http://cnum.cnam.fr
Conservatoire numérique des Arts & Métiers

Auteur ou collectivité : Martin, René
Auteur : Martin, René (18..-19.. ; ingénieur)
Auteur secondaire : Marchena, Ernest-Rafael-Joseph de (1868-1960)
Titre : Traction électrique

Adresse : Paris : Librarie de l'enseignement technique, 1920
Collation : 1 vol. (XXIII-781 p.-[57] f. de pl.) : ill. ; 25 cm
Collection : Encyclopédie industrielle et commerciale
Cote : CNAM-BIB 8 Ca 500
Sujet(s) : Chemins de fer électriques ; Locomotives électriques
Langue : Français

Date de mise en ligne : 06/04/2018
Date de génération du document : 6/4/2018

Permalien : http://cnum.cnam.fr/redir?8CA500

La reproduction de tout ou partie des documents pour un usage personnel ou d'enseignement est autorisée, à condition que la mention complète de la source (*Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*) soit indiquée clairement. Toutes les utilisations à d'autres fins, notamment commerciales, sont soumises à autorisation, et/ou au règlement d'un droit de reproduction.

You may make digital or hard copies of this document for personal or classroom use, as long as the copies indicate *Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*. You may assemble and distribute links that point to other *CNUM* documents. Please do not republish these PDFs, or post them on other servers, or redistribute them to lists, without first getting explicit permission from *CNUM*.

Restauration, Eugenia Wessel, 2010

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8° Ca. 500.

ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE ET COMMERCIALE

8° Ca 500

TRACTION ÉLECTRIQUE

PAR

RENÉ MARTIN

Ingénieur des Arts et Manufactures
Ingénieur à la Compagnie française Thomson-Houston
Chargé de Conférences d'Électricité Industrielle à l'École Centrale des Arts et Manufactures
Professeur du Cours de Traction Électrique à l'École des Travaux Publics

PRÉFACE DE E. DE MARCHÉNA

Ingénieur des Arts et Manufactures
Professeur du Cours d'Électricité Industrielle à l'École Centrale des Arts et Manufactures

Ouvrage illustré de 585 figures et de 57 planches hors-texte

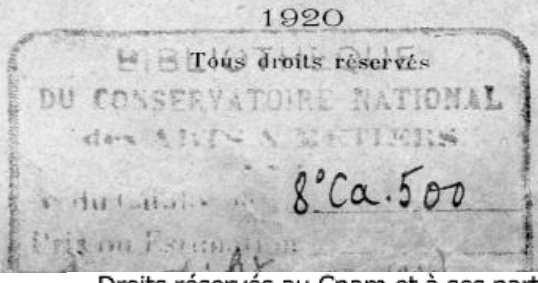




PARIS
LIBRAIRIE DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
3 *bis*, RUE THÉNARD, 3 *bis*

1920

Tous droits réservés



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PRÉFACE

C'est pour moi un très vif plaisir que d'avoir à présenter au lecteur l'ouvrage de M. René Martin et de répondre ainsi au désir qu'a bien voulu me manifester un jeune collaborateur, dont j'ai pu apprécier aussi bien le talent que la modestie.

J'en suis d'autant plus heureux que cet ouvrage vient, au bon moment, remplir une place inoccupée dans la littérature technique. Il constitue, à ma connaissance, depuis le traité classique de MM. A. Blondel et P. Dubois, le premier ouvrage de cette importance qui ait été écrit en langue française ; il se distingue de tous ceux qui ont paru dans la littérature étrangère, par son ordonnance rationnelle, la manière à la fois générale et détaillée dont est traitée chaque partie du sujet et par sa documentation abondante, qui ne consiste pas, comme trop souvent, en une compilation de publications techniques variées, mais qui, au contraire, a sa source dans l'expérience propre du praticien. On sent de suite que celui qui tient la plume a longtemps vécu son sujet et, en effet, toute la carrière déjà bien remplie de M Martin a été consacrée à la traction électrique, soit pour les études, soit pour la construction, soit pour l'exploitation. Les séjours faits par lui aux États-Unis lui ont permis des comparaisons utiles et ont beaucoup augmenté son expérience personnelle ; aussi, en composant un travail qui lui fait le plus grand honneur, n'a-t-il fait que condenser le résultat de ses propres études et de sa vie professionnelle.

Ce traité est consacré à la traction électrique en général, sans aucune division entre ses divers champs d'application. A l'heure actuelle, il a plus particulièrement son intérêt pour les questions qui concernent l'électrification des grandes voies ferrées. Ce grand problème est maintenant, comme on le sait, tout à fait à l'ordre du jour ; il y a lieu de penser, qu'après avoir fait si souvent l'objet d'études spéculatives, il va entrer dans la voie des réalisations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tout y pousse et, plus que tout autre chose, peut-être, l'intérêt primordial qu'il y a, maintenant, pour la France comme pour le reste du monde, à utiliser, de la manière la plus parfaite, ses ressources en combustibles, en forces motrices naturelles et aussi, ajouterons-nous, en main-d'œuvre. On peut dire que la période d'études, d'expériences et de préparation est passée et que celle des grandes applications va commencer.

L'ouvrage de M. Marlin résume, de manière complète et claire, tous les résultats fournis par cette première période, ainsi que les conclusions qui peuvent en être tirées.

Il ne témoigne d'aucun parti pris pour tel ou tel système : son auteur a trop de compétence et d'expérience pratique pour ne pas reconnaître la futilité qu'il y a à professer des dogmes absolus et à prononcer des jugements sans appel. Le progrès marche du même pas pour toutes les branches de l'industrie électrique et amène des perfectionnements constants pour chacune des solutions envisagées. Aussi, la préférence se déterminera en pratique pour chaque pays, en faveur du système qui, au moment où la réalisation commencera, sur une grande échelle, bénéficiera du maximum d'expérience et, par le fait de circonstances d'ordres divers, aura pris de l'avance sur les autres. La solution adoptée ne sera probablement pas la même partout et, d'ores et déjà, on peut prévoir que chacun des trois grands systèmes préconisés aura ses pays d'application.

Un sujet aussi varié et aussi complexe demande beaucoup de méthode pour être convenablement traité; la division adoptée par M. Marlin est tout à fait simple et logique.

Après avoir commencé à exposer la raison d'être de la traction électrique et les caractéristiques de chacun des principaux systèmes de traction (à courant continu, à courant alternatif monophasé et à courants triphasés), il étudie successivement les points essentiels de toute installation de traction, en les classant d'une manière judicieuse en chapitres qui constituent chacun un ensemble.

Parmi ces chapitres, plusieurs d'entre eux sont étudiés pour la première fois d'une manière aussi complète; par exemple, le chapitre consacré à la commande mécanique de l'essieu permet de bien comprendre les raisons de principe qui président à la variété si grande des différents types de locomotives électriques.

Cette variété peut paraître extrême, quand on la compare à l'unification remarquable à laquelle on est arrivé pour les locomotives à vapeur; elle peut donner à celui qui n'a pas l'expérience de la question, l'impres-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sion de décousu et d'incertitude de la part des techniciens, alors qu'on doit y voir surtout la souplesse des solutions que permet l'emploi de l'électricité, pour donner au mieux satisfaction aux desiderata très variables de chaque application.

Il est très probable que le nombre des solutions différentes se réduira dans l'avenir, mais sans jamais donner lieu, toutefois, à l'unification complète à laquelle l'emploi de la vapeur conduit.

Un chapitre spécial est consacré au freinage et, dans ce chapitre, est traité, avec tout le détail que comporte ce sujet, le freinage électrique par récupération.

Ce système de freinage, qui offre peu d'intérêt dans les applications urbaines ou suburbaines de traction électrique, offre, au contraire, un intérêt capital pour la traction sur les grandes lignes et doit faire partie du programme qui sera imposé pour leur électrification. L'étude faite à ce sujet par M. Martin est entièrement nouvelle ; elle montre cette question sous son jour véritable et indique les solutions qui ont été expérimentées ou simplement proposées pour chacun des systèmes de traction.

Nul doute que ce chapitre n'intéresse vivement le lecteur.

Le chapitre consacré à la commande par unités multiples est remarquablement traité et constitue, très certainement, l'étude d'ensemble la plus complète qui ait été faite de cette importante question.

Le perfectionnement des systèmes à unités multiples a eu l'influence la plus grande sur le développement de la traction électrique ; il en a étendu les possibilités d'emploi à un degré qui eût été autrement impossible. Il a seul permis la constitution des groupes tracteurs extrêmement puissants qui peuvent maintenant être envisagés et, seul, il a rendu pratique l'emploi du courant continu haute tension.

Après la description des différents organes qui entrent dans la constitution des systèmes à unités multiples, et de leur rôle dans le fonctionnement de l'ensemble, l'auteur en donne des exemples d'application intéressants, qui permettent aisément d'apprécier la variété des combinaisons rendues possibles.

Je n'insisterai pas davantage sur tout ce que contient d'intéressant et d'utile cet ouvrage, qui a dû nécessiter, pour sa mise au point, une énorme somme de travail.

Dans son ensemble, il ne constitue pas seulement un ouvrage de vulgarisation destiné à permettre aux personnes non initiées de prendre une connaissance approfondie du sujet traité, mais il sera utile même aux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

professionnels par sa documentation abondante qui tient compte des derniers progrès réalisés.

Il est facile à lire, ne contient aucun développement inutile au sujet et, en ce qui concerne la partie théorique, se borne strictement aux exposés nécessaires à la compréhension des questions traitées ; en un mot, il se recommande par ses qualités si éminemment françaises : la clarié et la précision.

Il rendra grand service à l'industrie électrique et, sans aucun doute, rencontrera le succès que mérite la grande somme d'effort et le travail consciencieux dont il est le résultat.

Paris, le 25 mai 1920.

E. DE MARCHÉNA.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

AVANT-PROPOS DE L'AUTEUR

Parmi les applications industrielles de l'électricité, la traction électrique sur voies ferrées est probablement celle qui, à l'époque actuelle, est la plus à l'ordre du jour en ce qui concerne principalement son emploi sur les lignes d'intérêt général.

Dans tous les pays, les grandes compagnies de chemins de fer étudient la possibilité d'électrification partielle ou totale de leurs réseaux. D'importantes installations ont d'ailleurs été réalisées durant ces dernières années ou sont encore en cours de réalisation : lignes du Midi, du Loetschberg, du Saint-Gothard, du Giovi, du Mont-Cenis, de Savone, etc., suivant celles de la Valteline, du Simplon etc., et aux Etats-Unis, le Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, le Butte Anaconda Pacific, le Norfolk et Western, le Pennsylvania, suivant le Baltimore, le Great Northern, le New-York Central, le New-York New-Haven et Hartford, etc. Il n'est pas exagéré de dire que dans cette dernière décade la traction électrique a fait de gigantesques progrès.

Aux Etats-Unis surtout, nous trouvons en pleine activité un magnifique champ d'applications aux grandes lignes et il n'est pas étonnant que les Américains nous aient devancés dans cet ordre d'idées : leur réseau ferré dépasse en effet formidablement tous les réseaux européens par son trafic total, par la capacité de ses grandes artères et par le tonnage de ses trains. Il les dépasse aussi par la puissance financière des compagnies concessionnaires sans limite de durée de réseaux énormes et par la puissance industrielle de sociétés de construction de matériel électrique telles que la General Electric de Schenectady et la Westinghouse de Pittsburgh.

Aux Etats-Unis, existe actuellement en exploitation régulière depuis le début de 1917 l'électrification la plus considérable du monde : celle d'une section continue de 710 kilomètres de ligne principale du réseau du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul qui s'étend de Chicago à la côte du Pacifique. La section électrifiée traverse la région des Montagnes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Rocheuses, (1) et est alimenté par les usines hydro-électriques du Montana-Power Co, disposant d'une puissance de plus de 200.000 kws et d'une réserve d'eau de plus de 500 millions de mètres cubes. Les trains remorqués atteignent 850 tonnes pour les express transcontinentaux de voyageurs et 4.500 tonnes pour les trains de marchandises (2).

Après une telle entreprise, jointe à l'expérience acquise entre autres sur les lignes particulièrement accidentées des chemins de fer italiens du réseau du Giovi-Mont-Cenis-Savone, on conçoit qu'on puisse, au point de vue technique, envisager la possibilité de l'électrification de n'importe quel réseau.

Plusieurs systèmes de traction peuvent d'ailleurs être envisagés et l'on trouve des applications importantes de chacun d'eux. En *courant continu haute tension :* le Butte Anaconda Pacific à 2.400 volts, le Chicago-Milwaukee et Saint-Paul à 3.000 volts etc. ; *en courant monophasé :* le New-York, New-Haven et Hartford à 11.000 volts, le Midi à 11.000 volts, le Loetschberg à 15.000 volts, etc. ; en *triphasé :* le Simplon, la Valteline, le Giovi à 3.000 volts etc., en *monotriphasé* appelé par les Américains « Split phase » : le Norfolk et Western Ry, le Pennsylvania (ligne d'Altona à Johnstown) à 11.000 volts.

Chacun de ces systèmes a ses partisans et nous verrons dans le cours de cet ouvrage les propriétés caractéristiques avec les avantages et les inconvénients de chacun d'eux. Une conclusion quant à la préférence à donner *a priori* à tel ou tel système serait actuellement, pour le moins, prématurée, et nous nous bornerons à observer que le courant continu haute tension, arrivé chronologiquement le dernier, semble justifier de grandes espérances. Il répond en particulier pleinement à ces qualités

---

(1) Une première section de 181 kilomètres du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul de Deer-Lodge à Three-Forks a été inaugurée en décembre 1915, une seconde section à peu près égale de Three-Forks à Harlowton a été inaugurée en juillet 1916, enfin une troisième section de 345 kilomètres de Deer-Lodge à Avery a été inaugurée en février 1917 donnant une longueur totale continue de ligne principale de 710 kilomètres de Harlowton à Avery. En outre une nouvelle section continue de 350 kilomètres environ aboutissant au Pacifique et actuellement en construction, devra être ouverte à l'exploitation au début de 1920.

(2) Ces tonnages élevés peuvent surprendre par comparaison avec ceux de nos trains. Il n'est pas inutile de noter à ce propos que tandis que l'attelage américain a une résistance de 136 tonnes, l'attelage européen type ancien a une résistance de 30 tonnes et le nouveau, du type renforcé, 50 tonnes. Cette circonstance n'a pas été sans aider beaucoup la transformation des réseaux américains.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

essentielles dans un service de traction : élasticité, souplesse et *fonctionnement en récupération* dans des limites étendues de la vitesse — pratiquement dans toutes les conditions ordinaires de marche, — ainsi que l'a prouvé le « Chicago-Milwaukee-St-Paul », dont les résultats économiques se montrent en outre satisfaisants.

En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie électrique, une objection qui est souvent formulée contre le courant continu est la nécessité d'avoir des sous-stations à transformateurs rotatifs. Or, il ne faut pas perdre de vue que les réseaux de distribution d'énergie comportent le plus généralement l'emploi de courants à 50 périodes impropres à la traction monophasée ou triphasée, ce qui exige par suite l'emploi de groupes transformateurs de fréquence qui tiennent lieu des groupes convertisseurs employés en courant continu. Si d'autre part il s'agit de centrales spéciales pour la traction monophasée ou triphasée, produisant par suite des courants de 15 ou 25 périodes au maximum, outre que de tels courants amènent d'assez sérieuses complications dans tous les services accessoires, ils ne sont pas susceptibles d'être fournis à un réseau général de distribution.

Dans la période troublée que nous traversons, il est impossible d'évaluer avec quelque certitude, les conséquences économiques d'une importante électrification. Néanmoins, en se plaçant uniquement au point de vue économie de combustible, il y a un intéret national de premier ordre à l'électrification tout au moins partielle, mais dans une large proportion, de nos chemins de fer. Cet intérêt résidera dans l'utilisation rationnelle des chutes d'eau, dont notre pays est amplement pourvu, à la place de la houille pour la traction des trains (1).

La France avait avant la guerre une consommation annuelle de charbon d'environ 60 millions de tonnes, supérieure d'environ 20 millions à sa production, cet excédent constituait naturellement un tribut net sur la fortune nationale à payer à l'étranger. Or d'après les statistiques officielles, la consommation de charbon pour les grands réseaux français, y compris la grande et la petite ceinture a été, pendant l'année 1913, de 176 millions de francs. Un programme modéré d'électrification portant sur le quart du développement des réseaux, soit environ 10.000 kilomètres de voies fer-

(1) Sur la division des Montagnes Rocheuses de la section électrifiée du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, 39,4 kwh. produisent un travail équivalent à 125 kilogrammes de charbon.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rées, judicieusement choisis, permettra aisément d'économiser le tiers de la dépense indiquée ci-dessus soit près de 60 millions au prix d'avant-guerre (1).

Aussi nos grands réseaux français, le Midi, le P.-L.-M., le P.-O. envisagent-ils l'électrification partielle de leurs lignes. Le P.-O. en particulier projette la réalisation dans un délai de 15 à 20 années d'un ensemble de près de 3.000 kilomètres de ses lignes, ce qui constitue environ 40 0/0 de son réseau total (2) et (3).

A côté de cette question d'électrification des grandes lignes, une autre également importante s'impose à l'attention générale : c'est celle de l'électrification des lignes de banlieue par application des *systèmes à unités multiples* qui constitue la seule solution possible pour « décongestionner » les gares de banlieue dont un type bien caractérisé est à Paris la gare Saint-Lazare, d'ailleurs en cours de transformation.

Il y a encore la question des chemins de fer d'intérêt local à trafic réduit actuellement exploités pour la plupart par des locomotives à vapeur où le remplacement de ce mode de traction, onéreux et ne répondant plus aux besoins actuels de confort, de transport rapide, de fréquence d'horaire, serait avantageusement effectué soit par l'emploi d'automotrices indépendantes du type pétroléo-électrique si le trafic est faible, soit par l'emploi de trains purement électriques, si le trafic est suffisamment important pour justifier les dépenses de premier établissement de lignes électriques. D'ailleurs, la première solution étant d'abord adoptée, on pourra facilement passer ensuite à la seconde si le trafic augmente dans des proportions suffisantes, ce qui sera sans doute le cas général.

---

(1) Conférence de M. Mauduit. Annales des P. T. T. de décembre 1918.

(2) Bulletin de novembre-décembre 1918 de la Société d'Encouragement à l'Industrie Nationale. Conférence de M. Sabouret, Ingénieur-en chef des services techniques à la Compagnie du P.-O.

(3) Dans le même ordre d'idées : *en Suisse*, pays dépourvu de houille, le Comité d'Etudes pour l'Electrification des Chemins de fer Fédéraux, comité créé dès 1902, se prononçait définitivement, en 1913, pour l'électrification des chemins de fer, et *en Italie*, également tributaire de l'étranger pour la houille, la Direction des Chemins de fer de l'Etat envisage actuellement un programme d'électrification futur portant sur environ 2.000 Km. — pour un développement du réseau d'Etat de 14.000 Km. — ce qui permettra d'économiser annuellement une quantité évaluée à environ 500.000 tonnes de combustible. Ce programme est prévu pour une réalisation en trois étapes de cinq années.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, il y a le cas de l'exploitation de lignes à trafic local reliées à celles d'intérêt général, qui se rattache au précédent, et que l'emploi de la traction électrique améliorerait sensiblement.

Nous avons pensé qu'il ne serait pas inutile, étant donné l'intérêt général de la question, de présenter au public un nouvel ouvrage de traction électrique comme suite modeste à une partie du remarquable et classique traité de MM. Blondel et Dubois.

Le présent ouvrage est consacré à la technique de la traction électrique pour ce qui concerne le matériel roulant comprenant les moteurs et l'équipement électrique des automoteurs.

La division naturelle des applications réalisées nous a conduit à étudier séparément le matériel à courant continu, le matériel à courant monophasé et le matériel à courants triphasés correspondant aux trois systèmes de traction fondamentaux en présence, auxquels se rattachent les systèmes mixtes monophasé continu et monotriphasé.

Après avoir exposé des considérations générales sur les avantages que procure la traction électrique et sur les différents systèmes actuellement employés, nous avons, pour chacun des systèmes fondamentaux, étudié d'abord les moteurs puis les modes de régulation de la vitesse des véhicules automoteurs en donnant particulièrement une large place au moteur courant continu qui est de beaucoup le plus employé. Sans doute la théorie du fonctionnement de ce moteur est exposée dans tous les traités d'Electrotechnique, mais il nous a paru utile d'y donner, en nous plaçant au point de vue particulier de son adaptation à la traction, des développements que ne peut embrasser un cours général d'électricité et que des spécialistes ont cependant intérêt à connaître.

Après l'étude électrique des moteurs nous avons examiné les particularités qui caractérisent leur construction.

Le chapitre suivant traite du mode de transmission de l'effort moteur à l'essieu et de la suspension du moteur, questions qui font actuellement l'objet d'intéressantes discussions et dont l'importance est fondamentale au point de vue de la construction d'une locomotive.

Puis nous avons examiné la question du freinage en nous attachant particulièrement à celle du freinage électrique, puis à celle de la récupération, et ce, pour les trois systèmes de traction fondamentaux.

Dans les chapitres suivants nous avons étudié les systèmes à unités multiples, le système dit de « traction symétrique », puis les équipements

**

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à courant continu haute tension qui comportent en général l'application des principes des systèmes à unités multiples.

Viennent ensuite les questions accessoires de l'éclairage, du chauffage, du câblage des véhicules, puis la construction des trucks, bogies et caisses.

L'étude si importante des automotrices indépendantes fait l'objet d'un chapitre spécial.

En dernier lieu nous avons examiné les matériels spéciaux : crémaillères, monorails, traction dans les mines, etc...

Nous considérons que le seul moyen permettant de dégager les véritables leçons de l'expérience est de donner des exemples de réalisation pour illustrer ou appuyer chaque théorie ou principe : ce que nous nous sommes efforcés de faire en nous aidant de la pratique que nous avons pu acquérir dans les différentes fonctions que nous avons successivement occupées à la General Electric d'Amérique et au service de la traction à la Compagnie Française Thomson-Houston.

Pour la partie théorique nous avons fait divers emprunts au traité de MM. Blondel et Dubois et pour les applications, nous avons cité autant que possible nos sources de renseignements qui ont été les nombreuses publications techniques, communications à diverses sociétés d'ingénieurs outre ceux qui nous ont été fournis gracieusement par les Maisons de construction.

Notre but aura été atteint si nous avons pu, par cet ouvrage, ajouter à l'intérêt que présente la question de la traction électrique et aider le lecteur dans ses recherches pour se documenter sur tel ou tel point particulier, en le mettant en état de se tenir au courant des applications nouvelles et des progrès que chaque jour apporte à cette branche des applications de l'électricité.

Paris, 3 avril 1919.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

RÉSUMÉ ANALYTIQUE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER. — *Introduction. Développement historique*.... 1

CHAPITRE II. — *Utilisation de l'énergie électrique. Systèmes de traction. Généralités*..... 21

CHAPITRE III. — *Moteurs à courant continu. Etude électrique*..... 34

CHAPITRE IV. — *Essais industriels et calcul des caractéristiques des moteurs à courant continu*..... 73

CHAPITRE V. — *Courant continu. Régulation de la marche des voitures* 90

CHAPITRE VI. — *Moteurs à courant monophasé. Etude électrique*.. 141

CHAPITRE VII. — *Courant alternatif monophasé. Régulation de la marche des voitures. Influence perturbatrice des lignes de traction monophasées sur les lignes des P. T. T.*..... 171

CHAPITRE VIII. — *Moteurs à courants triphasés. Etude électrique*.. 199

CHAPITRE IX. — *Courants alternatifs triphasés. Régulation de la marche des voitures. Système mono-triphasé*..... 212

CHAPITRE X. — *Construction des moteurs de traction*..... 253

CHAPITRE XI. — *Transmission de l'effort moteur à l'essieu et suspension des moteurs*..... 288

CHAPITRE XII. — *Freinage des voitures électriques. Récupération*.. 364

CHAPITRE XIII. — *Systèmes de traction à unités multiples. Traction double symétrique.* Annexes : *Equipements du Nord-Sud, de l'Ouest-Etat, S. T. A. R.*..... 461

CHAPITRE XIV. — *Traction par courant continu haute tension*..... 558

CHAPITRE XV. — *Accessoires de la traction*..... 574

CHAPITRE XVI. — *Trucks et caisses des voitures*..... 594

CHAPITRE XVII. — *Traction par automotrices indépendantes*..... 640

CHAPITRE XVIII. — *Matériels spéciaux*..... 682

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES SOMMAIRES DES CHAPITRES

CHAPITRE PREMIER

PAGE

Introduction 1

Développement historique de la traction électrique : Tramways et Chemins de Fer. — Courant d'alimentation. — Classification des lignes à traction électrique et causes de l'électrification de ces lignes. — Avantages de la traction électrique par rapport à la traction à vapeur. — Conclusion et critique. — Systèmes divers: Locomotives mixtes Heilmann; Locomotive à turbo-générateur de la North-British Locomotive Co; Automotrices thermo-électriques; Locomotives à accumulateurs.

CHAPITRE II

Utilisation de l'Énergie électrique. — Systèmes de traction. Généralités 21

Production, transmission et utilisation de l'énergie électrique. — Tension et nature du courant d'alimentation. — Classification des systèmes de traction : Systèmes à courant continu ; à courant alternatif monophasé ; à courants alternatifs triphasés. Systèmes mixtes. — Applications diverses : Lignes à courant continu ; à courant alternatif monophasé ; à courants alternatifs triphasés. Lignes mixtes. — Conditions d'emplois des divers systèmes de traction.

CHAPITRE III

Moteurs à courant continu. — Étude électrique 34

Généralités. — Types de moteurs. — Moteur série. — Fonctionnement ; Sens de rotation ; Force contre-électromotrice ; Courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGE

absorbé ; Vitesse ; Puissances ; Couples ; Rendements ; Caractéristiques électro-mécaniques. — Influence d'une modification de la différence de potentiel aux bornes du moteur. — Influence d'une modification de l'enroulement induit. — Stabilité de marche. — Caractéristique mécanique. — Caractéristiques de la marche d'une voiture motrice. — Remarque sur les formules de conversion des caractéristiques. — Remarque sur l'effort théorique et sur l'effort réel de la jante. — Calage des balais. — Moteurs à pôles de commutation. — Puissance nominale d'un moteur de traction. — Régime uni-horaire. — Régime de 10 heures. —Application des définitions de la puissance d'un moteur à l'étude d'un projet de traction. — Puissance continue de même échauffement. — Puissance uni-horaire d'un moteur et puissance absorbée au démarrage. — Poids moyens des moteurs de traction.

CHAPITRE IV

Essais industriels et calcul des caractéristiques des moteurs à courant continu 73

Essais en plateforme. — Nature et but des essais. — Montage de deux moteurs sur banc d'essai : Montage mécanique ; montages électriques. — Vérifications diverses. — Mesure des résistances. — *Moteurs d'un type existant ; Essais courants.* — Essai d'échauffement d'une heure. — Caractéristique en charge. — Rendement avec engrenages. — Essai d'emballement. — Essai de surtension. — *Moteurs d'un type existant; Essais complets.* — Caractéristiques à vide. — Rendement par les pertes séparées. — Essais d'échauffement. — Caractéristiques thermiques. — Courbes du courant absorbé et de la puissance développée en chevaux pour un échauffement donné. — Courbe de refroidissement.

CHAPITRE V

Courant continu. — Régulation de la marche des voitures... 90

Objet de la régulation de la marche des voitures. — Principe des méthodes employées. — Etude du démarrage. — Calcul de l'effort à développer. — Poids d'inertie.

I. — Alimentation a potentiel constant

Contrôle rhéostatique. — Théorie. — Détermination graphique des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGE

résistances de démarrage: Cas d'un moteur; Cas de deux moteurs. — Contrôleurs. — Résistances employées.

Contrôle série-parallèle. — Détermination graphique des résistances de démarrage. — Equipements à 4 moteurs. — Contrôleurs. — Cas particulier de l'alimentation à haute tension.

Modification du bobinage de l'induit.

Variation du flux inducteur : Modification du nombre des spires inductrices ; Shuntage des enroulements inducteurs par des résistances ; Caractéristiques du moteur à inducteurs shuntés. — Contrôleur série-parallèle avec shuntage. — Résultats d'essais et applications. — Remarques générales sur les démarrages.

II. — Alimentation a potentiel variable

Méthode des accumulateurs à groupements variables. — Méthode de la variation d'excitation de la génératrice: Ward-Léonard, Heilmann. — Méthodes diverses : Survolteur-dévolteur Ward-Léonard, Systèmes S. T. A. R.

CHAPITRE VI

Moteurs à courant monophasé. — Étude électrique..... 141

Introduction. — Différents types de moteurs. — Moteurs type série (Eickmeyer, Oerlikon, Siemens-Schuckert, Westinghouse-Lamme). — Moteurs type répulsion et dérivés (Elihu Thomson, Latour, Winter-Eichberg, Alexanderson, Thomson-Houston, Ateliers de Constructions Electriques du Nord et de l'Est). — *Appendice :* Théorie algébrique élémentaire des moteurs à collecteur série et répulsion. — Détermination du couple moteur.

CHAPITRE VII

Courant alternatif monophasé. — Régulation de la marche des voitures. — Influence perturbatrice des lignes de traction monophasées sur les lignes des P. T. T..... 171

Procédés employés pour la régulation : Transformateur; Autotransformateur ; Régulateur d'induction. — Exemples de schémas d'équipements monophasés. — Systèmes monophasés mixtes: Systèmes monophasé-continu (Méthode Ward-Léonard). — Em-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGE

ploi du courant redressé par le redresseur Auvert et Ferrand. — Emploi du redresseur de courant à vapeur de mercure (Système Westinghouse). — Système monotriphasé Westinghouse et Pennsylvania. — Application du système monophasé. — Remarques générales sur le système monophasé. — Lignes à alimentation mixte : Courant continu et courant monophasé. — Lignes monophasées à haute et basse tension. — Fréquence du courant d'alimentation. — Forme du couple développé par les moteurs monophasés. — Poids et coût d'entretien du matériel monophasé. — Influence perturbatrice des lignes de traction monophasées sur les circuits téléphoniques et télégraphiques voisins. — Dispositif employé sur la ligne principale du New-York, New-Haven et Hartford. — Méthode Girousse. — Méthode des transformateurs-suceurs.

CHAPITRE VIII

Moteurs à courant triphasés. — Étude électrique 199

Introduction. — Rappel des propriétés fondamentales du moteur asynchrone triphasé : Glissement ; Vitesse ; Changement du sens de rotation. — Couple. — Puissances et rendements. — Caractéristiques électro-mécaniques. — Caractéristique mécanique. — Stabilité de marche. — Réversibilité du moteur asynchrone. — Fonctionnement en récupération. — Résumé des propriétés principales du moteur asynchrone.

CHAPITRE IX

Courants alternatifs triphasés. — Régulation de la marche des voitures. — Système mono-triphasé 212

Différents modes de régulation : Couple ou vitesse. — Etude du démarrage.

Procédés de régulation du couple : Transformateur ; Survolteur à rapport de transformation variable ; Modification du groupement des enroulements inducteurs ; Etoile-triangle ; Série-parallèle.

Procédés de réglage de la vitesse : Contrôle rhéostatique ; Modification du nombre de pôles ; Groupement en cascade ou tandem ; Cascade triple Ganz ; Régulation de la vitesse par combinaison de la modification du nombre de pôles et du groupement en cascade ; Système mixte monotriphasé (split phase).

Remarques générales sur le système triphasé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X

PAGE

Construction des moteurs de traction 253

Conditions mécaniques générales d'établissement d'un moteur de traction.

I. — Moteurs a courant continu

Conditions générales. — Détails de construction : Carcasse inductrice; Paliers d'induit; Paliers à billes; Armatures; Pôles inducteurs; Enroulement des inducteurs; Balais et porte-balais; Isolants ; Engrenages et carters. — Remarques sur les moteurs à courant continu haute tension.

II. — Moteurs a courants alternatifs

Moteurs monophasés. — Moteurs triphasés.

III. — Moteurs ventilés : courant continu ou alternatif

CHAPITRE XI

Transmission de l'effort moteur à l'essieu et suspension des moteurs 288

I. — Moteurs a action directe

Moteurs non suspendus. — Moteurs à demi-suspendus. — Moteurs complètement suspendus : Emploi d'un arbre creux concentrique à l'essieu (Raffard).

II. — Moteurs a action indirecte

Moteurs à engrenages et entraînement rigide : Engrenages à double réduction; Engrenages à simple réduction. — Suspension des moteurs à engrenages : Suspension par le nez ; Suspension par barres latérales de la General Electric Co ; Suspension par joug de la General Electric Co ; Suspension Westinghouse ; Suspension Westinghouse « Cradle suspension » ; Suspension Walker. — Etude des effets du couple de réaction sur la suspension des moteurs. — Moteurs à engrenages élastiques. — Moteurs à engrenages élastiques et arbre creux. — Transmissions par bielles et manivelles avec ou sans engrenages. — Locomotives à moteurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGE

très surélevés. — Remarques générales sur les transmissions par bielles et manivelles. — Influence de la position du moteur sur la position du centre de gravité du véhicule, sur la stabilité de celui-ci et sur les efforts latéraux sur la voie. — Phénomènes d'oscillation des locomotives électriques. — Transmissions diverses : Par vis sans fin ; Par engrenages coniques.

CHAPITRE XII

Freinage des voitures électriques. — Récupération..... 364

Considérations générales. — Modes d'action des freins.

I. — Absorption de l'énergie par frottement

A. — ***Étude théorique du freinage.***

Parcours minima pour l'arrêt d'une automotrice seule, d'une voiture motrice attelée d'une remorque. — Pression totale sur les sabots pour un bon freinage dans les conditions ordinaires. — Sablières.

B. — ***Différents systèmes de freins utilisant les effets de frottement.***

Freins exclusivement mécaniques.

Freins à air comprimé. — Production de l'air comprimé. — Equipement de freins à air comprimé par groupe moteur compresseur électrique: Freins à air comprimé direct; Systèmes automatiques. — Pressions ordinaires pour le fonctionnement des freins. — Régulateurs électro-pneumatiques. — Détermination de la puissance d'un compresseur. — Consommation d'air pour le freinage.

Freins électromagnétiques. — Frein à plateau sur essieu de la General Electric. — Freins modernes à patins sur rail. — Excitation des freins. — Freins à patins sur rail pour voitures de remorque. — Application des freins électromagnétiques à patins sur rails. — Calcul de la distance parcourue jusqu'à l'arrêt par une voiture. — Avantages des freins électromagnétiques.

II. — Freinage électrique par les moteurs

A. — ***Courant continu.***

Freinage par inversion de marche. — Freinage électrique par fonctionnement des moteurs en générateurs débitant sur résistances. — Contrôleurs à freinage électrique. — Théorie du freinage élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGE

trique par fonctionnement des moteurs en générateurs. — Résistances de freinage. — Caractéristiques du fonctionnement d'une voiture en freinage électrique sur une pente donnée. — Calcul des résistances de freinage, la vitesse devant rester dans des limites données. — Freinage par mise des moteurs en court-circuit franc. — Freinage par récupération. — Fonctionnement en récupération des locomotives du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul.

B. — ***Courant alternatif monophasé.***

Freinage par inversion de marche. — Freinage par fonctionnement des moteurs en générateurs : sur résistances, par mise des moteurs en court-circuit ; par récupération. — Nouveau procédé de freinage par récupération (Oerlikon).

C. — ***Courants alternatifs triphasés.***

Freinage par inversion de marche. — Freinage par fonctionnement des moteurs en générateurs asynchrones. — Diagramme du fonctionnement en récupération. — Caractéristiques du fonctionnement en freinage électrique sur une pente donnée. — Rendement de la récupération aux moteurs. — Applications du fonctionnement en récupération. — Freinage par fonctionnement en générateur synchrone sur résistances.

D. — ***Remarques générales sur le freinage électrique.***

Nature du freinage par récupération. — Rendement de la récupération en fonction de la pente. — Avantage du freinage électrique par récupération ou sur résistances.

CHAPITRE XIII

Systèmes de traction à unités multiples. — Traction double symétrique. — Annexes : Equipements des automotrices du Nord-Sud, de l'Ouest-Etat, Equipements S. T. A. R... 461

I. — Systèmes de traction a unités multiples

Introduction. — Caractéristiques de ces systèmes. — Remarques sur les conditions économiques d'établissement.

A. — ***Systèmes à unités doubles.***

1er système (Ligne Invalides-Champ-de-Mars) ; 2e système (Siemens et Halske) ; 3e système (Métropolitain de Paris, Thomson-Houston). — Critique de ces systèmes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

B. — ***Systèmes à unités multiples.***

PAGE

Principe. — Systèmes divers :

1° *Systèmes à contrôleurs asservis.* — Système pneumatique Auvert. — Système électro-magnétique Sprague. — Système électro-pneumatique Westinghouse (Mersey). — Système électro-pneumatique Siemens-Schuckert.

2° *Systèmes à contrôleurs relayés.* — Système électro-magnétique General Electric ou Thomson-Houston. — Equipements modernes électro-magnétiques Sprague, General Electric ou Sprague-Thomson-Houston. — Equipements non automatiques, semi-automatiques, à accélération automatique par le contrôleur, à accélération automatique par un relais. — Détails des principaux appareils d'un équipement à relais automatique. — Système électro-magnétique Dick Kerr. — Systèmes électro-pneumatiques modernes Westinghouse « Turret type » et « Unit Switch type ».

C. — ***Applications des systèmes à unités multiples.***

Equipements à unités multiples pour la traction à courant alternatif monophasé ou par la traction mixte courants monophasé et continu et pour la traction à courants triphasés.

Application des systèmes à unités multiples à des motrices isolées.

Extension des systèmes à unités multiples à la commande de machines fixes.

II. — Traction double symétrique

III. — Annexes

Equipements des automotrices du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris.

Equipements des automotrices de la Compagnie du chemin de fer de l'Ouest-Etat.

Systèmes de traction S. T. A. R. de la Compagnie du chemin de fer Métropolitain de Paris.

CHAPITRE XIV

Traction par courant continu haute tension. — Equipements des automotrices 558

Introduction. — Généralités. — Système General Electric ou Thomson-Houston. — Système Westinghouse. — Système Siemens-Schuckert. — Système Brown-Boveri.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XV

PAGE

Accessoires de la traction 574

I. — Eclairage

Eclairage des automotrices. — Eclairage des remorques. — Cas de l'alimentation en courant continu haute tension. — Cas de l'alimentation en courants alternatifs.

II. — Chauffage.

Divers modes de chauffage. — Comparaison entre les qualités de chaleur dégagées par le courant électrique et par la houille. — Divers modes de chauffage électrique. — Conditions d'emploi des deux systèmes. — Appareils employés. — Garanties de construction des chaufferettes. — Consommation d'énergie.

III. — Equipement électrique d'une automotrice

Dispositions générales. — Causes d'incendie et précautions à prendre pour la câblerie.

CHAPITRE XVI

Trucks et Caisses des Voitures.... 594

I — Trucks

Trucks rigides à deux essieux parallèles. — Trucks à grands empattements à deux essieux. — Trucks rigides à trois essieux parallèles. — Trucks rigides à quatre essieux parallèles ou davantage. — Bogies-trucks. — Bogies-trucks à traction maxima. — Truck à essieux radiaux. — Essieu monté et bandages.

II. — Caisse des voitures

Matériaux employés. — Dispositions intérieures des voitures. — Aspect extérieur de quelques automotrices types. — Chasse corps. — Ramasse corps. — Attelages.

CHAPITRE XVII

Traction par automotrices indépendantes 640

De l'emploi des automotrices indépendantes en général.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

I. — Traction par accumulateurs

A. — ***Tramways.***

PAGE

Remarques générales sur l'emploi des accumulateurs. — Lignes à traction uniquement par accumulateurs. — Lignes à traction mixte par accumulateurs et trolley (ou caniveau). — Installation des éléments dans les voitures. — Régulation de la vitesse des voitures. — Exemples de tramways urbains à accumulateurs.

B. — ***Automotrices sur voies ferrées.***

Développement de la traction par accumulateurs en Allemagne.

II. — Automobiles thermo-électriques

A. — ***Emploi du moteur à explosion.***

Dispositions générales employées. — Automotrices à transmission électrique. — Automotrices à transmission mixte et à récupération (Système Piéper). — Comparaison entre les deux systèmes. — Consommation de combustible des automotrices pétroléo-électriques.

B. — ***Emploi du moteur à combustion interne.***

Automotrices de l'Etat suédois. — Automotrices des Chemins de Fer saxons et prussiens.

C. — ***Remarques générales sur l'emploi des voitures thermo-électriques. — Applications.***

CHAPITRE XVIII

Matériels spéciaux..... 682

I. — Trottoir roulant

Principe et description.

II. — Automotrices monorails

Introduction. — Systèmes monorails divers. — Monorails à gyroscope Brennan.

III. — Systèmes funiculaire et a crémaillère

Introduction. — Traction funiculaire. — Systèmes de crémaillères. — Pièces d'entrée de crémaillère. — Poussée longitudinale dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les systèmes à crémaillère. — Avantages de la traction électrique pour les systèmes à crémaillère. — Mécanismes de locomoteurs. — Freinage des locomotives. — Exemples de chemins de fer à crémaillère.

IV. — Traction électrique dans les mines

Divers modes de traction. — Locomotives à trolley. — Locomotives à tambour à câble prise de courant. — Locomotives à cabestan. — Locomotives à accumulateurs.

V. — Traction électrique sur les canaux

Remorquage par bateaux automoteurs. — Touage. — Halage.

VI. — Traction électrique sans rails sur routes

Généralités. — Systèmes principaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TRACTION ÉLECTRIQUE

SYSTÈMES DE TRACTION — MATÉRIEL ROULANT MOTEURS — ÉQUIPEMENTS

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

SOMMAIRE. — Développement historique de la traction électrique : Tramways et Chemins de fer. — Courant d'alimentation. — Classification des lignes à traction électrique et causes de l'électrification de ces lignes. — Avantages de la traction électrique par rapport à la traction à vapeur. — Conclusion et critique. Systèmes divers : Locomotives mixtes d'Heilmann. Locomotive à turbo-générateur de la North-British Locomotive Co. Automotrices thermo-électriques. Automotrices à accumulateurs.

1. **Développement historique de la traction électrique** (1). — L'idée d'appliquer l'énergie électrique à la traction des véhicules a devancé l'apparition de la dynamo moderne et la découverte du principe de sa réversibilité. C'est ainsi que la première voiture électrique paraît due à un simple ouvrier américain *Thomas Davenport* qui, dès 1834, réussit à construire une machine magnéto-motrice rudimentaire et à l'employer à la propulsion d'une voiture portant une batterie de piles. En 1838, Robert Davidson exécuta une locomotive électrique pesant 5 tonnes qui circula à la vitesse de 6 kilomètres à l'heure entre Edimbourg et Glascow.

(1) Extrait pour la plus grande partie de la « *Traction électrique sur voies ferrées* », de MM. Blondel et Dubois, t. I.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A la même époque, Jacobi faisait des essais de navigation électrique sur la Néva. Ce furent là les précurseurs réels de la traction électrique.

La *première application* de traction électrique à un cas vraiment pratique remonte à 1879, époque à laquelle une petite locomotive miniature Siemens et Halske fut mise en service à l'Exposition universelle de Berlin. Cette locomotive (fig. 1), captait le courant sur un rail spécial à l'aide d'un balai en fils de cuivre. Ce rail était placé dans l'axe de la voie. Le retour du courant avait lieu par les rails de roulement. Un train d'engrenages à plusieurs réductions transmettait aux essieux l'effort fourni par un



FIG. 1.

Locomotive Siemens avec son train à l'Exposition industrielle de Berlin (1879).

moteur ordinaire du type Siemens. Cette locomotive remorquait un petit train formé de trois véhicules et portant une vingtaine de personnes. Sa vitesse était d'environ 12 kilomètres à l'heure.

En 1880, MM. Bontemps et Marcel Depretz étudiaient à Paris des locomotives minuscules pour le transport des dépêches pneumatiques. Cette tentative toutefois ne réussit pas, l'Administration des Postes conservant son matériel existant.

En 1881, on met en circulation à Paris, sur la ligne Louvre-Vincennes la première locomotive électrique à accumulateurs, et la même année la maison Siemens et Halske installait à Paris, aux portes de l'Exposition

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'Électricité, le petit tramway à prise de courant aérienne qui faisait la navette entre la place de la Concorde et le Palais de l'Industrie. Ce fut là la première installation à distribution aérienne. La ligne d'alimentation était double pour l'amenée et le retour du courant. Les deux conducteurs consistaient en deux tubes de laiton fendus suivant leur génératrice inférieure, et dans lesquels glissaient deux navettes remorquées par la voiture.

La *première installation définitive* et présentant un caractère industriel date également de 1881 et se rapporte à la ligne Gross-Lichterfeld, près Berlin, réalisée par Siemens et Halske. Cette ligne, qui est d'ailleurs toujours en exploitation, est à voie de 1 mètre ; elle avait à l'origine une longueur de 2 km. 500. L'arrivée du courant se faisait par des rails de roulement convenablement éclissés et isolés du sol par des traverses sur lesquelles ils étaient posés. La transmission du couple moteur aux essieux se faisait au moyen de câbles sans fin en fils d'acier. La vitesse atteinte était de 40 kilomètres à l'heure en palier. Le véhicule pesait 4 tonnes 800. En 1893, on installa une ligne aérienne d'alimentation pour remplacer l'arrivée du courant par les rails.

En 1884 eut lieu l'installation de la ligne de Francfort à Offenbach avec une tension d'alimentation de 500 volts et conducteur aérien tubulaire fendu avec navette de prise de courant.

Les lignes de Bressbrook-Newry, puis du « Giant's Causeway », en Irlande, de Montreux-Vevey, en Suisse, suivirent bientôt.

Aux États-Unis d'Amérique, en 1883, Edison et Field exposèrent à Chicago une locomotive électrique remorquant une voiture sur voie de 0 m. 90 en utilisant un rail central pour amener le courant et les rails de roulement pour le retour. La même année, un ingénieur belge, Van de Poele, réalise plusieurs installations sur le continent américain. L'une d'elles, à Toronto (Canada), comprit une conduite d'alimentation souterraine et retour du courant par les rails de roulement. La tension d'alimentation était 2.500 volts.

La Bentley Knight Co et M. Frank J. Sprague firent bientôt adopter la traction électrique sous forme de tramways urbains, suburbains et interurbains (Street Railways) dans les villes américaines et pour relier celles-ci entre elles. En 1884, à Cleveland (Ohio), apparaît le premier tramway électrique proprement dit ; il circule sur une distance de 3 kilomètres ; le conducteur d'amenée était souterrain et posé dans un caniveau établi au milieu de la voie. L'appareil prise de courant passait dans une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fente ménagée à cet effet à la partie supérieure du caniveau. Suivirent les lignes de Kansas City (1884, conducteur aérien sous la forme actuelle de trolley), puis Richmond (1888), Boston, Pittsburg, Scranton, etc...

En 1885, apparaît l'invention de M. Sprague consistant à faire reposer le moteur directement sur l'essieu par l'intermédiaire de deux paliers tandis que de l'autre côté de son arbre il est suspendu au châssis du véhicule par des ressorts qui laissent au moteur un certain jeu, tout en conservant le parallélisme et la distance de l'axe de l'essieu à l'axe de l'arbre du moteur.

On retrouve intégralement cette disposition de principe pour les moteurs modernes les plus employés avec les tramways, voitures automotrices de métropolitains, etc.

A partir de ce moment, de grandes compagnies se créent pour l'exploitation des lignes qui se multiplient avec une rapidité surprenante. Au commencement de 1892, on comptait aux Etats-Unis et Canada un développement de plus de 6.500 kilomètres avec près de 9.000 voitures en service ; en 1895, 14.500 kilomètres et, en 1897, 23.000 kilomètres avec près de 40.000 véhicules. En 1907, plus de 900 sociétés exploitaient électriquement près de 55.000 kilomètres de lignes de tramways aux Etats-Unis seulement. Sur ces 55.000 kilomètres, environ 98 0/0 étaient exploités en courant continu et 2 0/0 seulement en courant monophasé.

L'essor était donné et partout les progrès furent rapides. Ils furent gigantesques aux Etats-Unis. Le développement si rapide de la traction électrique aux Etats-Unis tient surtout — et encore maintenant — à l'insuffisance des routes jointe aux grandes distances à parcourir entre villes, voire plus généralement entre agglomérations habitées, et à la tendance de l'habitant à résider dans la banlieue. Aux Etats-Unis, à l'inverse de ce qui se passe ailleurs, c'est la création d'une ligne de tramway, sans but apparent, *a priori*, qui décide de l'édification d'une ou de cités ouvrières. En beaucoup d'endroits, on circule en tramway sur des chemins à peine tracés, ou tout au moins à peine carrossables et non encore bordés de maisons. On crée une ligne, on érige des maisons, puis, par la suite, vient la construction de la route.

Pendant cette période de développement rapide aux Etats-Unis, les progrès étaient assez lents en Europe, quoique l'essor primaire y ait été donné. Les conditions en Europe n'étaient pas les mêmes ; de bonnes routes carrossables existaient, les distances à franchir entre agglomérations étaient peu considérables, des moyens de transport existaient. La

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nécessité d'adopter rapidement un nouveau moyen de transport se faisait moins sentir.

En *1890 seulement, apparaît la première ligne en France,* celle de *Clermont-Ferrand,* installée avec *matériel suisse Thury.* On y employa encore la prise de courant par navette, quoique le système par trolley fut alors régulièrement usité aux Etats-Unis. Ensuite, vinrent les tramways de Marseille (1892), Bordeaux (1893), Lyon et le Havre (1894), etc....

Ce n'est toutefois, qu'à partir de 1895 que l'activité se manifeste réellement dans la construction des lignes à traction électrique.

En 1896, en Europe, on comptait près de 900 kilomètres de lignes à traction électrique de toute sorte avec près de 2.000 véhicules. En 1897, plus de 200 lignes avec 2.550 kilomètres et plus de 4.500 véhicules.

2. **La traction électrique sur les chemins de fer.** — Après l'application de la traction électrique aux tramways, apparut celle aux *chemins de fer de surface* à voie normale, aux *chemins de fer aériens* ou « Elevated » ou « Overhead Railway », puis aux *chemins de fer souterrains* ou « Subways » (New-York), ou « Underground Rys » ou «Tubes » (Londres).

La *première locomotive électrique* à voie normale en service commercial apparaît en 1883 dans l'Etat de New-York sur les lignes du « Mount Mac Gregor et Lake George Railroad ». C'est la locomotive *Leo Daft* à prise de courant par galets de roulement sur rail central.

En 1885, Daft met en service sur le chemin de fer aérien de la Neuvième Avenue à New-York une locomotive connue sous le nom de locomotive « Ben-Franklin » représentée sur la figure 2. Cette locomotive ne fonctionna d'abord que quelques semaines. Elle fut ensuite reconstruite en 1888 pour remorquer un train de 4 voitures et fit le service pendant 8 mois.

Les « Elevated » ont leur origine dans les essais faits par *Sprague* à New-York en 1886-1887, mais c'est en 1893, aux Docks de Liverpool qu'apparaît réellement le premier chemin de fer aérien électrique en service régulier.

En 1890, s'ouvre le chemin de fer souterrain dit « Tube » de Londres : le « City et South London Ry ».

Le succès du *Chemin de fer intramuros* de M. Baker, à l'exposition de Chicago en 1893 (World's Fair) peut être considéré comme le point de départ réel de l'électrification en grand des chemins de fer aériens et purement urbains des États-Unis d'Amérique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'étape suivante, importante et nouvelle, fut la mise en service, en 1895, des locomotives électriques de 90 tonnes (fig. 3), constituées par deux unités couplées de 45 tonnes, construites par la « General Electric Co » d'Amérique pour le « Baltimore et Ohio Ry » et destinées à remorquer des trains lourds de voyageurs et de marchandises, y compris leur locomotive à vapeur (trains de 1.700 tonnes, vitesse de 20 kilomètres à l'heure), sous tunnel à Baltimore.

En Suisse, en Italie, on installa les lignes de Florence, Frésole, Murren, du Salève (1892), etc.

De *1893 à 1897,* eurent lieu les essais méthodiques importants des Chemins de fer français du P.-L.-M. et de l'Ouest. Au P.-L.-M., avec la locomotive *Auvert* à accumulateurs (4 essieux dont 2 moteurs, poids total 46 tonnes), on obtint une vitesse de 100 kilomètres à l'heure. Avec une charge remorquée de 100 tonnes, on atteignit 75 kilomètres à l'heure. A l'Ouest on essaya la locomotive *Heilmann,* avec laquelle on atteignit 120 kilomètres à l'heure. On essaya également à cette époque le *système Ward-Léonard* entre Saint-Germain-Ouest et Saint-Germain-Grande-Ceinture (alimentation à potentiel variable).

On constate, vers cette époque, en Europe et en Amérique, l'*extension de la traction électrique,* aux *mines, usines, chantiers, lignes d'intérêt local, embranchements particuliers,* etc. En *1893, M. Hillairet* fait une application à l'*embranchement minier de Montmartre à la Béraudière,* près Saint-Etienne, avec une locomotive de 15 tonnes.

3. — **Courant d'alimentation.** — Le courant continu a été le premier employé en traction et est encore de beaucoup le plus utilisé. La tension a été longtemps limitée à 500/600 volts. Un tel système de traction n'est toutefois applicable économiquement qu'à de relativement courts tronçons. Le problème de l'électrification de longues lignes exigea la recherche d'autres systèmes.

Dès 1900, le gouvernement italien entrait résolument dans la voie de l'électrification des chemins de fer avec le réseau de la Valteline, en employant le système triphasé 3.000 volts avec du matériel Ganz, ce qui constituait une incontestable nouveauté, bien que venant après les premières applications des courants triphasés en traction réalisées par la Société Brown-Boveri (Lugano 1896, Burgdorf-Thoune 1899).

Dans le but principalement d'éviter l'emploi d'une ligne aérienne double nécessitée par le courant triphasé et de conserver un type de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

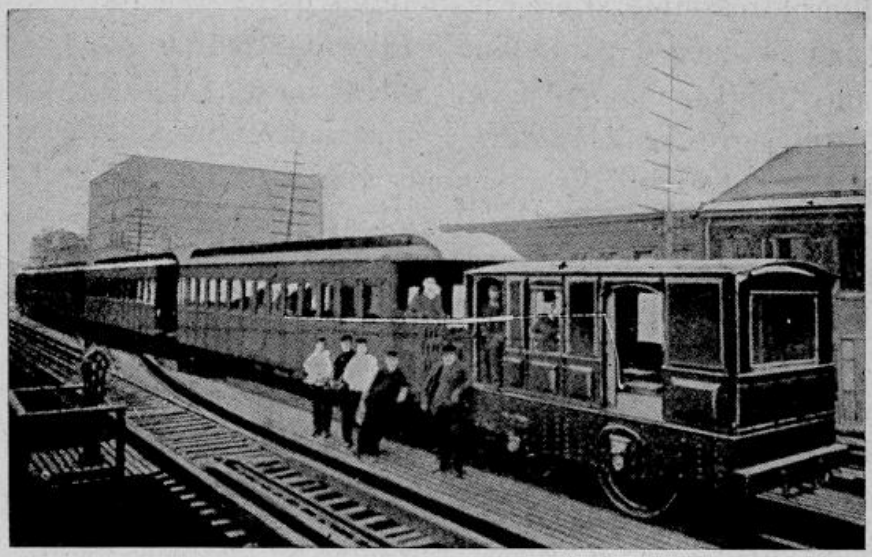


FIG. 2.

Locomotive Ben-Franklin de Daft (1895).

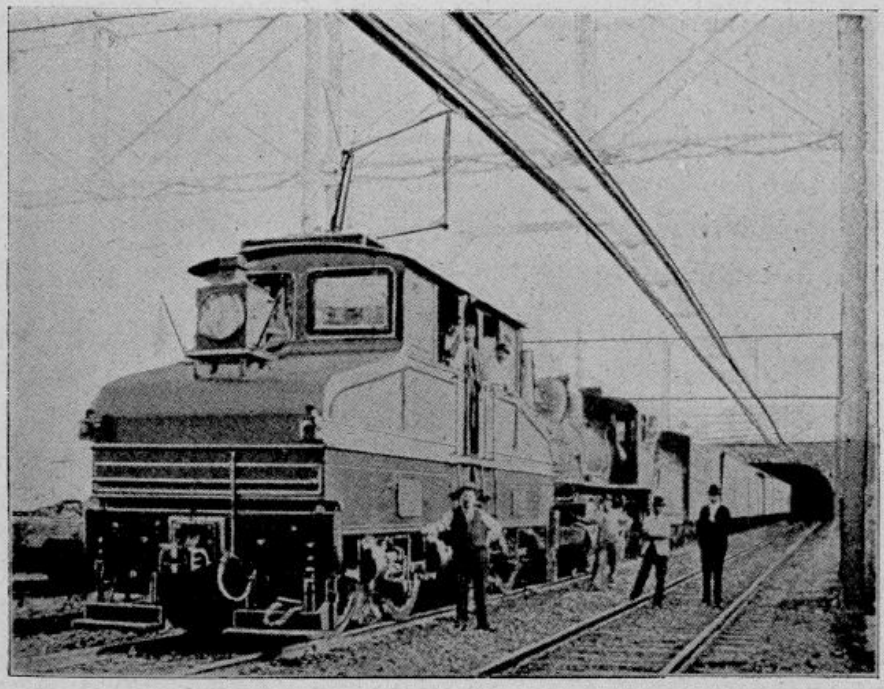


FIG. 3.

Locomotive du Baltimore et Ohio Ry, de la General Electric Co (1895).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur à caractéristiques série, on a étudié la possibilité d'utiliser le courant alternatif simple. Ce n'est toutefois qu'en 1903 que l'on posséda un moteur monophasé capable d'un service de traction. Avec ce nouveau système, on atteint facilement 15.000 volts à la ligne d'alimentation.

Enfin, les progrès réalisés dans la construction des moteurs à courant continu permirent l'emploi de tensions élevées allant jusque 1.500 volts par moteur dans les installations les plus récentes. Ce système paraît actuellement devoir beaucoup se développer. On a atteint 3.000 volts en exploitation régulière au Chicago-Milwaukee-Saint-Paul en 1915.

4. Classification des lignes à traction électrique et causes de l'électrification de ces lignes. — D'une façon générale, on peut classer les applications de la traction électrique comme suit :

Lignes principales. — *a*) Dans l'intérieur et au voisinage des villes : lignes de pénétration. Forces hydrauliques disponibles ou non.

b) Longues distances entre villes dans les pays où le combustible est abondant et bon marché.

c) Régions montagneuses où le combustible est cher et l'eau abondante.

Lignes urbaines : à la surface (tramways), en souterrain, tranchées ou sur structures élevées (métropolitains, chemins de fer aériens).

Lignes spéciales : embranchements d'usines, mines, etc.

A un autre point de vue, on peut distinguer les lignes où l'*électricité a remplacé la vapeur* et celles *construites en vue de la traction électrique*.

Si nous considérons les lignes en exploitation et en particulier la liste ci-dessous qui donne quelques-unes des principales :

NOM DE LA LIGNE	ANNÉE DE MISE EN SERVICE
* City and South London Railway	1890
* Chemin de fer aérien ou « Overhead » de Liverpool	1893
* Baltimore and Ohio	1895
Burgdorf-Thoune	1899
« Elevated » de Chicago (côté Sud)	1899
* Central London	1900
* Métropolitain de Paris	1900
* Chemin de fer d'Orléans (Quai d'Orsay, Paris)	1900
Chemins de fer de l'Ouest (Paris-Invalides-Versailles)	1900

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NOM DE LA LIGNE	ANNÉE DE MISE EN SERVICE
Milan-Gallarate et embranchements	1900
Valteline	1901
*Chemin de fer aérien de Berlin	1902
Elevated du Manhattan (New-York)	1902
Berlin-Lichterfeld	1903
Lancashire et Yorkshire	1904
North-Eastern	1904
Seebach-Wettingen	1904
Métropolitain District (Londres)	1905
Pennsylvania Atlantic City Branch	1906
Tunnel du Simplon	1906
New-York Central	1906
New-York, New-Haven, Hartford	1907
*Hambourg-Blankenese-Altona	1907
London-Brighton South-Coast	1909
Pennsylvania	1909
Great Northern Railway (Etat de Washington, Etats-Unis)	1909
Wiesenthal (Etat badois)	1910
Giovi	1911
Chemin de fer du Midi (ligne expérimentale de Villefranche à Ille-sur-Têt)	1911
Chemin de fer du Mont-Cenis de Modane à Bussoleno (La dernière section Modane-Bardonnèche comprenant le tunnel du col de Fréjus a été mise en service en 1915.)	1912
*Tunnel du Lœtschberg (Alpes Bernoises)	1913
Chicago-Milwaukee-Saint-Paul	1915
etc...	

* *Les lignes marquées d'un astérisque ont été à traction électrique dès l'origine.*

Nous constatons qu'elles se divisent d'elles-mêmes en (1) :

1° Lignes nouvellement construites et pour lesquelles la traction à vapeur ne pouvait pas être employée (*tunnels, métropolitains, souterrains*) ;

2° Lignes primitivement construites pour la traction à vapeur dont les résultats financiers furent mauvais (concurrence de tramways ou autres raisons) et qui adoptèrent la traction électrique comme amélioration (*Chicago, Manhattan, North-Eastern*, etc.) ;

3° Lignes à traction à vapeur essayant d'abord la traction électrique à titre expérimental, puis l'y maintenant (*New-York, New-Haven et Hartford, Milan-Varèse, Berlin-Lichterfeld*, etc.).

(1) *Electric Traction on Railways*, par DAWSON.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4° Lignes où la traction électrique a remplacé la traction à vapeur à cause de la cherté du combustible et de l'abondance des forces hydrauliques utilisables (*Valleline, Burgdorf-Thoune, Mont-Cenis, Giovi, Chicago-Milwaukee-Saint-Paul*, etc.);

5° Lignes adoptant l'électricité, reconnaissant ses avantages d'une manière générale : amélioration du trafic, facilités aux terminus dans les villes, absence de fumée (*Lancashire et Yorkshire, Paris-Orléans, Pennsylvania, London-Brighton South-Coast*, etc.);

6° Raisons politiques et diverses (*Central-London, Metropolitan District (London), New-York-Central*, etc.).

Dans le tableau ci-dessus la majorité des lignes sont urbaines ou suburbaines. L'électrification des grandes lignes (*Lancashire-Yorkshire, New-York Central, New-York-New-Haven et Hartford, Midi, lignes Italiennes, lignes Suisses,* etc.), ne date que de quelques années seulement.

Les conditions dans lesquelles se trouve la traction électrique en général dépendent essentiellement du pays. Par exemple, pour prendre des cas extrêmes, en Suisse, en Suède, dans certaines régions de l'Italie, etc., où le charbon doit être importé et où les forces hydrauliques utilisables sont abondantes, les conditions sont naturellement différentes de celles que l'on trouve en Angleterre, où le charbon est à pied d'œuvre et bon marché. En Suisse, une commission spéciale a été nommée par le gouvernement pour étudier la possibilité d'une électrification d'ensemble de tous les chemins de fer du pays et étant donné les ressources hydrauliques disponibles, on peut prévoir sa prochaine réalisation. Même si dans ces conditions, les dépenses étaient égales à celles qui correspondraient à la traction par la vapeur, on aurait encore l'avantage de ne pas dépendre de l'étranger pour le combustible (1).

Toute la question de l'électrification d'une ligne donnée est en dernière analyse une question financière dépendant du capital exigé par l'électrification et des dépenses courantes de l'électrification achevée, tenant compte naturellement des bénéfices et avantages inhérents à l'emploi de l'électricité.

5. **Avantages de la traction électrique.** — *a) Absence de fumée.* — Ceci est important pour les terminus et voies de pénétration dans les villes et tunnels et entraîne la suppression des effets de corrosion des

(1) Voir « *Avant-Propos* », pages III et IV.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fumées sur les ouvrages métalliques et la faculté d'utiliser l'espace au-dessus des gares terminus pour des constructions confortables et propres : bureaux, magasins, hôtels, etc... (Gare du quai d'Orsay, à Paris, première installation de ce genre, 1900 ; terminus du Pennsylvania R.R., à New-York ; terminus du New-York Central, également à New-York, etc.)

Ce dernier terminus est remarquable par son importance : on y a réalisé une gare à deux étages de voies ; ce qui, rien que de ce fait, double la capacité du terminus pour une même surface de terrain en plan et la division des trains à leur arrivée. Cette gare comprend un total de 67 voies dont 25 à l'étage inférieur pour les lignes de banlieue et 42 à l'étage supérieur pour les trains de grandes lignes.

b) Augmentation de la capacité de trafic d'une gare terminus. — L'augmentation de la capacité de trafic d'une gare terminus équipée électriquement est encore accrue de ce fait que, d'une manière générale, une gare équipée électriquement comprend, pour un même trafic, un nombre de voies sensiblement moindre qu'une gare destinée uniquement aux trains à vapeur et par suite permet, pour un même nombre de voies, un accroissement sensible du trafic possible. Cela résulte de ce que l'emploi de la traction électrique réduit considérablement les manœuvres nécessaires à l'arrivée et au départ des trains. La locomotive à vapeur doit, en effet, tourner sur une plaque ou sur un pont pour aller ensuite reprendre la tête du train, elle doit encore refaire son plein d'eau et de charbon, ou enfin, si elle vient d'effectuer un long parcours, rentrer au dépôt. Cette dernière manœuvre nécessite même, aux abords des gares importantes, l'établissement de voies spéciales entre la gare et le dépôt pour éviter l'encombrement des voies principales.

La locomotive électrique est, au contraire, prête à repartir immédiatement, et, de plus, s'il s'agit d'un *train à unités multiples*, aucune manœuvre n'est nécessaire, celui-ci étant toujours pourvu d'au moins deux automotrices, c'est-à-dire d'une cabine de manœuvre à chaque extrémité si les automotrices sont aux deux extrémités du train.

Enfin, l'établissement d'un terminus en boucle permet encore d'accroître considérablement la rapidité du trafic sur les lignes de banlieue, tout en réduisant au minimum les chances de collision.

Du fait de la réduction des manœuvres aux terminus, il résulte une économie au point de vue de la dépense d'énergie, donc de combustible,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par rapport aux locomotives à vapeur qui brûlent du charbon pendant les manœuvres et quand elles sont « immobiles sous pression » ou « en attente ». Cette dernière circonstance n'a évidemment pas lieu avec les locomotives électriques.

c) Accélération aux démarrages. — Quoique méritant d'être pris en considération, ces premiers avantages de la traction électrique ne sont pas les plus importants et il convient particulièrement de mentionner la facilité d'obtenir des démarrages rapides avec des trains électriques.

Avec les locomotives à vapeur, il est à peu près impossible d'obtenir autre chose au démarrage qu'une accélération très modérée. L'accélération maxima possible est très inférieure à celle obtenue normalement avec un tracteur électrique.

En traction électrique, la valeur de l'accélération n'est pas limitée au point de vue technique. L'avantage d'une accélération rapide est évidente : obtention rapide de la vitesse maxima de régime, ou pour une vitesse moyenne donnée entre deux arrêts consécutifs, réduction de la vitesse maxima nécessaire, d'où réduction de l'énergie qui devra être dissipée dans les freins au freinage, et, finalement, économie dans l'énergie totale absorbée par un train donné sur un parcours et dans un temps donnés.

Cette rapidité de démarrage des trains électriques est la conséquence du couple élevé que peuvent développer les moteurs par suite de leur grande capacité de surcharge momentanée par rapport à leur régime de fonctionnement continu, et aussi de l'augmentation possible du nombre des essieux moteurs, grâce surtout à l'emploi des équipements à *unités multiples*.

Des expériences faites avec des locomotives électriques par la *General Electric Co.* d'Amérique, ont montré qu'il était pratiquement possible d'atteindre une vitesse de 48 kilomètres à l'heure en 10 secondes en partant du repos, ce qui correspond à une accélération moyenne de 1,33 m./sec./sec. environ.

Des essais faits pour obtenir une accélération rapide avec des locomotives à vapeur n'ont pas été satisfaisants. Les meilleurs ont donné comme accélération moyenne pendant toute la période de démarrage environ 0,15 m./sec./sec. En général, la valeur initiale de l'accélération pour une locomotive à vapeur d'express, varie de 0,30 à 0,35 m./sec./sec. ; elle s'abaisse rapidement à 0,20 et même 0,05 pendant la dernière période de la mise en vitesse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme terme de comparaison, sur le City South London Ry, pour une locomotive remorquant son train normal, la valeur moyenne de l'accélération en m./sec./sec. varie entre 0,40 et 0,50. Au Métropolitain de Paris, elle a été augmentée progressivement et est maintenant voisine de 0,75 m./sec./sec, au chemin de fer Nord-Sud de Paris, elle est de 0,57 m./sec./sec.

Aux Etats-Unis, la valeur de l'accélération à peu près uniformément adoptée pour les lignes urbaines électriques est de 1,5 mille par heure par seconde, soit environ 0,67 m./sec./sec. Dans certains cas spéciaux cependant où des démarrages rapides s'imposent, on va jusqu'à 0,90 m./sec./sec.

Cette question d'un *démarrage rapide est de toute importance* pour les *services à arrêts fréquents* (métropolitains, chemins de fer urbains, suburbains, tramways, etc...), mais il *ne faut pas s'en exagérer la portée* quant aux *chemins de fer de grandes lignes*, car en général les arrêts n'y sont pas tellements fréquents que de grandes accélérations soient nécessaires.

d) Augmentation de la capacité de trafic d'une voie. — Grâce à la rapidité des démarrages, la vitesse moyenne de marche des trains peut être plus élevée et les départs plus fréquents, d'où augmentation possible de la capacité de trafic d'une voie, tout en évitant son doublement.

D'autre part, sur une ligne électrifiée, il est possible d'adopter des méthodes rationnelles d'exploitation basées sur l'emploi de trains à *unités multiples*, ce qui est encore une cause d'augmentation possible du trafic de la ligne ainsi que l'a montré l'expérience. Sur la ligne Milan-Gallarate-Venise, le trafic a augmenté de 170 p. 100 en trois années; dans la banlieue de Newcastle, il a augmenté rapidement de 47,5 p. 100 ; sur les voies du London-Brigton, l'accroissement en deux mois a été de 63 p. 100 (1) etc...

e) Economie de combustible. — Les locomotives à vapeur transportent leur propre « station génératrice », c'est-à-dire : charbon, eau, appareils de transformation en vapeur, relativement peu économiques, d'où en outre un poids mort ajouté. En *traction électrique, l'énergie est produite économiquement* dans les *stations centrales*, d'où elle est transformée

(1) *Bulletins de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, mars et mai 1911. Conférence de M. de VALBREUZE.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec une perte assez légère à des distances considérables. De plus, il est possible d'employer dans une centrale du charbon de moins bonne qualité et par suite meilleur marché que sur les locomotives à vapeur. Par exemple, pour emprunter des chiffres relevés sur une ligne en service, les locomotives du tunnel de la Mersey brûlaient du charbon à 19 fr. 50 la tonne, tandis que les chaudières de l'usine électrique ont utilisé du combustible à 10 fr. 50 la tonne. En outre la consommation a diminué de 4 p. 100 environ (1).

En outre, les machines fixes des centrales travaillant à condensation, leur consommation spécifique est naturellement moins élevée que celle des locomotives qui fonctionnent à échappement libre.

Il y a encore une autre cause importante et manifeste d'économie de combustible, celle qui résulte du fait qu'avec les locomotives, une quantité considérable de charbon est brûlée en dehors de celle nécessitée par leur fonctionnement effectif : on compte en moyenne environ 230 kilos de charbon pour mise en pression des petites machines, 360 kilos pour les moyennes, 550 à 700 et même 750 pour les grandes et 140 à 230 kilos pour tenir la pression pendant les arrêts. Ces causes de consommation de charbon n'existent évidemment pas pour les locomotives électriques.

Une autre cause d'économie de combustible pour les locomotives électriques est celle qui résulte, comme nous l'avons vu, de la diminution de l'importance et de la durée des manœuvres aux terminus.

f) Diminution du poids par essieu moteur : Les trains électriques avec plusieurs automotrices, sur le principe des *unités multiples*, présentent l'avantage que le *poids du train est mieux réparti sur la voie* sur la longueur couverte par le train outre que sur chaque essieu moteur le poids est plus petit qu'il ne le serait avec une locomotive puisqu'il y a davantage d'essieux moteurs. Une locomotive à vapeur doit être assez lourde pour avoir un poids adhérent suffisant pour remorquer son train sous toutes conditions et à la plus grande vitesse donnée. Outre cela, ce poids adhérent n'est souvent qu'une faible fraction du poids total. Cette concentration du poids est nuisible à la voie et cet effet est encore augmenté du fait du mouvement alternatif des bielles qui produit un effet de pilon sur les rails.

---

(1) *Bulletins de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, mars et mai 1911. Conférence de M. de VALBREUZE.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

g) Couple moteur uniforme. — Pour un *même poids adhérent, un moteur électrique exerce un effort de traction plus considérable qu'un engin ordinaire à vapeur.*

Avec la locomotive à vapeur, l'effort de traction maximum ne dépasse pas 20 0/0 du poids adhérent (coefficient d'adhérence) par suite des variations du couple moteur pendant chaque tour ; avec une locomotive électrique, surtout s'il s'agit d'une locomotive à courant continu ou à courants triphasés pour laquelle le couple développé par les moteurs est constant, il atteint 28 et même 30 0/0, toutes conditions de voie identiques. Avec les locomotives à moteurs monophasés développant un couple de nature pulsatoire, les conditions d'adhérence sont un peu moins bonnes ; on peut néanmoins compter sur 22 à 25 0/0.

h) Poids moindre à égalité de puissance. — A l'époque des locomotives à courant continu type 1906, du New-York Central, qui pèsent 85 tonnes dont 60 de poids adhérent et sont d'une puissance de 2.200 chevaux (pouvant atteindre momentanément 3.000 chevaux), les locomotives les plus puissantes à vapeur étaient du type Mallet et développaient au maximum 2.000 chevaux pour un poids de 270 tonnes.

Les locomotives électriques précitées ont remplacé des locomotives à vapeur type Atlantic de 1.800 chevaux et dont le poids était de 145 tonnes dont 55 adhérentes.

Les locomotives à vapeur les plus puissantes existant actuellement en Amérique, type Pacific et Atlantic, sont de 2.600 chevaux (vitesse 120 kilomètres à l'heure), et pèsent 143 tonnes dont 90 tonnes adhérentes. Elles ont réalisé un progrès important sur les précédentes, mais nous citerons pour comparaison les locomotives récentes du Loetschberg à courant monophasé qui développent 2.500 chevaux, pour un poids de 107 tonnes dont 80 de poids adhérent, et celles du Giovi à courants triphasés de 2.000 chevaux, pour un poids de 60 tonnes et adhérence totale. Ces dernières sont les plus remarquables au point de vue qui nous occupe.

Dans tous les cas, on voit que l'avantage appartient à la locomotive électrique.

L'effort de traction par tonne de poids total est également sensiblement plus élevé pour les locomotives électriques que pour celles à vapeur. C'est ainsi que si l'on compare deux types de locomotives à grande vitesse du New-York Central, l'une à vapeur du type « Atlantic », l'autre élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trique du type déjà cité, on constate que la première ne développe, à la vitesse de 70 kilomètres à l'heure, qu'un effort de traction de 5.900 kilos environ pour un poids de 145 tonnes, alors qu'à la même vitesse, l'effort fourni par la seconde atteint environ 6.800 kilos et ce, pour un poids de 85 tonnes seulement.

La valeur de l'effort de traction est d'ailleurs encore plus élevée pour les locomotives triphasées du Simplon : elle dépasse, en effet, 7.000 kilos pour un poids de 68 tonnes seulement.

Les tableaux comparatifs I et II ci-après donnent, d'après M. Wilgus, président du New-York Central RR., (1) deux exemples qui mettent bien en évidence la diminution du poids résultant de l'emploi de la traction électrique pour les mêmes trains remorqués.

Dans le tableau I, on compare la locomotive électrique à la locomotive à vapeur et dans le tableau II la locomotive électrique à des automotrices à unités multiples.

TABLEAU I

Poids total, en tonnes, d'un train express :

Locomotive à vapeur « type Pacific ».....	154 T	
8 Pulmann-cars (train de luxe).....	360	
TOTAL.....	514	514 tonnes.
Locomotive électrique du New-York Central	85 T.	
8 Pulmann-cars.....	360	
TOTAL.....	445	445 tonnes.
Economie de poids en faveur de la traction électrique		69 tonnes.

soit 13,50 0/0 du poids total.

(1) *Bulletins de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, de mars et mai 1911, déjà cités.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU II.

Poids total, en tonnes, d'un train de banlieue :

Locomotive électrique.....	85 t.	
4 voitures en moyenne.....	180	
TOTAL.....	265	265 tonnes.
Unités multiples 4 automotrices	216	216 tonnes.
D'où, économie en faveur du train à unités multiples..		49 tonnes.

soit 18,5 0/0 du poids total.

i) Souplesse. — *La traction électrique est beaucoup plus souple* que la traction à vapeur. Les trains peuvent être facilement réunis (unités multiples), tout en restant sous la commande d'un même homme, ou divisés suivant les besoins du moment.

j) Sécurité. — Au point de vue *sécurité* de l'exploitation, nous noterons que pour les trains électriques, la méthode de contrôle est telle que si le wattman se trouve indisposé et abandonne l'organe du contrôle (contrôleur), le train s'arrête automatiquement.

k) Franchissement des fortes rampes. — Au point de vue particulier *de la traction sur les fortes rampes*, on peut signaler l'avantage suivant de la traction électrique :

Avec les chemins de fer à vapeur, on considère comme un maximum pratique une rampe de 2,5 0/0 et ce n'est qu'exceptionnellement en pays de montagne qu'on admet des déclivités dépassant 3 0/0. Au delà de 7 0/0, valeur réalisée à l'Uetliberg, près Zurich, et même souvent au-delà de 5,5 0/0, on a recours à la crémaillère.

Ces limites proviennent uniquement du défaut de puissance des locomotives. En effet, le coefficient de traction en palier étant très faible, soit de l'ordre de 5 kilos par tonne, la moindre rampe nécessite un accroissement relatif énorme de l'effort de traction ; or, la chaudière d'une locomotive n'a qu'une puissance de vaporisation limitée et on arrive rapidement à cette limite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En traction électrique, on est seulement limité par l'adhérence. On a atteint jusque 14 0/0 en Amérique, à San-Francisco. On considère toutefois comme limite pratique 10 0/0 ; ce qui est déjà notablement supérieur à la limite indiquée ci-dessus pour les locomotives à vapeur.

l) Augmentation du coefficient d'utilisation des locomotives électriques par rapport à celles à vapeur. — La locomotive à vapeur exige de fréquentes visites, des nettoyages et des réparations qui l'immobilisent pendant un temps assez long dans des ateliers spacieux situés à proximité des gares. La locomotive électrique est immobilisée moins souvent et moins longtemps, elle exige par suite des locaux moins spacieux ; d'autre part, elle travaille pendant un plus grand nombre de jours par an, c'est-à-dire que son coefficient d'utilisation est plus élevé.

Le parcours quotidien effectué en moyenne par une locomotive à vapeur ne dépasse pas 160 km. (1). Le parcours quotidien moyen effectué par une locomotive électrique est sensiblement plus élevé ; il suffit donc d'un nombre moindre de machines pour assurer le même service. Ainsi comme résultats pratiques : sur le réseau du Giovi des chemins de fer de l'État italien, 7 locomotives électriques font le service de 10 locomotives à vapeur ; sur la ligne du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, en comparant les résultats d'exploitation des quatrièmes trimestres des années 1915 (vapeur) et 1916 (électricité) on trouve qu'une locomotive électrique a fait le service de deux locomotives à vapeur, en service voyageurs, et de trois, en service marchandises.

6. **Conclusion et critique. Systèmes divers.** — Il ne faut pas toutefois conclure que l'électrification méthodique des grandes lignes de chemins de fer s'impose. La *locomotive électrique* et *celle à vapeur* ont *chacune leur rôle propre à remplir* comme moyen de transport.

Il y a lieu de signaler que la locomotive à vapeur a fait dans ces derniers temps des progrès considérables par l'emploi de la surchauffe, par l'emploi de compoundage et l'accroissement de la pression, par l'augmentation de la puissance de la chaudière et du foyer, par suite de l'installation de celui-ci placé partiellement ou entièrement au-dessus des roues porteuses de petits diamètres. L'évolution récente de la locomotive à

(1) *Bulletins* déjà cités *de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, mars et mai 1911.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vapeur a fait changer les conditions de possibilité de son remplacement par la locomotive électrique et ce n'est guère qu'au point de vue de la puissance spécifique que la locomotive électrique devra se montrer supérieure à la locomotive à vapeur. Ceci en dehors de toute question d'économie de combustible.

Une *grave critique faite à la traction électrique* en général est, outre une *dépense considérable de premier établissement* et par suite un capital énorme immobilisé, la *non-indépendance des unités* en fonctionnement. Un accident à la centrale ou à la ligne peut immobiliser le réseau, d'où un inconvénient très sérieux au point de vue stratégique par exemple et qui interdira vraisemblablement la généralisation de l'électrification. Un réseau électrifié immobilisé reste en outre accessible aux locomotives ennemies à vapeur.

On a cherché d'autre part, à appliquer la traction électrique en tant que mode de transmission de l'énergie aux roues motrices, pour profiter des avantages inhérents à ce mode de transmission, à des *automotrices indépendantes*. On a ainsi construit des machines mixtes dont le prototype est la *locomotive d'Heilmann* (1893) où l'énergie produite sur la locomotive elle-même sous forme de vapeur est transformée en énergie électrique alimentant les électro-moteurs. L'électricité ne joue ici qu'un rôle intermédiaire de transmission. Ce type n'a pas paru se développer pendant ces dernières années. Les essais ne furent pas satisfaisants. Nous devons signaler toutefois, dans le même ordre d'idées, la locomotive expérimentale d'express, construite en 1910 par la North-British Locomotive Co. dans laquelle il était fait emploi d'un turbo-générateur à courant continu qui envoie son courant sous tension réglable 200/600 V dans 4 électro-moteurs-série ordinaires. La turbine était une turbine à action tournant à 3.000 t/m et était alimentée par de la vapeur surchauffée. C'est peut-être là, l'origine d'une évolution nouvelle dans la traction électrique appliquée aux grandes lignes.

Une autre variété de motrices mixtes indépendantes et qui semble devoir se développer beaucoup pour un service particulier est l'*automotrice thermo-électrique*, dans laquelle il est fait emploi d'un moteur thermique (benzol, pétrole, huiles lourdes, etc...) actionnant une dynamo envoyant son courant aux moteurs électriques d'essieu. Les premières applications industrielles remontent à 1900 et ont été faites sur les *Chemins de fer hongrois d'Arad-Osanad* qui avaient en service, en 1913-1914, quelque 40 automotrices Westinghouse de ce genre. Le champ d'appli-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cation de ce système semble toutefois devoir être restreint à des lignes à service peu chargé et pour des trains assez légers. Pour un tel genre de service il paraît tout à fait approprié. Nous étudierons plus loin (chapitre XVII) avec quelques détails cette classe particulière d'automotrices.

Citons enfin pour terminer les *locomotives à accumulateurs*, en service sur les chemins de fer de l'État prussien. Ce système se développe beaucoup en Allemagne, où des marchés à forfait à raison de tant par tonne-kilomètre, sont passés avec les fabriques d'accumulateurs pour assurer le maintien et l'entretien des batteries en service. (Le système de traction par accumulateurs sera également étudié au chapitre XVII).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

UTILISATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
SYSTÈMES DE TRACTION. — GÉNÉRALITÉS

SOMMAIRE. — Production, transmission et utilisation de l'énergie électrique. — Tension et nature du courant d'alimentation. — Classification des systèmes de traction : systèmes à courant continu, à courant alternatif monophasé, à courants alternatifs triphasés. Systèmes mixtes. — Applications diverses : lignes à courant continu, à courant alternatif monophasé, à courants alternatifs triphasés. Lignes mixtes. — Conditions d'emploi des divers systèmes de traction.

7. Production, transmission et utilisation de l'énergie électrique. — L'expérience a montré que dans les conditions ordinaires d'électrification, il était plus économique de produire et de transporter l'énergie électrique sous forme de courants alternatifs, produits soit immédiatement à la tension même de la transmission, soit à une tension inférieure suivant sa valeur.

Jusqu'à une tension d'environ 10.000 ou 15.000 volts à la transmission, on peut produire directement le courant au voltage de la transmission. Au-dessus de cette valeur, il paraît préférable de produire le courant à une tension plus faible et d'élever celle-ci au moyen de transformateurs.

Pour l'utilisation de l'énergie à la traction, la tension et la nature du courant (ou la tension seule) sont modifiées ou ne le sont pas, ainsi que nous allons le voir.

Certaines lignes utilisent directement le courant produit à haute tension, c'est le cas de certaines lignes à courants alternatifs monophasés ou triphasés. Il n'y a alors aucune transformation intermédiaire entre la production à la centrale et l'utilisation à la ligne de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

traction. Nous verrons plus tard qu'il y a toutefois une transformation par transformateurs statiques abaisseurs de tension sur les locomotives elles-mêmes, avant les moteurs, car ceux-ci ne sauraient être alimentés directement à la tension de la ligne.

Ce cas d'utilisation directe de l'énergie est encore celui d'un grand nombre de petites lignes de tramways, courant continu, 600 volts, où le courant est directement produit sous cette forme à la centrale.

Dans le cas général, on peut dire que l'énergie produite à l'état de courants alternatifs et transmise à haut voltage est transformée avant d'arriver à la ligne d'alimentation en courant à plus bas voltage, soit de *même nature* : courants alternatifs triphasés ou monophasé par l'emploi de transformateurs statiques (1), soit de *nature différente* : courant continu, par exemple, par emploi de transformateurs dynamiques ou rotatifs (commutatrices ou groupes moteurs générateurs), alimentés eux-mêmes le plus généralement par des transformateurs statiques abaisseurs de tension.

Les figures 4, 5, 6 et 7 ci-après (2), représentent schématiquement les dispositions-types d'une installation à courant continu avec sous-station, ce qui est le cas général, de deux installations à courant monophasé (l'une sans sous-station à transformateurs statiques, l'autre avec sous-station) et d'une installation à courants triphasés avec sous-station.

8. **Tension et nature du courant d'alimentation.** — L'étude du service à réaliser conduit à la prédétermination des puissances moyenne et maxima demandées par les trains pour leur propulsion pendant un temps déterminé et à la puissance à leur fournir à chaque instant.

Pour un tramway, par exemple, en supposant la ligne d'alimentation à 600 volts, on trouvera qu'il faut au démarrage 100 à 150 ampères et qu'en moyenne, pour maintenir le véhicule en mouvement, il faut quelque chose comme 10 à 25 kw. A côté de cela, si on considère un service avec trains, on arrive rapidement à un courant de démarrage de 2.000 ampères et à une puissance moyenne de 400 à 500 kw. nécessaire pour maintenir le train en mouvement, soit environ 700 à 800 ampères sous 600 volts. L'importance du courant à capter est ainsi très variable suivant la nature des lignes et pour une ligne déterminée, elle varie suivant le profil en

(1) Abstraction faite du cas où les transformateurs de fréquence sont nécessaires.

(2) Empruntées au n° du 26 août 1911 de « *La Lumière électrique* ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

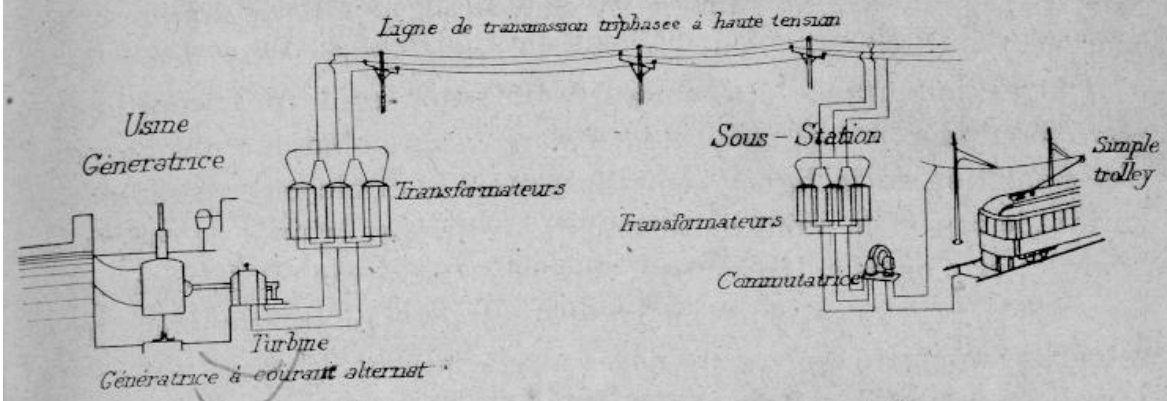


FIG. 4. — Installation à courant continu avec sous-station.

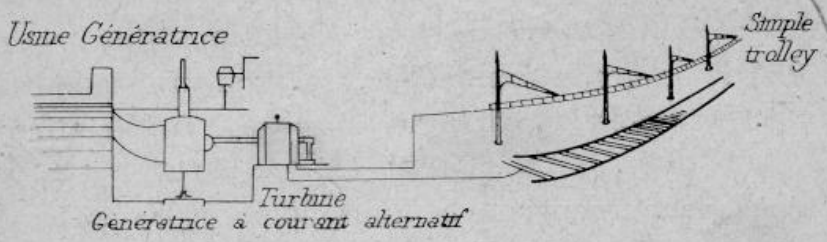


FIG. 5. — Installation à courant monophasé sans sous-station.
(Usine à proximité de la ligne.)

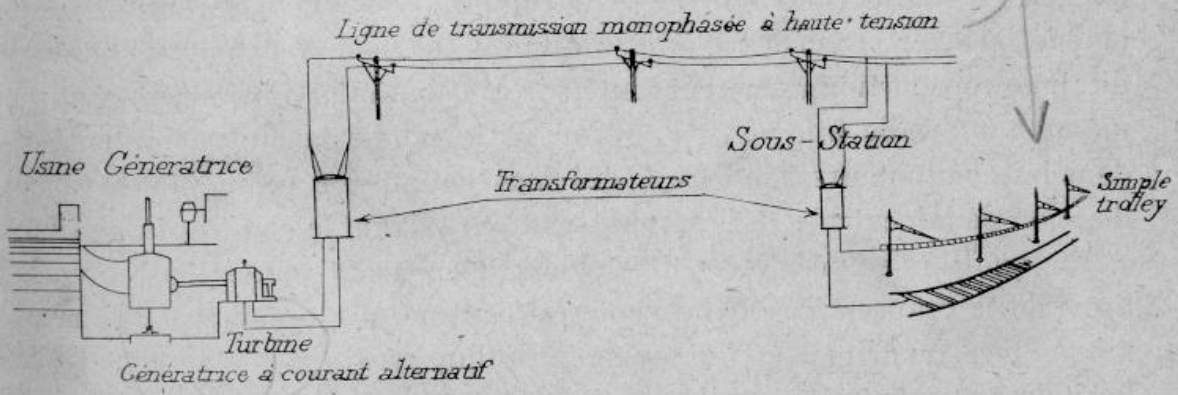


FIG. 6. — Installation à courant monophasé avec sous-station.

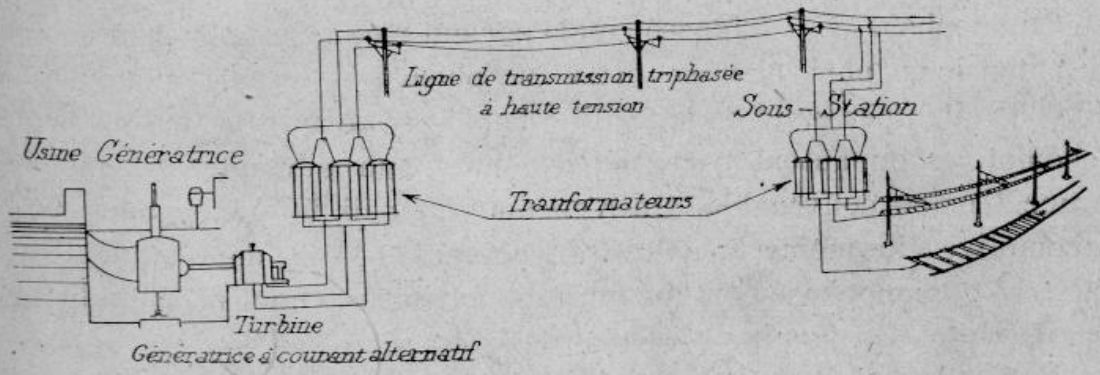


FIG. 7. — Installation à courants triphasés avec sous-station.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

long et suivant que le train est en période de démarrage ou de pleine marche.

Outre l'importance du courant à transmettre, il y a encore lieu de considérer *la chute de tension en ligne* ou chute ohmique entre le point d'alimentation de la ligne depuis la station centrale ou la sous-station suivant le cas, et le point d'utilisation, c'est-à-dire la prise de courant de l'automotrice ou de la locomotive, chute de tension qui est de forme $r\,I\,L$, où r est la résistance ohmique kilométrique du circuit complet aller et retour, I l'intensité du courant nécessaire à la propulsion du véhicule et L la distance en kilomètres entre les deux points ci-dessus spécifiés. Cette chute ohmique ne doit pas dépasser une certaine fraction de la tension à la sortie de la centrale (ou de la sous-station), soit, pour fixer les idées 20 0/0. Or, on arrive rapidement à des valeurs inadmissibles pour des réseaux un peu étendus, si la distance entre sous-stations est trop grande.

Ce qui précède est suffisant pour bien faire comprendre que lorsqu'il s'agit d'un service un peu intensif et d'un réseau un peu étendu, si l'on ne veut pas par trop multiplier le nombre des sous-stations ou faire un emploi exagéré de survolteurs ou de feeders trop importants, l'on soit rapidement amené à élever la tension d'alimentation. Ceci a en effet pour résultat de diminuer proportionnellement l'intensité du courant à transmettre pour un même nombre de kilowatts à fournir et le poids de cuivre immobilisé dans les conducteurs (feeders, fils aériens), et aussi d'augmenter le rayon d'action de la centrale et d'une sous-station, suivant le carré de la tension.

La question se pose alors de savoir si le courant haute tension de la ligne de traction devra être du courant continu ou du courant alternatif, monophasé ou triphasé. Le courant continu présente certainement des limitations quant à l'emploi de tensions très élevées et actuellement 3.000 volts est le maximum réalisé en exploitation. En courant alternatif soit monophasé, soit triphasé, mais surtout monophasé, on peut adopter des tensions plus élevées (il y a plusieurs lignes monophasées 15.000 volts), par suite de la facilité d'abaisser ensuite la tension sur les locomotives ou automotrices elles-mêmes pour alimenter les moteurs à une tension convenable. On a même la possibilité de changer sur la locomotive elle-même la nature du courant, comme dans les systèmes mixtes : monophasé-continu ou monotriphasé que nous étudierons par la suite.

Enfin, il ne doit pas être perdu de vue que cette étude des chutes de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tension admissibles, de la tension et de la nature du courant à adopter, doit être poursuivie parallèlement à l'étude économique du problème (loi de lord Kelvin) au point de vue de la comparaison du coût des pertes en ligne par effet Joule proportionnelles à $r\ I^2$, par rapport aux frais de premier établissement.

9. **Classification des systèmes de traction.** — En passant en revue les différents systèmes dont la pratique a sanctionné l'usage, on peut établir la classification suivante d'après la nature du moteur :

a) Système de traction à courant continu. — Ce mode de traction est le plus ancien en même temps que le plus répandu. On peut en diviser les applications d'après la valeur de la tension d'alimentation comme suit, le moteur employé étant uniformément le moteur série :

1° Jusque 600 volts (cas général : 500 à 600 volts) ;
2° De 600 à 1.000 volts ;
3° Au-dessus de 1.000 volts (1200-1500-2400-3000-5000 volts).

b) Systèmes de traction à courant alternatif monophasé, dont on peut diviser les applications suivant le type de moteur employé. On distingue à ce point de vue :

1° Le moteur série simple (Westinghouse-Lamme) ;
2° Le moteur série compensé (Siemens-Schuckert) ;
3° Le moteur type répulsion : répulsion compensé, série répulsion (Latour, Winter-Eichberg, Alexanderson, répulsion-série-répulsion Thomson-Houston).

Nous rattacherons à cette catégorie, les lignes à *alimentation mixte* dans lesquelles on trouve des sections à haute tension courant monophasé et des sections à tension ordinaire 600 volts courant continu : le moteur monophasé à collecteur permettant cette double alimentation. Les premières se rapportent à des parcours interurbains où la haute tension est possible tandis que les secondes ne se rapportent qu'à des parcours urbains.

c) Systèmes à courants alternatifs triphasés, dont on peut diviser les applications d'après *le mode de régulation de la vitesse,* le moteur employé étant uniformément *le moteur asynchrone* qui peut être à rotor bobiné ou à cage d'écureuil. On distingue ainsi :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° Le système triphasé normal avec régulation de la vitesse par insertion de résistances dans le circuit du rotor (Brown-Boveri : Burgdorf-Thoune ; General Electric : Great Northern).

2° Le système triphasé avec régulation de la vitesse par le montage des moteurs en cascade (Ganz : Valteline ; Westinghouse : Giovi).

3° Le système triphasé avec régulation de la vitesse par variation du nombre de pôles (Brown-Boveri : Simplon).

4° Enfin récemment on a réalisé une combinaison des méthodes 2e et 3e (Brown-Boveri et Westinghouse : Etat italien).

d) Systèmes de traction mixtes, dans lesquels le courant à la ligne d'alimentation est monophasé haute tension et les moteurs d'essieu des moteurs à courant continu ou asynchrones triphasés, pour profiter de l'avantage que présente le courant monophasé de pouvoir être facilement employé à haute tension (10.000, 15.000 ou 20.000 volts) tout en ne demandant qu'une seule ligne, et des avantages caractéristiques que présentent sur les moteurs monophasés, soit les moteurs série courant continu, soit les moteurs asynchrones triphasés. Le courant d'alimentation est ainsi transformé sur la locomotive même :

1° Soit par des groupes convertisseurs rotatifs (Ward-Léonard, Auvert et Ferrand) ou par un redresseur de courant à vapeur de mercure pour l'emploi de moteurs d'essieu courant continu ;

2° Soit par un transformateur de phases pour l'emploi de moteurs d'essieu asynchrones triphasés.

Toutefois, ces systèmes mixtes conduisent à des équipements assez complexes qui font que les applications réalisées appartiennent encore plus ou moins au domaine expérimental.

L'organe fondamental pour un système quelconque de traction électrique est le moteur.

Nous étudierons successivement les différents moteurs employés, moteurs précédemment énumérés, et en les envisageant au point de vue de leur emploi à la traction qui est le seul dont nous ayons à nous occuper ici. Nous étudierons plus particulièrement, en détail, le moteur à courant continu eu égard à son importance : c'est en effet, de beaucoup, le plus employé.

10. Applications diverses. — *a) Lignes à courant continu.* — 1°) *Jusqu'à 600 volts,* c'est ainsi que nous l'avons déjà dit, le cas général des tramways

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

urbains et métropolitains. Les règlements administratifs limitent en effet à un maximum de 600 volts la tension d'alimentation de ces lignes, ce qui donne en moyenne 550 volts aux bornes des moteurs en tenant compte de la chute de tension moyenne en ligne.

Quelques lignes de pénétration fonctionnent sous deux tensions telles que 600 et 1.200 volts ; 600 volts dans les sections urbaines et 1.200 volts dans les sections interurbaines. Plusieurs lignes de ce genre sont en exploitation aux Etats-Unis.

A mentionner ici le cas particulier de l'alimentation à 3 fils dont le fil neutre est constitué par les rails c'est-à-dire est à la terre, les deux autres fils à $\pm$ 600 volts, l'ensemble formant ainsi deux ponts à 600 volts avec 1.200 volts entre fils extrêmes. C'est le cas du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris que nous étudierons plus tard avec quelques détails, et aussi la ligne de Grenoble à Chapareillon. Pour ces lignes, les moteurs des automotrices sont divisés en deux groupes : un groupe est sur un pont, l'autre est sur l'autre pont ; chaque groupe fonctionne sous un voltage maximum qui est celui d'un pont.

2°) *De 600 à 1.000 volts.* — Comme exemples de lignes suburbaines ou interurbaines, rentrant dans cette catégorie, nous citerons celles de Grenoble à Villars de Lans, sous 750 volts, de Villefranche à Bourg-Madame, sous 800 volts, de Lucca-Monsummano, sous 850 volts, de Cologne-Bonn, de Bonn-Siegburg-Königswinter, de Neustadt-Landau, du chemin de fer de banlieue de Frankfurt-sur-Mein, sous 1.000 volts, certaines sections du réseau des tramways de Budapest, également sous 1.000 volts, de même encore certaines lignes des chemins de fer de la banlieue de Lugano, etc.

Les équipements des voitures alimentées sous ces tensions ne diffèrent, dans leur ensemble, de ceux de la catégorie précédente 500/600 volts qu'en ce que l'isolement des différentes parties est renforcé.

Les exemples de lignes de cette classe sont toutefois relativement peu nombreux, et on quitte généralement le 600 volts pour aborder la haute tension à partir de 1.200 volts.

3°) *1.200 volts et au-dessus.* — L'emploi de telles tensions est relativement récent, mais en revanche, se développe très rapidement surtout en Amérique.

Aux Etats-Unis et au Canada un grand nombre de lignes fonctionnent sous 1.200 volts. Ce système a pris là un développement considérable

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

durant ces dernières années. La première ligne à 1.200 volts date de 1907 et fin 1912 on y comptait déjà un total d'environ 2.700 kilomètres de lignes installées à 600/1.200 volts ou 1.200 volts comprenant 17 réseaux et fin 1916 on comptait 3.600 kilomètres avec 38 réseaux.

Plusieurs lignes sont à 1.500 volts telles que le Lake Erie et Northern Ry (Ontario), le Salt Lake et Utah Ry (Utah), le Southern Pacific à Portland (Orégon), etc.

Plusieurs autres à 2.400 volts telles que le Butte, Anaconda et Pacific Ry (Montana), le Michigan Ry, le Canadian Northern Ry à Montréal (Canada), etc.

Un réseau est, depuis 1915, en fonctionnement régulier à 3.000 volts, c'est celui du Chicago-Milwaukee et Saint-Paul Ry, qui constitue l'électrification la plus considérable qui ait été encore effectuée, à la fois pour le développement du réseau et pour le tonnage des trains. A la fin de 1917, il y avait environ 700 kilomètres de lignes de ce réseau électrifiées et en exploitation, et on commençait l'électrification d'une nouvelle section de 300 kilomètres. Outre que cette tension de 3.000 volts est actuellement la tension maximum utilisée en traction par courant continu pour un réseau en exploitation régulière, cette ligne présente encore d'autres particularités sur lesquelles nous reviendrons et spécialement à propos de la « récupération ».

Cette dernière ligne et la très grande majorité des lignes ci-dessus ont été installées par la General Electric Co.

Nous mentionnerons enfin l'essai de traction à 5.000 volts réalisé en 1915 par la société Westinghouse sur la ligne de Jackson à Grasse Lake et Wolfe Lake (Michigan) sur une longueur de 19 kilomètres. Ces essais ont montré qu'une telle tension était techniquement possible, mais il reste à établir par la pratique s'il est économiquement avantageux de porter la tension jusqu'à 5.000 volts, étant donnés les résultats satisfaisants acquis à 3.000 volts sur la ligne très importante du Milwaukee où les conditions du trafic sont extrêmement sévères.

En dehors de certains dispositifs spéciaux résultant de l'emploi d'une haute tension, dans la plupart des cas ci-dessus — exception faite pour quelques lignes à 1.200 volts où les moteurs sont alimentés directement sous cette tension — les moteurs des automotrices ou locomotives sont en permanence, couplés par deux en série, afin de n'avoir aux bornes de chacun d'eux qu'une tension moitié de la tension totale.

En France, nous citerons la ligne de Saint-Georges Commiers à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mure qui est à 3 fils avec fil neutre à la terre et 2.400 volts entre fils extrêmes, soit, par suite, deux ponts à 1.200 volts, installée dès 1903 par M. Thury et dont le prolongement vers Gap est en exécution avec 2.400 volts directs entre le fil trolley et la terre.

Nous citerons encore certaines lignes du réseau des tramways des Basses-Pyrénées à 1.350 volts avec des sections à 600 volts. Enfin la ligne du chemin de fer industriel de Maizières-Sainte-Marie-aux-Chênes en Lorraine à 2.000 volts.

En Italie, plusieurs lignes comprennent également l'emploi du courant continu 1.200 volts au trolley, ce sont par exemple celles de Briescia-Toscolano et Brescia-Stocchetta, de Monza-Canto, de Turin-Rivoli, de Pisa-Marina, de Verona-San-Bonifacio, de Pompéi-Salerno, etc.

En Autriche-Hongrie, celles de Zartlesdorf-Lippnetschwebe, sous 1.200 volts, de Poprad-Scorbasee sous 1.650 volts.

En Suisse, celle de Biasqua-Acquarosa, de Tavannes-Tramelan-Noirmont à 1.200 volts, de Coire-Arosa, de Nyon-la-Cure à 2.000 volts.

En Hollande, le réseau des tramways de Harlem à 1.200 volts.

Classification des lignes à courant continu. — Pour résumer ce qui précède, et en considérant la nature des lignes en exploitation, on peut établir la classification suivante :

Lignes à 600 volts : Tramways services urbains;
Lignes à 1.200 volts : Lignes suburbaines et interurbaines se reliant aux lignes précédentes urbaines.
Lignes à 1.500 volts : Lignes moyennes de chemins de fer voyageurs et marchandises.
Lignes à 2.400 volts et au-dessus : gros trafic, grandes lignes.

b) Lignes à courant alternatif monophasé. — *Aux Etats-Unis*, il y avait à la fin de 1909 (1), près de 30 grandes lignes présentant un développement total d'environ 1.600 kilomètres utilisant le courant monophasé à 3.300, 6.600 ou 11.000 volts. Ces lignes ont été installées pour la majorité par la Compagnie Westinghouse de Pittsburg. Depuis cette époque les lignes de cette nature se sont relativement peu développées. La faveur semblant se reporter sur le courant continu à haute tension.

La plupart de ces lignes fonctionnent sous une alimentation mixte :

(1) *Revue électrique* du 15 mai 1909. « Étude sur la traction monophasée aux Etats-Unis » par l'Auteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

coura monophasé haute tension pour les parcours interurbains, et courant continu 500/600 volts pour les parcours urbains.

Nous ne mentionnerons ici que la plus importante parmi les lignes monophasées américaines, celles du New-York, New-Haven et Hartford (1907) (1), construite par la Société Westinghouse et qui est remarquable à bien des points de vue, outre qu'elle est la première grande ligne d'une réelle importance ainsi électrifiée. Cette ligne sera souvent citée dans cet ouvrage.

En France, nous citerons la ligne mixte de Lyon-Miribel-Jons, à 6.600 volts, monophasé, 15 périodes, pour la section interurbaine et 600 volts continu pour la section urbaine, le réseau des chemins de fer départementaux de la Haute-Vienne à 10.000 volts, monophasé, 25 périodes, avec 600 volts également monophasé pour la traversée de Limoges, la ligne d'Arles-sur-Tech à Prats de Mollo et à Saint-Laurent de Cerdans à 6.000 volts, 25 périodes, la ligne de Saint-André de Cubzac à Libourne et à Puisseguin à 6.600 volts 16 2/3 périodes, le réseau du chemin de fer du Sud-France à 6.600 volts, 25 périodes, enfin, la ligne plus importante de Bayonne-Toulouse à 12.000 volts 16 2/3 périodes en cours d'exécution pour une portion tout au moins, de la Compagnie des chemins de fer du Midi (sections exploitées : Lourdes-Pierrefitte, Tarbes-Bagnères de Bigorre, Lannemezan-Arreau, Perpignan-Villefranche, d'un développement total d'environ 116 kms).

En Angleterre, nous citerons les lignes du Middland, à 6.600 volts, 25 périodes, du London-Brighton et South-Coast à 6.600 volts, 25 périodes.

En Suisse et en Allemagne, la traction monophasée semble recevoir un nouvel essor. En Suisse il existe un projet d'électrification d'ensemble des chemins de fer fédéraux, et la commission d'études a conclu en 1913 à l'adoption générale du courant monophasé 15.000 volts, 15 périodes pour les grandes lignes. Les études et essais faits par les chemins de fer des Etats prussien, bavarois, autrichien et suédois ont abouti à la même conclusion.

En Suisse, une première application consécutive aux essais faits en 1905-1909 sur la ligne Seebach-Wettingen des chemins de fer fédéraux, est

(1) Cette ligne, au début à 11.000 volts avec ligne unique d'alimentation, est maintenant transformée en ligne à 3 fils avec 22.000 volts entre fils extrêmes et un seul pont à 11.000 volts utilisé pour la ligne de traction ainsi que nous le verrons en détail ultérieurement. (Chapitre IV).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

celle datant du milieu de l'année 1913 réalisée par le chemin de fer des Alpes bernoises au tunnel du Loetschberg sur la ligne de Berne au Simplon à 15.000 volts, 15 périodes. L'électrification dans les mêmes conditions du Saint-Gothard (ligne de Lucerne à Milan), est en cours et sera d'abord réalisée sur la portion d'Erstfeld-Bellinzona (110 kilomètres).

En Allemagne, la ligne de Dessau-Bitterfeld (chemins de fer de l'Etat prussien) à 10.000 volts, 15 périodes, la ligne de la Wiesenthal (chemins de fer badois) à 10.000 volts 15 périodes, la ligne suburbaine Hambourg-Altona-Blankenese et Ohlsdorf (Etat prussien) à 6.000 volts, 25 périodes. Pour les lignes dans le voisinage de Berlin (Stadt-Ring et Vorortbahnen), on a choisi 10.000 volts, 15 périodes.

En Suède, les lignes de Nottoden-Tinoset à 10.000 volts, 15 périodes, de Kiruna-Riksgränsen à 15.000 volts, 15 périodes.

En Italie, les lignes de Rome à Civita-Castella, à 6.600 volts et 600 volts (6.600 volts sur la section interurbaine et 600 volts sur la section urbaine), de la Valle-Brembana à 6.000 volts. Les tramways de Salerne, à 6.600 volts, de Padoue-Fusina à 6.600 et 600 volts, etc. Toutes ces lignes sont à la fréquence de 25 périodes

c) Lignes à courants triphasés. — Ce système a reçu ses premières applications aux tramways avec les tramways de Lugano (1896) à 400 volts, 40 périodes, aux chemins de fer avec la ligne de Burgdorf-Thoune (1899) à 750 volts, 40 périodes, installées par la maison Brown-Boveri. Mais il a reçu ses principales applications sur les lignes de chemins de fer de grosse traction en Suisse et en Italie, avec les lignes du Simplon, de la Valteline, du Giovi, de Savone, du Mont-Cenis, toutes à 3.000 volts, 16 périodes.

Nous mentionnerons encore la ligne importante Great-Northern aux Etats-Unis (tunnel de Cascade), à 6.000 volts, 25 périodes.

d) Lignes mixtes. — Nous citerons la ligne expérimentale de New-Canaan du réseau du New-York, New-Haven et Hartford où le courant d'alimentation est monophasé 11.000 volts et le courant d'alimentation des moteurs est continu, et celles du Norfolk et Western et Pennsylvania où le courant de la ligne est également monophasé 11.000 volts, mais le courant d'alimentation des moteurs est triphasé.

11. **Conditions d'emploi des divers systèmes de traction.** — En dehors de cas simples comme par exemple celui d'un réseau de tramways urbains

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

où le courant continu 500/600 volts est naturellement tout indiqué, le choix du système de traction à adopter pour l'électrification d'une ligne déterminée (ligne suburbaine, interurbaine ou grande ligne), constitue un problème extrêmement complexe et les discussions auxquelles se livrent les partisans des différents systèmes le prouvent. En particulier, la controverse ouverte à propos des systèmes à courant continu haute tension et à courant alternatif monophasé, systèmes que l'on oppose le plus fréquemment l'un à l'autre, est toujours aussi vive.

Aux Etats-Unis, on peut constater dans ces dernières années, que plusieurs lignes à courant monophasé ont été transformées en lignes à courant continu haute tension, sans qu'il y ait aucun exemple de l'inverse, que dans la création de nouvelles lignes, c'est le courant continu haute tension qui a prévalu (1), telles les lignes des réseaux importants du Butte-Anaconda et Pacific Railway à 2.400 volts et du Chicago-Milwaukee et Saint-Paul Railway à 3.000 volts dont les résultats économiques satisfaisants obtenus justifient le choix qui a été fait.

A côté de cela, les chemins de fer suisses, bavarois, prussiens, suédois après de laborieuses et méticuleuses études appuyées sur de nombreux essais de traction en grand, ont conclu à l'adoption exclusive du courant monophasé pour de grands réseaux.

Enfin le système triphasé est très en faveur en Italie pour les grandes lignes.

Nous ne pouvons ici que préciser quelques points de vue généraux bien acquis. (2)

a) Pour un service suburbain à trafic intense, la préférence va au système à courant continu et ce, d'autant plus que l'accroissement du trafic est plus grand. Le système monophasé conduit à des équipements trop lourds pour le matériel roulant (3) et de plus ce système est peu favorable à des accélérations élevées et à des démarrages fréquents (faible valeur du facteur de puissance au démarrage). Quant au système triphasé il ne se prête pas aux variations de vitesse nécessaires dans un tel service.

---

(1) En dehors des deux lignes récentes du Norfolk et Western et du Pennsylvania en mono-triphasé.

(2) Communication de M. Valbreuze à la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale. Bulletins de Mars et Mai 1911.

(3) Un équipement courant continu pèse en moyenne pour des moteurs de 100 à 200 chevaux, environ 20 kilos par cheval, alors qu'un équipement courant monophasé pèse près de 40 à 45 kilos par cheval dont près de la moitié pour le moteur seul.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b) Pour un service interurbain à trafic limité, le système monophasé d'abord en faveur a presque entièrement été supplanté par le courant continu haute tension avec lequel le rendement est meilleur. Le poids et le prix de l'équipement du matériel roulant sont beaucoup moindres et surtout les dépenses d'entretien notablement plus faibles.

c) Sur certaines sections spéciales de lignes de grande communication telles que la traversée d'un tunnel par exemple, l'un des trois systèmes pourra être reconnu le plus avantageux suivant la longueur de la section et les conditions locales. La préférence sera souvent donnée au triphasé : la grande puissance unitaire et l'exceptionnelle robustesse des moteurs triphasés, dépourvus de tout organe délicat, permettent en effet d'établir des locomotives puissantes, capables de travailler dans des conditions extrêmement dures. Il présente toutefois l'inconvénient de la complication d'une double ligne aérienne d'alimentation, ce qui peut d'ailleurs être prohibitif.

d) Sur les lignes de grandes communications elles-mêmes, le problème est plus complexe. Si le trafic est suffisamment intense, le système à courant continu haute tension pourra donner les meilleurs résultats quelle que soit la longueur de la ligne. Sinon on aura recours au triphasé ou au monophasé. Le premier sera préféré s'il n'est pas nécessaire d'avoir une tension très élevée et si la présence de deux fils aériens ne constitue pas une complication trop gênante, le second sera choisi si une tension très élevée est nécessaire et si l'on a surtout en vue la simplicité des installations fixes.

e) Pour terminer ces considérations, nous dirons encore que les systèmes monophasé et triphasé demandent des faibles fréquences (15 à 25 périodes maximum), ce qui est une circonstance défavorable au point de vue utilisation de lignes générales existantes de transport de force qui sont généralement à des fréquences plus élevées 50-60 périodes. L'emploi de ces sytèmes conduit ainsi pratiquement les compagnies de traction à avoir leur propre centrale. Cet inconvénient n'existe pas avec le système à courant continu.

f) Enfin à signaler pour les lignes à courants alternatifs l'influence perturbatrice par induction électromagnétique et induction électrostatique sur les lignes télégraphiques et téléphoniques voisines et qui donne lieu à de grandes difficultés auxquelles il n'a pas encore été obvié d'une manière complète par des moyens pratiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE III

MOTEURS A COURANT CONTINU
ÉTUDE ÉLECTRIQUE

SOMMAIRE. — Généralités. Types de moteurs. — Moteurs-série. Fonctionnement : sens de rotation. Force contre-électromotrice, courant absorbé, vitesse, puissances, couples, rendements. — Caractéristiques électro-mécaniques. — Influence d'une modification de la différence de potentiel aux bornes du moteur. — Influence d'une modification de l'enroulement induit. — Stabilité de marche. Caractéristique mécanique. — Caractéristiques de la marche d'une voiture motrice. — Remarque sur les formules de conversion des caractéristiques. — Remarque sur l'effort théorique et sur l'effort réel à la jante. — Calage des balais. Moteurs à pôles de commutation. — Puissance nominale d'un moteur de traction. Régime uni-horaire. Régime de 10 heures. — Application des définitions de la puissance d'un moteur à l'étude d'un projet de traction. — Puissance continue de même échauffement. — Puissance uni-horaire d'un moteur et puissance absorbée au démarrage. — Poids moyens des moteurs de traction.

12. **Généralités. Types de moteurs.** — Les phénomènes dont un moteur à courant continu est le siège peuvent se ramener à quatre principaux : *création d'un champ magnétique*, *production d'un effort moteur*, *production d'une force contre-électro-motrice* et *d'une réaction d'induit*.

Comme moteurs à courant continu pouvant s'appliquer à la traction des véhicules électriques de toute sorte, on peut envisager *le moteur-série* et *le moteur-shunt*.

En traction électrique, en raison de la charge très variable résultant du nombre variable des voyageurs sur une même ligne, des déclivités et des courbes du parcours et surtout des arrêts et démarrages nombreux,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'effort demandé au moteur est très variable, la consommation de courant varie notablement et dans des temps relativement courts. Comme au démarrage, le couple moteur doit être fréquemment le triple et même le quadruple (dépendant de la valeur admise pour l'accélération) du couple normal, il s'ensuit qu'un moteur de véhicule électrique doit être en état pendant un court espace de temps de développer un couple bien plus grand que celui qui correspond à sa puissance normale.

Le moteur-série à courant continu répond le mieux à ces conditions. Ce moteur règle sa vitesse d'après la charge, de sorte que sur une rampe, la vitesse sera réduite, mais l'effort développé sera grand. En palier, au contraire, la vitesse sera élevée et l'effort moindre. En somme, les propriétés de ce moteur sont telles, qu'automatiquement, à une diminution de la vitesse correspond une augmentation du couple et, inversement, à une diminution de la vitesse correspond une augmentation du couple. En particulier au démarrage où la vitesse part de zéro, il développe un couple élevé. Il est enfin susceptible de fortes surcharges momentanées. Il présente toutefois un désavantage sur le moteur shunt, il ne permet pas, sans artifices spéciaux, de récupérer du courant pour le renvoyer au réseau.

Le *moteur-série étant le seul employé en traction à courant continu, c'est lui seul que nous considérons ici. De plus, le seul mode d'alimentation en usage* sur les lignes existantes est l'*alimentation à potentiel constant*. C'est dans ce cas que nous nous placerons dans la suite, sauf indication spéciale.

13. **Moteur-série. Fonctionnement.** — La théorie générale du fonctionnement du moteur à courant continu est développée dans tous les cours d'électrotechnique générale ; aussi nous ne rappellerons ici, pour les discuter en vue de l'application que nous avons en vue, que les résultats et les formules dont nous avons besoin.

a) Sens de rotation. — On sait que pour inverser le sens de rotation d'un moteur-série, *il suffit d'inverser le sens du courant dans les inducteurs ou dans l'induit ;*

b) Force contre-électromotrice. Courant absorbé. — La force contre-électromotrice du moteur, c'est-à-dire la force électromotrice opposée à celle du réseau, qu'il développe en tournant à une vitesse angulaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$\omega = 2\pi n$, n étant le nombre de tours de son induit par seconde, est, pour un moteur multipolaire à $2p$. pôles et à toute charge :

$$E = \frac{p}{p_1} n N \Phi_1 10^{-8} \text{ volts},$$

quel que soit le mode de bobinage de son induit.

Dans cette formule :

N est le nombre total des conducteurs périphériques de l'induit ou armature.

Φ_1 le flux magnétique en unités CGS ou Maxwells par circuit magnétique correspondant à deux pôles conjugués ou encore flux émané d'un pôle.

$2p_1$ le nombre des circuits de l'enroulement induit réunis en parallèle.

Si on appelle Φ la somme des flux issus des pôles inducteurs de même signe ou simplement *flux inducteur total*, on a évidemment :

$$\Phi = p \Phi_1 .$$

Si, de plus, on observe que l'enroulement induit est, dans le cas qui nous occupe, le plus généralement un bobinage série, on a :

$$p_1 = 1$$

et la formule précédente prend la forme simple

$$(1) \qquad E = n N \Phi 10^{-8} \text{ volts},$$

qui est celle que nous emploierons le plus ordinairement. Il est essentiel de bien remarquer que cette formule est générale et s'applique à un moteur à induit bobiné en série, que ce moteur soit bipolaire ou multipolaire.

Pour bien faire comprendre la signification du nombre N, nous prendrons deux exemples :

Soit un induit à 25 encoches périphériques à 5 bobines à 3 tours chacune. Il y a en tout $25 \times 5 = 125$ bobines ou sections électriques (correspondant à 125 lames au collecteur) à 3 tours et comme chaque tour forme un cadre élémentaire lequel a forcément deux génératrices, on voit que

$$N = 125 \times 3 \times 2 = 750.$$

Soit encore un induit à 33 encoches à 7 bobines à un tour. On a :

$$N = 33 \times 7 \times 2 = 462$$

avec $33 \times 7 = 231$ lames au collecteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ceci posé, pour un enroulement inducteur donné, le flux est *seulement fonction du courant inducteur, lequel est égal au courant total absorbé, le moteur étant un moteur-série*. On exprime souvent le flux Φ en fonction du nombre d'ampères-tours inducteurs A, produit du nombre de spires inductrices M par le courant inducteur en ampères I. Nous poserons donc :

$$\Phi = f(A), \text{ avec } A = MI.$$

Soit Φ_o la valeur qu'aurait le flux inducteur sans la réaction magnétique de l'induit qui produit une force électro-motrice correctrice e volts. On a, à toutes charges et en toute rigueur :

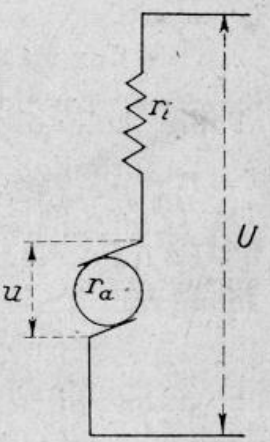


FIG. 8.

$$(2) \qquad E = nN\Phi . 10^{-8} = nN\Phi_o . 10^{-8} - e.$$

A un régime quelconque :

I étant l'intensité du courant absorbé ;

u la tension entre balais ;

U la différence de potentiel entre les bornes extrêmes (le circuit comprenant les inducteurs) ;

R la résistance totale intérieure du moteur, c'est-à-dire la somme de la résistance r_a de l'induit (y compris celle des balais et des contacts) et de celle r_i des inducteurs en série avec lui de sorte que

$$R = r_a + r_i.$$

On a :

$$(3) \qquad \begin{aligned} U &= u + r_i I \\ u &= E + r_a I, \end{aligned}$$

d'où, en éliminant u :

$$E = U - (r_a + r_i) I$$

et finalement :

$$(4) \qquad E = U - RI.$$

Nous emploierons indifféremment l'une ou l'autre des formules (1) ou (4) pour le calcul de la f. c. e. m. E.

La f. c. e. m. E intervient d'une façon essentielle dans le fonctionne-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment du moteur, c'est d'elle, en particulier, que dépend l'intensité du courant qui traverse le moteur. Ce courant a, en effet, pour valeur :

$$(5) \qquad I = \frac{U - E}{R}.$$

Au lieu de cela, un récepteur ordinaire (une lampe par exemple) de même résistance R, alimenté sous une même tension U ne donnerait naissance à aucune f. c. e. m. et serait par suite parcouru par un courant

$$I' = \frac{U}{R}$$

d'après la loi d'Ohm pure et simple.

La formule (5) montre qu'au *démarrage*, puisque $n = o$, $E = o$, I *est maximum*, de là, la nécessité de résistances de démarrage.

La force contre-électromotrice E allant en croissant avec la vitesse, le courant absorbé par le moteur partant du repos, diminue à mesure que la vitesse augmente. E atteint facilement 90 0/0 de U. On voit donc que le courant absorbé par le moteur à un moment quelconque dépend bien de E et à chaque instant.

Il est essentiel de bien se pénétrer de la signification de E et de son importance.

c) Vitesse. — D'après les équations (2) et (4), on a :

$$(6) \qquad n = \frac{E}{N\Phi} \cdot 10^8 = \frac{U - RI}{N\Phi} \cdot 10^8$$

et aussi :

$$(6') \qquad n = \frac{E + e}{N\Phi_o} \cdot 10^8 = \frac{U - RI + e}{N\Phi_o} \cdot 10^8.$$

On emploiera plus généralement les équations (6) qui sont d'une application immédiate.

Des équations précédentes on déduit cette loi :

A flux inducteur et courant égaux, la vitesse d'un moteur ne dépend que de la différence de potentiel aux bornes.

Considérons les équations (6'). Pratiquement (pour avoir un bon rendement), la chute ohmique totale RI ne dépasse pas, même au régime

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maximum, une très petite fraction de la tension U ; d'autre part, la force électromotrice *e*, due à la réaction d'induit est de signe contraire à RI, elle est en outre également très petite parce que *les balais sont toujours calés sur la ligne neutre*. On écrit alors, avec une approximation pratique suffisante, approximation qui sera d'ailleurs d'autant plus grande que la charge sera plus faible, la relation simple :

$$n = \frac{U}{N\Phi_0} \cdot 10^8, \qquad (7)$$

Ou même, avec une approximation moindre mais en général suffisante :

$$n = \frac{U}{N\Phi} \cdot 10^8, \qquad (7')$$

en négligeant purement et simplement RI dans la formule (6) d'où cette règle :

La vitesse est sensiblement proportionnelle à la différence de potentiel aux bornes et inversement proportionnelle au flux magnétique inducteur.

d) Puissances. — 1° *Puissance absorbée.* — La puissance absorbée par le moteur et mesurée à ses bornes est en watts :

$$P = UI$$

U étant supposé constant, cette équation représente une droite passant par l'origine et de coefficient angulaire U.

2° *Puissance électromagnétique de l'induit.* — Nous admettrons que le moteur absorbant la puissance P = UI tourne effectivement. Dans ces conditions il développe nécessairement sur son arbre une certaine puissance, correspondant d'ailleurs à un certain couple. Cette puissance appelée *puissance électromagnétique* de l'induit P_e est égale au produit de la f. c. e. m. du moteur par le courant qui le traverse. Elle a par suite pour expression en watts :

$$P_e = EI$$

ou en remplaçant E par sa valeur E = U — RI :

$$P_e = (U - RI)\, I$$

ou : (8)
$$P_e = UI - RI^2$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c'est-à-dire qu'elle est encore égale à la puissance absorbée diminuée de la perte par effet Joule.

3° *Puissance utile.* — Enfin, la puissance mécanique recueillie sur l'arbre ou *puissance utile* P_u est égale à P_e diminuée de la puissance absorbée pour compenser les pertes par frottements mécaniques, ventilation, hystérésis et courants de Foucault. Si p est l'ensemble de ces pertes en watts, on a :

$$P_u = P_e - p$$

ou (9) $$P_u = EI - p$$

ou encore $$P_u = UI - RI^2 - p$$

p étant donné par une formule empirique de la forme

$$p = An + B\Phi^{1\cdot 6}n + D\Phi^2 n^2$$

A, B, D étant des coefficients appropriés.

Dans cette formule :

Le premier terme représente les pertes par frottements dans l'air et par frottements mécaniques (proportionnelles à la première puissance de la vitesse) ; le second terme, les pertes par hystérésis (également proportionnelles à la première puissance de la vitesse) ; et le troisième terme, les pertes par courants de Foucault (proportionnelles à la deuxième puissance de la vitesse).

La formule (9) peut se mettre sous une autre forme qu'il est utile de connaître : en désignant par J, le courant variable consommé pour compenser les pertes d'énergie p, ce qui revient à poser $p = EJ$, on a :

(10) $$P_u = E(I - J).$$

En chevaux de 75 kgms/sec. on aura :

(11) $$P_u = \frac{UI - RI^2 - p}{736}$$

ou (11') $$P_u = \frac{E(I - J)}{736}$$

ou encore (11'') $$P_u = \frac{n N \Phi (I - J)}{736} \cdot 10^{-8}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

e) **Couples.** — 1° *Couple électromagnétique.* — Le couple électromagnétique C_e développé par l'induit est lié à la puissance électromagnétique de l'induit P_e par l'équation :

$$P_e = 2\pi n C_e$$

d'où :

$$(12) \qquad C_e = \frac{P_e}{2\pi n} = \frac{EI}{2\pi n} = \frac{N\Phi I}{2\pi}.10^{-8} \qquad \text{watts-secondes ou joules.}$$

En kilogrammètres on aurait :

$$(12') \qquad C_e = \frac{1}{9.81}.\frac{N\Phi I}{2\pi}.10^{-8},$$

I étant maximum au démarrage ainsi que nous l'avons vu C_e l'est également.

On voit de plus que C_e *est proportionnel à* Φ *et à* I.

2° *Couple utile.* — Le couple utile C_u réellement utilisable est lié à la puissance utile par une expression analogue à celle qui lie P_e et C_e et l'on a :

$$P_u = 2\pi n C_u$$

d'où :

$$C_u = \frac{P_u}{2\pi n} = \frac{EI - p}{2\pi n} \qquad \text{watts-secondes ou joules}$$

ou :

$$C_u = \frac{1}{9.81}.\frac{EI - p}{2\pi n} \qquad \text{kgms.}$$

En remplaçant dans cette formule p et E par leurs valeurs :

$$p = An + B\Phi^{1.6}n + D\Phi^2 n^2$$

et

$$E = nN\Phi.10^{-8},$$

on obtient l'expression complète du couple :

$$C_u = \frac{1}{9.81}.\frac{1}{2\pi}.\left[N\Phi I.10^{-8} - (A + B\Phi^{1.6}) - D\Phi^2 n.\right].$$

En y introduisant le courant de compensation des pertes J, défini par la relation $p = EJ$, on obtient :

$$(13) \qquad C_u = \frac{E(I - J)}{2\pi n} \qquad \text{joules}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou (14) $$C_u = \frac{N\Phi}{2\pi}(I-J)\,10^{-8} \quad \text{joules}$$

et (14′) $$C_u = \frac{1}{9.81}\cdot\frac{N\Phi}{2\pi}(I-J)\,10^{-8} \quad \text{kgms.}$$

On remarquera que ces expressions ne diffèrent de celles (12) et (12′) du couple électromagnétique C_e que par le remplacement de I par I — J.

L'équation (13) peut s'écrire :

$$C_u = \frac{EI}{2\pi n} - \frac{EJ}{2\pi n},$$

$\frac{EI}{2\pi n}$ est le couple électromagnétique, quant à $\frac{EJ}{2\pi n}$ il représente également un couple, d'ailleurs variable, qui n'est autre que le couple perdu par les effets parasites soit C_p $\quad C_p = \frac{EJ}{2\pi n}$

et l'on a $$C_u = C_e - C_p.$$

La valeur explicitée de C_p étant d'ailleurs

$$C_p = \frac{p}{2\pi n} = \frac{1}{2\pi}(A + B\Phi^{1\cdot6} + D\Phi^2 n).$$

Reprenons les équations 13 ou 14 et soit I_o la valeur particulière de J pour la marche à vide du moteur. I_o est dit *courant de marche à vide* du moteur, il correspond à l'énergie minima nécessaire pour entretenir la rotation du moteur sans production d'effet utile. Pour cette valeur de I on a donc $C_u = o$, et par suite $I = I_o$. Il en résulte que I_o est l'abscisse à l'origine de la courbe du couple utile dont nous étudierons d'ailleurs plus loin la forme. Cette courbe ne *passe donc pas par l'origine*, contrairement à une faute souvent commise. Ce résultat est à retenir.

De même la puissance utile est nulle pour $J = I_o$ et l'on a $I = I_o$ qui est encore l'abscisse à l'origine de la courbe qui en représente les variations.

f) Rendements. — On distingue plusieurs rendements :

1° *Rendement organique du moteur.* — Le rendement organique η_i du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur est par définition le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée c'est-à-dire $\eta_1 = \frac{P_u}{P}$,

η_1 est le véritable rendement industriel du moteur.

En développant les deux termes du rapport, il vient :

$$(15) \qquad \eta_1 = \frac{UI - RI^2 - p}{UI} = 1 - \left(\frac{R}{U} \cdot I + \frac{p}{UI}\right).$$

Cette expression montre qu'en évaluant les pertes par effet Joule en pour cent de la puissance absorbée, on peut les représenter par les ordonnées d'une droite de coefficient ordinaire 100. $\frac{R}{U}$.

Si donc on trace la droite AB (fig. 9) parallèle à OX et telle que OA = 100, puis la droite AC de coefficient angulaire $-100\frac{R}{U}$,

$\left(\overline{mn} = 100\frac{R}{U} \cdot I\right)$.

enfin, si on porte en dessous de cette droite les ordonnées $\overline{np} = 100\frac{p}{UI}$, le lieu du point p est la courbe DE du rendement organique η_1 du moteur exprimé en $^0/_0$.

Cette courbe passe évidemment par le point d'abcisse I_0.

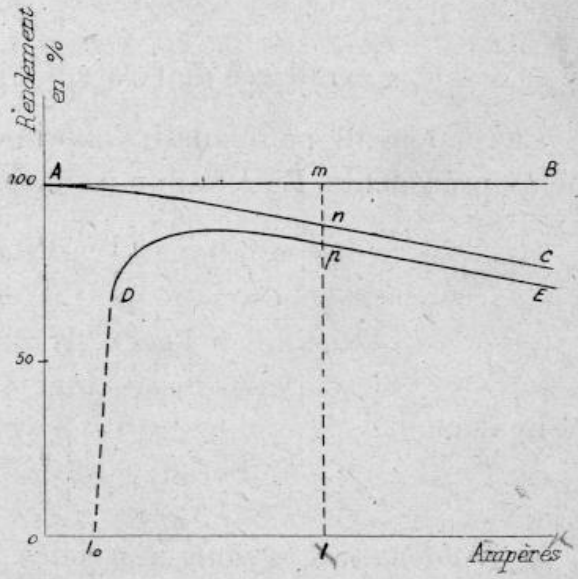


FIG. 9.
Construction de la courbe du rendement.

Il est important de noter pour ce qui va suivre que ce rendement η_1 tient compte de *toutes les pertes* dans le moteur, ce qui n'a pas lieu pour les deux rendements suivants qui n'ont d'ailleurs qu'un intérêt théorique.

2° *Rendement organique de l'induit.* — Le rendement organique de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'induit η_{io} est défini par le rapport de la puissance utile à la puissance électromagnétique de l'induit, c'est-à-dire que l'on a :

$$\eta_{io} = \frac{P_u}{P_e}.$$

Au rapport des puissances, on peut évidemment substituer celui des couples correspondants et écrire :

$$\eta_{io} = \frac{C_u}{C_e}.$$

Dans la première de ces deux formules remplaçons P_u et P_e par leur valeur, on aura :

$$\eta_{io} = \frac{E\,(I-J)}{EI} = \frac{I-J}{I}.$$

3° *Rendement électrique du moteur.* — On distingue encore quelquefois un autre rendement : le rendement électrique du moteur θ qui est défini par le rapport de la puissance électromagnétique à la puissance absorbée, soit :

$$\theta = \frac{EI}{UI} = \frac{E}{U}.$$

Ce rendement peut aussi s'exprimer par le rapport des deux rendements précédents. En effet, on a successivement :

$$\theta = \frac{EI}{UI} = \frac{P_e}{P} = \frac{P_u}{P} \times \frac{P_e}{P_u}$$

ou finalement

$$\theta = \frac{\dfrac{P_u}{P}}{\dfrac{P_u}{P_e}} = \frac{\eta_i}{\eta_{io}}.$$

4° *Rendement à la jante des roues.* — Les rendements précédents η_i, η_{io} et θ se rapportent au moteur seul. En pratique de traction, on fait intervenir un autre rendement correspondant à la puissance ou, ce qui revient au même, à l'effort développé aux jantes des roues motrices. Il faut alors, en plus des pertes $p = EJ$ qui entrent dans le calcul de la puissance utile $P_u = UI - RI^2 - p$ tenir compte des pertes dues aux frottements dans les organes de transmission de l'effort moteur de l'arbre du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur à l'essieu moteur, transmission qui est constituée dans le cas le plus général, par un train d'engrenages : un pignon calé sur l'arbre du moteur et une roue dentée calée sur l'essieu moteur. Ce nouveau rendement que nous désignons par ρ est le *rendement à la jante des roues*. C'est en somme celui que l'on considère le plus souvent en pratique de traction.

5° Nous remarquerons encore qu'au point de vue *exploitation*, on considère encore le *rendement global de l'automotrice* ou de la *locomotive* défini par le rapport entre la puissance développée aux jantes des roues motrices et la puissance absorbée mesurée au point de contact de l'organe de prise de courant avec le conducteur d'amenée. Ce rendement est naturellement fonction du rendement ρ précédent, mais il dépend en outre du mode de couplage des moteurs, du mode de régulation de la vitesse, des organes mêmes de régulation, etc. Il y a enfin à considérer le *rendement total* depuis les barres omnibus de la centrale ou de la sous-station à la jante des roues motrices.

g) Autres expressions du couple utile, et remarques sur quelques-unes des formules précédentes. — 1° La notion des rendements va nous permettre de donner une autre expression du couple utile qui est d'un emploi fréquent et d'une application plus immédiate dans le calcul des caractéristiques électromécaniques du moteur que nous étudierons en détail plus loin.

Nous avons $$C_u = \frac{P_u}{2\pi n}.$$

Or, d'après la définition du rendement organique τ_i du moteur, on a :

$$P_u = \tau_i P = \tau_i UI$$

par suite

$$C_u = \tau_i \frac{UI}{2\pi n} \qquad \text{joules.} \tag{16}$$

expression que l'on peut d'ailleurs écrire *à priori*. Elle n'est en effet autre que *l'équation d'équivalence* entre la puissance utile produite $2\pi n\, C_u$ et la puissance absorbée UI, celle-ci étant affectée du coefficient de rendement τ_i. Cette équivalence donne en effet immédiatement :

$$2\pi n\, C_u = \tau_i\, UI$$

d'où, la valeur de C_u.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En kgms. on aurait :

$$(16') \qquad C_u = \frac{1}{9{,}81} \cdot \eta_i \frac{UI}{2\pi n}.$$

Si enfin on introduit, ce qui est la pratique habituelle, la vitesse en tours par minute n' :

$$n' = 60\, n.$$

On a : $$C_u = \frac{1}{9{,}81} \cdot \eta_i \frac{UI}{2\pi n'} \cdot 60 \qquad \text{kgms.}$$

soit très sensiblement, toutes réductions faites :

$$(17) \qquad C_u = \eta_i \frac{UI}{n'} \qquad \text{kgms.}$$

ce qui est la formule pratique d'un emploi très simple. Cette formule est très importante.

2° Nous avons d'autre part entre les couples utile et électromagnétique la relation :

$$C_u = \eta_{io}\, C_e,$$

c'est-à-dire en remplaçant C_e par sa valeur (12) ou (12').

$$C_u = \eta_{io} \frac{EI}{2\pi n} \qquad \text{joules}$$

ou $$C_u = \eta_{io} \frac{N\Phi I}{2\pi} \cdot 10^{-8} \qquad \text{joules}$$

ou encore $$C_u = \frac{1}{9{,}81} \cdot \eta_{io} \cdot \frac{N\Phi I}{2\pi} \cdot 10^{-8} \qquad \text{kgms.}$$

expression qui est de forme.

$$C_u = K.\, \eta_{io}\, \Phi\, I$$

K étant une constante du moteur. Si donc on néglige les variations de η_{io} aux différents régimes dans les limites ordinaires de fonctionnement du moteur on peut dire que :

Dans les conditions ordinaires de fonctionnement du moteur, le couple moteur utile est sensiblement proportionnel au courant et au flux inducteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme d'ailleurs, le flux inducteur, pour un inducteur donné ne dépend que du courant qui le traverse, il s'ensuit que :

Pour un moteur donné, le couple utile ne dépend que du courant absorbé.

D'autre part, suivant une remarque déjà faite à propos du couple électromagnétique, I étant maximum au démarrage, il en est de même du couple utile, ce qui constitue une propriété fondamentale au point de vue de l'emploi du moteur-série en traction. Théoriquement, le courant de démarrage, et par suite le couple, peut être aussi grand que l'on veut. Pratiquement, il faut prendre des précautions pour limiter ce courant à une valeur acceptable non dangereuse, ce sera par exemple au moyen de résistances intercalées dans le circuit du moteur et en série avec lui ainsi que nous le verrons ultérieurement.

3° Nous avons trouvé pour expressions du couple C_u les formules :

$$C_u = \eta_{io} \frac{EI}{2\pi n} \quad \text{et} \quad C_u = \eta_i \frac{UI}{2\pi n}.$$

Ces expressions sont nécessairement identiques par suite ;

$$\eta_{io} E = \eta_i U$$

ou :

$$\frac{\eta_i}{\eta_{io}} = \frac{E}{U}.$$

Ce rapport est ce que nous avons appelé le rendement électrique θ du moteur. On peut d'ailleurs arriver aussi à cette dernière expression par le calcul direct de η_i et η_{io} et en prenant leur rapport.

4° Enfin, nous remarquerons que l'expression

$$C_u = \eta_i \frac{UI}{n'}$$

permet de calculer le rendement η_i si on mesure directement le couple C_u au frein de Prony par exemple.

14. **Caractéristiques électro-mécaniques.** — Les équations ci-dessus déterminant la vitesse de rotation du moteur, son couple moteur et son rendement définissent complètement les conditions de fonctionnement d'un moteur-série quelconque.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On nomme *caractéristiques électromécaniques*, ou simplement caractéristiques d'un moteur, les courbes représentant les variations des trois grandeurs suivantes : vitesse n', couple utile C_u et rendement τ_i en fonction de l'intensité du courant absorbé. Ces courbes ont l'allure générale de celles représentées ci-après (fig. 10). On les complète souvent par les courbes accessoires des puissances absorbée et utile, lesquelles ont également été tracées sur la figure.

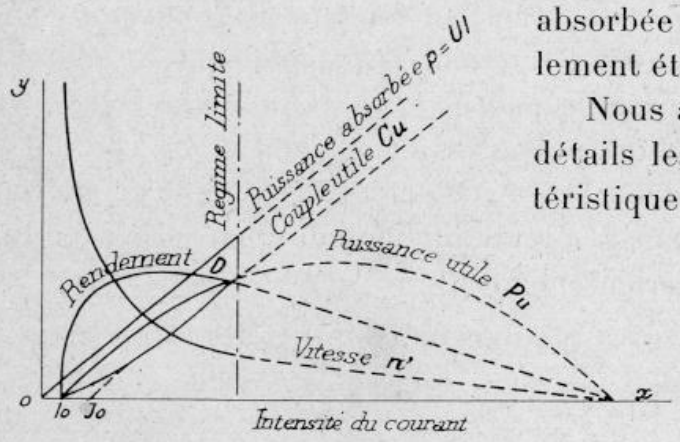


FIG. 10.

Caractéristiques d'un moteur excité en série en fonction du courant. Allure théorique générale.

Nous allons étudier avec quelques détails les propriétés des trois caractéristiques principales.

1° *Courbe du couple utile.* — Nous avons vu que pour un enroulement inducteur donné, le flux étant fonction seulement de l'intensité du courant, le couple ne dépend que de la valeur du courant; mais sa loi de variation en fonction du courant dépend dans une large mesure de la construction de la machine et de l'état de saturation plus ou moins grand des inducteurs.

Lorsque les inducteurs *ne sont pas saturés*, *le flux varie à peu près proportionnellement au courant*, et par suite, *le couple à peu près comme le carré du courant.*

En effet, nous avons vu que le couple C_u était de forme

$$C_u = K\, \tau_{io}\, \Phi\, I,$$

K étant une constante du moteur ($K = \frac{1}{9{,}81} \cdot \frac{N}{2n} \cdot 10^{-8}$). Si donc Φ est supposé proportionnel à I, C_u variera proportionnellement à I^2.

Ce résultat suppose toutefois encore que τ_{io} est constant. En réalité τ_{io} est fonction du courant J variable de compensation des pertes puisque

$$\tau_{io} = \frac{I - J}{I}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et la loi de variation du couple utile C_u est plus complexe : elle est de forme parabolique. Pour s'en rendre compte on remplacera τ_{i_0} par sa valeur dans l'expression de C_u, d'où

$$C_u = K\,(I - J)\,\Phi$$

et on calculera en fonction de Φ le courant J au moyen de la formule de définition

$$p = E\,J$$

dans laquelle on explicitera p et E au moyen des formules connues.

On obtiendra ainsi l'expression complète développée de C_u qui démontrera la proposition énoncée.

Nous nous bornons toutefois à indiquer le calcul, qui pratiquement, ne présente pas d'intérêt : la loi de variation du couple C_u suivant le carré du courant étant suffisamment approchée dans les limites où cette variation est à considérer.

Lorsque les *inducteurs sont saturés,* l'augmentation des fuites magnétiques avec le courant fait que l'accroissement de celui-ci ne modifie pas sensiblement le flux utile Φ et *le couple tend alors à varier à peu près porportionnellement au courant.*

En effet, en reprenant l'expression du couple

$$C_u = K\,\tau_{i_0}\,\Phi\,I,$$

on voit que si on suppose $\Phi = C^{te}$, C_u varie proportionnellement à I dans le même degré d'approximation que ci-dessus.

On voit ainsi par ce qui précède que la courbe du couple se confond rapidement, et ce, à partir du commencement de la saturation, avec une droite inclinée sur l'axe des I. L'abscisse à l'origine J_o (fig. 10) de cette droite représente le courant consommé par les pertes dues aux frottements et effets parasites, qui devient sensiblement constant à partir du commencement de la saturation.

En définitive, dans la formule générale (14) du couple utile

$$C_u = \frac{N\Phi}{2\pi}\,(I - J).\,10^{-8}$$

le courant variable J des pertes varie de I_o à J_o quand le courant absorbé I croit depuis sa valeur minima qui est I_o pour qu'il y ait mouvement. Il tend, lorsque le moteur tourne à vide, vers la valeur I_o, courant de marche

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à vide et abscisse à l'origine de la courbe du couple et dont nous avons déjà vu la signification, et il tend, lorsque le moteur tourne en charge, au-dessus de la saturation, vers la valeur J_o, abscisse à l'origine de la droite qui représente à partir de ce moment le couple utile C_u. De sorte qu'*au-dessus* de la saturation on peut écrire :

$$C_u = \frac{N\Phi}{2\pi}(I - J_o).\ 10^{-8},$$

tandis qu'*au-dessous* de la saturation on conservera la forme

$$C_u = \frac{N\Phi}{2\pi}(I - J).\ 10^{-8},$$

J variant de I_o à J_o.

2° *Courbe de la vitesse ou caractéristique en charge.* — La vitesse décroît quand l'intensité augmente. La courbe des vitesses a, en effet, la forme d'un arc d'hyberbole dont le coude plus ou moins accentué est dirigé vers l'origine. L'allure de cette courbe varie considérablement même pour des modifications qui semblent peu importantes des éléments de construction. En principe, la vitesse diminuera d'autant plus, quand l'intensité du courant augmentera, que le moteur sera moins vite saturé. Un moteur ayant peu de spires inductrices présente peu de stabilité d'allure et tend à s'emballer aux faibles charges. L'augmentation de la vitesse quand le courant tend vers sa valeur minima I_o de marche à vide (I_o n'est jamais nul) est très rapide. Pour réaliser une marche plus stable et réduire les variations d'allure, il est souvent bon de saturer les inducteurs pour une faible valeur du courant en mettant un grand nombre de spires dans l'enroulement. Toutefois, la section du fil peut devenir insuffisante aux fortes charges.

On a admis pendant longtemps qu'il fallait pour augmenter *la stabilité de marche* (1), saturer très rapidement les inducteurs et les faire travailler, par conséquent, autant que possible, au-dessus du coude de la caractéristique. Aujourd'hui, les constructeurs estiment, au contraire, qu'il faut n'atteindre la saturation qu'aux fortes charges, de façon à permettre, à variation égale du courant, un plus grand accroissement du couple moteur sur les rampes et aux démarrages.

(1) La question de la stabilité de marche sera examinée plus loin, § 17.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° *Courbe du rendement* η. — Le rendement augmente très rapidement quand le courant absorbé passe de 0 au 1/4 ou au 1/3 de l'intensité normale, puis décroît ensuite lentement tout en restant compris entre 80 et 90 pour 100 dans les limites ordinaires d'emploi.

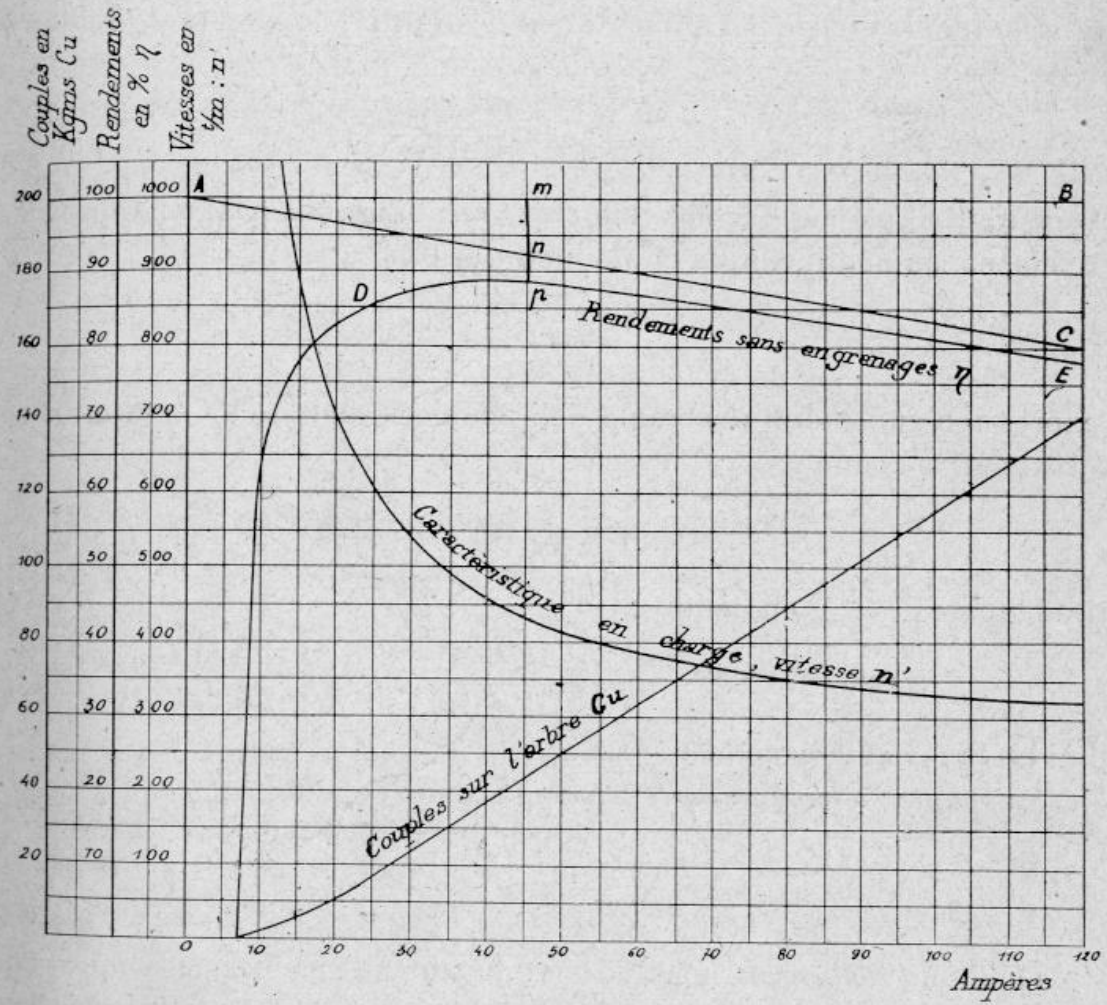


FIG. 11.

Caractéristiques sous 500 volts du moteur de tramway Thomson-Houston TH-2 de 40 chx.

Exemple. — Nous donnons à titre d'exemple (fig. 11), les caractéristiques principales sous 500 volts d'un moteur de tramway très répandu type TH-2 Thomson-Houston de 40 chevaux correspondant à un courant absorbé de 70 ampères. Nous avons en outre tracé sur cette figure la droite AC de coefficient angulaire $\left(-100\frac{R}{U}\right)$, représentant les pertes par effet Joule ainsi qu'il a été expliqué antérieurement (§ 13-*f*). Pour ce moteur particulier $R = 0{,}82$ ohm.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

15. **Influence d'une modification de la différence de potentiel aux bornes du moteur.** — Nous avons vu que la f. c. e. m. d'un moteur avait pour expression :

$$E = n N \Phi . 10^{-8} = U - RI.$$

Par suite, si la tension d'alimentation devient U', la vitesse deviendra n' telle que :

$$\frac{n}{n'} = \frac{E}{E'} = \frac{U - RI}{U' - RI}, \tag{18}$$

le courant et par suite le flux inducteur ne changeant pas; ou approximativement, en négligeant la chute ohmique RI :

$$\frac{n}{n'} = \frac{U}{U'},$$

expression qui traduit une règle déjà énoncée déduite de la formule approximative connue :

$$n = \frac{U}{N\Phi} \cdot 10^{8}.$$

De la formule (18), on déduit :

$$n' = n . \frac{U' - RI}{U - RI} \tag{18'}$$

qui est la formule exacte.

Le *couple moteur* ne *varie pas* en vertu de l'égalité

$$C_e = \frac{EI}{2\pi n} = \frac{1}{2\pi} \cdot N\Phi I . 10^{-8}.$$

Quant au *rendement* nous observerons d'une part que le couple étant constant, sous un courant I, la puissance mécanique recueillie varie dans le même rapport que la vitesse, c'est-à-dire dans le rapport $\frac{n}{n'}$ et que, d'autre part, la puissance dépensée étant UI dans le premier cas, U'I dans le deuxième, elle varie dans le rapport $\frac{U}{U'}$; les rendements sont donc dans le rapport :

$$\frac{\eta}{\eta'} = \frac{\frac{n}{n'}}{\frac{U}{U'}} = \frac{n}{n'} \times \frac{U'}{U} = \frac{U - RI}{U' - RI} \times \frac{U'}{U},$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou enfin : (19) $$\frac{\tau_1}{\tau_1'} = \frac{1 - \frac{RI}{U}}{1 - \frac{RI}{U'}},$$

c'est-à-dire qu'ils décroissent avec U′ et d'autant plus vite que la charge est plus forte.

Ainsi, *pour passer d'une tension d'alimentation* U *à une tension d'alimentation* U′, il suffit de *multiplier* les *ordonnées de la courbe des vitesses correspondant à* U *par le rapport* $\frac{U' - RI}{U - RI}$ et *celles de la courbe de rendement par le rapport :* $\frac{1 - \frac{RI}{U'}}{1 - \frac{RI}{U}}$.

Remarquons que dans le degré d'approximation de la formule

$$\frac{n}{n'} = \frac{U}{U'}$$

on a nécessairement : $\tau_1' = \tau_1$.

Nous avons appliqué les formules exactes précédentes 18′ et 19 au calcul des courbes de la vitesse et du rendement sous 250 volts (fig. 12) du moteur des caractéristiques tracées sous 500 volts de la figure 11. Nous avons d'ailleurs reproduit ici ces dernières pour comparaison.

On voit par l'examen de ces courbes quel serait le degré d'approximation que l'on obtiendrait si on négligeait la chute ohmique RI en employant les formules approximatives.

Il est essentiel de remarquer que les vitesses et les rendements sont d'autant plus modifiés que la charge et que la résistance intérieure du moteur sont plus grandes. L'emploi des formules simplifiées n'est donc réellement légitime qu'aux faibles charges.

Les propriétés précédentes reçoivent une application importante dans le couplage *série-parallèle* de deux moteurs que nous étudierons plus loin. Dans ce cas, en effet, si l'on a $U = 500$ volts, on a $U' = \frac{500}{2} = 250$ volts. Chaque moteur est sous $U' = 250$ volts lorsque les deux moteurs sont en série et sous $U = 500$ volts lorsqu'ils sont en parallèle. Dans une première

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

approximation, si on néglige les termes soustractifs RI, on a alors comme rapport des vitesses celui des tensions qui est 2.

Dans ces conditions, nous voyons que pour un équipement à deux moteurs par exemple, lorsqu'on passe du couplage série au couplage parallèle, la vitesse passe approximativement du simple au double. Ce résultat est à retenir.

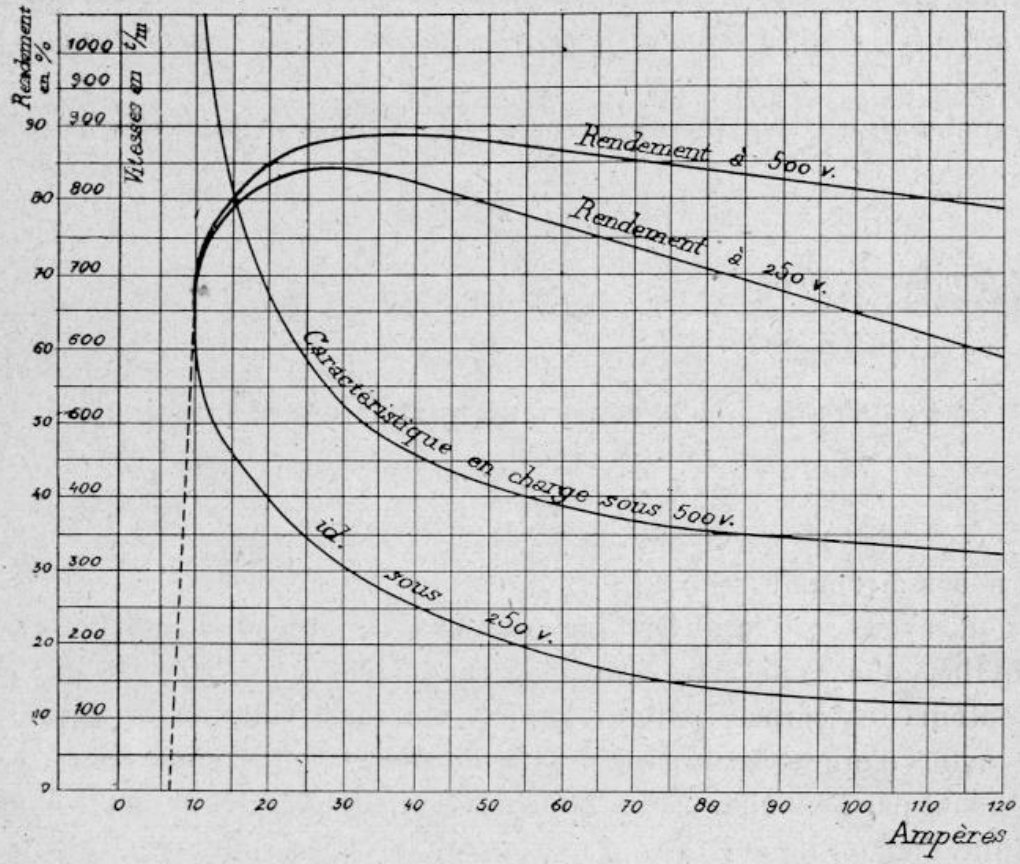


FIG. 12.

Courbe des vitesses et des rendements sous 500 et 250 v. du moteur Thomson-Houston de 40 chx de la figure 11.

16. **Influence d'une modification de l'enroulement induit.** — Nous venons de voir l'effet d'une modification du circuit magnétique inducteur sur la vitesse et le couple d'un moteur. On peut modifier considérablement les propriétés du moteur en agissant sur le nombre de spires de l'enroulement induit, c'est ce que montre la formule connue :

$$n = \frac{U - RI + e}{N\Phi_0} \cdot 10^8.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons que l'on remplace un bobinage d'induit à N génératrices périphériques de résistance totale r par un bobinage à N' génératrices de résistance totale r' (en supposant $N' > N$, en général $r' > \frac{N'}{N} \cdot r$) ; la résistance des inducteurs étant la même dans les deux cas, soit r_i, les résistances totales intérieures du moteur seront respectivement

$$R = r + r_i \quad \text{et} \quad R' = r' + r_i$$

et la vitssse sera, pour l'induit à N' génératrices et pour la même valeur du courant absorbé :

$$n' = \frac{U - R'I + e'}{N'\Phi_0} \cdot 10^8.$$

en supposant une disposition invariable du circuit inducteur de telle sorte que Φ_0 est le même. On a donc, en toute rigueur :

$$\frac{n}{n'} = \frac{N'}{N} \cdot \frac{U - RI + e}{U - R'I + e'}$$

ou sensiblement, en négligeant les termes RI et e qui sont suffisamment petits et en outre de signes contraires, et de même R'I et e' :

$$\frac{n}{n'} = \frac{N'}{N},$$

ce qui montre que : *la vitesse varie sensiblement en raison inverse du nombre des spires.*

En toute rigueur, $\frac{n}{n'} \neq \frac{N'}{N}$ et d'autant plus qu'il s'agit de plus fortes charges.

Quant au *couple utile* C_u sur l'arbre, il *varie en raison directe* du nombre des spires, pour une même valeur du courant.

En effet, nous avons vu que :

$$C_u = \frac{EI - p}{2\pi n}.$$

ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHEQUE CONSERVATOIRE

Or, $$E = nN\Phi_0 10^{-8} - e.$$

Donc : $$C_u = \frac{1}{2\pi}\left(N\Phi_0 I. 10^{-8} - \frac{e}{n} I - \frac{p}{n}\right)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et par suite :

$$\frac{C_u}{C'_u} = \frac{N\Phi_o\, I.\, 10^{-8} - \frac{e}{n} I - \frac{p}{n}}{N'\Phi_o\, I.\, 10^{-8} - \frac{e'}{n'} I - \frac{p'}{n'}},$$

d'où approximativement, en négligeant les termes soustractifs :

$$\frac{C_u}{C'_u} = \frac{N}{N'} \qquad (20)$$

C. Q. F. D.

On a par suite dans les mêmes conditions :

$$\frac{C_u}{C'_u} = \frac{n'}{n}.$$

Enfin, le rendement η *ne varie pas* dans les conditions d'approximation où nous sommes placés.

En effet, la puissance utile

$$P_u = 2\pi n C_u$$

ne change pas puisque le rapport

$$\frac{n C_u}{n' C'_u}$$

qui représenterait ses variations est égal à l'unité. Or il en est de même (rigoureusement) de la puissance absorbée UI. Les rendements étant dans le rapport des variations de ces puissances sont donc égaux.

En réalité, à cause des pertes par effet Joule, qui sont plus importantes dans l'enroulement à N′ spires ($N' > N$), le rendement diminue quand le nombre de spires augmente et il s'en suit que le couple utile C'_u est plus petit que ne l'indique l'équation (20) précédente ; c'est-à-dire

$$\frac{C_u}{C'_u} > \frac{N}{N'}.$$

Nous ajouterons qu'en réalité le rendement baisse plus rapidement aux fortes charges, toutes choses égales d'ailleurs, pour un moteur à vitesse modérée, c'est-à-dire à plus grand nombre de spires par section de l'induit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

17. Stabilité de marche. Caractéristique mécanique. — Pour que la marche d'un moteur soit stable (1), il faut, suivant les conditions ordinaires de l'équilibre, que tout écart de régime fasse naître une action opposée à celle qui l'a produite ; il faut donc, si l'on suppose l'effort de traction indépendant de la vitesse, que le couple moteur aille en diminuant quand la vitesse augmente, et inversement. Plus la variation de couple produite par une variation de vitesse donnée sera plus grande, plus le régime sera stable.

Pour interpréter graphiquement ce qui précède, construisons la *caractéristique mécanique* du moteur, qui est la courbe représentant directement les couples en fonction des vitesses. Analytiquement, cette courbe est définie par exemple par les deux équations connues (§. 13. *c* et *g*) :

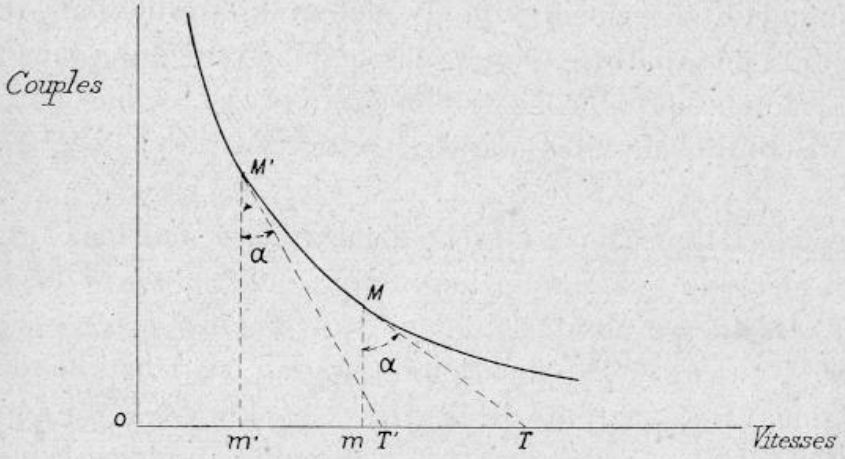


FIG. 13.

Caractéristique mécanique.

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi} \cdot 10^8$$

$$C_u = \eta_{10} \cdot \frac{N\Phi}{2\pi} \cdot I \cdot 10^{-8}$$

entre lesquelles on élimine I. On obtient une courbe ayant la forme de celle représentée sur la figure 13.

(1) BLONDEL et DUBOIS, *la Traction électrique sur voies ferrées*, t. II, p. 75.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La règle ci-dessus se traduit par la condition que la courbe précédente présente une chute rapide dans le sens des vitesses croissantes. Or, la stabilité est définie par le rapport $\frac{dc}{dv}$ et l'on a sur la figure

$$\frac{dc}{dv} = \frac{1}{tg\alpha} = \frac{Mm}{mT'},$$

ce qui montre que la stabilité de marche est plus grande en M' qu'en M.

Nous avons vu d'autre part (§ 14-2e) quelle était l'influence de la saturation des inducteurs sur la stabilité de marche : nous n'y reviendrons pas autrement.

Pratiquement, on peut dire que le moteur est stable dans des limites assez étendues de la vitesse. Nous verrons plus tard que, dans cet ordre d'idées, le moteur asynchrone triphasé ne présente une marche stable que dans des limites de vitesse assez étroites.

18. **Caractéristiques de la marche d'une voiture motrice.** — Les caractéristiques électro-mécaniques d'un moteur qui traduisent les variations de la vitesse n' du couple utile C_u et du rendement η sont plus généralement tracées, en vue de l'application du moteur à la traction, pour donner immédiatement les variations de la vitesse en km/h. V du véhicule, de l'effort en kgs, F développé aux jantes des roues motrices et du rendement du moteur ρ évalué aux jantes de ces roues. Sous cette forme, les courbes définissent directement les conditions de la marche du véhicule.

Ces dernières courbes, appelées par extension caractéristiques du moteur, se déduisent des premières de la façon suivante.

Nous supposerons le cas général d'un moteur entraînant l'essieu au moyen d'un train d'engrenages.

Soient alors :

$\frac{1}{m}$ le coefficient de réduction, c'est-à-dire rapport du nombre de dents du pignon à celui de la roue d'engrenages ;

d, le diamètre en mètres, des roues motrices.

1° *Courbe des vitesses en Km/h. V.* — Pour construire cette courbe il suffit d'appliquer la formule évidente de conversion :

$$(21) \qquad V = \frac{60\, n'\pi d}{1000\, m} = 0.1885 \frac{d}{m} n'$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans laquelle les valeurs de n' sont données par la caractéristique en charge du moteur. n' est la vitesse du moteur en t/m.

2° *Courbe du rendement à la jante* ρ. — Pour obtenir la courbe du rendement ρ avec engrenages, on portera (fig. 14) au-dessous de la courbe CD supposée connue du rendement (η_1), les pertes mécaniques dues aux engrenages et exprimées en 0/0 de la puissance absorbée. La courbe obtenue EK est évidemment la courbe du rendement avec engrenages ρ.

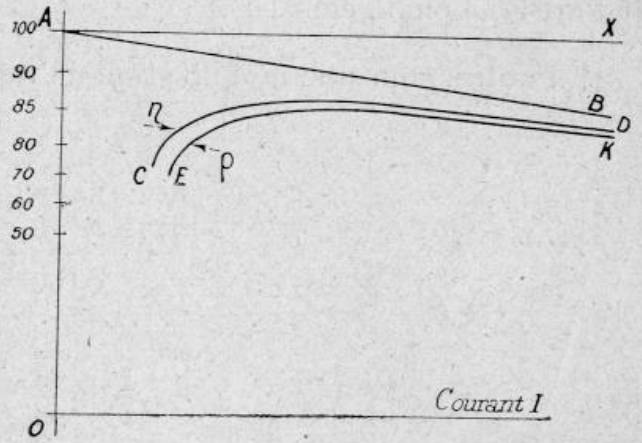


FIG. 14.

3° *Courbe des efforts à la jante, en kgs* F. — On calculera ensuite la courbe des efforts à la jante des roues motrices en appliquant une règle déjà donnée, savoir : écrire l'équation d'équivalence entre la puissance absorbée au bornes du moteur et celle développée à la jante :

$$F\frac{V}{3,6}=\rho UI\frac{1}{9,81}$$

d'où

$$(22)\qquad F=\rho\frac{UI}{V}\frac{3,6}{9,81}=0,3672\,\rho\frac{UI}{V}.$$

dans laquelle V et ρ résultent des calculs ci-dessus. Quant à U, il est constant. On peut donc calculer F pour chaque valeur de I.

Nous avons appliqué les formules précédentes au calcul des caractéristiques de la figure 15 déduites des courbes de la figure 11 du moteur Thomson-Houston TH. 2 de 40 chevaux.

19. **Remarques sur les formules de conversion des caractéristiques.** — Pour une variation de la tension aux bornes du moteur, on a évidemment comme précédemment :

$$\frac{V}{V'}=\frac{n}{n'}=\frac{U-RI}{U'-RI}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et
$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{\eta_1}{\eta_1'} = \frac{1 - \frac{RI}{U}}{1 - \frac{RI}{U'}},$$

l'effort F ne changeant pas.

En outre, pour une modification du rapport de réduction $\frac{1}{m}$ on aura :

$$\frac{V}{V'} = \frac{\frac{1}{m}}{\frac{1}{m'}} = \frac{m'}{m}$$

et
$$\frac{F}{F'} = \frac{m}{m'}$$

de sorte que le produit FV qui exprime la puissance développée aux jantes ne change pas, ce qui est bien évident.

Quant à l'influence d'une modification du bobinage de l'induit, les conclusions vues précédemment (§ 16) s'appliquent évidemment ici et nous ne faisons que les rappeler pour mémoire.

20. **Remarque sur l'effort théorique et l'effort réel à la jante.** — Etant donnée la valeur du couple utile C_u développé sur l'arbre, s'il n'y avait pas de pertes dans les engrenages ou plus généralement dans les organes de la transmission de l'effort, on aurait évidemment d'après le théorème des moments :

$$F_1 \frac{d}{2} = C_u m,$$

F_1 étant l'*effort théorique* développé à la jante des roues de diamètre d.

On en déduit :

$$(23) \qquad F_1 = \frac{2 C_u m}{d}.$$

Si l'on voulait calculer *l'effort réel* d'après cette méthode, il faudrait faire intervenir un petit couple variable C_o qui correspondrait précisément aux pertes dans les engrenages et qui ne serait autre que la valeur du couple à développer pour vaincre ces pertes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C_o correspond, en somme, à la différence des rendements ρ et η et l'on aurait :

$$F = \frac{2\,m\,(C_u - C_o)}{d}$$

Cette formule ne se prête pas bien au calcul étant donné l'indétermi-

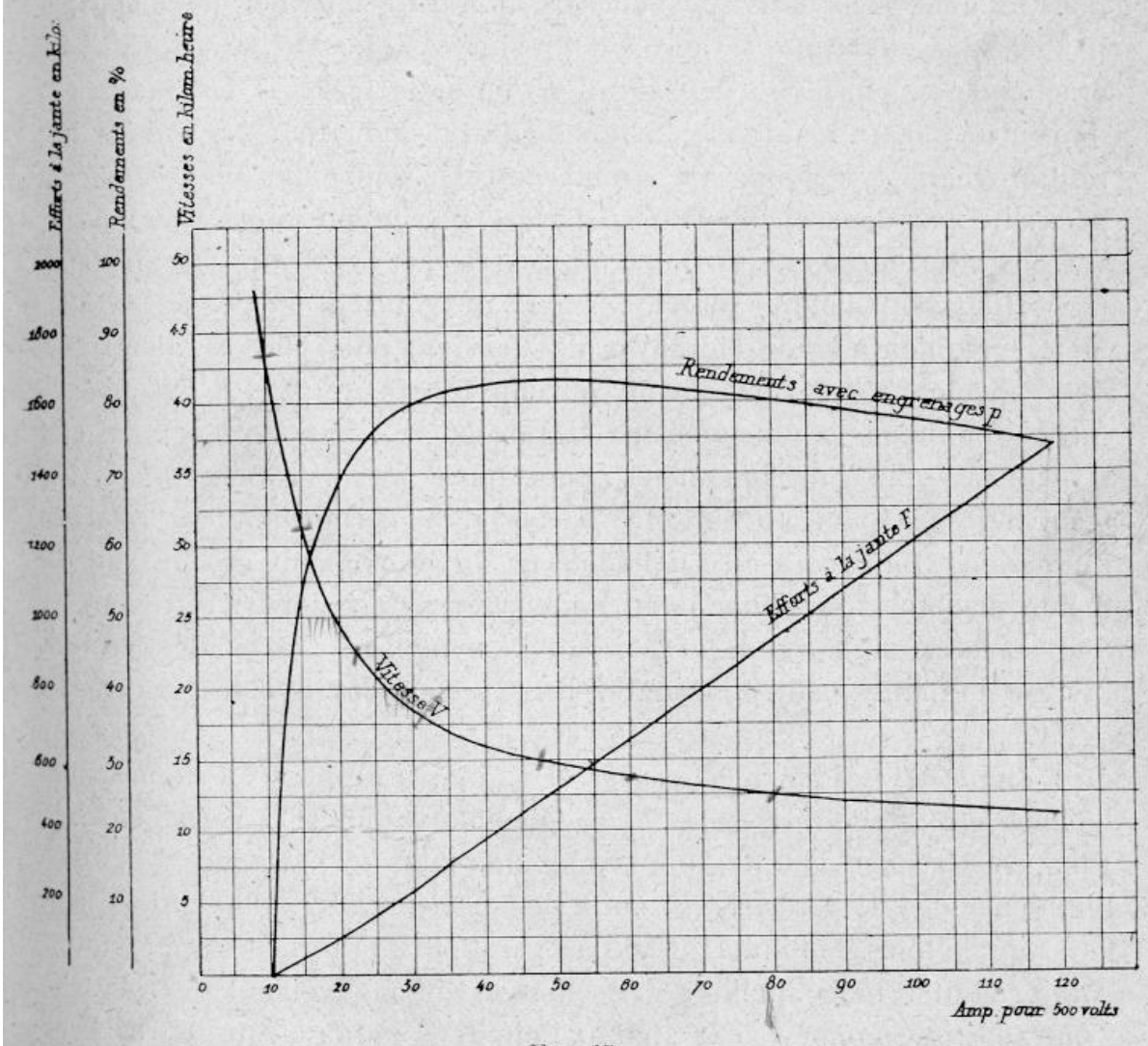


FIG. 15.

Caractéristiques de la marche d'une voiture équipée avec un moteur de 40 chevaux, type Thomson-Houston TH-2, 500 volts.

nation de C_o, aussi il est préférable d'employer pour calculer F la formule (22).

Ainsi il faut bien comprendre que l'équation (23) ne donne la valeur de l'effort à la jante que pour une transmission sans pertes : ce serait, par exemple, le cas d'un moteur à attaque directe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

21. Calage des balais. Moteurs à pôles de commutation. — La formule

$$U = E + RI$$

n'est *rigoureusement vraie que si les balais sont calés sur la ligne neutre*, ce qui a lieu en pratique, car un moteur de traction doit pouvoir tourner dans les deux sens sans que l'on soit obligé de modifier le calage des balais, manœuvre qui serait d'ailleurs impossible. Or, afin d'éviter des crachements, cause de détérioration du collecteur, il est nécessaire d'avoir un champ résultant constant (induit et inducteur), ce qui conduit pratiquement à adopter un grand entrefer. outre que ceci est encore nécessité par des considérations d'ordre mécanique ainsi que nous le verrons ultérieurement. On a pu ainsi arriver à construire des moteurs très satisfaisants comme marche, jusqu'à des tensions de 600 à 800 volts. Mais, lorsqu'on a voulu employer des tensions plus élevées, l'entretien des collecteurs est rapidement devenu fort onéreux et le fonctionnement du moteur n'a plus été satisfaisant.

On sait que théoriquement, pour une dynamo fonctionnant en *génératrice* les balais doivent être décalés d'un certain angle α_g *en avant* du plan neutre, c'est-à-dire dans le sens du mouvement et que pour la même machine fonctionnant en moteur les balais doivent être décalés d'un certain angle α_m *en arrière* du plan neutre, c'est-à-dire en sens inverse du mouvement. Les angles α_g et α_m augmentent d'ailleurs avec le débit.

L'angle α_m (moteur) n'est pas symétrique par rapport au plan neutre de l'angle α_g (génératrice) $\alpha_m < \alpha_g$. L'explication est assez complexe. Pour nous rendre compte du phénomène, nous n'envisagerons ici que l'influence de l'hystérésis. Par suite de ce phénomène, l'induction dans le noyau de tôles de l'induit n'est pas parallèle à la ligne des pôles qui y sont produits, mais inclinée dans le sens du mouvement de rotation. Tout se passe comme si le champ inducteur entier avait tourné d'un angle ε dans le sens du mouvement. Cet angle ε correspond en somme au retard d'aimentation du noyau. Les angles ε et α_g ou α_m peuvent d'ailleurs être du même ordre de grandeur.

Lorsque la dynamo fonctionne comme génératrice, les balais étant calés en avant, le calage apparent des balais est augmenté du fait seul de l'hystérésis, tandis que dans le moteur où les balais sont calés en arrière le calage apparent est diminué. On a donc bien $\alpha_g > \alpha_m$. On conçoit alors qu'en donnant à l'induction dans le noyau une valeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

suffisamment élevée (jointe à un grand entrefer) on puisse arriver pour les moteurs à presque annuler le décalage apparent. Effectivement, cette condition a pu être réalisée mais au détriment du rendement.

Ce qui précède montre, en passant, que pour une même machine, la marche sans étincelles est plus facile à obtenir lorsqu'elle fonctionne comme moteur que lorsqu'elle fonctionne comme génératrice.

En tenant compte du décalage des balais, la formule (24) prend la forme (1)

$$E - U = RI + K_g \alpha_g I$$

pour la génératrice et

$$U - E = RI + K_m \alpha_m I$$

pour le moteur, K_g et K_m étant dans les deux cas des quantités dépendant des données de la machine : réluctance du circuit magnétique, vitesse de rotation et nombre de conducteurs périphériques.

Les différences constituant les premiers membres de ces équations représentent dans chaque cas la réaction totale d'induit.

Les angles α_g et α_m augmentent ainsi qu'il a été dit avec le débit.

C'est donc seulement dans le cas d'un décalage nul que l'on a réellement pour le cas qui nous occupe (moteurs) :

$$U - E = RI$$

ou

$$U = E + RI$$

On peut, par différents moyens, arriver à réaliser ce résultat : $\alpha_m = o$ (décalage nul).

L'emploi des *pôles supplémentaires* ou *pôles de commutation*, proposé dès 1889 par M. Picou pour certains moteurs et appliqué par MM. Sautter et Harlé, donne une solution complète du problème.

La méthode consiste à intercaler entre les inducteurs principaux sur les lignes neutres, des inducteurs auxiliaires excités *en série avec le courant total* et ayant le signe des pôles qui les suivent dans le sens du mouvement. Ces pôles émettront un flux dirigé en sens inverse de celui du courant de l'induit et il se développera au moment de la commutation dans chaque section mise en court circuit par un balai, une force électromotrice dite de renversement croissant d'ailleurs avec le courant total,

(1) *Leçons d'Électrotechnique générale*, par P. Janet, tome I, deuxième édition, page 273.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et qui, si le nombre de spires est convenablement choisi, annulera la *f. é. m.* de self-induction dans la section ci-dessus et donnera le même résultat qu'un décalage des balais qui produit précisément cette *f. é. m.* de renversement nécessaire. Les balais pourront alors être invariablement calés dans le plan neutre, et ce, *à toute charge*.

En résumé, *les pôles de commutation permettent de laisser les balais calés rigoureusement dans le plan neutre à tout régime*.

L'emploi, en traction, des pôles de commutation s'impose pour des tensions élevées et se généralise pour des tensions ordinaires pour des moteurs à partir de 40 à 50 chevaux environ.

22. **Puissance nominale d'un moteur de traction. Régime uni-horaire. Régime de 10 heures.** — Les moteurs de traction (courant continu ou courants alternatifs) entrent dans la catégorie des machines à *service intermittent* (Congrès de Milan 1906) et comme tels, il est logique de définir la puissance d'un tel moteur par la puissance intermittente pour laquelle il a été étudié électriquement et mécaniquement.

On a adopté universellement, en principe, comme définition de la puissance d'un moteur de traction, la définition américaine basée sur un essai *au régime d'une heure* sous la tension normale de service, d'où le nom de *puissance au régime d'une heure* ou *puissance unihoraire* ou encore simplement mais moins correctement *puissance horaire*.

On convient d'appeler *puissance d'un moteur de traction ou plus exactement puissance unihoraire, la puissance que ce moteur est capable de développer au banc d'essai pendant un essai ininterrompu d'une heure sous la tension normale de service, sans que l'échauffement, c'est-à-dire l'élévation de température, d'une quelconque de ses parties dépasse une certaine valeur, généralement 75°, la température ambiante étant au plus égale à 25°, le moteur étant à l'origine à la température ambiante*.

La puissance unihoraire ainsi définie est la *puissance normale* ou encore *nominale* du moteur.

On envisage aussi quelquefois une autre sorte de puissance : la *puissance permanente* ou *continue* qui est la puissance que peut développer le moteur dans les conditions ci-dessus, sauf que la durée de l'essai est de *10 heures consécutives*. On peut, en général, admettre qu'après un tel essai le moteur a atteint sa température de régime, mais ceci est loin d'être absolu.

Il est encore une clause qu'il est bon de spécifier à propos de la façon

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

suivant laquelle l'un ou l'autre des essais de définition ci-dessus doit être conduit ; clause précisant si pendant la durée de l'essai le moteur doit être ouvert ou complètement clos. Cette clause est, à tort, souvent omise, car ces deux manières d'effectuer les essais conduisent à des résultats qui peuvent très sensiblement différer, ce que l'on comprend bien puisque la conséquence d'avoir les portes ouvertes est de créer une certaine ventilation dans le moteur diminuant son échauffement pour un régime déterminé et conduisant, par suite, pour un même échauffement, à une valeur plus grande pour sa puissance, toutes les autres conditions de l'essai restant d'ailleurs égales.

Il serait évidemment à souhaiter que l'on adoptât une seule manière de voir pour les comparaisons, quelle qu'elle soit, d'ailleurs, puisqu'il ne s'agit là que d'une définition.

En Amérique, d'où vient la conception de la puissance au régime horaire, on fait, d'après la General Electric Co, les essais, portes de visite ouvertes (covers off.).

La valeur numérique de la puissance horaire d'un moteur est, en général, comprise entre 2,5 fois et 3 fois celle de sa puissance continue pour la même tension de service, les deux essais étant naturellement conduits de la même façon et basés sur le même échauffement soit 75°.

23. **Application des définitions de la puissance d'un moteur à l'étude d'un projet de traction.** — Ayant, dans un avant-projet de traction, déterminé par le calcul le *travail moyen* à produire aux jantes des roues motrices d'après l'évaluation des résistances à vaincre (paliers et alignements, rampes, courbes, démarrages) selon le profil de la ligne pour faire effectuer à un train donné, à pleine charge, un trajet complet aller et retour, on en déduit, étant donné la *vitesse commerciale* à réaliser sur le dit parcours complet, la *puissance totale moyenne continue* en chevaux à demander aux moteurs et on multiplie le nombre trouvé par un coefficient qui pourra, en général, être pris entre 2, 5 et 3. Il y a là une question d'appréciation suivant que le service est plus ou moins chargé et suivant le genre de moteur envisagé, pour avoir la *puissance totale unihoraire* des moteurs de la ou des automotrices du train. En divisant cette puissance par le nombre des moteurs que l'on se propose d'employer, on en déduit la *puissance unihoraire* ou *nominale individuelle des moteurs*.

Pour bien faire comprendre ce qui précède, supposons par exemple que le trajet aller et retour d'un développement total de 150 Kms sur un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

profil déterminé d'un tracé donné, exige de produire un travail total de 3.840.000 kilogrammètres *rapporté à la tonne et évalué aux jantes*. Ce travail étant, pour fixer les idées, réparti ainsi :

Portions en palier	1.224.000 kgms.
Déclivités et courbes.....	2.376.000 —
Démarrages.....	240.000 —
Total	3.840.000 kgms.

Le total ci-dessus donne 25.600 kgms par tonne-kilomètre.

Si la vitesse commerciale pour le trajet aller et retour considérée est 20 km/h, la *puissance moyenne* continue par *tonne* à développer aux jantes est de

$$\frac{1}{1.000} \times 25.600 \times \frac{20.000}{3.600} = 142 \text{ kgms. sec.}$$

ou :

$$\frac{142}{75} = 1{,}9 \text{ cheval.}$$

Les trains étant supposés de 40 tonnes à pleine charge, cela conduit à une puissance continue totale moyenne nécessaire de

$$1{,}9 \times 40 = 76 \text{ chevaux.}$$

En supposant que les conditions du service et le type de moteurs envisagé justifient l'emploi du coefficient inférieur 2, 5, on conclut que la puissance totale unihoraire des moteurs devra être de :

$$76 \times 2{,}5 = 190 \text{ chevaux.}$$

En admettant que les trains soient formés d'une automotrice à bogies et de remorques, nous arrivons au résultat suivant dans l'hypothèse où l'on veut que tous les essieux soient moteurs.

Il faudra des automotrices à quatre moteurs de $\frac{190}{4} = 47{,}5$ chevaux chaque. On prendra finalement des moteurs de 50 chevaux environ.

Il sera ensuite nécessaire de vérifier, d'après les caractéristiques des moteurs choisis que les efforts maxima à produire aux démarrages et aux points les plus durs du parcours sont compatibles avec les moteurs en question. De même, pour les différentes vitesses maxima en rampe et en palier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est bien entendu toutefois que le calcul précédent qui conduit en pratique à des conclusions suffisamment exactes dans beaucoup de cas : réseau de tramways, par exemple, où les conditions de marche, horaire, etc.... sont assez imprécises (c'est d'ailleurs la seule méthode possible pour un réseau un peu étendu), doit être complété par une étude plus exacte (1), calcul ou procédé graphique, s'il s'agit d'un chemin de fer métropolitain, par exemple, où les conditions de fonctionnement sont bien connues et déterminées, ou s'il s'agit, pour un cas quelconque, d'une section du parcours que l'on veuille étudier en détail. Ce calcul plus exact conduit, comme on sait, à la prédétermination du courant moyen d'échauffement

$$I_m = \int I^2 \, dt$$

du moteur. C'est, en effet, l'échauffement du moteur qui limite la puissance vraie qu'il peut développer dans un temps donné.

Il est bon de noter ici que l'échauffement du moteur est en réalité fonction non seulement du courant moyen :

$$I_m = \int I^2 \, dt$$

ou plus exactement fonction de la puissance :

$$W_1 = \int RI^2 \, dt \qquad \text{(en watts)}$$

mais aussi des pertes mécaniques de forme :

$$W_2 = \int A \, n \, dt$$

et des pertes dans le noyau de forme :

$$W_3 = \int (Bn \, \Phi^{1.6} + Dn^2 \, \Phi^2) \, dt$$

de sorte que le calcul complet comporte en réalité la prédétermination des pertes totales en watts,

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

lorsque le moteur est établi, pour se rendre compte s'il peut assurer le service envisagé, sa puissance continue réelle ou effective dépendant de la quantité de chaleur, c'est-à-dire du nombre de watts qu'il peut dissiper

(1) *Revue Électrique*, 15 septembre 1909 et 30 décembre 1909. "Etude du mouvement d'un train", par l'Auteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par radiation, conductibilité et convection pour un échauffement donné en degrés. A ce propos, il faut observer que l'échauffement de 75° pris comme base pour la définition de la puissance horaire d'un moteur, puissance déterminée en plate-forme serait certainement exagérée en service réel pour un service continu. L'échauffement considéré ci-dessus et qui correspond à un service réel, sera, par suite, pris plus petit que 75°.

Cette question de la puissance des moteurs est intimement liée à celle des essais que nous étudierons plus loin, et il importe de bien se pénétrer de sa nature pour comprendre la *signification* et le *but pratique* des essais tels qu'il sont à peu près universellement conduits.

Il est utile de faire remarquer qu'en dehors de la question d'échauffement d'un moteur, d'autres circonstances peuvent influer sur la valeur vraie de sa puissance et la faire majorer ou diminuer suivant le cas. Il y a principalement la question de la commutation qui est très importante. On pourra demander une puissance plus grande à un moteur commutant bien qu'à un moteur commutant mal. La recherche d'une bonne commutation prime même celle d'un bon rendement. Le rendement d'un moteur de traction est d'ailleurs relativement peu élevé, soit entre 0,85 et 0,88 en général, engrenages non compris.

24. **Puissance continue de même échauffement** (1). — Etant donné le régime réel de fonctionnement d'un moteur donné et qui est un régime intermittent, on peut se rendre compte simplement de la manière suivante de ce qu'est la puissance continue, équivalente, au point de vue de l'échauffement du moteur, à la puissance vraie intermittente qu'il doit développer. La puissance intermittente qu'un moteur de traction doit développer en service réel peut se chiffrer de la manière suivante, à titre d'exemple :

50	chevaux	pendant	10	secondes	accélération
40	—	—	2	—	—
30	—	—	6	—	—
20	—	—	20	—	—
15	—	—	60	—	—
0	—	—	20	—	freinage
0	—	—	10	—	arrêt

soit un cycle complet en 128 secondes.

(1) *Revue Électrique*, 14 juillet 1911. "Puissance nominale d'un moteur de traction", par l'Auteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'énergie à développer est ainsi :

$$\begin{aligned} 50 \times 10 &= 500 \text{ chevaux secondes} \\ 40 \times 2 &= 80 \quad — \quad — \\ 30 \times 6 &= 180 \quad — \quad — \\ 20 \times 20 &= 400 \quad — \quad — \\ 15 \times 60 &= 900 \quad — \quad — \end{aligned}$$

Soit un total de 2.060 chevaux secondes et par suite une puissance moyenne de

$$\frac{2060}{128} = 16{,}1 \text{ chevaux pour un cycle entier.}$$

Cette puissance n'est pas celle qu'il faut considérer si l'on veut étudier les conditions d'échauffement du moteur. En effet, le courant constant I_m de même échauffement, c'est-à-dire celui qui produit les mêmes pertes par effets Joule RI^2 est égal à la racine carrée de la somme des carrés des courants absorbés à chaque instant, soit :

$$I_m = \sqrt{\frac{\int I^2 dt}{T}},$$

T, étant la durée d'un cycle, arrêts compris.

Les puissances étant proportionnelles aux intensités (alimentation sous tension constante), nous considérons les puissances au lieu des intensités et formons les quantités suivantes :

$$\begin{aligned} 50^2 \times 10 &= 25.000 \\ 40^2 \times 2 &= 3.200 \\ 30^2 \times 6 &= 5.400 \\ 20^2 \times 20 &= 8.000 \\ 15^2 \times 60 &= 15.500 \end{aligned}$$

Le total est..... 57.100

Il est de la forme :

$$\Sigma \left(\overline{HP}^2 \, dt \right) ;$$

on en déduit $(HP)_m$ correspondant à I_m

$$(HP)_m = \sqrt{\frac{\int \overline{HP}^2 \, dt}{T}} = 21{,}1 \text{ chevaux.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Observant que le moteur a été sous courant pendant 98 secondes sur les 128, durée du cycle, c'est-à-dire pendant 76 °/₀ environ de la durée de ce cycle, on peut en conclure approximativement que la capacité continue du moteur sera *un courant* qui correspond à 21,1 chevaux mesurés au voltage normal de service et *une tension* appliquée qui est 76°/₀ environ du voltage normal. Ceci est seulement approximatif, mais montre bien que l'on peut déterminer un courant et un voltage qui, appliqués continuellement, produisent les mêmes pertes et échauffements que ceux qui se produisent le moteur étant en service réel.

L'étude électrique et mécanique d'un moteur doit être faite en considérant le service intermittent réel du moteur, tenant compte de la puissance maxima à développer et éventuellement de la puissance moyenne continue, s'il y en a une.

Remarquons que les pertes dans le cuivre croissent comme le carré du courant absorbé par le moteur, tandis que les pertes dans le fer restent pratiquement constantes. Si alors, un moteur prévu pour un service continu est mis en fonctionnement sous un régime intermittent, les pertes dans le cuivre deviennent très élevées et un moteur meilleur s'échauffant moins aurait pu être obtenu pour les mêmes poids et prix s'il avait été étudié en vue du service intermittent.

Un moteur étudié en vue d'un régime continu a ordinairement et comparativement une proportion assez faible de fer et un assez grand nombre de spires de cuivre. Un moteur, pour un service intermittent, aura beaucoup plus de fer et un petit nombre de spires de cuivre d'assez grosse section.

25. **Puissance unihoraire d'un moteur et puissance absorbée au démarrage.** — La puissance maxima demandée à un moteur pendant la période de démarrage est en principe égale à sa puissance unihoraire ou tout au moins voisine de celle-ci. A cette valeur de la puissance correspondent un certain courant, un certain effort et une certaine vitesse, quantités qui définissent complètement le fonctionnement du moteur au régime considéré.

26. **Poids moyen des moteurs de traction.** — Les tableaux suivants donnent, à titre d'indication, les poids moyens et vitesses approximatifs des moteurs de traction les plus employés :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

I. — Moteurs pour voies étroites

(inférieures à 1 mètre).

PUISSANCE HORAIRE	VITESSE EN T/M	POIDS DU MOTEUR SEUL EN KGS.
5-7 chevaux	700	200
10-15 —	500-450	400
20 —	400	600
35 —	500	900

II. — Moteurs pour voie de un mètre.

	PUISSANCE HORAIRE	VITESSE EN T/M	POIDS DU MOTEUR SEUL EN KGS.
Tramways urbains.....	35-40	400-500	750
	50	550	950
Tramways urbains lourds et interurbains.....	60	500	1.050
	80	450	1.600

III. — Moteurs pour voie normale.

	PUISSANCE HORAIRE	VITESSE EN T/M	POIDS DU MOTEUR SEUL EN KGS.
Tramways urbains.....	50	600	1.100
	60	500	1.200
Tramways urbains lourds et interurbains.....	75	500	1.450
	100	500	1.600
Métropolitains.....	130-150	550	2.200
Chemin de fer interurbain (banlieue).....	150-200	500	2.700
Locomotives.....	250-300	350	4.500
	350-400	400	4.800

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est important de bien remarquer à ce propos qu'un même moteur, au point de vue mécanique, peut donner des puissances très différentes pour un même échauffement, soit au régime horaire pour préciser, suivant la façon dont sont réalisés les bobinages de son induit et de ses inducteurs.

Ainsi, à titre d'exemple, le moteur Thomson-Houston, type tramway, dont nous avons antérieurement donné les caractéristiques, donne 40 chevaux avec un induit à 99 sections à 4 tours et inducteurs à 144 spires et il est également construit avec un induit à 99 sections à 3 tours et inducteurs à 108 spires. Sous cette forme le moteur donne environ 50 chevaux au régime unihoraire. Le courant correspondant qui était de 70 ampères est passé à 90 et la vitesse de 370 t/m à 550 t/m. Le poids du moteur n'a d'ailleurs pas sensiblement changé. Ceci montre en passant que les indications des tableaux ci-dessus ne peuvent, de toute manière être considérées que comme des moyennes approximatives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IV

MOTEURS A COURANT CONTINU
ESSAIS INDUSTRIELS
ET CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES

SOMMAIRE. — Essais en plate-forme. Nature et but des essais. — Montage de deux moteurs sur banc d'essai : montage mécanique, montages électriques. — Vérifications diverses. Mesure des résistances. — *Moteurs d'un type existant. Essais courants.* Essai d'échauffement d'une heure. Caractéristique en charge. Rendement avec engrenages. Essai d'emballement. Essai de surtension. — *Moteurs d'un type nouveau. Essais complets.* Caractéristique à vide. Rendement par les pertes séparées. Essais d'échauffement. Caractéristiques thermiques. Courbes du courant absorbé et de la puissance développée en chevaux pour un échauffement donné. Courbe de refroidissement.

27. **Essais en plate-forme. Nature et but des essais.** — Nous étudierons en détail seulement les essais des moteurs série courant continu, comme formant de beaucoup la catégorie la plus importante des moteurs utilisés en traction, mais il faut bien remarquer que les principes généraux de ces essais, le but poursuivi en les faisant, ainsi que le mode de traduction finale des résultats auxquels ils conduisent, s'appliquent à toutes les catégories de moteurs de traction, le détail de la conduite des essais varie seulement pour adapter ceux-ci à la nature particulière du moteur envisagé.

D'une manière générale et comme pour toute catégorie de machines électriques, il y a deux séries d'essais, les uns sont effectués à l'atelier *durant la construction du moteur* et les autres sont effectués *en plate-forme après sa construction*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous n'examinerons ici que la seconde catégorie d'essais qui sont particuliers au moteur de traction.

Ces essais ont pour but de se rendre compte des conditions de fonctionnement sur un banc d'essai d'un moteur venant d'être construit et d'en déterminer la puissance à différents régimes.

Les essais industriels en plate-forme sont de deux sortes suivant qu'il s'agit d'un moteur d'un *type nouveau* ou d'un moteur d'un *type déjà établi*.

Dans le premier cas, la machine vient d'être exécutée d'après des calculs et des dessins, et les essais doivent être très complets en vue de vérifier les prévisions et de se rendre compte exactement des conditions de fonctionnement du moteur et de ses propriétés. De cette étude, il résultera évidemment des indications précieuses pour des études de moteurs qui pourront, par la suite, être dérivés de celui en question.

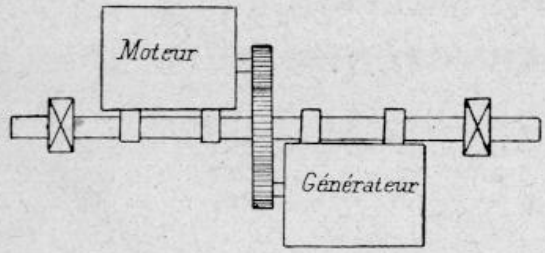


FIG. 16.

Dans le second cas, on conçoit que l'on puisse abréger les essais puisqu'il s'agit de nouveaux exemplaires d'un même moteur. Il est seulement nécessaire de vérifier par des essais judicieusement choisis, les caractéristiques générales du moteur.

Les essais à faire dans le premier cas comprennent les essais à faire dans le second, ou essais courants, plus des essais spéciaux.

Dans tous les cas on essaie le plus généralement les moteurs en charge par groupe de deux que l'on accouple de manière que l'un fonctionne en moteur et l'autre en générateur, le système devant d'ailleurs être réversible.

Le montage de deux moteurs dans ces conditions est réalisé de la façon suivante :

28. **Montage de deux moteurs sur banc d'essai.** — *a) Montage mécanique.* — Les deux moteurs sont accouplés mécaniquement au moyen d'un train d'engrenages pour se rapprocher de leurs conditions d'emploi réel. A cet effet (fig. 16) une roue dentée analogue à celle utilisée sur les tramways est montée sur un arbre supporté par deux paliers et faisant office d'essieu. Les deux moteurs supposés identiques, s'appuient par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

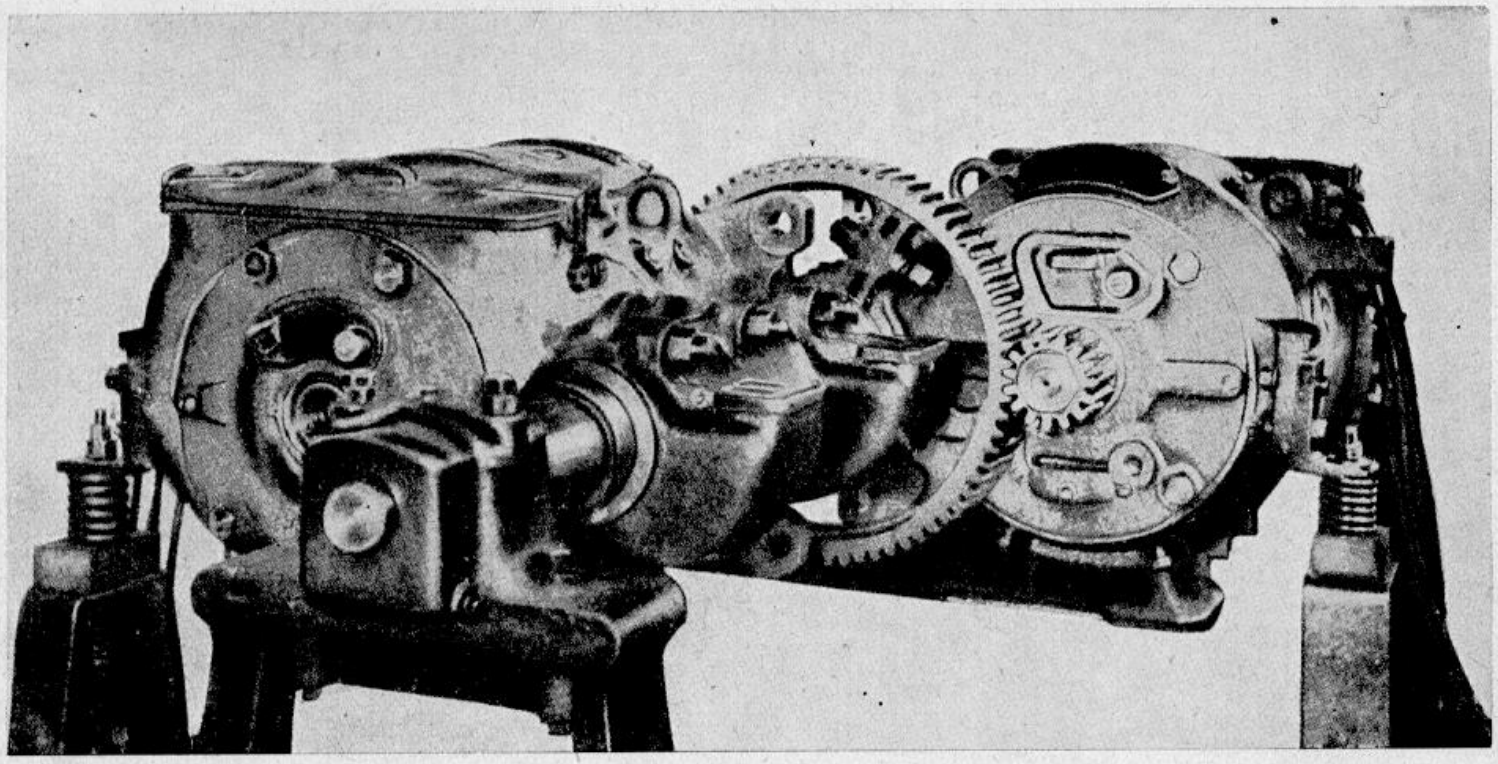


FIG. 17.

Montage de deux moteurs sur banc d'essai.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

leurs paliers sur cet arbre et sont montés de chaque côté de lui ; ils sont en outre suspendus du côté opposé à l'arbre d'une manière analogue à celle suivant laquelle ils sont suspendus aux trucks des voitures.

La photographie en planche hors-texte, figure 17, représente un ensemble de deux moteurs de 50 chevaux montés sur banc d'essai.

b) Montages électriques : 1° Méthode en opposition avec survolteur. — Ce montage peut varier dans le détail de sa réalisation, mais le principe est toujours le même et nous le rappellerons brièvement.

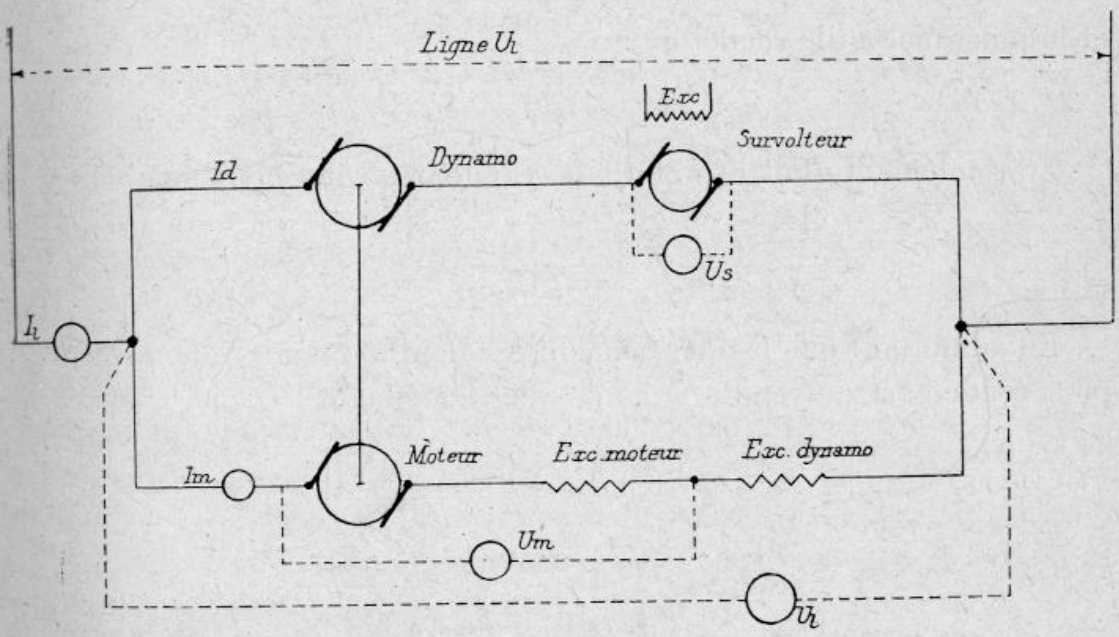


FIG. 18.

Montage électrique en opposition avec survolteur de deux moteurs sur banc d'essai.

Une machine marche en moteur, l'autre en dynamo. On s'arrange d'ailleurs pour pouvoir inverser les sens de rotation et les rôles. Les excitations des deux machines sont en série de manière à être parcourues par un courant de même intensité et ils sont directement en série avec l'induit de la machine moteur.

Pour suppléer aux pertes, on a recours à une source électrique extérieure d'énergie, par exemple la distribution dans l'usine et, en outre, afin de parer à une baisse de tension aux bornes d'alimentation, on monte souvent en série avec la machine fonctionnement en dynamo, un survolteur à excitation indépendante qui, étant en parallèle avec la ligne, alimentera le moteur.

Le schéma de montage est représenté (fig. 18).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En se reportant aux indications de ce schéma, on voit que la puissance fournie au moteur est $U_m I_m$, que celle fournie à l'ensemble par le survolteur est $U_s I_d$ et celle fournie par la ligne $U_l I_l$.

On a d'ailleurs :

$$I_m = I_l + I_d.$$

Les pertes totales sont :

$$U_s I_d + U_l I_l$$

et la puissance utile recueillie :

$$U_m I_m - (U_s I_d + U_l I_l).$$

Le rendement global, produit des rendements des deux machines est :

$$\frac{U_m I_m - U_s I_d - U_l I_l}{U_m I_m}.$$

En admettant que les deux machines aient le même rendement, on a pour rendement moyen du moteur avec engrenages :

$$\rho = \sqrt{\frac{U_m I_m - U_s I_d - U_l I_l}{U_m I_m}}$$

avec :

$$I_d = I_m - I_l.$$

2° *Méthode directe.* — On réalise quelquefois, au lieu du montage précédent, le montage électrique direct suivant le schéma de la figure 19.

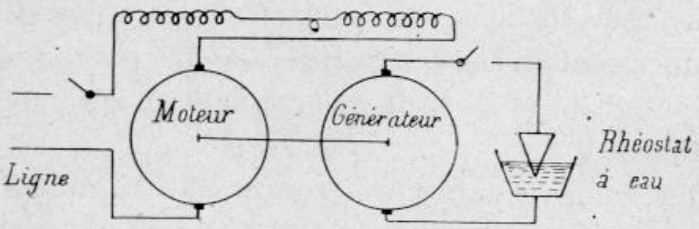


FIG. 19.

Montage électrique direct de deux moteurs sur banc d'essai.

Ici, la machine fonctionnant en moteur entraîne l'autre fontionnant en générateur à excitation indépendante, cette excitation indépendante étant d'ailleurs en série avec l'excitation série du moteur, ce qui donne ainsi aux deux machines la même excitation. Enfin, la machine fonctionnant en générateur, débite dans un rhéostat à eau dont la résistance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est réglée par l'enfoncement plus ou moins grand des électrodes dans l'eau, suivant la charge que l'on se propose d'obtenir au moteur.

Dans ces conditions, et maintenant la tension d'alimentation constante, égale à la tension normale, soit 600 volts, on mesure pour chaque charge, c'est-à-dire pour chaque débit du moteur fonctionnant en dynamo, le courant absorbé par le moteur, le courant débité par la dynamo, la vitesse de rotation du groupe et la tension aux balais de la dynamo. On en déduit facilement le rendement pour chaque charge.

Cette méthode à l'inconvénient d'absorber beaucoup de puissance.

29. **Vérifications diverses. Mesure des résistances.** — Ceci posé, et quel que soit le mode exact de couplage électrique des deux moteurs pour leur mise en charge, on commence par procéder aux vérifications suivantes :

On vérifie le calage des balais (les balais doivent être calés dans le plan neutre électrique) par la méthode du voltmètre ou en comptant le nombre de lames au collecteur entre balais. Le calage des balais est ici déterminé par la construction même du moteur et n'est pas réglable à la main comme dans le cas des moteurs ou dynamos ordinaires. Il s'agit donc là d'une mesure de vérification.

Ensuite, on mesure les résistances des divers circuits : inducteurs principaux, bobines de commutation, si elles existent, induit avec balais et sans balais.

La méthode employée est celle de la " chute de potentiel ", c'est-à-dire qu'on mesure simultanément la différence de potentiel aux bornes du circuit à étudier et l'intensité du courant qui le traverse. On fait plusieurs mesures et prend la moyenne. On note toujours les températures "t" auxquelles les mesures sont faites et on ramène celles-ci à la température de 75° par la formule connue (1) :

$$R_{75} = R_t \left[(1 + 0{,}004\,(75 - t).\right]$$

(1) Cette formule permet également de calculer la température d'un enroulement, ses résistances R_0 à zéro degré et R_t à t degrés étant mesurés directement. Il y a lieu d'observer à ce propos que la température mesurée *électriquement* dans le cas d'enroulement fixes est plus exacte et plus élevée que celle mesurée au thermomètre et la différence peut atteindre 20 à 30 °/₀. Pour les circuits mobiles, suivant le cas, l'une ou l'autre méthode peut donner une valeur supérieure et l'on trouve généralement des différences peu importantes entre les deux déterminations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On fait enfin fonctionner les moteurs dans les deux sens de manière à *former* les charbons et les coussinets d'induit.

Ceci étant, on procède aux *essais de fonctionnement proprement dits*.

Nous examinerons d'abord les *essais courants* puisqu'ils se retrouvent intégralement dans tous les cas ; ensuite nous étudierons les *essais spéciaux* qui s'ajoutent aux précédents pour former la série des *essais complets* pour un nouveau type de moteur.

30. **Moteurs d'un type existant. Essais courants.** — *a) Essai d'échauffement d'une heure.* (Régime unihoraire). — Cet essai a pour but de mesurer l'échauffement des diverses parties du moteur en fin d'essai et de vérifier qu'il est acceptable.

On fait fonctionner, au régime indiqué par le bureau d'études, chacun des deux moteurs successivement dans les deux sens de rotation et en moteur. Des thermomètres en nombre suffisant sont placés en contact intime (emploi de papier d'étain, ouate, mastic....) avec les différentes parties des machines : carcasse, bobines inductrices, paliers d'essieu et dans l'air pour avoir la température ambiante moyenne. A la fin de l'essai on prendra aussi les températures de l'induit et du collecteur. On mesurera aussi les résistances à chaud par la méthode de la chute de tension. Cette mesure permet de calculer les températures des enroulements.

b) Caractéristique en charge. Rendement avec engrenages. — La tension aux bornes du moteur étant maintenue égale à la valeur normale en agissant sur l'excitation du survolteur, dans le cas du montage avec survolteur (fig. 18), on fait varier la charge en agissant sur le rhéostat de démarrage du moteur. On relève en fonction de la charge, les vitesses correspondant au moins à $^1/_3$, $^1/_2$, $^3/_4$, 1, 1,25 et 1,50 de la charge normale (régime unihoraire) et ce, pour chaque machine fonctionnant en moteur et successivement dans les deux sens de rotation.

On note les valeurs du courant dans le moteur, sur la ligne et les volts de la ligne, aux bornes du moteur et du survolteur. On déduira, comme il a été indiqué plus haut (§ 28) le rendement moyen pour chaque valeur de la charge.

On note encore les températures moyennes, par la mesure des résistances, au commencement et à la fin de l'essai et on fait les corrections pour ramener les valeurs à la température choisie, soit 75°.

On construit les courbes de la vitesse en t/m et du rendement ρ avec engrenages en fonction du courant absorbé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On en déduit (§ 18) les courbes de vitesse V en Km/h et des efforts à la jante F en Kgs pour un véhicule monté sur roues de diamètre d en mètres et pour un rapport d'engrenages $\frac{1}{m}$.

c) Essai d'emballement. — Cet essai a pour but de vérifier la résistance des cerclages ou frettes de l'induit et le bon équilibrage de l'ensemble de la partie tournante.

Il est effectué sur chaque moteur séparément. Le moteur est excité en série avec charge décroissante de manière à lui faire prendre une vitesse croissante jusqu'à une limite fixée, soit double, triple ou même davantage de sa vitesse normale, c'est-à-dire de celle correspondant à son régime horaire.

d) Essai de surtension. — On fait tourner le moteur pendant un temps donné, soit 5 minutes, sous un voltage supérieur, soit de 25 °/₀ par exemple, au voltage normal et à la charge normale en changeant alternativement le sens de marche.

31. **Moteurs d'un type nouveau. Essais complets.** — Ces essais comprennent, en général, *en plus* des essais précédents, les suivants :

a) Caractéristique à vide. — On fait tourner le moteur à excitation séparée sous diverses valeurs de l'excitation, la tension aux bornes étant maintenue constante. On note les diverses valeurs de la vitesse et ce, pour les deux sens de rotation, puis on construit la courbe de la vitesse n' en t/m en fonction du courant d'excitation ou des ampères tours inducteurs.

b) Rendement par les pertes séparées. — Cette étude se fait par application de la méthode générale bien connue des pertes séparées.

On sait que les pertes totales pour un moteur se composent :

(1°) des *pertes électriques* ou pertes par effet Joule, c'est-à-dire en RI^2.

(2°) des *pertes mécaniques* par frottement des balais sur le collecteur, par frottements dans les paliers et dans l'air par ventilation (pertes proportionnelles à la première puissance de la vitesse).

(3°) des *pertes électromagnétiques* ou pertes dans le noyau et dues à l'hystérésis (proportionnelles à la première puissance de la vitesse) et aux courants de Foucault (proportionnelles à la seconde puissance de la vitesse).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les *pertes à vide* du moteur sont la somme des pertes (2°) et (3°) ci-dessus et nous avons vu qu'elles peuvent se traduire par une formule de forme :

$$p = An + B\,\Phi^{1,6}\,n + D^2\,\Phi^2\,n^2.$$

On mesure, en général, les pertes à vide au moyen d'un moteur taré, employé pour entraîner le moteur à essayer. En faisant l'essai, le moteur étudié étant excité, on obtient les pertes à vide totales. On renouvelle l'essai pour diverses valeurs de l'excitation qui donnent autant de vitesses différentes.

En faisant l'essai du moteur non excité, on obtient par différence avec les résultats précédents les pertes dans le noyau pour différentes excitation (ou vitesses).

Des résultats obtenus, on peut déduire les courbes des pertes à vide et des pertes dans le noyau aux différents régimes du moteur, au moyen de la caractéristique en charge du moteur.

En faisant l'essai au moteur taré, les balais en place, puis les balais enlevés, on sépare les pertes par ventilation et frottements dans les paliers, des pertes par frottement des balais sur le collecteur.

A titre d'exemple, et pour montrer l'allure générale de ces courbes et leur emploi, nous avons considéré un moteur de 50 chevaux au régime uni-horaire sous 600 volts dont la vitesse à cette puissance est 600 t/m et le courant absorbé 75 amp., et dont la résistance totale intérieure à 75° est de 0,753 ohm.

La fig. 20 donne les pertes mécaniques séparées et sur la fig. 21, les courbes (I) sont celles des pertes dans le noyau en fonction du courant absorbé et pour différentes vitesses. On déduit de ces courbes, en s'aidant de la caractéristique en charge (III) que l'on trace par rapport aux mêmes axes, la courbe (II) donnant les pertes dans le noyau à une vitesse quelconque ou pour un courant quelconque.

Déterminons un point de cette courbe, celui correspondant à la vitesse de 800 t/m par exemple.

Du point (1) correspondant à cette vitesse sur l'axe des ordonnées en t/m, on déduit (2) sur la courbe des vitesses (III), puis (3) sur la courbe (I) des pertes à 800 t/m. Ce point (3) est le point cherché de la courbe (II) et on voit qu'il correspond à un courant de 44 ampères. On cherche de même d'autres points.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a donc bien ainsi la courbe des pertes dans le noyau à un régime quelconque. (On ferait de même pour les courbes des pertes à vide.)

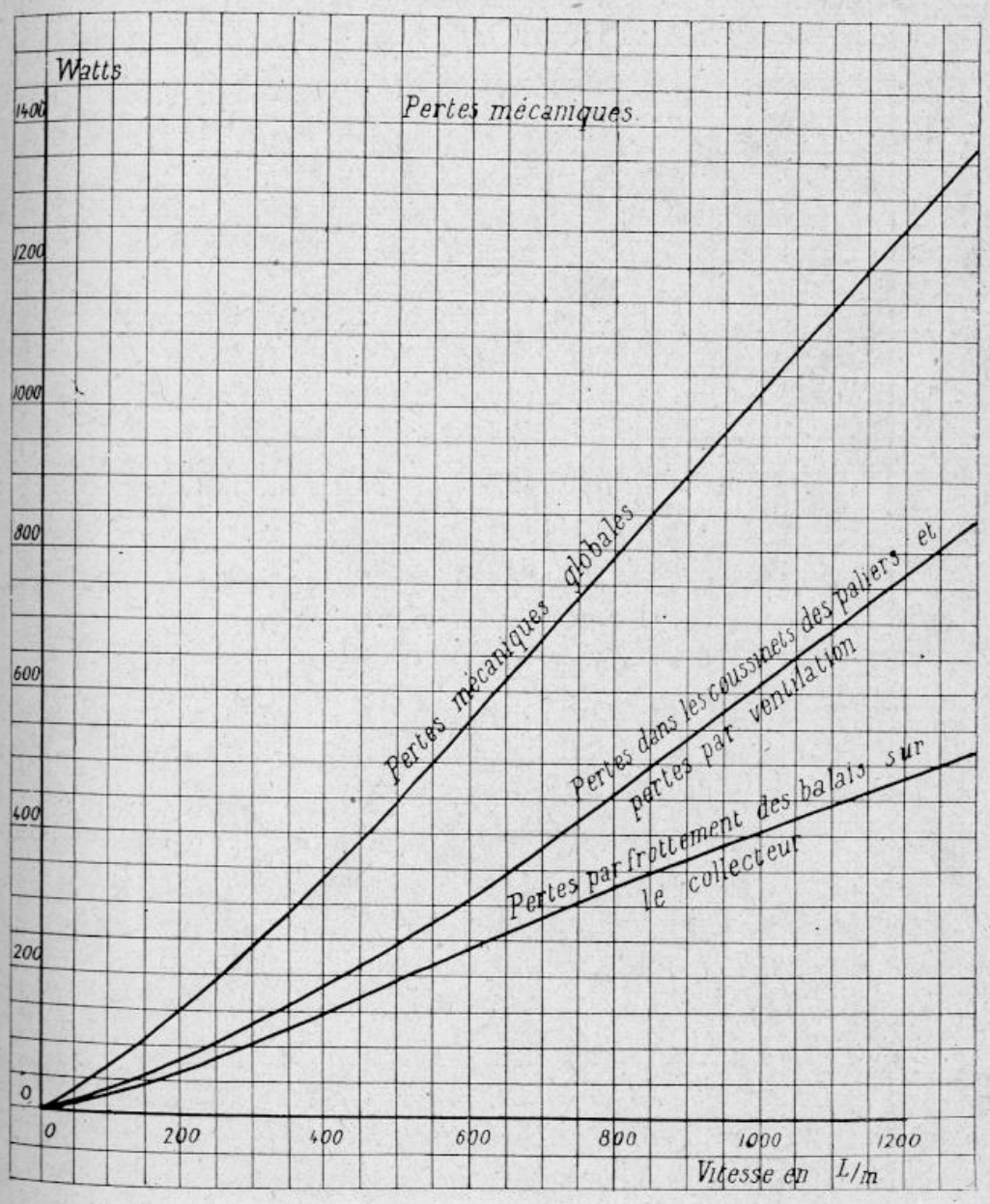


FIG. 20.

Moteur de 50 chevaux.

On exprime généralement les diverses pertes représentées par les courbes des fig. 20 et 21 en % de la puissance absorbée. On exprime aussi de la même manière les pertes par effet Joule.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

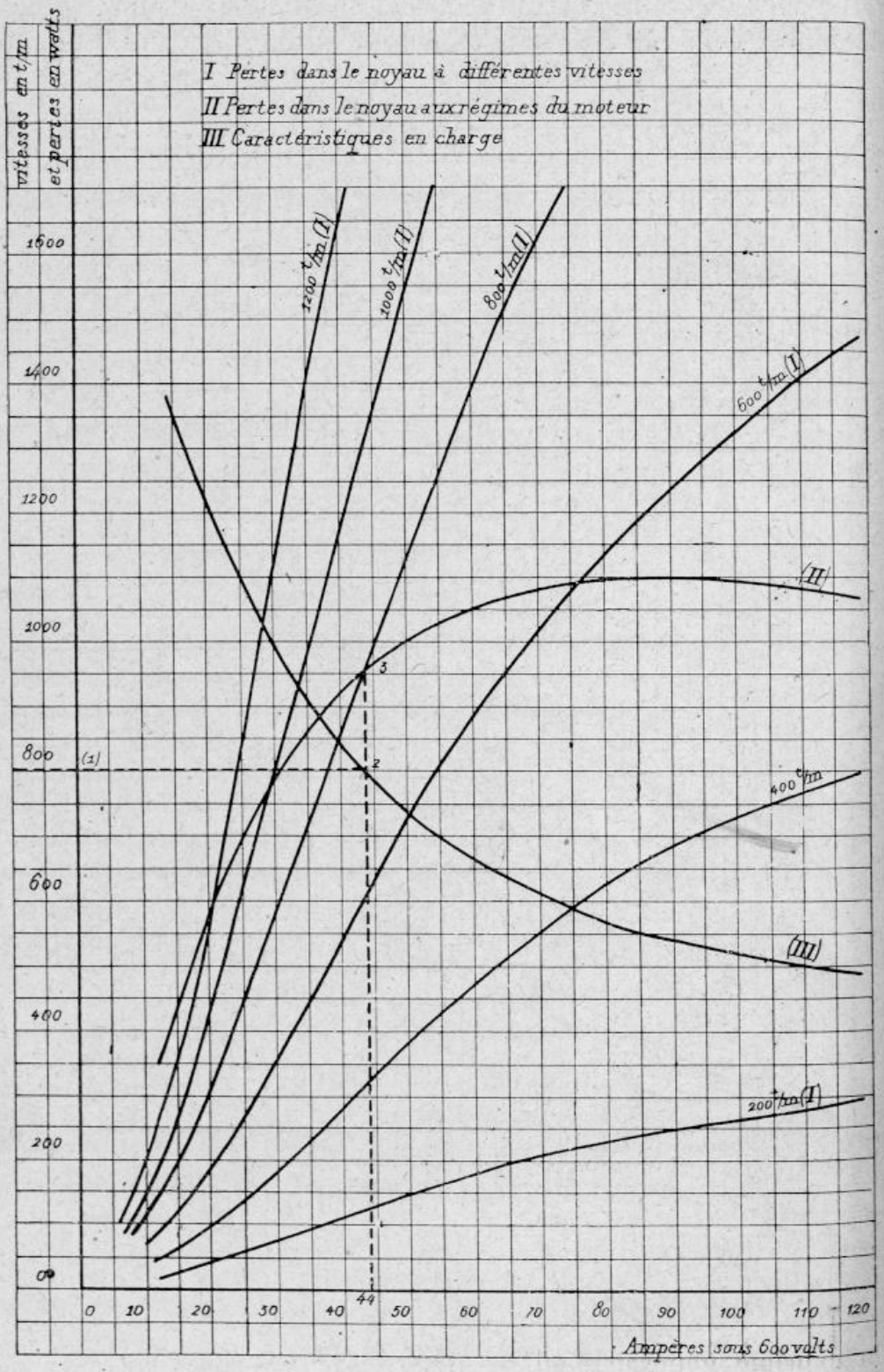


FIG. 21.

Moteur de 50 chevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tous ces pourcentages s'ajoutent et on traduit les résultats obtenus comme l'indique la fig. 22.

La dernière courbe obtenue η_i représente évidemment la courbe du *rendement organique* du moteur, c'est-à-dire sans engrenages. En en retranchant les pertes dans les engrenages exprimées de la même manière, c'est-à-dire en °/₀ de la puissance absorbée on obtient la courbe du rendement ρ avec engrenages.

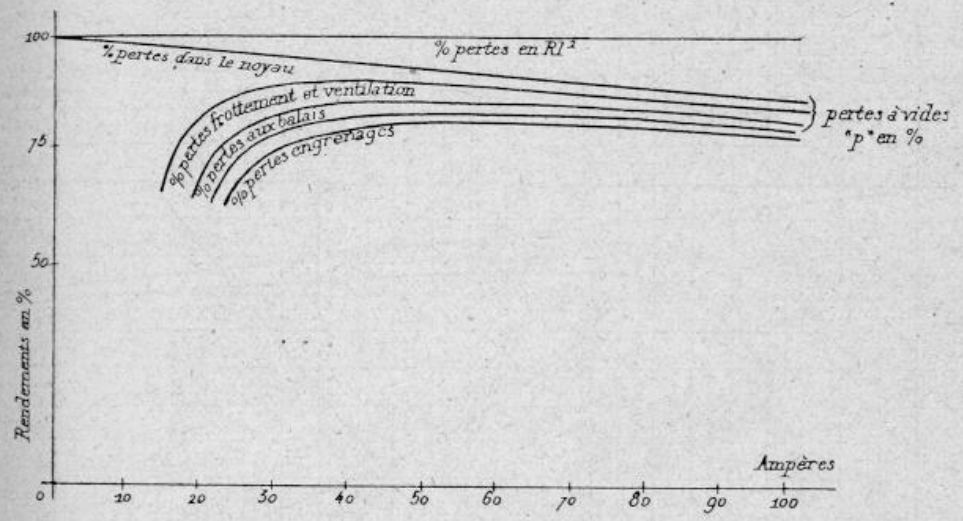


FIG. 22.

Séparation des pertes. — Rendements.

Ayant la courbe du rendement η_i on construit la caractéristique en charge comme aux " Essais courants " et de ces deux courbes on déduit la courbe du couple utile C_u sur l'arbre au moyen de la formule connue :

$$C_u = \eta_i \frac{UI}{n'} \text{ K}gms.$$

On obtient ainsi les caractéristiques tracées sur la fig. 23.

D'autre part, ayant la courbe du rendement ρ et la courbe des vitesses V déduite de la caractéristique en charge précédente par la formule connue :

$$V = 0{,}1885 \frac{n'd}{m},$$

on en déduit la courbe des efforts à la jante :

$$F = 0{,}3672\, \rho \frac{UI}{V}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On obtient ainsi les caractéristiques tracées sur la fig. 24, sur laquelle nous avons en outre tracé ces mêmes caractéristiques sous tension $\frac{U}{2} = 300$ volts et les courbes secondaires des puissances développées sous 600 et 300 volts.

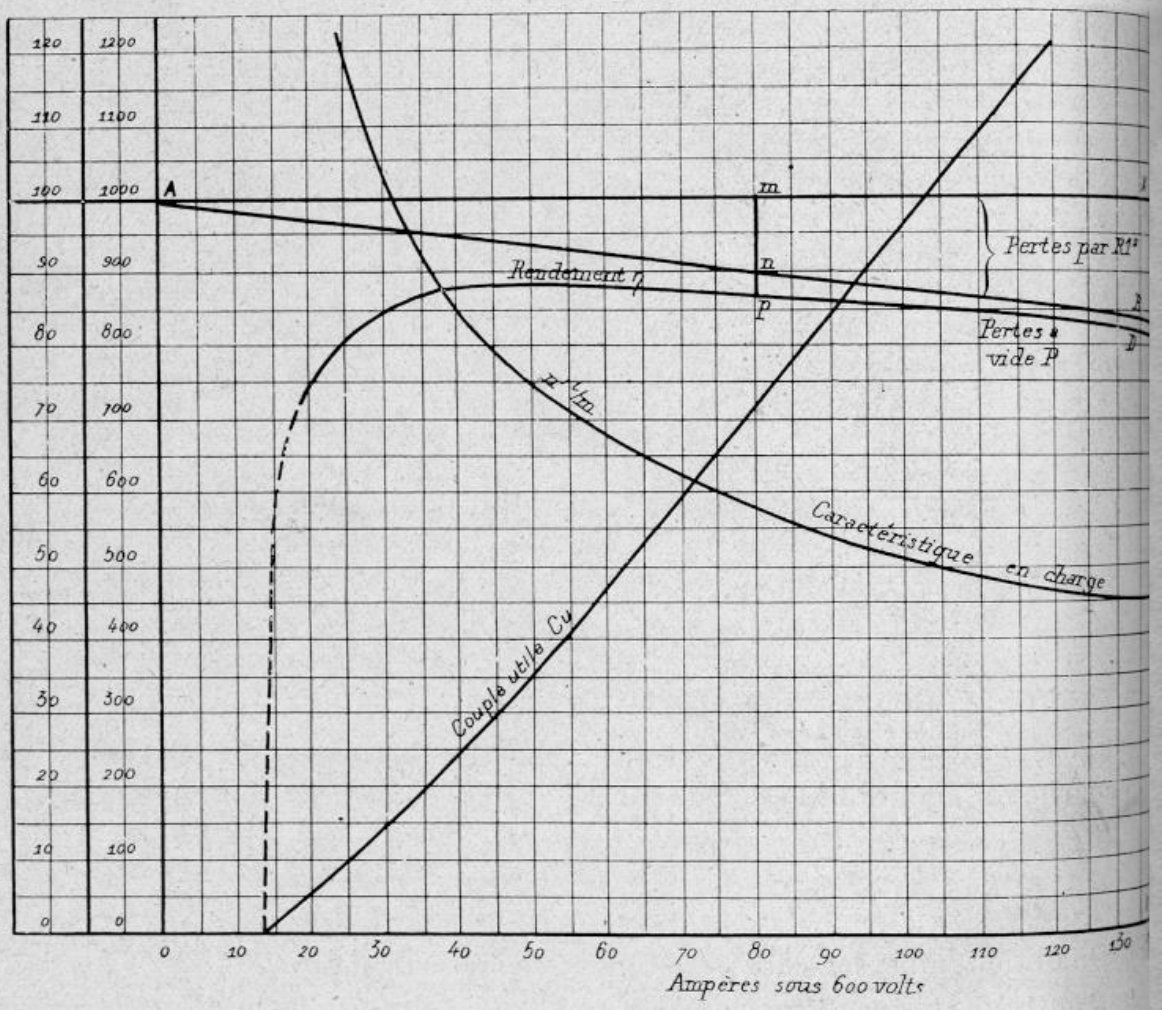


FIG. 23.

Moteurs de 50 chevaux. — Caractéristique en charge. — Rendement. — Couple utile.

c) *Essais d'échauffement. Caractéristiques thermiques.* — Ces essais consistent en une série d'essais en charge à voltage normal constant et à charge variable d'un essai à l'autre mais constante pour chaque essai; la durée de celui-ci étant suffisante pour obtenir au moteur un échauffement au-dessus de la température ambiante d'au moins 75°. Les valeurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la charge pour ces différents essais sont généralement comprises entre 50 et 150 °/₀ de la charge normale (unihoraire).

Après chaque essai d'une durée donnée, le moteur étant arrêté, on mesure aussitôt les résistances et les températures.

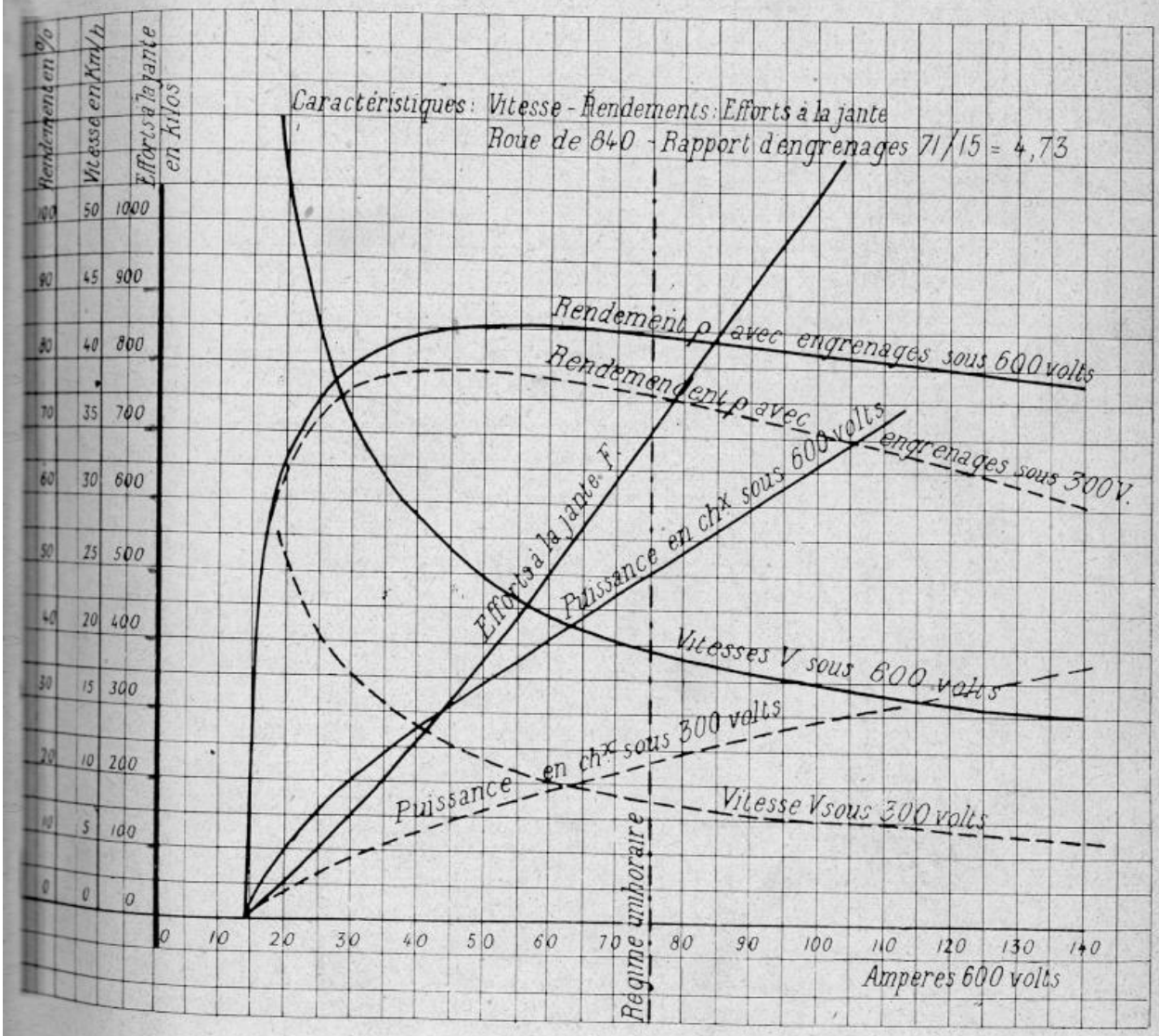


FIG. 24.

Moteur de tramway 50 chevaux sous 600 volts.

On traduit les résultats par des courbes dites " caractéristiques thermiques " ayant comme ordonnées les excès de température d'une partie du moteur sur la température ambiante et comme abscisses les temps. On trace généralement ces courbes pour le collecteur, pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'induit et pour les inducteurs principaux et éventuellement pour ceux de commutation. On obtient ainsi plusieurs familles de courbes analogues.

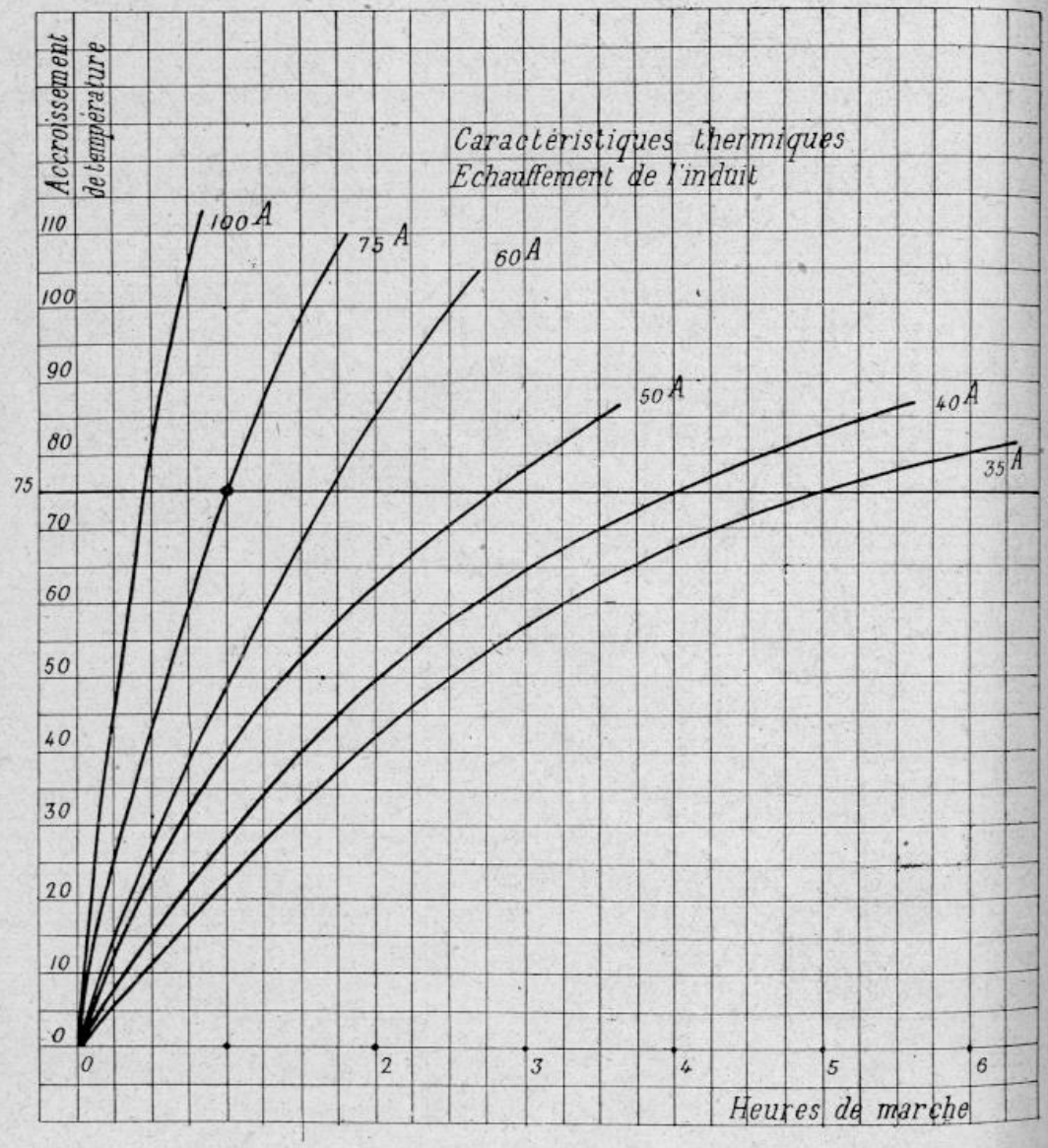


FIG. 25.

Moteur de 50 chevaux

La fig. 25 représente les caractéristiques thermiques de l'induit du même moteur que précédemment.

Pour chacune de ces familles de caractéristiques thermiques, les points d'intersection de la ligne d'ordonnée 75 avec les courbes correspondant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aux diverses charges donnent les durées de fonctionnement au bout desquelles l'échauffement atteint 75° avec les charges particulières envisagées et pour l'organe (induit, inducteurs, etc...) auquel la famille de courbes considérée se rapporte.

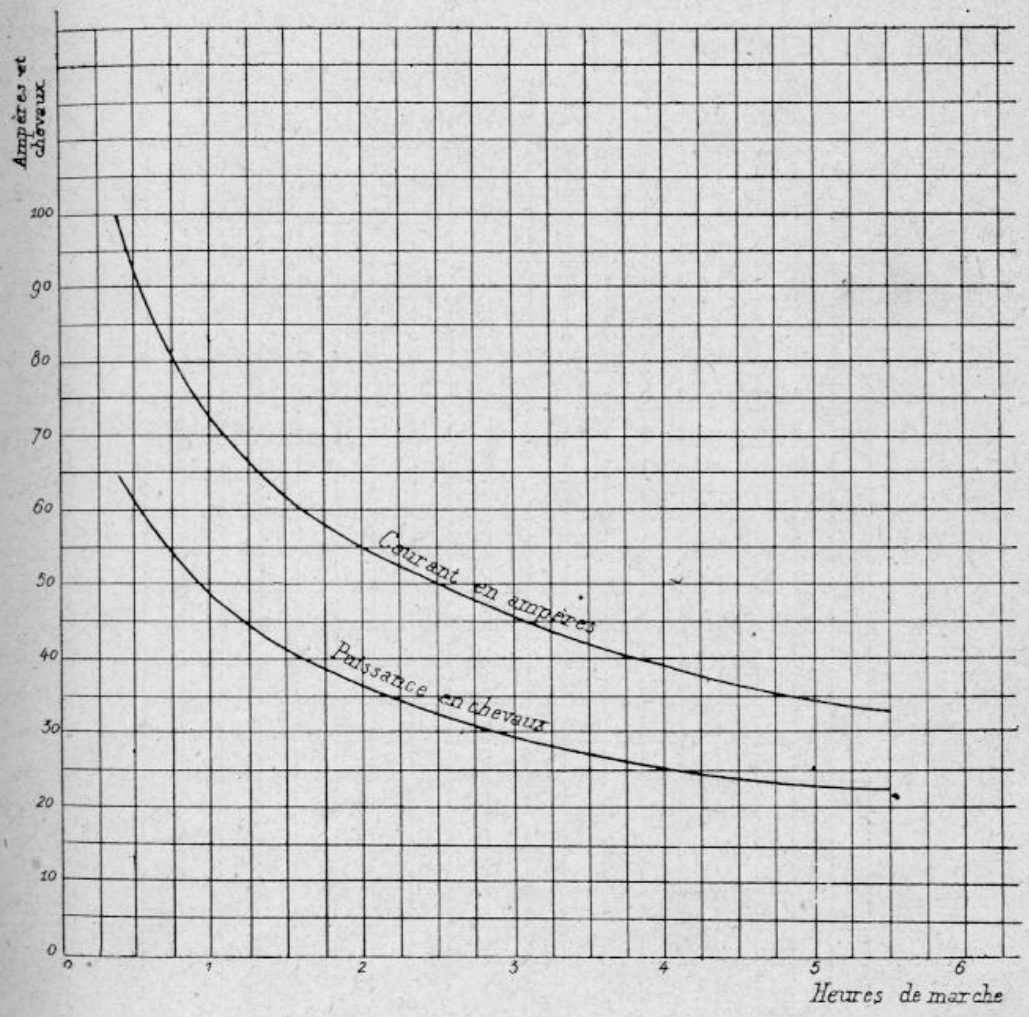


FIG. 26.

Moteur de 50 chevaux. — Courant et puissance pour un échauffement de 75°.

De chaque famille de courbes, on déduit, en fonction du temps, la courbe du courant absorbé, d'où celle de la puissance développée en chevaux pour un échauffement donné :

$$\text{Puissance en chevaux} = \rho \frac{UI}{736}.$$

Ces deux courbes (fig. 26), sont tracées en général seulement pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'échauffement de 75°. On obtient ainsi la valeur de la puissance que peut développer le moteur considéré pour un échauffement de 75° et une durée de fonctionnement quelconque depuis, par exemple, une 1/2 heure jusqu'au régime continu.

d) Courbe de refroidissement. — On complète quelquefois les essais précédents par le suivant :

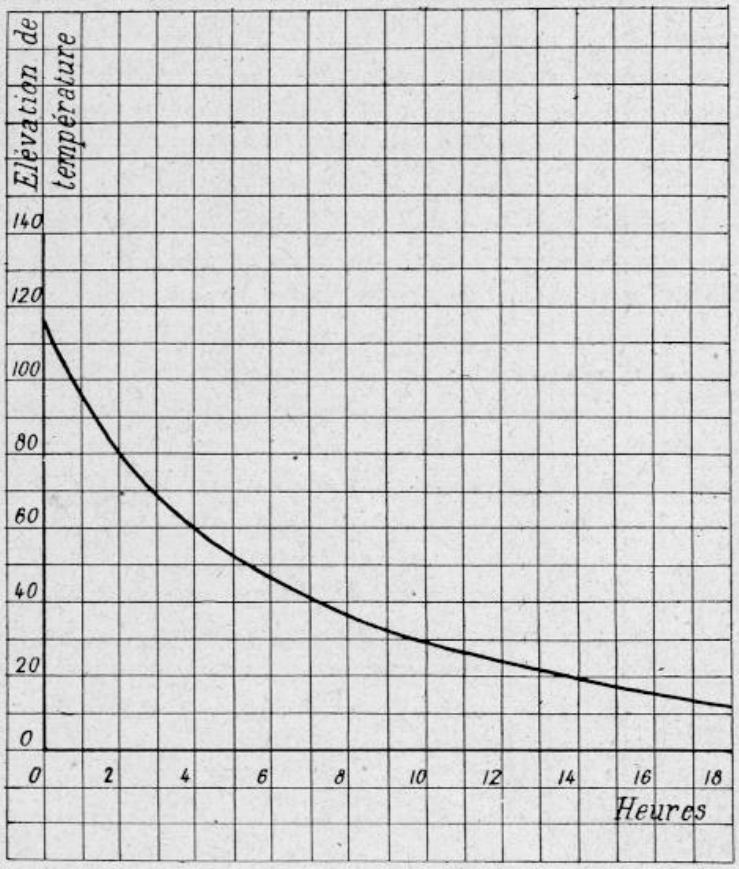


FIG. 27.

Courbe de refroidissement de l'induit.

On fait fonctionner le moteur à pleine charge pendant une heure, après quoi on l'arrête et on coupe complètement le courant.

Le moteur se refroidit naturellement et on note les températures de ses diverses parties à intervalles de temps réguliers, soit, par exemple, tous les 1/4 d'heure pendant la première heure et ensuite toutes les 1/2 heure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On trace ensuite la courbe de refroidissement en prenant comme ordonnées les excès de température sur la température ambiante et comme abscisses les temps.

On trace généralement des courbes pour l'induit, les inducteurs, le collecteur, le bâti et l'air dans le moteur.

La figure 27 représente la courbe de refroidissement de l'induit du même moteur que précédemment.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE V

COURANT CONTINU
RÉGULATION DE LA MARCHE DES VOITURES

SOMMAIRE. — Objet de la régulation de la marche des voitures. — Principe des méthodes employées. — Etude du démarrage. — Calcul de l'effort à développer. — Poids d'inertie.

I. **Alimentation à potentiel constant**

Contrôle rhéostatique. — Théorie. — Détermination graphique des résistances de démarrage : cas d'un moteur, cas de deux moteurs. — Contrôleurs. — Résistances employées.

Contrôle série-parallèle. — Détermination graphique des résistances de démarrage. — Equipements à 4 moteurs. — Contrôleurs. — Cas particulier de l'alimentation à haute tension.

Modification du bobinage de l'induit.

Variation du flux inducteur : modification du nombre des spires inductrices; shuntage des enroulements inducteurs par des résistances. Caractéristiques du moteur à inducteurs shuntés. — Contrôleur série-parallèle avec shuntage. — Résultats d'essais et applications. — Remarque générale sur les démarrages.

II. **Alimentation à potentiel variable**

Méthode des accumulateurs à groupements variables. — Méthode de la variation d'excitation de la génératrice : Ward-Léonard, Heilmann. — Méthodes diverses : Survolteur-dévolteur Ward-Léonard. Système S. T. A. R.

32. **Objet de la régulation de la marche des voitures.** — Le but de tout système de régulation est de permettre de réaliser à volonté pour chaque valeur de l'effort demandé, déterminé par les résistances à vaincre un régime voulu de vitesse compatible avec le genre d'exploitation dont il s'agit et la puissance des moteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi que nous l'avons vu (§ 18), les conditions de fonctionnement d'une voiture actionnée par un moteur électrique se traduisent par des caractéristiques exprimant les variations de la vitesse V du véhicule en Km/h., de l'effort F en Kgrs développé aux jantes et du rendement ρ du moteur à la jante des roues.

Le problème dont il s'agit constitue une application immédiate des propriétés des moteurs.

33. **Principe des méthodes employées.** — (I). En supposant, ce qui est le cas général, que la ligne soit alimentée à *potentiel constant*, on a les méthodes suivantes :

1° *Contrôle rhéostatique* qui consiste en l'insertion de résistances dans le circuit du moteur.

2° *Contrôle série-parallèle* pour un équipement à deux moteurs au moins et où il est également fait emploi de résistances pour la réalisation du démarrage et au besoin de vitesses intermédiaires par rapport aux 2 vitesses de régime que cette méthode permet d'obtenir dans le cas de 2 moteurs ou de deux groupes de moteurs. Cette méthode est d'un emploi très général.

3° *Modification du bobinage de l'armature ou méthode du double induit.* — Cette méthode n'a encore qu'un intérêt théorique.

4° *Variation du flux inducteur* réalisée par exemple par shuntage de l'enroulement inducteur.

(II). En supposant le cas où la ligne peut être alimentée à *potentiel variable*, on réalise la régulation de la vitesse par variation de ce potentiel.

Toutes ces méthodes résultent immédiatement de l'examen de la formule approchée bien connue (§ 13 c) :

$$n = \frac{U}{N\Phi} \cdot 10^8.$$

Dans les deux premières méthodes ainsi que dans la dernière, on fait en définitive varier la tension appliquée aux bornes du moteur ; dans la troisième on fait varier N (on peut d'ailleurs aussi interpréter cette dernière méthode en la considérant comme variante de la deuxième) ; enfin, dans la quatrième méthode, on fait varier Φ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avant d'examiner en détail ces diverses méthodes de régulation de la marche des voitures, il nous paraît nécessaire de préciser les conditions de démarrage d'une voiture motrice, cette question étant distincte des autres et d'une importance primordiale.

34. **Etude du démarrage. Calcul de l'effort à développer. Poids d'inertie.** — Il s'agit d'obtenir au démarrage un grand couple sans que le courant absorbé soit exagéré.

Dans la plupart des cas la méthode employée pour réaliser le démarrage consiste à insérer dans le circuit du moteur et en série avec lui, des résistances que l'on diminue progressivement ainsi que nous allons le voir en détail.

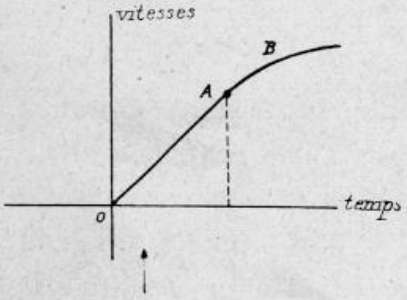


FIG. 28.

Il faut commencer par *déterminer ou se fixer a priori l'intensité moyenne ou celle maxima du courant au démarrage.* Cette intensité doit être choisie la plus grande possible compatible avec la puissance des moteurs, avec l'accélération maxima admissible pour le confort des voyageurs, avec le genre d'exploitation que l'on a en vue et avec la condition que les roues ne patinent pas. On sait que cette dernière condition est réalisée tant que l'effort produit F est inférieur à l'effort adhérent maximum utilisable, produit du poids adhérent du véhicule moteur par le coefficient d'adhérence sur la voie.

Traçons d'autre part, pour la période de mise en vitesse, la courbe des vitesses de la voiture en fonction du temps. Cette courbe (fig. 28) commence par une portion rectiligne OA correspondant à toute la période d'accélération sur le "contrôleur" (accélération à valeur moyenne constante) durant laquelle on élimine progressivement au moyen du dit contrôleur *les résistances de démarrages*, puis d'une portion courbe AB dépendant de, et déterminée par les caractéristiques du moteur.

La puissance maxima demandée au moteur pendant la période de démarrage et qui est en principe égale, ainsi que nous l'avons déja noté, à sa puissance uni-horaire, correspond au point A où le moteur est alimenté à pleine tension. L'intensité du courant est maintenue constante pendant toute la période OA ainsi que nous le verrons plus loin. Cette intensité est en général celle du régime uni-horaire du moteur. Au delà

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du point A, l'intensité du courant décroît jusqu'à sa valeur de régime et la vitesse croît suivant la caractéristique des vitesses du moteur.

Soit, maintenant, à calculer l'effort à développer au démarrage pour réaliser une accélération moyenne constante A (correspondant au coefficient angulaire de la droite OA de la figure précédente).

Pour simplifier nous considérerons seulement dans le calcul suivant une automotrice isolée mais en observant que la méthode de calcul est applicable aux remorques et plus généralement à un train formé d'automotrices et de remorques.

Soient :

A La valeur moyenne de l'accélération en m./sec./sec. ;

P Le poids de l'automotrice en tonnes ;

r La résistance totale au roulement en Kgs par tonne de poids total en palier et alignement droit (r est en toute rigueur fonction de la vitesse du véhicule) ;

i La valeur de la rampe en m/m. par mètre (i est positif pour une rampe et négatif pour une pente) ;

c La résistance en Kgs. par tonne due à un passage en courbe de rayon donné.

L'effort moteur à appliquer à l'essieu se compose de deux parties : une première correspondant à la marche normale et indépendante de l'accélération et qui a pour expression :

$$F_1 = P\,(r + i + c)$$

et une seconde partie qui dépend de la valeur de l'accélération et qui correspond à l'augmentation de force vive communiquée, du fait de l'accélération, à la masse de l'automotrice. C'est l'effort accélérateur proprement dit dont l'expression est

$$F_2 = 1000.\frac{P}{g}.A$$

g étant l'accélération due à la pesanteur.

Cette valeur suppose toutefois qu'il ne s'agit que de déplacements rectilignes, mais il faut ici tenir compte de l'effet d'inertie des parties tournantes : essieux, roues et induits des moteurs, qui s'ajoute à l'effort F_2 ci-dessus et retarde la mise en vitesse. Remarquons en passant que cet effet intervient aussi pendant les périodes de freinage, mais en sens contraire, en prolongeant le mouvement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour analyser l'effet d'inertie des parties tournantes au démarrage, soit v en m./sec. la vitesse de l'automotrice à un instant quelconque de la mise en vitesse; sa puissance vive serait à ce moment, s'il ne s'agissait que de déplacements rectilignes :

$$\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot \frac{P}{g} v^2.$$

Or, appelons :

k Le moment d'inertie en Kg.-masse $\times \rho^2$ d'un essieu monté et de la roue d'engrenage calée sur cet essieu, ce qui constitue le mode d'entraînement le plus général ;

w La vitesse angulaire de cet ensemble ;

n Le nombre des essieux supposés tous moteurs pour simplifier, n est alors également le nombre des moteurs.

k' Le moment d'inertie en kg.-masse $\times \rho^2$ de l'induit d'un moteur muni de son pignon ;

m Le rapport du nombre de dents d'une roue dentée à celui du pignon.

La puissance vive totale réelle de l'automotrice est évidemment :

$$\frac{1}{2} \times \frac{1000\ P}{g} \cdot v^2 + \frac{1}{2} n k w^2 + \frac{1}{2} n k' m^2 w^2$$

ou :

$$1000 \frac{v^2}{2g} \left[P + \frac{g}{1000} \left(\frac{w}{v} \right)^2 (n k + n k' m^2) \right]$$

ou encore

$$1000 \cdot \frac{v^2}{2g} (P + H)$$

en posant

$$H = \frac{g}{1000} \cdot \frac{w^2}{v^2} (n k + n k' m^2).$$

On voit ainsi que l'effet des parties tournantes sur la puissance vive totale de l'automotrice est le même que si le poids P du train était augmenté d'une certaine quantité que nous appelons ici H, autrement dit, on peut faire abstraction des parties tournantes en attribuant au train un poids *fictif* P' plus grand que P,

tel que :

$$P' = P + H.$$

Ce poids P' est dit *poids d'inertie* de l'automotrice. C'est en définitif le poids d'une mobile se déplaçant d'un mouvement purement linéaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec la vitesse v et ayant même puissance vive que le véhicule considéré.

C'est donc ce poids P′ qu'il faut considérer pour étudier les périodes de démarrage et de freinage.

Or, pour un véhicule donné, la quantité H est une constante que l'on peut facilement calculer. En reportant sa valeur à la tonne de poids total on peut finalement poser :

$$P' = P + H = P\left(1 + \frac{H}{P}\right),$$

soit

$$P' = \lambda\, P,$$

en faisant

$$\lambda = 1 + \frac{H}{P}.$$

Ce coefficient λ est dit *coefficient d'inertie* du véhicule.

D'après M. A-H. Armstrong "λ" a comme valeur moyenne :

(1°) Pour les automotrices de trains de banlieue, métropolitains ; vitesses dans le voisinage de 45 km/h : 1,10 ;

(2°) Pour les tramways lourds de surface, vitesses moyennes : 1,12 à 1,14;

(3°) Pour les petites automotrices : jusqu'à 1,25 et même 1,30.

On voit par ces valeurs de λ que les effets d'inertie qui nous occupent sont loins d'être négligeables surtout pour les petits véhicules et qu'il y a bien lieu d'en tenir compte dans les questions de démarrage et aussi dans celles de freinage ainsi que nous le verrons ultérieurement.

De ce qui précède, il résulte que *l'effort accélérateur* réel, est, au lieu

de

$$F_2 = 1000.\frac{P}{g}.\,A$$

$$F_2' = 1000.\frac{P'}{g}.\,A \quad (1)$$

(1) Cette formule montre que si on néglige d'employer le poids d'inertie pour le calcul de l'effort accélérateur, ce qui revient à employer l'expression $F_2 = 1000\,\frac{P}{g}\,A$, l'effort accélérateur par tonne est sensiblement représenté par le nombre qui exprime la valeur de l'accélération en cm./sec. On a en effet $\frac{F_2}{P} = \frac{1000}{g}\,A = 100\,A$ approximativement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite, l'effort total F_m à développer aux jantes des roues pour produire l'accélération donnée est :

$$F_m = F_1 + F_2',$$

c'est-à-dire : $$F_m = P\,(r + i + c + \frac{1000}{g} \cdot \frac{P'}{P} \cdot A)$$

ou enfin sensiblement en prenant $g = 9{,}81$ et remplaçant $\frac{P'}{P}$ par λ :

$$F_m = P\,(r + i + c + 102\,\lambda\, A).$$

Cette formule montre que pour obtenir un démarrage à accélération constante, il faut développer un effort constant en négligeant les variations de r, ce qui, en général, peut être admis (nous supposons naturellement que le profil de la voie reste constant tout au moins pendant la période qui nous occupe).

Or, à un effort constant correspond un courant constant déterminé par la caractéristique des efforts du moteur. Il faudra, par suite, pour obtenir un tel démarrage, maintenir le courant à une valeur constante. Ce résultat sera obtenu par l'insertion dans le circuit du moteur et en série avec lui, d'une résistance réglable ainsi que nous le verrons à l'étude du contrôle rhéostatique.

Dans un cas normal et en principe, les moteurs dont est équipée une voiture motrice seront tels que, fonctionnant à leur régime horaire, l'effort total développé aux jantes des roues motrices à ce régime, soit précisément égal à F_m.

On voit ainsi comment on est guidé pour choisir l'intensité moyenne du démarrage.

Naturellement, ce qui précède *est loin d'être absolu* et *toujours observé* car il y a d'autres circonstances qui interviennent dans le choix d'un moteur et il peut être impossible de concilier la condition que l'on obtienne une accélération moyenne A donnée à l'avance, avec la condition que l'effort correspondant à développer F_m soit égal à l'effort total développé par l'ensemble des moteurs d'une motrice, fonctionnant à leur régime horaire, et avec d'autres conditions dépendant de chaque cas particulier. Ainsi, les conditions d'échauffement du moteur et surtout celles de sa commutation et de sa surcharge momentanée admissible interviennent d'une manière fondamentale. On peut être ainsi conduit à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

admettre à priori, pour des raisons particulières, que la valeur maxima de l'intensité du courant au démarrage (nous verrons plus loin que le courant au démarrage oscille en réalité entre deux valeurs) soit celle du courant du régime horaire ou que l'on effectue un démarrage à un courant moyen à tant pour cent au-dessus du courant du régime horaire, ou dans d'autres cas au-dessous de ce courant.

Ceci posé, nous allons maintenant étudier en détail les méthodes de régulation de la vitesse des voitures dont la première, celle du contrôle rhéostatique résout en particulier le problème de démarrage.

I. — Alimentation à potentiel constant

35. **Contrôle rhéostatique. Théorie.** — Cette méthode est la plus simple de toutes ; elle consiste seulement à intercaler en série dans le circuit du moteur une résistance variable capable de pouvoir supporter un échauffement momentané assez élevé et surtout le courant normal sans échauffement dangereux.

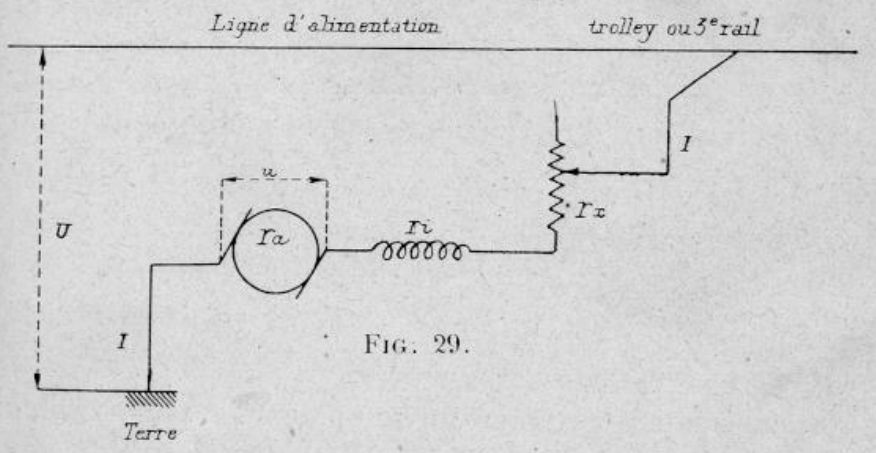


FIG. 29.

Soient (fig. 29) :

I, le courant total absorbé ;

R, la résistance totale intérieure du moteur égale à la somme de celle de l'induit r_a (y compris celle des balais) et de celle des inducteurs r_i ($R = r_a + r_i$) ;

R_x, celle du rhéostat réglable en série avec le moteur ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

U, le voltage du réseau (généralement c'est la différence de potentiel entre le conducteur d'alimentation et la terre, puisque le retour se fait par les rails) ;

u, la différence de potentiel aux balais;

E, la f. c. e. m. du moteur.

On a (1) $$u = U - (R_x + r_i)\, I,$$

ce qui montre que la mise en circuit de la résistance R_x a en somme pour effet direct de réduire la différence de potentiel u aux balais dans le rapport

$$\frac{U - (R_x + r_i)\, I}{U - r_i\, I}.$$

En faisant varier R_x on peut donc régler la valeur de u dans des limites très étendues et *comme conséquence la vitesse du moteur*. Si en effet n_x est cette vitesse en t/m on sait que :

$$u = E + r_a\, I$$

$$E = n_x\, N\Phi.\, 10^{-8}$$

ainsi qu'il a été établi au début du chapitre III. En éliminant E, on déduit :

$$u = n_x\, N\Phi.\, 10^{-8} + r_a\, I$$

$$n_x = \frac{u - r_a\, I}{N\Phi} \cdot 10^8$$

ce qui démontre la proposition énoncée.

Transformons cette expression en remplaçant u par sa valeur (1), on obtient :

$$n_x = \frac{U - (R_x + r_a + r_i)\, I}{N\Phi} \cdot 10^8$$

et finalement :

$$(2) \qquad n_x = \frac{U - (R_x + R)\, I}{N\Phi} \cdot 10^8.$$

Cette expression montre directement l'influence des variations de R_x sur n_x pour chaque valeur de I.

On voit que la vitesse n_x est d'autant plus réduite que la résistance R_x est plus grande et elle est d'autant plus grande que R_x est plus petit. Elle est maximum pour $R_x = o$: c'est la vitesse de pleine marche ou de régime

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du moteur et par suite du véhicule, correspondant à la marche sans résistance.

La valeur maxima possible de R_x est évidemment celle pour laquelle $n_x = o$ ce qui donne d'après l'équation (2) :

$$R_{x.\ max} = \frac{U}{I} - R.$$

Par suite, en donnant à R_x des valeurs successivement décroissantes depuis cette valeur maxima, on aura pour une même valeur de I des valeurs successivement croissantes de la vitesse à partir de zéro jusqu'à sa valeur de régime.

On aura ainsi toute une série de *résistances de démarrage*. Plus grand sera leur nombre, plus progressif sera le démarrage. Au contraire, plus il sera réduit, plus le démarrage sera brusque.

On remarquera que pour différentes valeurs de R_x le courant et le flux inducteur restant les mêmes, la puissance utile se trouve réduite dans le même rapport que la vitesse. Il en est de même, d'ailleurs, du rendement du système puisque la dépense d'énergie, proportionnelle à UI, est la même.

On remarquera encore que cette méthode permet de réduire la vitesse à partir de sa valeur de régime ou de pleine marche, mais non de l'augmenter, car on ne peut évidemment pas admettre une résistance restant constamment en circuit en pleine marche, le fait d'une résistance R_x en circuit se traduisant par une perte d'énergie supplémentaire proportionnelle à $R_x I^2$ par effet Joule absolument improductive. En outre, le rhéostat est lui-même assez encombrant et souvent difficile à loger.

Pour ces raisons, le système rhéostatique n'est plus guère employé sous cette forme simple que dans le cas où le véhicule n'est actionné que par un seul moteur et dans certains cas spéciaux (ligne du Fayet à Chamonix). En revanche, il est très employé combiné avec d'autres moyens et nous le retrouverons en particulier combiné avec la méthode du contrôle série-parallèle. Ainsi employé, il constitue le procédé le plus généralement utilisé pour assurer le démarrage.

La formule (2) permet de déterminer analytiquement les résistances de démarrage. On procédera ainsi :

La vitesse de pleine marche étant

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi} \cdot 10^8,$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour obtenir une vitesse quelconque n_x

$$n_x = \frac{U - (R + R_x) I}{N\Phi} \cdot 10^8$$

on éliminera Φ entre ces deux équations, ce qui donne :

$$\frac{n}{n_x} = \frac{U - RI}{U - (R + R_x) I}$$

d'où :

$$R_x = \frac{U - RI}{I} \left(1 - \frac{n_x}{n}\right).$$

Ayant par suite tracé la caractéristique des vitesses n, cette formule permettra pour chaque valeur de n_x donnée, de déterminer la résistance correspondante R_x à mettre en circuit.

Il est toutefois plus pratique d'employer une méthode graphique telle que la suivante :

36. **Détermination graphique des résistances de démarrage R_x.** — 1° *Cas d'un moteur :*

Rappelons que pour obtenir un démarrage à accélération constante donnée, il faut maintenir constante l'intensité du courant absorbé, dont la valeur est d'ailleurs déterminée par la courbe des efforts. Soit I_o, cette intensité et Φ_o le flux inducteur correspondant.

Ceci posé, l'équation (2) peut s'écrire en y introduisant en outre cette valeur I_o de l'intensité :

$$(3) \qquad (R_x + R) I_o = U - n_x N \Phi_o . 10^{-8}.$$

Nous appellerons cette équation, *l'équation du démarrage.*

Les seules variables sont R_x et n_x et *la loi de leurs variations est linéaire :* à une seule valeur de R_x correspond une valeur et une seule de n_x et réciproquement. Par suite, en faisant décroître progressivement la résistance R_x jusqu'à zéro à partir de sa valeur maxima :

$$(4) \qquad R_{x.\ max.} = \frac{U}{I_o} - R$$

obtenue en faisant $n_x = 0$ dans l'équation du démarrage, la vitesse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

croîtra linéairement de zéro à sa valeur maxima "n" qui sera la vitesse de pleine marche ou de régime égale à :

$$(5) \qquad n = \frac{U - RI_o}{N\Phi_o} \cdot 10^8,$$

valeur obtenue en faisant $R_x = O$ dans l'équation du démarrage.

Traduisons graphiquement l'équation (3) qui, par rapport aux variables R_x et n_x, représente une droite.

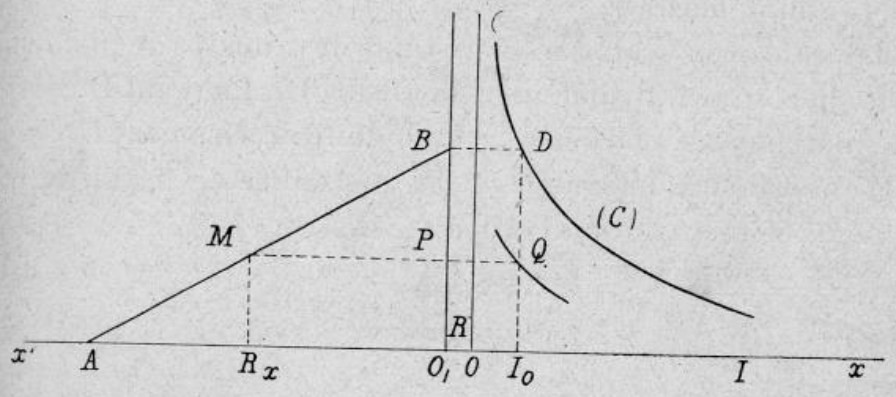


FIG. 30.

Pour tenir compte de R sur l'épure elle-même, portons en abscisses (fig. 30) sur Ox' à partir de O, les *résistances totales* en circuit, c'est-à-dire les sommes $(R + R_x)$, puis prenons $OO_1 = R$. Les résistances R_x seront alors portées vers la gauche à partir de O_1. Autrement dit, l'origine des abscisses pour les résistances R_x c'est-à-dire pour la graduation du rhéostat de démarrage sera le point O_1 (1).

Portons maintenant :

$$OA = \frac{U}{I_o}$$

ce qui revient à prendre avec la nouvelle origine O_1 :

$$O_1A = OA - OO_1 = \frac{U}{I_o} - R$$

(1) Dans le cas simple actuel d'un seul moteur on peut se dispenser d'avoir deux origines O et O_1 et n'avoir que O_1 mais cette façon de procéder trouvera sa justification dans l'application de la méthode à la détermination des résistances de démarrage dans le contrôle série-parallèle. Elle est donc plus générale. C'est pourquoi nous l'adoptons ici.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c'est-à-dire en vertu de l'équation (4)

$$O_1A = R_{x.\,max.}$$

puis sur l'ordonnée de O_1 portons

$$O_1B = n_{x.\,max.} = n = \frac{U - RI_o}{N\Phi_o} \cdot 10^8$$

valeur donnée par l'équation (5).

Joignons AB. La droite obtenue est évidemment la traduction de l'équation (3) du démarrage.

Traçons en outre en (C) la caractéristique des vitesses de pleine marche en fonction du courant. Projetons B en D sur (C). Le point D correspond à la pleine marche et son abscisse est par suite précisément I_o.

Soit R_x une valeur quelconque de la résistance de démarrage, on en déduit le point M sur AB dont l'ordonnée est

$$(6) \quad R_x M = O_1P = n_x = \frac{U - (R + R_x) I_o}{N\Phi_o} \cdot 10^8$$

d'après l'équation du démarrage qui est celle de la droite AB.

En projetant le point P sur l'ordonnée I_oD on obtient le point Q *qui est sur la courbe des vitesses* du moteur avec la résistance R_x en circuit. En effet, l'équation de la caractéristique de pleine marche (C) étant :

$$(7) \qquad n = \frac{U - RI}{N\Phi} \cdot 10^8$$

celle définissant la vitesse avec la résistance R_x en série est :

$$(8) \qquad n_x = \frac{U - (R + R_x) I}{N\Phi} \cdot 10^8$$

et on voit immédiatement que si l'on fait ici $I = I_o$, $\Phi = \Phi_o$, on obtient précisément pour n la valeur donnée par l'expression (6).

En se reportant à la figure précédente on voit qu'en faisant varier R_x par valeurs décroissantes du point A à O_1, le point M se déplace de A à B et le point-vitesse Q de I_o à D en étant à chaque instant sur une courbe-vitesse correspondant à une valeur particulière de R_x.

Les deux équations (7) et (8) permettent, étant donnée la courbe (C), d'en déduire n_x sans faire intervenir le flux Φ_o.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En effet, en les divisant membre à membre, on obtient :

$$\frac{n_x}{n} = \frac{U-(R+R_x)I}{U-RI},$$

d'où la valeur cherchée de n_x en faisant $I = I_o$

$$(9) \qquad n_x = n \frac{U-(R+R_x)I_o}{U-RI_o}$$

Pour avoir un point tel que Q il suffira donc de réduire l'ordonnée $I_o D$ dans le rapport :

$$\frac{U-(R+R_x)I}{U-RI_o}$$

En donnant à R_x toutes les valeurs que l'on veut entre les limites connues $R_{x.\ max.}$ et zéro, on aura pour chacune d'elle une valeur de n_x. La graduation du rhéostat de démarrage est ainsi absolument arbitraire.

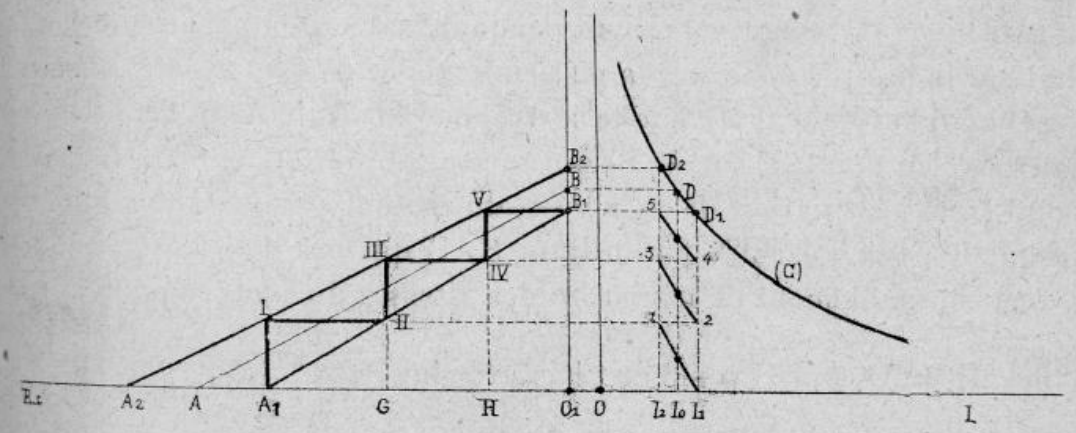


FIG. 31.

En pratique, la loi théorique linéaire des variations simultanées de R_x et n_x représentée par la droite AB n'est pas réalisable et on ne peut que diviser la résistance O_1 A, c'est-à-dire $R_{x.\ max.}$, en un nombre fini et même en un petit nombre de valeurs pour ne pas avoir un « contrôleur » trop compliqué. On se donne alors deux limites entre lesquelles on laissera osciller la valeur du courant de démarrage I_o. Soit I_1 et I_2 ces limites ; à I_1 correspond (fig. 31) une résistance :

$$O_1 A_1 = \frac{U}{I_1} - R$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et un point-vitesse D_1
à I_2 correspond une résistance :

$$O_1 A_2 = \frac{U}{I_2} - R$$

et un point-vitesse D_2.

Projetons ces deux points D_1 et D_2 en B_1 et B_2. Joignons $A_1 B_1$ et $A_2 B_2$. Ces deux droites remplacent la droite AB théorique de la figure précédente. $A_2 B_2$ correspond à $I_2 D_2$ et $A_1 B_1$ à $I_1 D_1$.

Dans ces conditions, le courant de démarrage oscillant entre I_1 et I_2, $(I_1 > I_2)$, les phénomènes seront les suivants :

La résistance $O_1 A_1$ qui constitue la première résistance de démarrage, soit R_1, étant en circuit, le courant est I_1, le moteur démarre et accélère avec une accélération correspondant à un effort F_1 déterminé lui-même par le courant I_1 d'après la courbe des efforts. Le moteur accélérant, il s'ensuit que sa f. c. e. m. croît, et que, par suite, l'intensité du courant absorbé diminue. On laisse alors décroître I_1 jusqu'à sa valeur minima I_2, la résistance R_1 restant en circuit pendant tout ce temps, ce que l'on traduit sur la figure en élevant la perpendiculaire $A_1 I$ à l'axe des abscisses.

Quand la valeur I_2 à laquelle correspond la droite $A_2 B_2$ est atteinte on se trouve au point (I) sur $A_2 B_2$ qui se projette en (1) sur l'ordonnée du point I_2, et la variation de la vitesse du moteur pendant que I_1 décroît jusque I_2 est représentée par la ligne $(I_1\ 1)$ qui est d'après ce que nous avons vu, un élément de la courbe des vitesses du moteur pour la résistance $R_1 = O_1 A_1 = \frac{U}{I_1} - R$ en série avec lui.

Il faut alors maintenant mettre hors circuit une certaine fraction de la résistance R_1 pour faire remonter l'intensité du courant absorbé de I_2 à sa valeur primitive I_1 ce qui se traduit sur la figure en traçant l'horizontale I-II jusqu'à son intersection II avec la droite $A_1 B_1$ correspondant à I_1, en même temps le point vitesse (1) passe en (2) sur l'ordonnée $I_1 D_1$.

La fraction de la résistance qui doit être ainsi mise hors circuit est $I - II = A_1 G$, et la résistante restante $O_1 G$ constitue la seconde résistance de démarrage soit R_2 laquelle reste en circuit jusqu'à ce que l'intensité soit redescendue à I_2 et on arrive alors d'une part au point III et d'autre part au point 3, puis les mêmes phénomènes se reproduiront.

En résumé, pendant le démarrage : l'intensité du courant passe alternativement de I_1 à I_2 et de I_2 à I_1, la vitesse varie suivant les éléments de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courbe $(I_1 - 1)$, $(2 - 3)$, $(4 - 5)$, et les résistances successives de démarrage sont : $R_1 = O_1 A_1$ $R_2 = O_1 G$ $R_3 = O_1 H$, puis on arrive finalement aux points B_1 et D_1 pour lesquels toutes les résistances de démarrage ont été éliminées.

Remarquons que comme conséquence des variations du courant, l'effort produit et par suite l'accélération en résultant, varient par échelons comme l'intensité. Ces échelons seront évidemment d'autant moins sensibles et leur nombre d'autant plus grand que la différence $I_1 - I_2$ sera plus faible, et par suite, que l'on aura un plus grand nombre de résistances partielles R_x, et, finalement, un plus grand nombre de crans au contrôleur car chaque valeur partielle obtenue pour les résistances de démarrage correspond à un cran au contrôleur. Nous arrivons ainsi dans le cas de l'épure théorique précédente à un contrôleur ayant trois crans avec résistances plus un cran de pleine marche, c'est-à-dire sans résistance, soit donc, en définitive, à un contrôleur à quatre crans.

En ce qui concerne l'accélération, on considère seulement en pratique sa valeur moyenne, c'est-à-dire celle qui correspond au courant moyen $I_o = \frac{I_1 + I_2}{2}$. Si F_o est l'effort correspondant à ce courant, on prend pour valeur constante moyenne de l'accélération :

$$A_o = \frac{F_o - P(r + i + \rho)}{102.\lambda P}$$

d'après une formule déjà vue (voir § 34).

Observons ici qu'en général I_o n'est autre que le courant du régime horaire du moteur.

L'ordonnée de I_o rencontre les éléments de courbe $(I_1 - 1)$, $(2 - 3)$, $(4 - 5)$, $(D_1 - D_2)$ en des points dont les ordonnées sont les *vitesses moyennes obtenues à chaque cran du contrôleur pendant le démarrage*, vitesses que l'on peut d'ailleurs calculer directement par application de la formule (9) que l'on écrira en faisant figurer les vitesses en km/h :

$$V_x = V.\frac{U - (R_x + R) I_o}{U - R I_o}$$

et dans laquelle on donnera à R_x successivement les diverses valeurs obtenues.

La ligne brisée A_1 I II III IV V doit aboutir au point B_1 pour qu'après la mise hors circuit de toutes les résistances on soit ramené à l'intensité

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maxima admise I_1. Ce n'est d'ailleurs que par tâtonnements que l'on arrivera à réaliser cette condition et par suite à obtenir un régime convenable de démarrage.

Le problème tel que nous venons de le traiter a donc eu pour résultat de déterminer en plus des résistances de démarrage le nombre de crans du contrôleur, mais il se pose souvent sous une forme un peu différente: on a un contrôleur que l'on veut utiliser; dans ce cas, le nombre de crans est déterminé et par suite le nombre des résistances partielles. Il s'agit alors de déterminer la valeur de chacune de ces résistances. L'épure est exactement la même et c'est par tâtonnements que l'on arrivera à déterminer les valeurs de I_1 et I_2 compatibles avec la condition donnée.

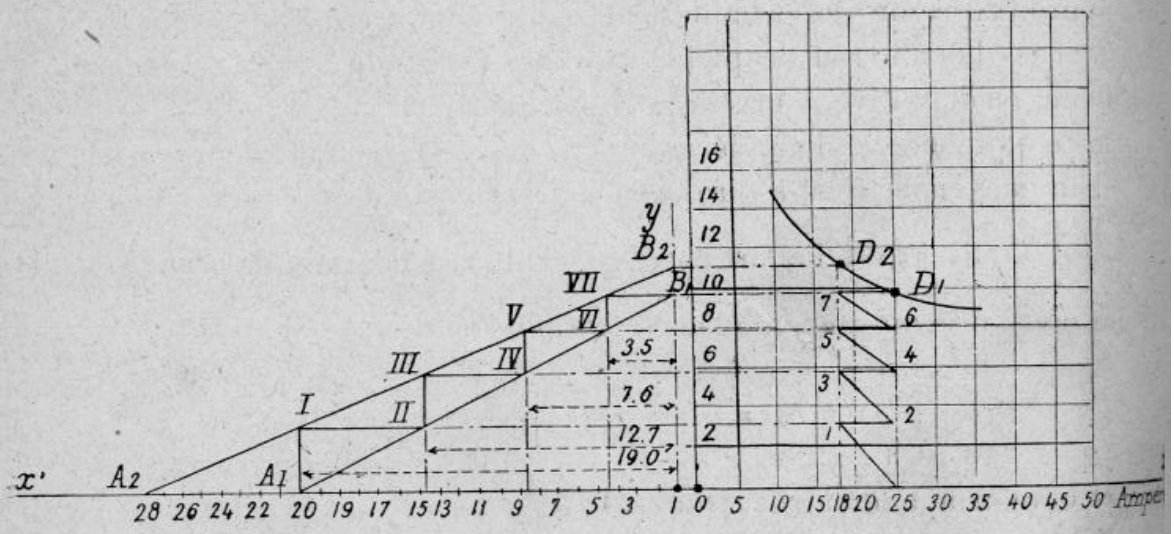


FIG. 32.

Détermination des résistances de démarrage.

Application (*fig. 32*):

Nous avons à titre d'exemple appliqué le tracé précédent au cas d'un équipement à un moteur de résistance $R = 1^{\omega}$ avec $I_o = 21^{a},5$. $I_1 = 25^{a}$. $I_2 = 18^{a}$, et soit : $U = 500$ volts.

Nous avons : $$OA_1 = \frac{500}{25} = 20 \text{ ohms},$$

par suite la première résistance de démarrage est :

$$1A_1 = R_1 = OA_1 - R = 20 - 1 = 19 \text{ ohms}$$

puis $$OA_2 = \frac{500}{18} = 28^{\omega},$$ etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'épure conduit aux résultats suivants :

$$R_1 = 19^{\omega} \quad R_2 = 12^{\omega}7 \quad R^3 = 7^{\omega}6 \quad R_4 = 3^{\omega}5.$$

La ligne brisée A_1 1 II III IV ..... VII aboutissant au point B_1, on en conclut que les valeurs I_1 et I_2 ont été judicieusement choisies.

Le contrôleur devra dans ce cas, comporter 4 crans avec résistance plus un cran de pleine marche, soit au total 5 crans.

2° *Cas de plusieurs moteurs :*

Soit, par exemple, deux moteurs supposés identiques. La méthode est exactement la même, il faut seulement faire attention de donner à R une valeur appropriée.

Si les deux moteurs sont en série, R étant comme toujours la résistance totale d'un moteur, devra être remplacé sur l'épure par 2 R et le segment OO_1 de la figure 31 sera égal à 2 R.

Si les deux moteurs sont en parallèle, R devra être remplacé sur l'épure par $\frac{R}{2}$ et le segment OO_1 sera égal à $\frac{R}{2}$.

37. **Contrôleurs.** — La mise en circuit et hors circuit des résistances de démarrage est réalisée au moyen d'un *contrôleur* du mot anglais "controler". A cet appareil est en outre combiné un *inverseur* pour permettre d'inverser le sens du courant dans les inducteurs ou dans l'induit de façon à renverser le sens de rotation du moteur. En général, on renversera le courant dans l'induit qui présente une self-induction moindre que celle de l'inducteur (1).

L'appareil complet, qui est ainsi en réalité un contrôleur-inverseur, est à axe vertical et comprend deux tambours manœuvrés par deux

(1) Ce procédé est le plus généralement suivi, toutefois, dans certains contrôleurs modernes pour équipements à contracteurs (que nous étudierons ultérieurement à propos des "unités multiples", on inverse les connexions des inducteurs ; cette méthode a son origine dans l'emploi du moteur à pôles de commutation et a été adoptée afin de maintenir une tension réduite sur l'enroulement de ces pôles toujours reliés à l'induit du côté terre. Elle offre en outre l'avantage de réduire les dimensions de l'inverseur puisque la tension entre doigts de contact dans cet appareil n'est plus que de l'ordre de la f. c. e. m. de l'induit et elle atteint seulement une valeur très réduite, égale à la chute ohmique à travers l'enroulement inducteur.

A noter en outre que l'inversion du champ est exclue des contrôleurs à freinage de secours pour éviter tout danger de désamorçage, si petit soit-il, car si une voiture redescendait sans courant, après avoir gravi une rampe, le freinage électrique ne serait plus possible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

manettes indépendantes : l'une pour la marche et a autant de positions qu'il y a de crans de démarrage, l'autre pour l'inverseur qui fonctionne comme un commutateur à deux directions. Les deux manettes sont d'ailleurs enclenchées de telle sorte qu'on ne puisse manœuvrer le tambour inverseur tant que le tambour démarreur n'est pas au zéro. L'enclenchement est en outre généralement réciproque, c'est-à-dire que

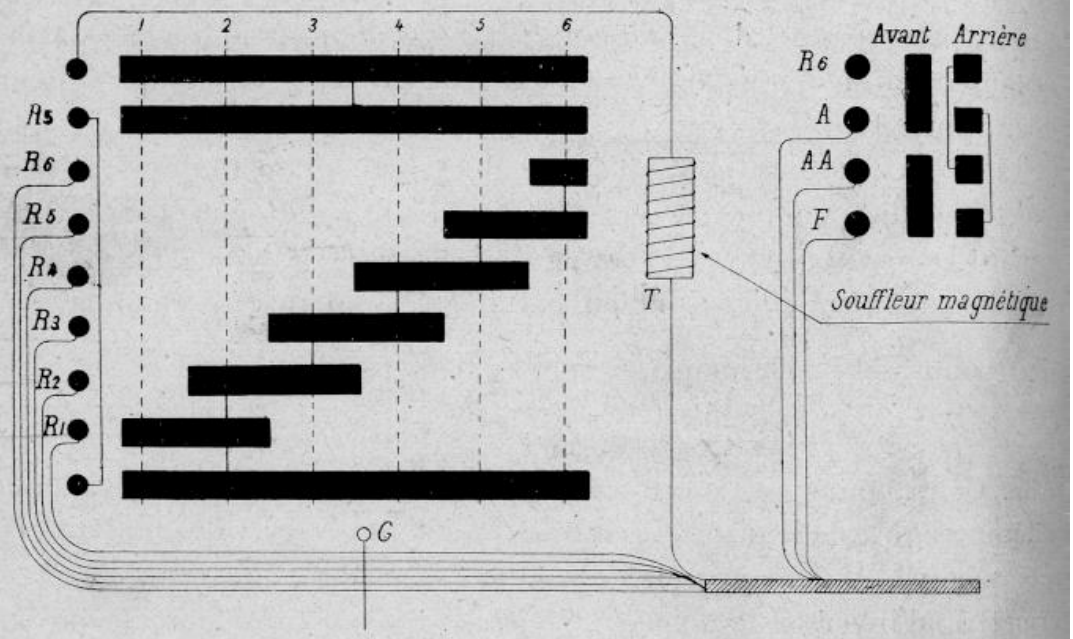




FIG. 33.

Schéma d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston, type R, pour un moteur.

l'on ne peut démarrer le tambour démarreur que lorsque le tambour inverseur est sur une des positions AV ou AR.

Le tambour de marche est muni de touches ou plots ayant la forme de bagues sectionnées qui frottent contre des balais fixes reliés aux différentes bornes de connexion. Le tambour de l'inverseur est analogue mais plus petit. Les différentes touches sont soigneusement isolées les unes des autres ainsi que de l'arbre du cylindre sur lequel elles sont fixées. Chaque fois que l'on déplace un cylindre au moyen de sa manette,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il se forme des étincelles de rupture dont on supprime les effets destructifs en multipliant les points de rupture (subdivision du courant) et en effectuant un soufflage magnétique sur ces points. Ce soufflage peut être réalisé au moyen d'une seule bobine parcourue par le courant total ou au moyen d'autant de bobines qu'il y a d'arcs à souffler réalisant ainsi un soufflage individuel beaucoup plus efficace. Dans ce dernier cas,

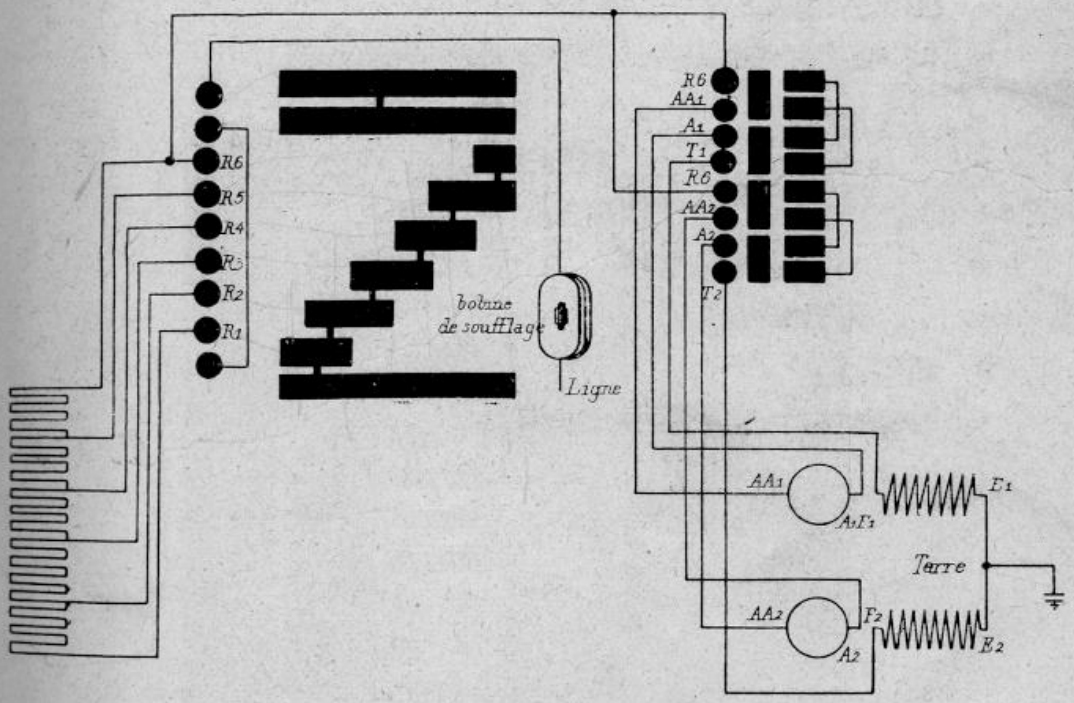


FIG. 34.

Connexions et développement d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston, type R, pour deux moteurs.

chaque bobine est parcourue par le courant qu'elle a à souffler et chaque souffleur est complet, c'est-à-dire qu'il comprend un circuit magnétique, une bobine de soufflage et deux déflecteurs d'arcs.

Enfin, le petit tambour est agencé pour permettre dans le cas d'équipements à deux moteurs par exemple, de mettre un moteur hors circuit en cas d'avarie et de ne marcher qu'avec un seul moteur.

Les schémas des figures 33 et 34 sont ceux de contrôleurs rhéostatiques inverseurs simples à un seul moteur (fig. 33) et à deux moteurs (fig. 34).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La photographie fig. 35 montre l'aspect d'un des contrôleurs précédents de construction Thomson-Houston. On voit nettement sur cette photographie les deux tambours, la bobine de soufflage unique et l'ensemble des cloisons isolantes ou séparateurs d'arcs.

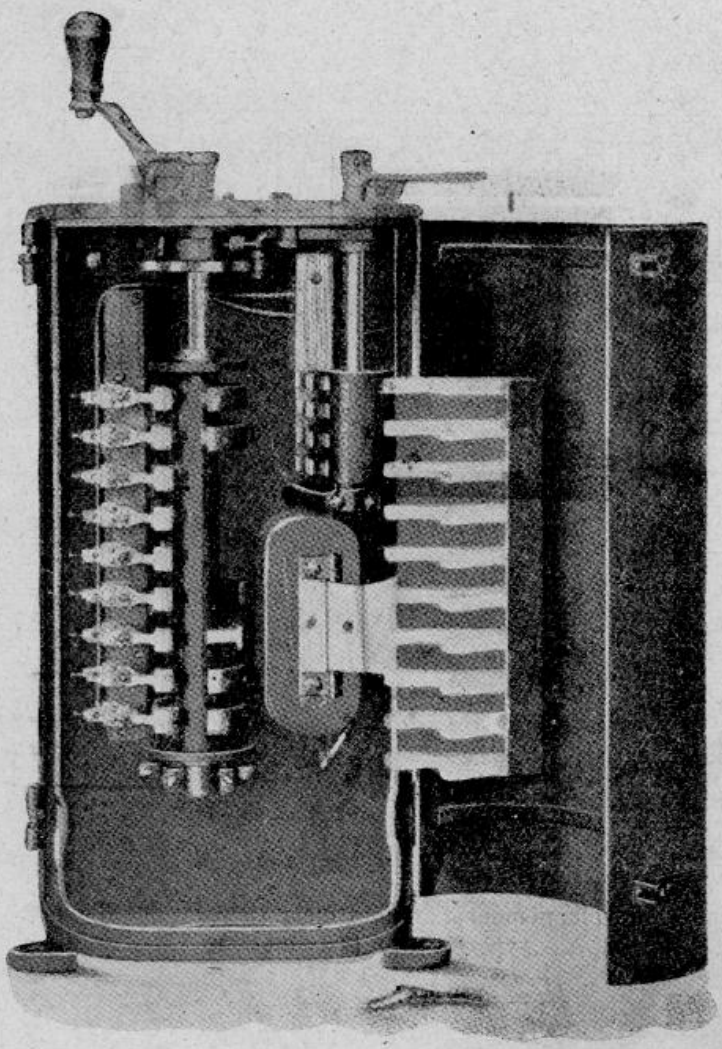


FIG. 35.

Pour réaliser le démarrage, le wattman doit rester un certain temps sur chaque touche. La façon dont est obtenu un démarrage est ainsi entièrement subordonnée à la manière suivant laquelle est manœuvré le contrôleur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

38. **Résistances employées.** — Elles sont généralement constituées par des éléments identiques juxtaposés (fig. 36), en fonte, dits " grilles ", montés dans des cadres.

Chacune des résistances R_x calculées comme nous l'avons vu, comprend un groupe d'éléments ; ce groupe est isolé et relié au moteur.

Les éléments d'un groupe forment une résistance continue ; des rondelles isolantes en mica alternent avec les contacts pour deux éléments consécutifs. L'ensemble forme une boîte de résistances. Elles sont assez lourdes, encombrantes et cassantes, mais les éléments sont facilement remplaçables.

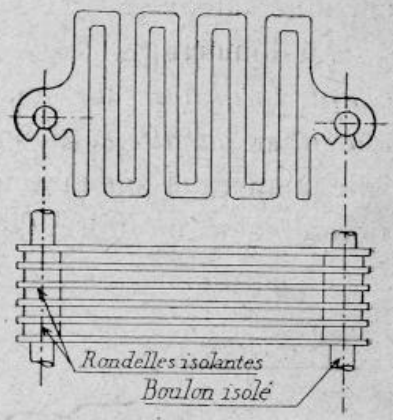
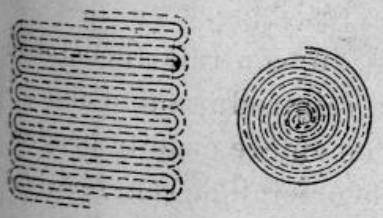


FIG. 36.

On emploie aussi du ruban de maillechort (fig. 37), en spirale ou en zigzag isolé à la micanite. Ce ruban a environ $25 \times 0{,}5$ mm.^{2} de section.

L'ensemble de ces résistances, quel qu'en soit le type, doit former un tout compact résistant bien aux vibrations et à une grande élévation de température.

39. **Contrôle série-parallèle.** — Cette méthode est la plus généralement employée. Elle a été appliquée la première fois par la General Electric Co en 1893.


FIG. 37.

En général, un véhicule électrique est mû par plusieurs moteurs semblables, le plus souvent 2 ou 4. Nous examinerons d'abord le cas de deux moteurs.

La méthode du contrôle série-parallèle est basée sur une remarque faite précédemment à propos de l'influence d'une modification de la différence de potentiel aux bornes d'un moteur. L'application de *cette méthode demande au moins deux moteurs* que l'on peut coupler de deux façons en régime permanent (fig. 38), en *série* (schéma A), et en *parallèle* (schéma B).

On obtient donc *deux vitesses de régime*, l'une étant approximati-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vement la moitié de l'autre. Cette méthode permet de réduire considérablement les pertes au démarrage. Les moteurs sont d'abord mis en série, puis ensuite en parallèle lorsque leur f. c. e. m. a atteint une certaine valeur.

Au démarrage, *les deux moteurs étant en série produisent le même couple total avec un courant moitié de celui qu'ils absorberaient s'ils étaient en parallèle*. En outre, il suffit, pour limiter le courant à une même valeur maxima par moteur, et pour des moteurs donnés, d'une résistance notablement moindre. On introduit encore des résistances dans le circuit

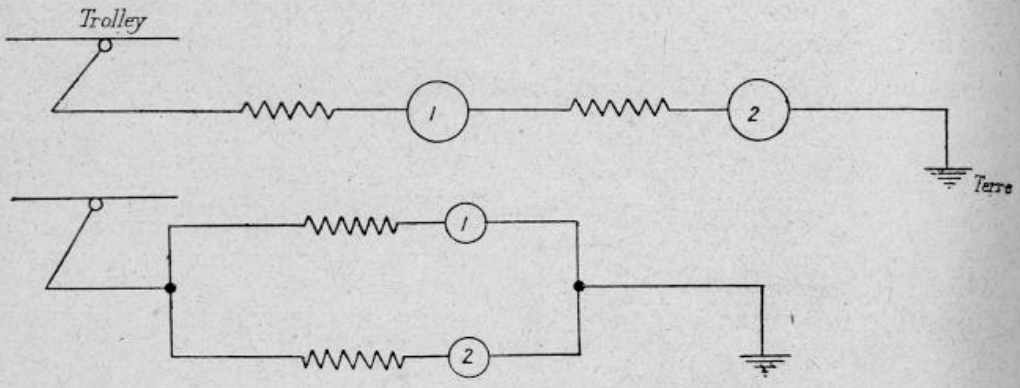


FIG. 38.

Schémas du couplage série-parallèle.

pour empêcher le courant de démarrage d'atteindre une valeur trop élevée.

On enlève ensuite progressivement ces résistances en les court-circuitant comme on a vu dans la méthode du contrôle rhéostatique, puis on couple les moteurs en parallèle en réintroduisant d'abord les résistances dans le circuit, résistances que l'on enlève ensuite progressivement pour avoir finalement un groupement en parallèle sans résistance, ce qui correspond à la vitesse maxima.

On a donc bien deux vitesses de régime sans résistance et on voit qu'il y a application de la méthode rhéostatique pour la période de mise en vitesse et plus généralement pour l'obtention de toute vitesse intermédiaire.

Les différentes connexions sont réalisées au moyen d'un contrôleur "série-parallèle", construit sur les mêmes principes qu'un contrôleur rhéostatique dont il est un perfectionnement et une amplification.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les schémas ci-contre (fig. 39), montrent les connexions successives de deux moteurs avec trois résistances de démarrage R_1 - R_2 - R_3.

On voit que pour passer de la marche série à la marche parallèle, il est nécessaire de modifier les connexions des moteurs avec la ligne d'alimentation. Au début, on coupait le courant, d'où le double inconvénient

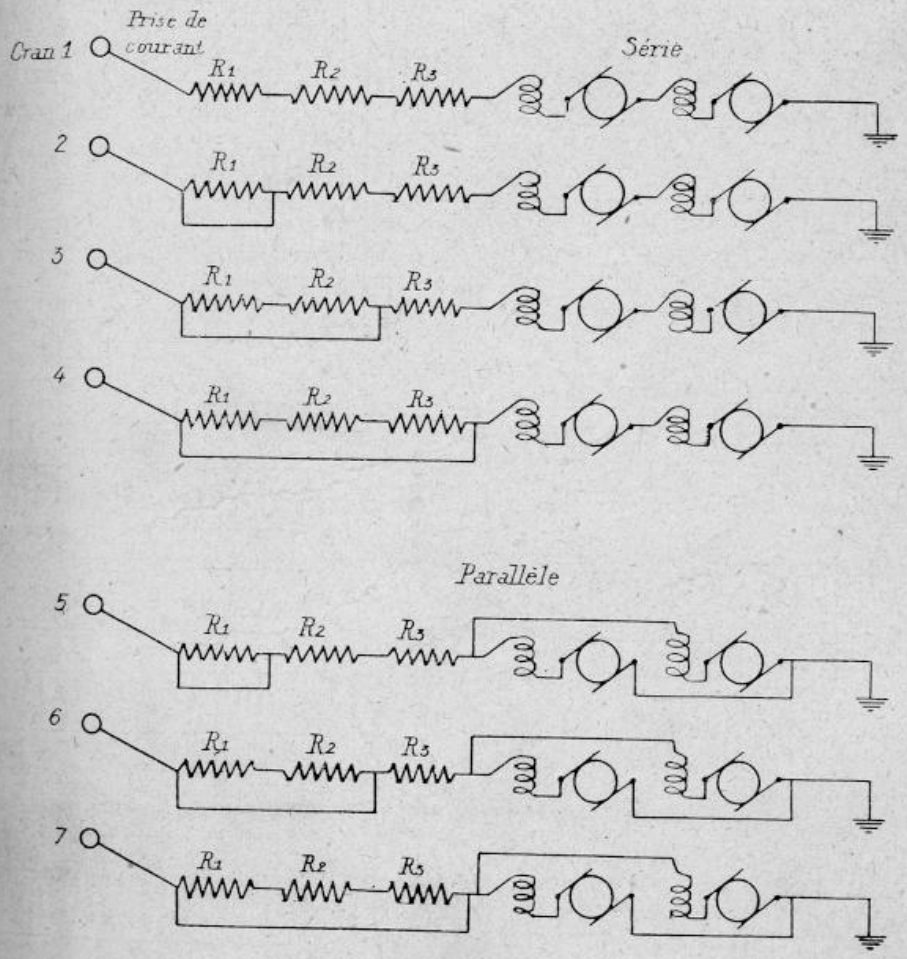


FIG. 39.

de supprimer l'effort de traction pendant un certain temps et de produire deux à-coups : l'un à la suppression, l'autre au rétablissement du courant.

Un premier perfectionnement a été de maintenir le courant dans un des moteurs en court-circuitant l'autre moteur, puis le supprimant, après toutefois avoir ajouté à nouveau des résistances pour limiter l'intensité à une valeur convenable pendant l'opération, mais il subsiste encore dans cet arrangement des variations de couple, réduites toutefois par rapport

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au cas précédent. Les schémas de la figure 40 donnent la succession des connexions réalisées. Les connexions A B C se rapportent à la période de transition. Les vitesses de régime sont obtenues aux crans 4 et 8. Nous donnons en planche hors-texte fig. 41, comme application de ce procédé

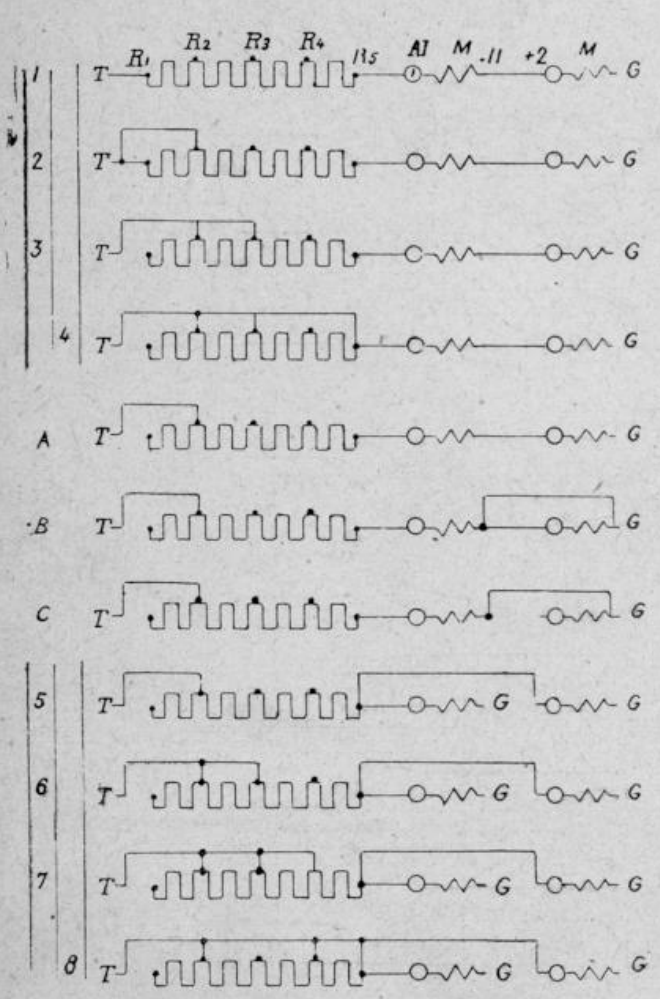


FIG. 40.

Passage de série à parallèle par court-circuit, d'un moteur.

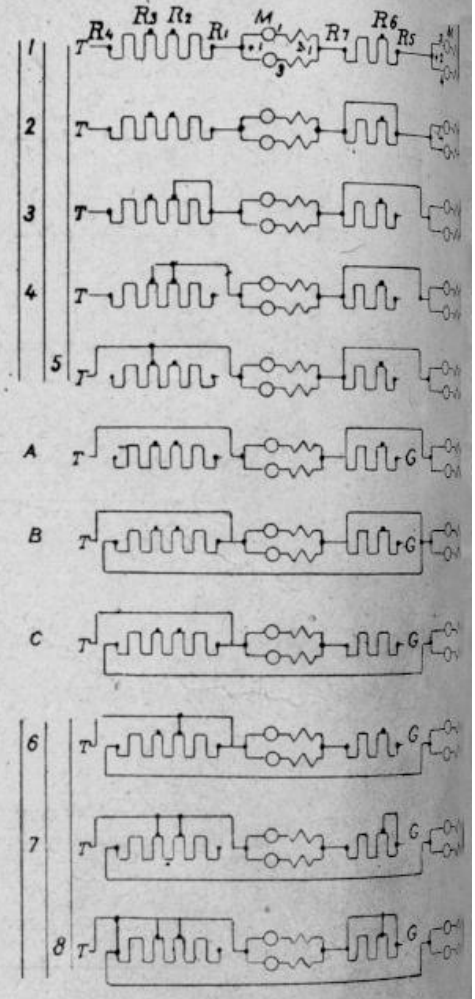


FIG. 42.

Passage de série à parallèle par la mi... du pont.

le schéma développé d'un équipement avec contrôleurs Thomson-Houston K-36-Z dont sont munies certaines automotrices de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris.

Ce contrôleur permet en outre le freinage de secours (1) par mise des

(1) L'étude du freinage électrique sera traitée ultérieurement (chapitre XII).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

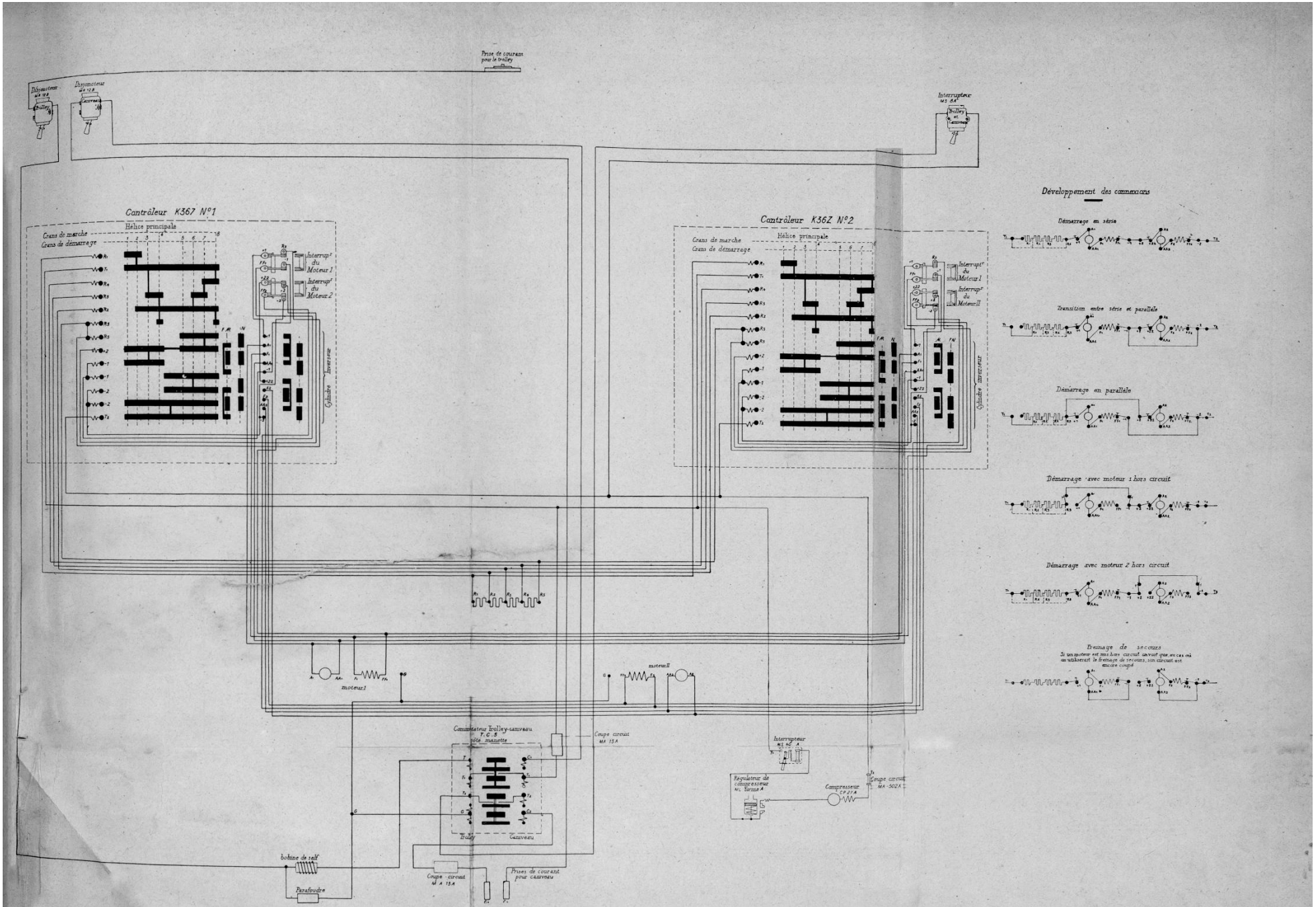


FIG. 41.

Equipement à 2 moteurs avec contrôleurs Thomson-Houston K-36-Z à frein de secours (Compagnie Générale des Omnibus de Paris).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteurs en court-circuit. (L'équipement de ces voitures comporte en plus un appareil spécial dit " commutateur Trolley-Caniveau " fonctionnant sur le principe des commutateurs à deux directions et qui permet d'alimenter les moteurs soit par le trolley, soit par le caniveau. Cet appareil est représenté schématiquement sur la figure précédente.)

Un dernier perfectionnement a été l'adoption de la connexion à "pont" au moyen de laquelle le courant de pleine charge est maintenu à travers tous les moteurs pendant la période de transition de série à parallèle. On obtient ainsi une accélération uniforme et on réduit en même temps les chocs sur les moteurs et les engrenages ainsi que sur les attelages en cas de service avec remorque, auxquels donnent lieu les procédés précédents. Il faut remarquer toutefois que cette méthode du pont conduit à des dimensions plus grandes pour le contrôleur. Son intérêt est surtout marqué pour les équipements puissants mais on peut parfaitement s'en passer pour les petits et moyens équipements ce qui est, par exemple, le cas du contrôleur de la figure précédente (fig. 41), qui correspond à l'emploi de deux moteurs de 60 chevaux.

Les schémas de la figure 42 donne la succession des connexions réalisées dans cette méthode "à pont". A comparer ces schémas avec ceux de la figure 40.

Comme application de la connexion à pont, nous donnons en planche hors texte le schéma (fig. 43) d'un contrôleur Thomson-Houston type K-34 pour équipements à 4 moteurs de 75 chevaux ou 2 moteurs de 150 chevaux. Ce contrôleur n'est pas prévu pour freinage de secours.

40. **Détermination graphique des résistances de démarrage d'un contrôle série-parallèle.** — On procède de la même manière que dans le cas de la méthode du contrôle rhéostatique. Il y a toutefois à faire cette détermination pour le couplage série et pour le couplage parallèle autrement dit le graphique étudié précédemment est à faire deux fois. Il faut observer à ce sujet que si on se fixe comme intensité maxima pour un moteur, I_1, ce sera ce courant qui passera par les résistances pendant le montage série et le double de cette valeur, soit $2\,I_1$ pour le montage en parallèle. Les résistances totales correspondantes en circuit seront donc respectivement $\frac{U}{I_1}$ et $\frac{U}{2\,I_1}$. En outre, pour avoir les résistances partielles R_x du rhéostat, il faut retrancher des valeurs obtenues, les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résistances intérieures combinées des deux moteurs, donc 2 R s'ils sont en série et $\frac{R}{2}$ s'ils sont en parallèle.

On commencera par construire les courbes de vitesses maxima, c'est-à-dire sans résistances intercalées, pour les deux couplages couplage série et couplage parallèle. Pour une même valeur du courant par moteur, les vitesses satisfont à l'équation bien connue :

$$\frac{V'}{V} = \frac{\frac{U}{2} - RI}{U - RI}$$

V′ correspondant à la marche en série sans résistances et V à la marche en parallèle également sans résistances.

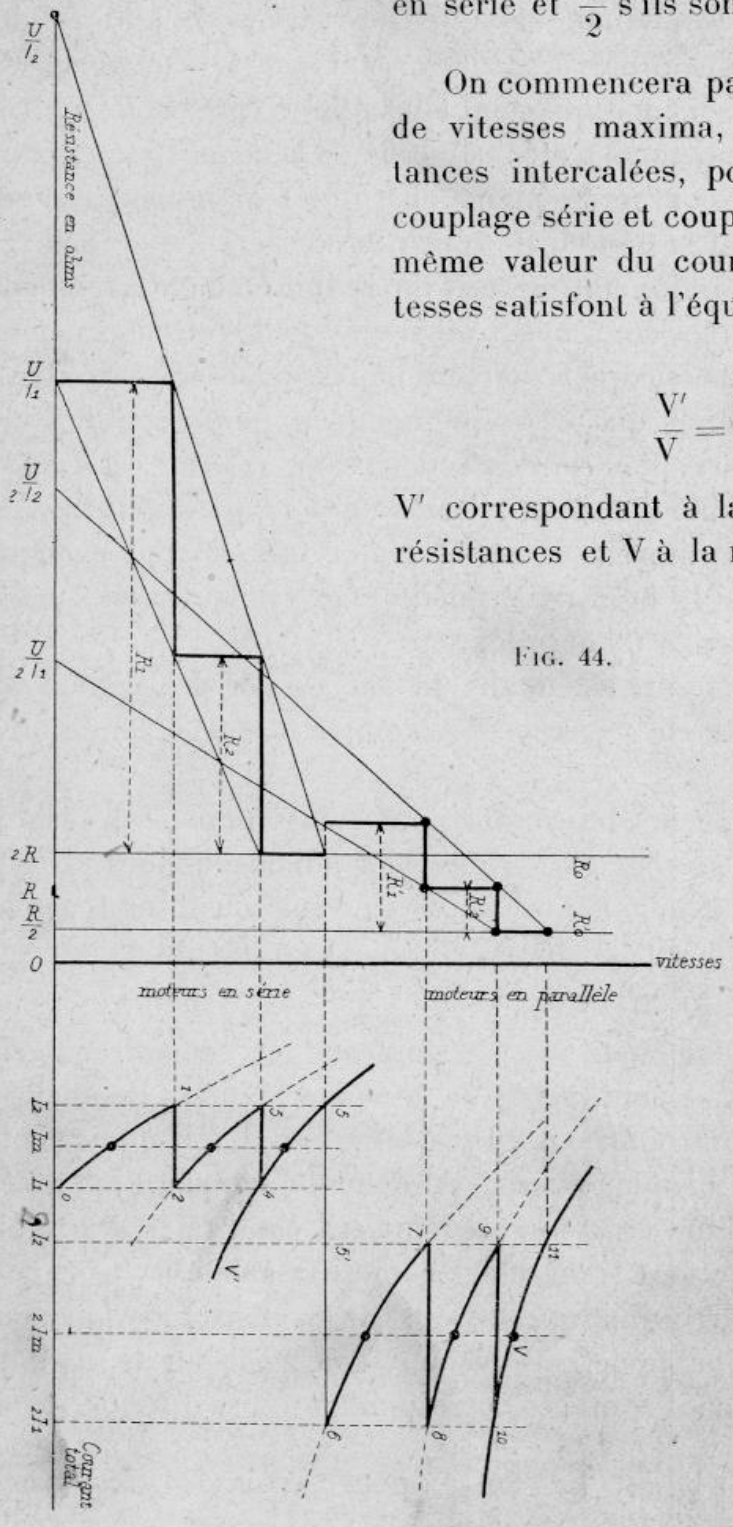


FIG. 44.

L'épure du démarrage est alors selon la figure 44 : V et la caractéristique en charge sous U et V′ la caractéristique sous $\frac{U}{2}$. Les variations de la vitesse et du *courant total absorbé* sont représentées par la ligne brisée 0-1-2-3-4-5 pour la marche moteurs en série puis 6-7-8-9-10-11 pour la marche moteurs en parallèle et les résistances partielles sont R_1 et R_2 pour le démarrage moteurs en série et R'_1 et R'_2 pour le démarrage moteurs en parallèle.

Comme précédemment, les courbes 0-1, 2-3, 6-7, 8-9 sont les courbes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des vitesses avec résistances en série et leurs points d'intersection avec les ordonnées du courant moyen I_m et $2\ I_m$ donnent les vitesses moyennes correspondant aux différents crans du contrôleur, vitesses que l'on peut d'ailleurs calculer directement. L'épure précédente correspond à 3 crans série et 3 crans parallèle.

Les troisièmes crans dans chaque cas correspondent à la marche sans résistances.

Pratiquement, pour faire une économie de matière et de poids, on cherche à utiliser le plus possible comme résistances en régime parallèle celles du régime série. Certaines résistances seront alors communes aux deux couplages. On ne peut donc pas parler en toute rigueur d'un calcul exact de résistances. En outre, il dépend essentiellement de l'habileté du wattman (exception faite pour les équipements à accélération automatique que nous étudierons plus tard à propos des " unités multiples ") que la variation de l'intensité soit telle que l'on ait une accélération moyenne constante puisqu'il faut évidemment passer d'une résistance à l'autre au moment convenable.

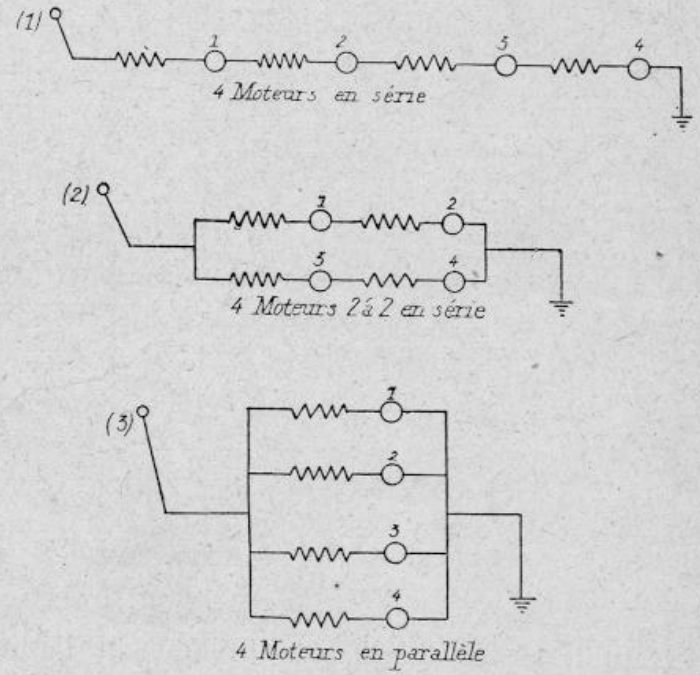


FIG. 45.

41. **Equipements à quatre moteurs.** — Lorsque l'équipement d'une voiture comporte quatre moteurs, on peut effectuer les montages symétriques suivants (fig. 45) : (1) est la combinaison à faible vitesse ; (2) est celle à moyenne vitesse et (3) celle à grande vitesse.

Ces trois couplages distincts fournissent des f. c. e. m. croissantes suivant la proportion 1, 2, 4.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En pratique, au lieu d'employer ces trois combinaisons possibles de régime, on se contente généralement de *diviser les quatre moteurs en deux groupes de deux moteurs en parallèle. Chaque groupe* tient alors lieu d'un *seul moteur* du cas d'un équipement à deux moteurs. Les deux combinaisons de régime sont alors celles des schémas de la figure 46.

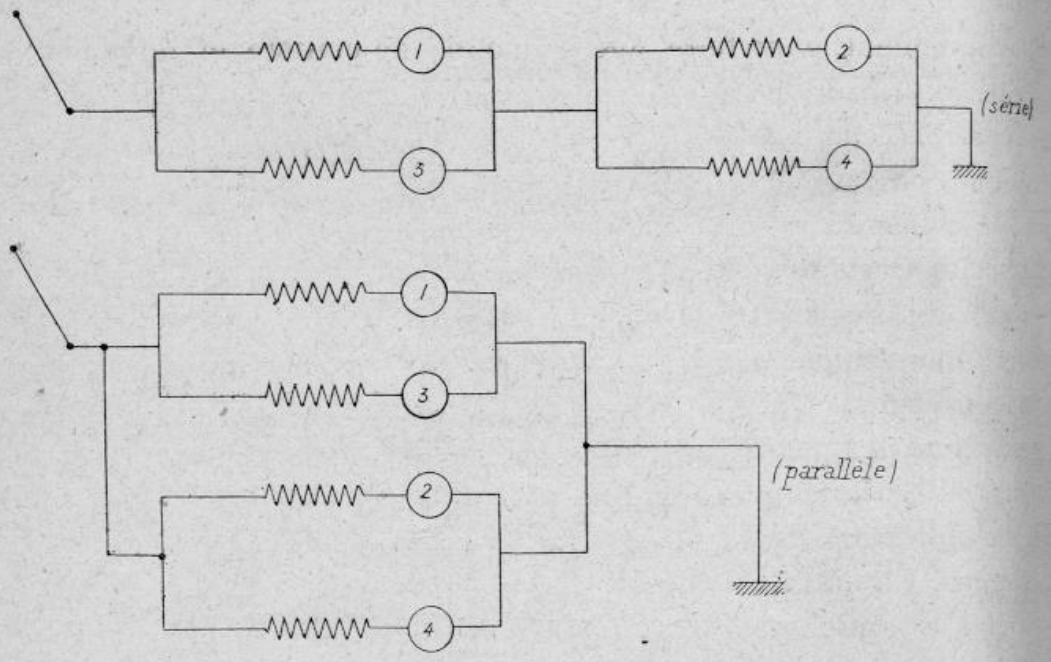


FIG. 46.

L'influence du mode de couplage sur l'adhérence utilisable peut du reste faire préférer cette méthode sur les lignes à fortes rampes ou à démarrages fréquents. Le couplage des quatre moteurs en série présente, en effet, un inconvénient qui est le suivant :

S'il arrive qu'un des essieux ait moins d'adhérence que les autres au moment du démarrage, il peut arriver que les roues de cet essieu patinent et que le moteur qui l'actionne s'emballe. Cet inconvénient est peu marqué avec les équipements à deux moteurs dans lesquels l'adhérence est facilement répartie d'une manière à peu près égale entre les essieux moteurs, soit que le véhicule soit à deux essieux ou à bogies à traction maxima, soit qu'il soit à bogies à roues égales, auquel cas il est bon de placer les deux moteurs sur le même bogie.

Dans les voitures à bogies, il peut arriver, par exemple en courbe, que l'adhérence d'un des bogies soit beaucoup plus grande que celle de l'autre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est pourquoi la disposition de quatre moteurs en série pourrait, dans ce cas, causer des difficultés au démarrage. *Lorsque l'on couple les moteurs par groupes de deux en parallèle, il faut placer sur un même bogie deux moteurs appartenant à deux groupes différents.*

Par exemple, pour le couplage des moteurs de la figure précédente, les moteurs doivent être groupés comme le représente la figure 47.

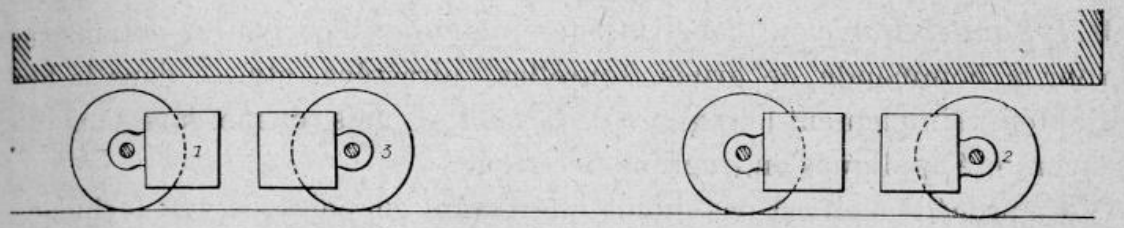


FIG. 47.

42. **Contrôleurs.** — Les contrôleurs ne diffèrent en général pas des contrôleurs série-parallèle précédents pour une même puissance totale des moteurs à contrôler puisque les quatre moteurs sont groupés par couples. C'est en particulier le cas du contrôleur de la figure 43 qui convient pour une puissance totale de 300 chevaux répartie en deux ou en quatre moteurs.

43. **Cas particulier de l'alimentation à haute tension.** — Quand la tension à la ligne d'alimentation dépasse 1.000 ou 1.200 volts, on divise en général les moteurs en groupes de deux connectés en permanence en série sous la tension totale afin de n'avoir aux bornes de chacun d'eux que la moitié de la tension totale. Dans ces conditions, un groupe de 2 moteurs se comporte au point de vue du contrôle comme un seul moteur et comme le groupe de 2 moteurs en parallèle du cas précédent de la figure 46.

Nous verrons plus loin deux exemples réalisés au Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, où on a même adopté respectivement des groupes de trois et de quatre moteurs en permanence en série pour la pleine marche sous 3.000 volts.

44. **Modification du bobinage de l'induit.** — On peut considérer que cette méthode est une variante de la méthode précédente série-parallèle.

Au lieu de coupler deux moteurs séparés, tantôt en série, tantôt en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parallèle, rien n'empêche d'appliquer le même principe à un seul moteur isolé : on peut, en effet, disposer sur un même noyau d'armature deux bobinages semblables aboutissant chacun à un collecteur et constituant deux circuits absolument indépendants, qu'on couplera à volonté en série ou en parallèle. Cette solution équivaut, au point de vue du résultat, à doubler ou dédoubler le nombre des spires de l'induit et c'est la seule qui apparaît pratiquement pour obtenir une modification de ce nombre. *MM. Sautter-Harlé* ont construit des moteurs de ce genre, notamment pour la commande de grues, tourelles cuirassées, etc..... dans le but d'obtenir simplement le réglage de la vitesse, mais ces moteurs n'ont pas encore été appliqués en traction électrique.

Ce procédé n'en est pas moins intéressant au point de vue technique et de sa possibilité d'application.

45. **Variation du flux inducteur.** — Cette variation peut s'obtenir :

Par *modification du nombre des spires inductrices* (Van de Poële-Sprague);
Par *shuntage des spires inductrices par des résistances.*

Dans ces deux procédés, on fait en définitive varier le nombre des ampère-tours inducteurs effectifs et cette variation tend, ainsi que nous le verrons, à modifier à la fois le flux inducteur et la résistance des inducteurs. Ces modifications tendent toutes deux à faire varier dans le même sens la vitesse de rotation. Le réglage est par conséquent possible par cette méthode.

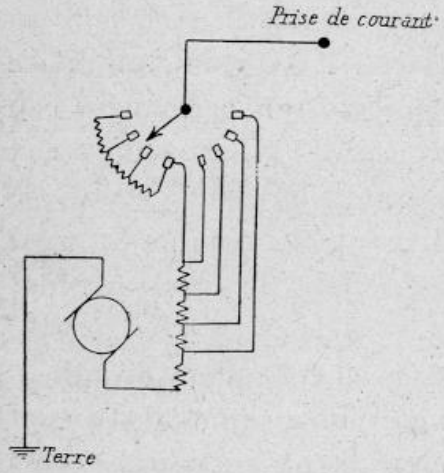


FIG. 48.

1° *Modification du nombre des spires inductrices.* — Ce procédé ou *méthode de la boucle* (schéma fig. 48) de Van de Poële consistait à supprimer progressivement des spires. Il a été abandonné parce qu'il utilisait mal le cuivre de l'enroulement inducteur aux fortes charges.

A cette méthode a succédé celle imaginée par Reckenzaun et appliquée en Amérique sur une grande échelle par Sprague jusqu'en 1890. Dans cette méthode, l'enroulement inducteur est divisé en galettes indépendantes que l'on supprime ou combine en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

différents groupements. Elle est souvent désignée sous le nom de *méthode par commutation des bobines de champ*.

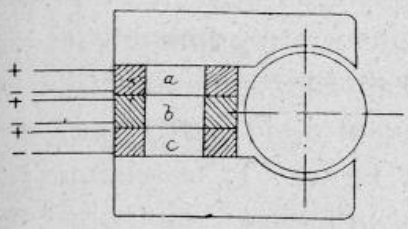


Fig. 49.

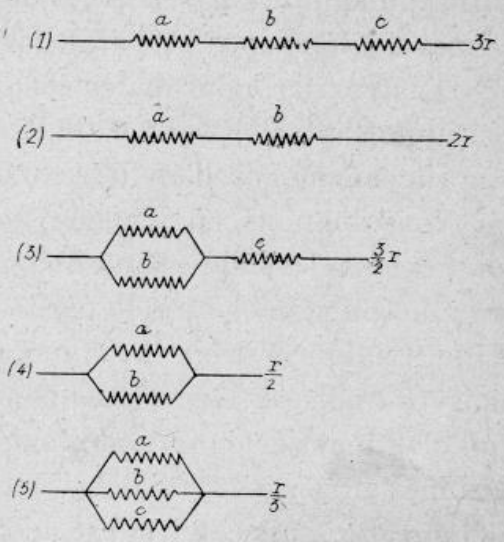


Fig. 50.

Les figures 49 et 50 représentent la disposition schématique d'un enroulement à 3 galettes identiques *a*. *b*. *c*. pour un moteur bipolaire Sprague et les divers modes de groupement qu'on peut, à l'aide d'un commutateur spécial, donner à ces trois galettes sur le circuit principal allant à l'armature. On remarquera qu'au fur et à mesure que l'on modifie comme il est indiqué les combinaisons des galettes, on diminue le nombre des ampères-tours inducteurs. Pour une même intensité I, si "*m*" est le nombre de spires et "*r*" la résistance de chacune des galettes, on peut former le tableau suivant :

COMBINAISONS	AMPÈRES-TOURS INDUCTEURS	RÉSISTANCE DE L'ENROULEMENT
1	3 *m* I	3 *r*
2	2 *m* I	2 *r*
3	2 *m* I	$\frac{3}{2}$ *r*
4	*m* I	$\frac{r}{2}$
5	*m* I	$\frac{r}{3}$

Il est, en général, nécessaire d'employer en outre une résistance de démarrage. C'est ce qui a été réalisé dans la plupart des applications

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parmi lesquelles nous citerons les tramways du Mans, d'Angers, de Rennes, d'Avignon, etc. Il y a lieu cependant de remarquer qu'on peut, en mettant suffisamment de cuivre sur les inducteurs, arriver à supprimer les résistances de démarrage. Il paraît toutefois plus simple de conserver celles-ci.

D'autre part, pour éviter les étincelles de rupture lorsque le courant est important, il est opportun de fermer d'abord chaque galette *a*, *b* ou *c* sur elle-même afin d'éteindre le courant avant de la mettre hors-circuit.

Nous donnons en planche hors-texte, figure 51, le schéma (1) des connexions développées d'un équipement Sprague à 2 moteurs combiné avec le freinage électrique par les moteurs réalisé par la Société de Fives-Lille. La figure 51 *bis* sur la même planche montre les diverses combinaisons réalisées avec un seul moteur pour simplifier. Pour le freinage qui s'obtient par deux combinaisons graduées, le moteur avec ses trois bobines en série est d'abord fermé en court-circuit sur le rhéostat de démarrage, puis celui-ci est mis lui-même en court-circuit. La marche arrière ne se fait qu'à la vitesse minima.

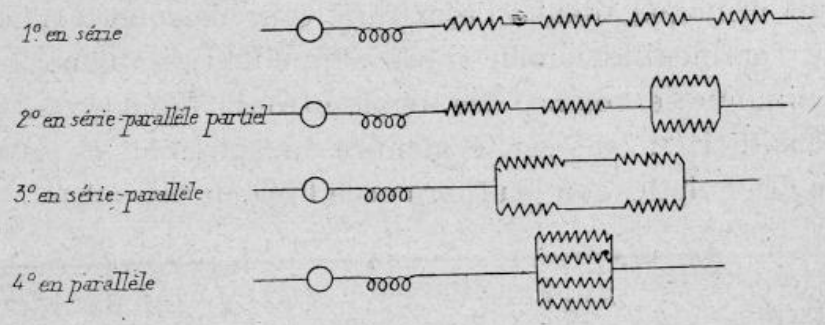


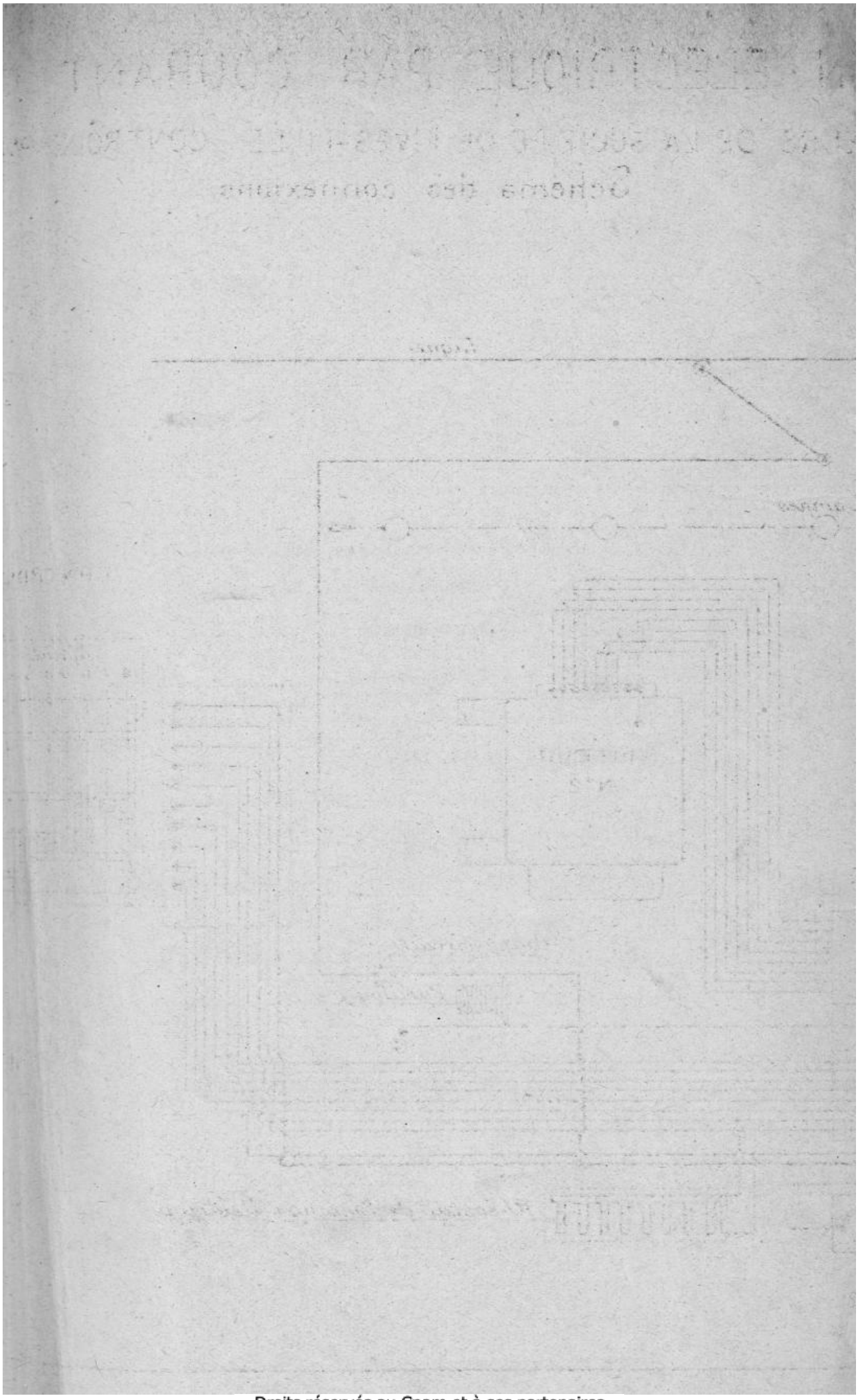
FIG. 52.

Application au cas de moteurs tétrapolaires. — Dans le cas où les moteurs sont à quatre pôles, ce qui est le cas général, on peut envisager de coupler les bobines elles-même des pôles sans partager leurs enroulements en sections.

Soit, par exemple, un équipement à 2 moteurs tétrapolaires ; on peut combiner les 4 bobines inductrices principales successivement comme suit (fig. 52), les bobines des pôles de commutation, si ceux-ci existent, restant évidemment en dehors de ces combinaisons.

(1) Emprunté à BLONDEL et DUBOIS. — *La Traction électrique sur voies ferrées*, t. II, page 227.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 51 TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANT CONTINU

ÉQUIPEMENT SPRAGUE A DEUX MOTEURS DE LA SOCIÉTÉ DE FIVES-LILLE CONTRÔLE PAR COMMUTATION DES BOBINES DE CHAMP

Schéma des connexions

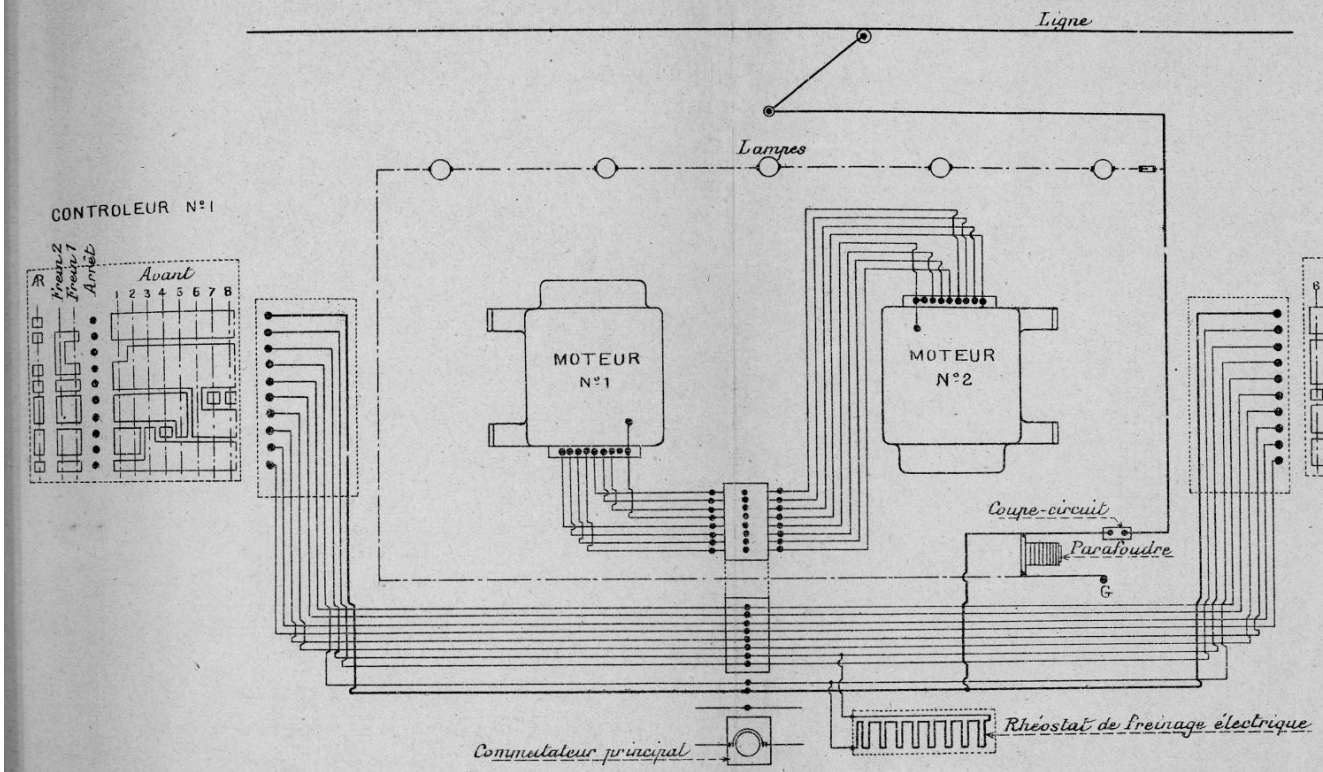
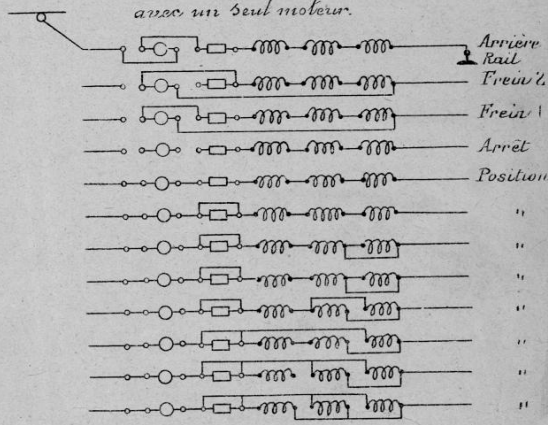


Fig. 51 bis

Schéma des combinaisons réalisées avec un seul moteur.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ces schémas, nous n'avons représenté qu'un seul moteur avec ses pôles de commutation (S : ∞∞∞) et ses quatre pôles principaux (P) (un pôle : ~~~~~). Le circuit de l'autre moteur se présente de la même manière dans chaque cas. On obtient ainsi quatre champs inducteurs différents pour chaque courant d'armature donné. En combinant ces groupements avec le couplage série-parallèle des moteurs, on voit que l'on obtient avec un équipement à deux moteurs tétrapolaires, 8 vitesses économiques de marche ou vitesses de régime.

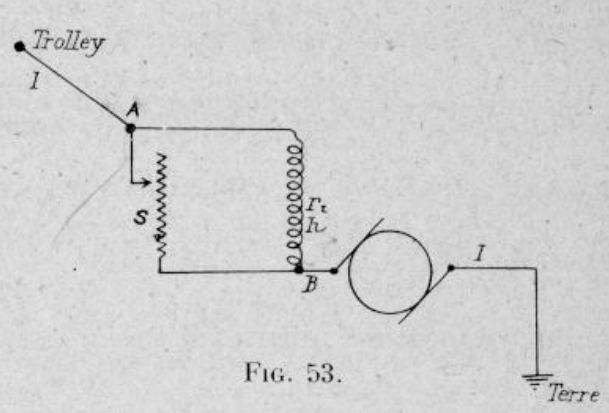


FIG. 53.

2° *Shuntage des enroulements inducteurs par des résistances.* — Ce procédé est plus général. Il consiste à intercaler en dérivation entre les bornes des inducteurs un shunt variable et réglable à travers lequel passe une fraction plus ou moins importante du courant total d'armature I. Ce procédé permet comme le précédent de modifier le nombre d'ampères-tours inducteurs. Il permet toutefois d'obtenir un nombre plus grand de vitesses de régime que par l'emploi de galettes et son extrême simplicité le rend préférable au système Sprague.

Soient (fig. 53) :

M le nombre de spires inductrices.
s la résistance réglable du shunt.
r_i la résistance totale des bobines inductrices.
I le courant tolal.
I_i le courant inducteur.

La résistance combinée ρ des inducteurs et du shunt, c'est-à-dire entre A et B, est telle que :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{s}$$

d'où :

$$\rho = \frac{r_i\, s}{r_i + s}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a d'ailleurs :

$$r_i\, I_i = \rho\, I = I\, \frac{r_i\, s}{r_i + s}, \tag{1}$$

d'où :

$$I_i = \frac{I\, s}{r_i + s}. \tag{2}$$

Les ampères-tours inducteurs sont alors $(M\, I_i)$ tel que :

$$(M\, I_i) = (M\, I).\, \frac{s}{r_i + s} \tag{3}$$

au lieu de $(M\, I)$.

Leur rapport est ainsi égal à $\frac{s}{r_i + s}$.

Voyons maintenant ce que devient la résistance intérieure du moteur.

Or, soit r la somme des résistances intérieures autres que r_i, c'est-à-dire la somme des résistances de l'induit, des balais et de leur résistance de contact, et des pôles supplémentaires s'ils existent. r a évidemment la même valeur pour le moteur normal que pour le moteur à inducteurs shuntés.

R étant la résistance totale intérieure du moteur normal et R_s celle du même moteur, mais avec inducteurs shuntés, on aura évidemment :

$$R = r + r_i$$
$$R_s = r + \rho,$$

en outre, d'après (1) et (2) on a :

$$\rho = \frac{I_i}{I} r_i = \frac{r_i\, s}{r_i + s} = \frac{r_i}{\frac{r_i}{s} + 1}$$

et :

$$I_i = \frac{I}{\frac{r_i}{s} + 1},$$

On voit ainsi que, au fur et à mesure que l'on diminue s, le courant I_i diminue dans les inducteurs et en même temps la résistance globale ρ du système A B va également en décroissant. La réalisation de ce procédé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exige seulement que dans aucun cas le courant maximum fourni à l'excitation ne produise plus qu'un commencement de saturation.

Ce procédé peut être avantageusement combiné avec la méthode série-parallèle auquel cas il permet d'obtenir plusieurs vitesses économiques de régime au lieu de deux seulement.

46. **Caractéristiques du moteur à inducteurs shuntés par une résistance.** — Soit C la courbe du flux inducteur Φ pour le moteur normal fonctionnant à plein champ (fig. 53 *bis*), M I étant les ampères-tours inducteurs.

On a : $$\Phi = f(\mathrm{M\,I}).$$

Au courant total de ligne I, qui est en même temps le courant inducteur, correspond un nombre d'ampère-tours inducteurs $(\mathrm{M\,I}) = \mathrm{O\,P}$ et un flux inducteur $\Phi = \overline{\mathrm{P\,H}}$.

Pour la marche en moteur à inducteurs shuntés et pour un courant de ligne I, on a un nombre d'ampère-tours inducteurs utiles :

$$(\mathrm{M\,I}_i) = (\mathrm{M\,I})\frac{s}{r_i + s} = \overline{\mathrm{O\,Q}}$$

et, par suite, un flux inducteur :

$$\Phi_s = \overline{\mathrm{Q\,K}}.$$

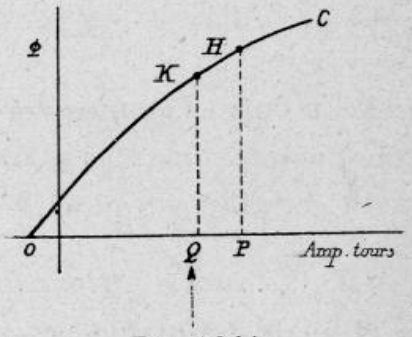


FIG. 53 *bis*.

On peut alors, en utilisant la courbe du flux en fonction du courant total ou de ligne, calculer les caractéristiques en moteur à inducteurs shuntés en procédant de la même manière que s'il s'agissait d'un moteur ordinaire de résistance totale intérieure R_s.

Au lieu de procéder ainsi directement, on peut se proposer de déduire les caractéristiques du moteur fonctionnant avec inducteurs shuntés de celles du même moteur fonctionnant à plein champ. C'est ainsi que se présente le plus souvent le problème et il se pose comme suit :

Soit à calculer les caractéristiques correspondant à un shuntage des inducteurs de β %. (β sera, par exemple, égal à 25, 30 ou 50) ce qui veut dire que le courant passant dans le shunt devra être β % du courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

total I, c'est-à-dire que le courant I_s passant dans le shunt étan évidemment $I_s = I - I_i$ on devra avoir :

$$I_s = I - I_i = \frac{\beta}{100} \cdot I$$

ce que nous écrirons :

$$I_s = I - I_i = \alpha I$$

en posant

$$\alpha = \frac{\beta}{100}$$

pour simplifier l'écriture.

On en déduit $I_i = (1 - \alpha) I$ et par suite d'après l'équation (2)

$$1 - \alpha = \frac{s}{r_i + s}$$

d'où :

$$s = \frac{1 - \alpha}{\alpha} r_i .$$

En outre, comme $\rho = \frac{r_i s}{r_i + s}$, on a $\rho = (1 - \alpha) r_i$.

Ceci posé, voyons ce que deviennent les vitesses, rendements et couples.

1° *Vitesses.* — *Pour un même flux inducteur total utile* Φ, correspondant à un *même nombre* d'ampères-tours inducteurs utiles ($M I_i$) on a : pour le moteur normal à plein champ :

$$E = U - R I_i = n N \Phi . 10^{-8}$$

et pour le moteur à inducteurs shuntés dont la vitesse deviendra n_s ($n_s > n$) :

$$E_s = U - R_s I = n_s N \Phi . 10^{-8}$$

car dans ce dernier cas les ampères-tours inducteurs sont :

$$M (1 - \alpha) I$$

c'est-à-dire précisément ($M I_i$). Le flux inducteur Φ est donc bien le même dans les deux cas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On en déduit :

$$\frac{n_s}{n} = \frac{V_s}{V} = \frac{U - R_s I}{U - R I_i}$$

d'où :

$$V_s = V \frac{U - R_s I}{U - R I_i}$$

avec

$$R_s = r + \rho = r + (1 - \alpha) r_i$$

$$R = r + r_i$$

$$I_i = (1 - \alpha) I \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{\beta}{100}$$

d'où la règle :

On déduit la vitesse en moteur à inducteurs shuntés de β °/₀ pour un courant total ou de ligne I de celle en moteur normal correspondant à un courant de ligne $I_i \left[I_i = (1 - \alpha) I = \left(1 - \frac{\beta}{100}\right) I \right]$ en multipliant celle-ci par le rapport

$$\frac{U - R_s I}{U - R I_i}.$$

La résistance du shunt est d'ailleurs donnée par la relation :

$$s = \frac{1 - \alpha}{\alpha} r_i .$$

2° *Rendement.* — Pour un même courant de ligne I, on a évidemment, la puissance fournie et mesurée aux bornes étant la même :

$$\frac{\eta}{\eta_s} = \frac{1 - \frac{R I}{U} - \frac{p}{U I}}{1 - \frac{R_s I}{U} - \frac{p_s}{U I}}$$

(l'indice s se rapportant au moteur à inducteurs shuntés) ; ou en négligeant les seconds termes soustractifs :

$$\frac{\eta}{\eta_s} = \frac{1 - \frac{R I}{U}}{1 - \frac{R_s I}{U}}$$

d'où :

$$\eta_s = \eta \frac{U - R_s I}{U - R I}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit ainsi que, à partir du moment où la saturation est suffisante pour justifier la suppression des seconds termes soustractifs, $\eta_{is} > \eta_i$ puisque $R_s < R$.

Pratiquement, cette formule suffira pour un fonctionnement en régime ordinaire et on l'appliquera aussi bien aux rendements à la jante ρ_s et ρ.

3° *Couples.* — On sait que, pour un moteur normal, le couple utile est en Kgms :

$$C_u = \eta_i \cdot \frac{U\,I}{n'}.$$

On a donc évidemment pour un même courant de ligne I, la puissance absorbée U I étant la même :

$$\frac{C_u}{C_{us}} = \frac{\eta_i}{\eta_{is}} \times \frac{n'_s}{n'}$$

d'où :

$$C_{us} = \frac{n'}{n'_s} \times \frac{\eta_{is}}{\eta_i} \cdot C_u.$$

On aurait d'ailleurs de même pour les efforts à la jante

$$F_s = \frac{V}{V_s} \cdot \frac{\rho_s}{\rho} \cdot F.$$

Nous avons tracé sur la figure 54 les caractéristiques d'un moteur de 40 chevaux fonctionnant à plein champ (traits pleins) et fonctionnant avec shuntage de $\beta = 33\,\%$ (traits mixtes). ($\alpha = 0{,}33$ et $I_i = (1 - 0{,}33)\,I = 0{,}67\,I$). La résistance intérieure totale de ce moteur est $R = 0{,}6$ ohm.

On voit, ce qui résulte d'ailleurs de l'examen des formules, que les vitesses sont augmentées, les efforts diminués et les rendements légèrement améliorés à partir d'une certaine charge.

47. **Remarques sur l'emploi du shuntage.** — L'application du shunt demande quelques précautions.

En shuntant sans précaution, on risque que le moteur ne tende à s'emballer et on peut le "griller" (brûler le bobinage par suite d'un trop fort appel de courant). Tout au moins, il peut en résulter une commutation défectueuse. Le fait peut se produire particulièrement dans l'ascen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sion des rampes ou aux démarrages lorsque le wattman shunte trop rapidement ou trop prématurément en rétablissant brusquement le courant après une interruption, car alors tout le courant tend à passer par le shunt, d'où un flux inducteur Φ faible et un fort appel de courant. C'est ce qui fait que cette méthode, très employée il y a plusieurs années aux Etats-Unis, l'a été beaucoup moins par la suite.

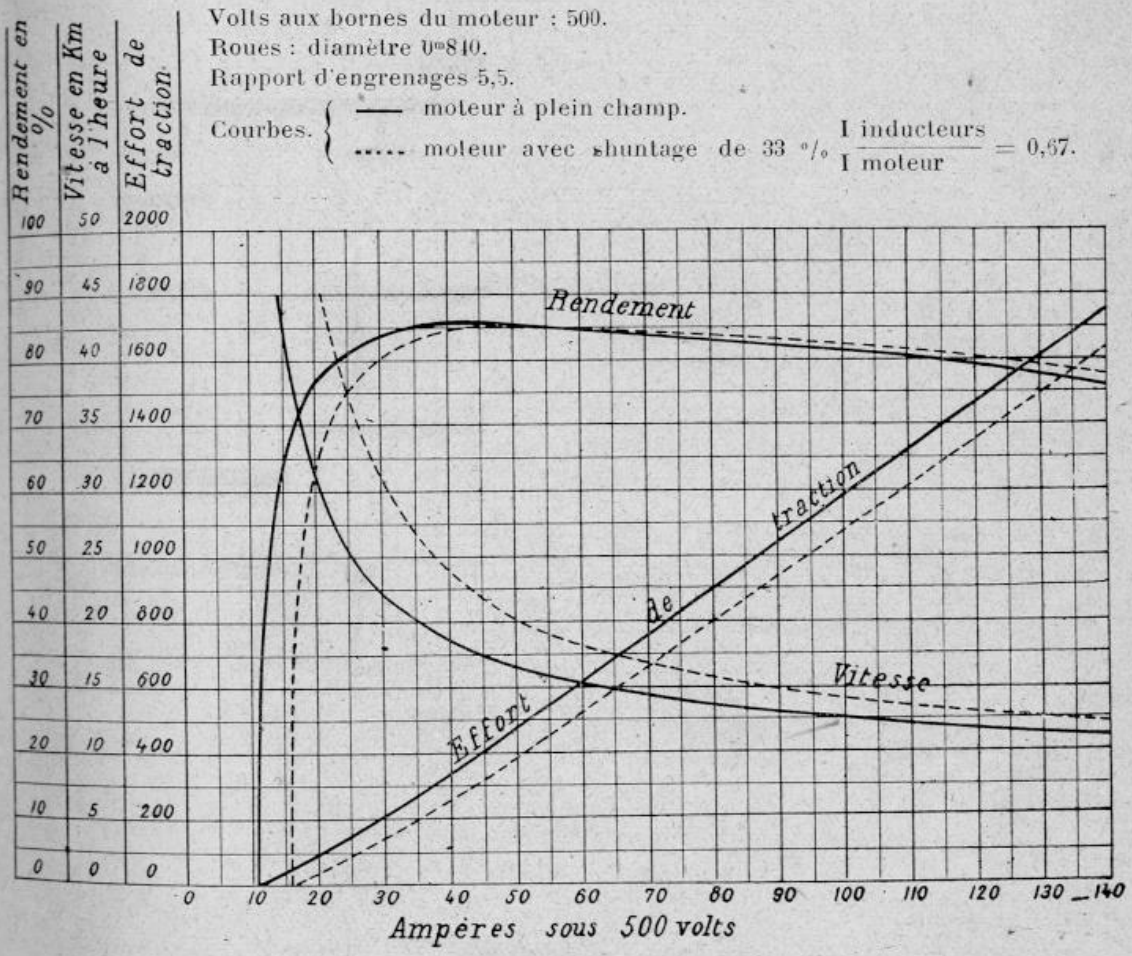


FIG. 54.

Moteur de 40 chevaux à plein champ.

Toutefois l'introduction des pôles supplémentaires ou de commutation qui maintient un flux de commutation indépendant de la condition du champ inducteur principal, mais proportionnel au courant d'armature a fait songer à nouveau à l'emploi du shuntage pour l'obtention des grandes vitesses et actuellement cette méthode est en faveur et est l'objet de nombreuses applications tant en Europe qu'en Amérique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

48. **Contrôleur série-parallèle avec shuntage.** — Les figures 55-56 donnent le schéma du développement des connexions d'un tel contrôleur pour un équipement à 2 moteurs et celui des combinaisons obtenues aux différents crans.

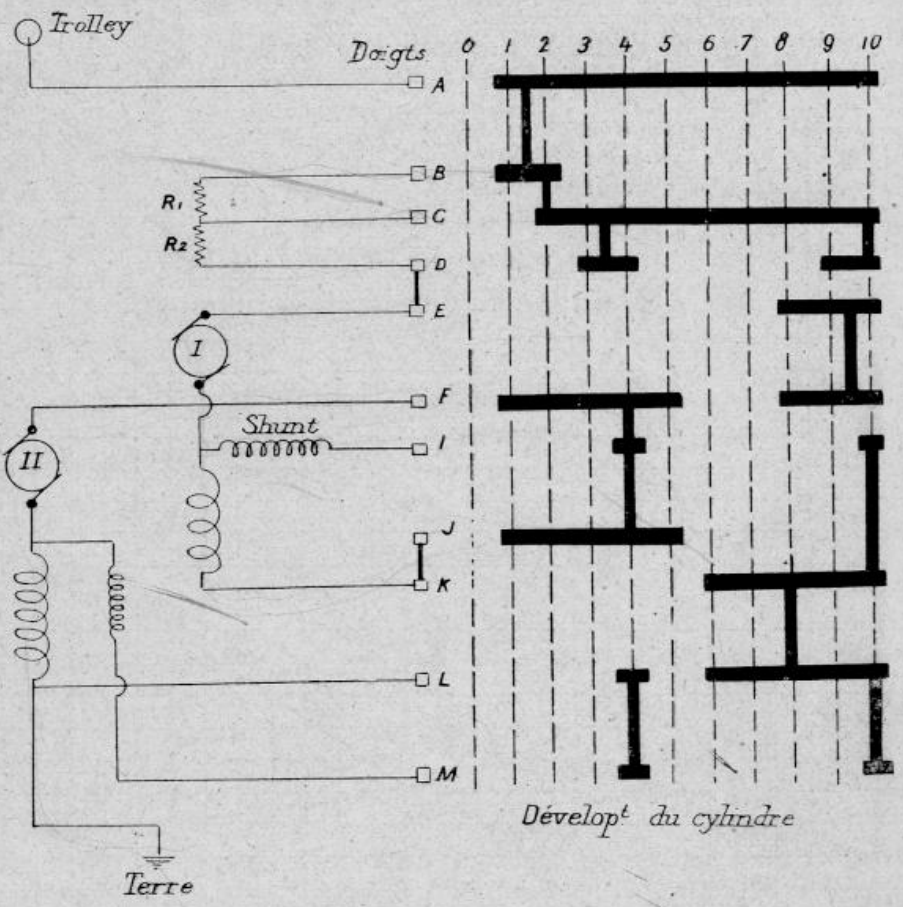


FIG. 55.

Contrôleur série parallèle avec shuntage.

49. **Résultats d'essais et applications.** — (1) Nous signalerons les essais intéressants faits par la Société Siemens, fin 1909, avec des moteurs à inducteurs shuntés et à pôles supplémentaires employés en contrôle série-parallèle.

MM. Siemens obtiennent cinq vitesses économiques qui sont :

1). Moteurs en série, plein champ.
2). — — champ réduit de 50 %.
3). Moteurs en parallèle, plein champ.
4). — — champ réduit de 25 %.
5). — — champ réduit de 50 %.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il en résulte une grande économie dans la consommation d'énergie. Des essais faits avec un tramway de 10 tonnes équipé avec deux moteurs à pôles supplémentaires de 38 chevaux donnant une vitesse maxima d'environ 26 Km/h, ont conduit à une consommation de 0,74 Kw-h par voiture-kilomètre avec la méthode ordinaire série-parallèle et de 0,60 Kw-h par voiture-kilomètre avec les shuntages ci-dessus, soit donc une économie de près de 19 °/₀.

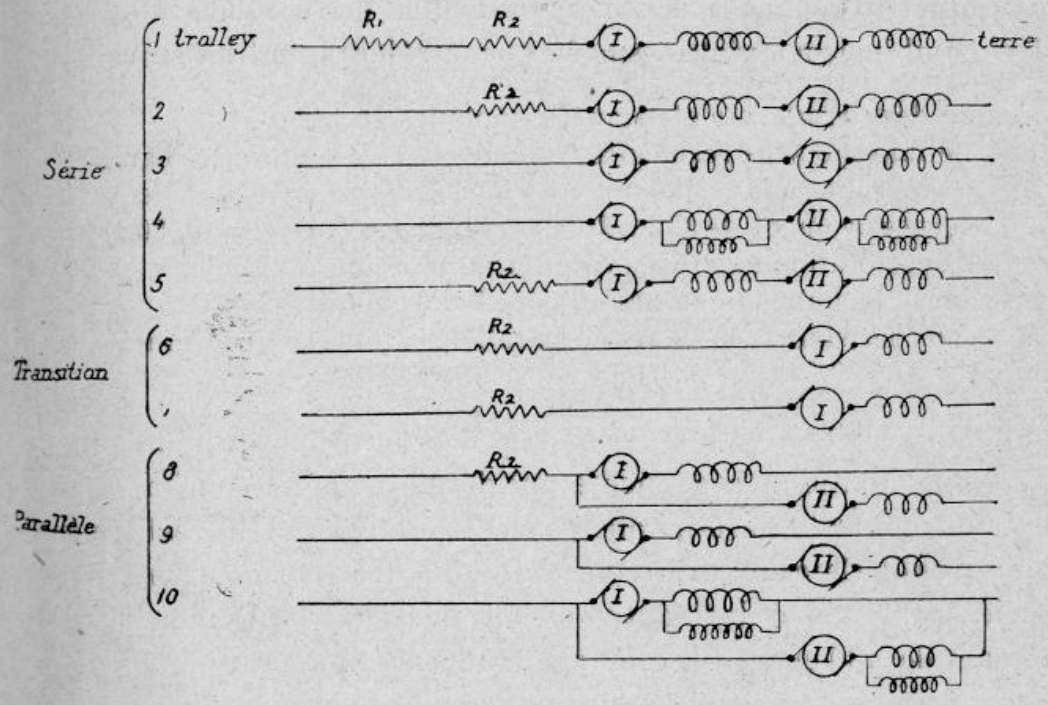


FIG. 56.

Schéma des connexions aux différents crans du contrôleur de la figure 54.

(2) La Compagnie générale des Omnibus de Paris a adopté pour un certain nombre de ses automotrices qui sont à 2 moteurs de 50 ou de 60 chevaux la régulation par contrôle série-parallèle avec shuntage des inducteurs. Pour la marche moteurs en série il y a deux shuntages successifs de 33 et de 50 °/₀ et pour la marche moteurs en parallèle il y a un shuntage de 33 °/₀. On obtient ainsi trois vitesses de marche économique en plus des deux vitesses correspondant aux couplages normaux, moteurs en série et moteurs en parallèle auxquelles elles sont d'ailleurs respectivement supérieures pour un même couplage des moteurs d'après ce que nous avons vu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Des essais effectués par la Compagnie générale des Omnibus lui ont permis de conclure à une économie dans la consommation d'énergie de 15 à 20 % ce qui est un résultat appréciable.

Les contrôleurs utilisés sont du type Thomson-Houston K — 501 — X permettant en outre le freinage d'urgence par mise des moteurs en court-circuit. Leur schéma développé est donné en planche hors-texte (fig. 57) et les deux photographies (fig. 58-59) montrent, l'une le contrôleur en question avec son séparateur d'arc ouvert, et l'autre le détail du souffleur magnétique qui réalise le soufflage individuel des contacts.

Les combinaisons réalisées par ces contrôleurs sont les suivantes :

3 crans de démarrage sur résistances, moteurs en série.
1 cran de marche sans résistance, moteurs en série et plein champ.
2 crans de marche sans résistance, moteurs en série avec inducteurs shuntés successivement de 33 et de 50 %. ($I_i = 0{,}67\ I$ et $I_i = 0,\ 50\ I$)
1 cran d'accélération sur résistances et moteurs en parallèle.
1 cran sans résistance, moteurs en parallèle et plein champ.
1 cran sans résistance, moteurs en parallèle et inducteurs shuntés de 33 %. ($I_i = 0{,}67\ I$)

ce qui donne 5 vitesses de régime, dont 3 en utilisant le shuntage.

(3) Nous mentionnerons encore une dernière application importante et récente du contrôle série-parallèle avec shuntage, celle réalisée sur les locomotives du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, construites par la General-Electric Co. (1). Les locomotives sont de deux types : le type 1915 à 8 moteurs de 430 chevaux et le type 1918 à 12 moteurs de 270 chevaux. Elles sont alimentées sous 3.000 volts courant continu.

Dans les locomotives du premier type, les moteurs sont groupés par deux en permanence en série. Chacun d'eux est alors sous 1.500 volts. Le contrôleur comporte :

16 crans de marche en série sur résistances.
1 cran de marche en série sans résistance et à plein champ.
11 crans de marche en parallèle (4 groupes en parallèle de 2 moteurs en série) sur résistances.
1 cran de marche en parallèle sans résistance.
1 cran de marche en parallèle sans résistance avec shuntage de 50 %.

Soit donc en tout 30 crans dont 3 correspondent à des vitesses de régime.

(1) " *General Electric Review* " de novembre 1916 et mai 1918.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

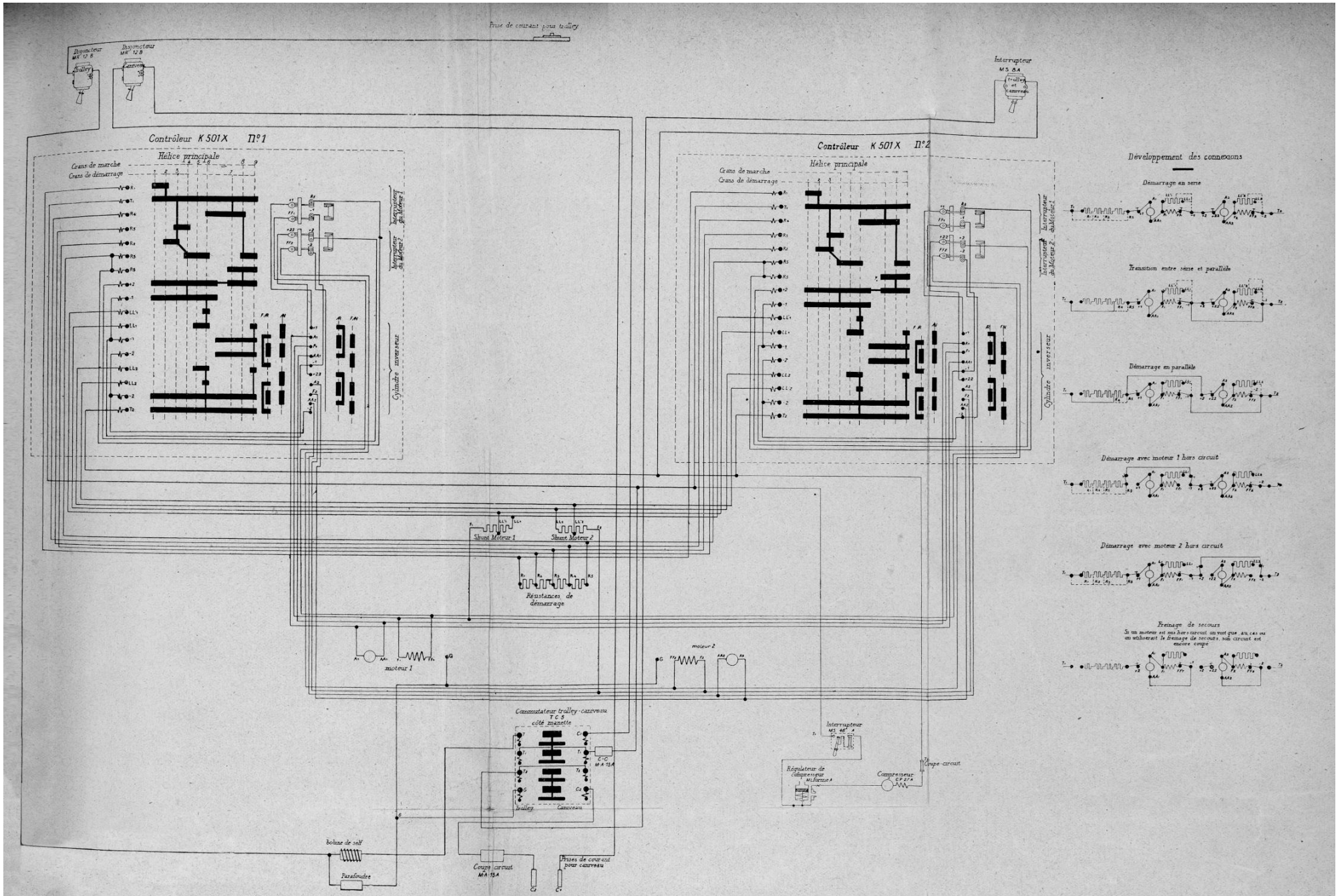


FIG. 57.

Equipement à 2 moteurs et 2 contrôleurs Thomson-Houston K-501-X avec shuntage et frein de secours (Compagnie générale des Omnibus de Paris).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

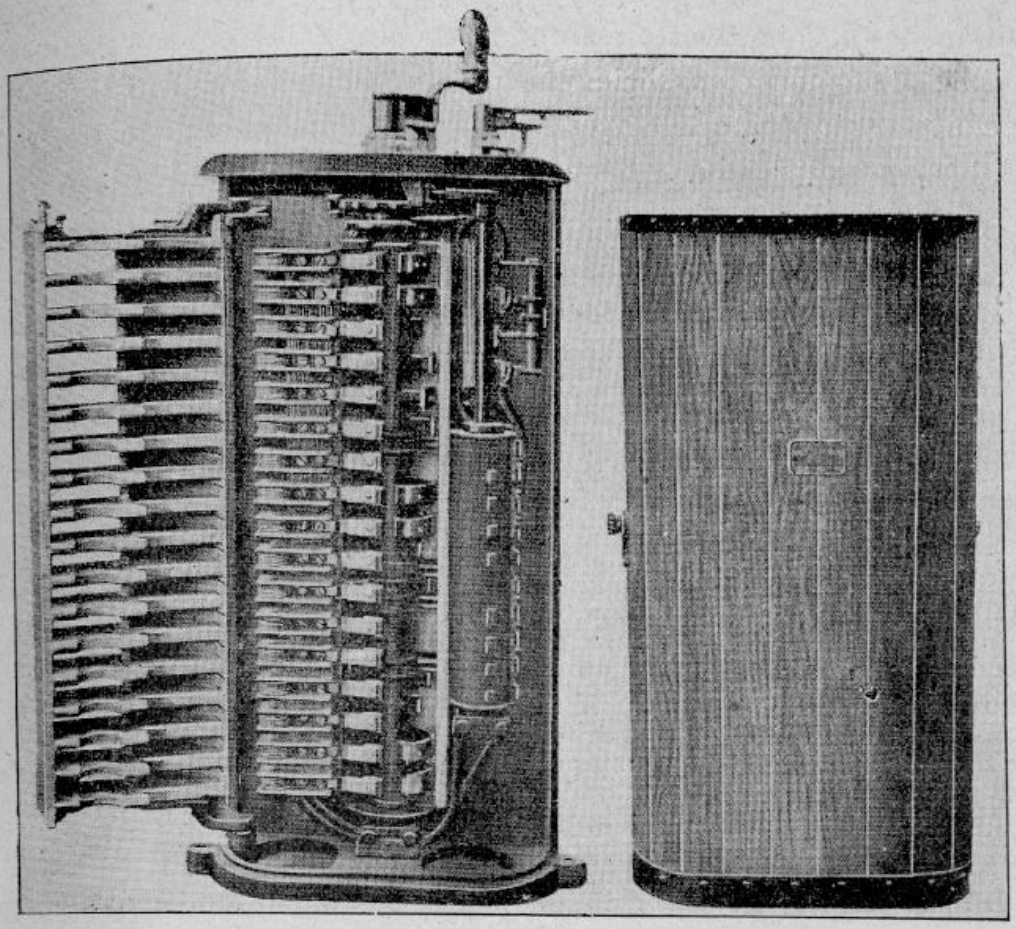


FIG. 58.

Contrôleur K-501-X Thomson-Houston avec le séparateur d'arc ouvert.
(Compagnie générale des Omnibus de Paris).

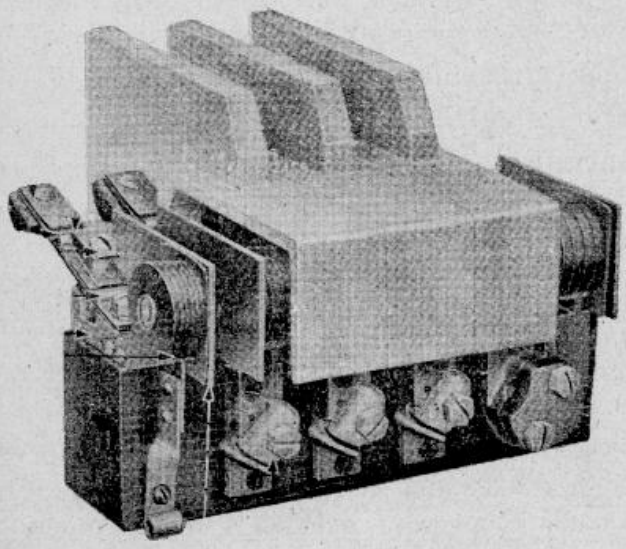


FIG. 59.

Soufflage magnétique individuel des contacts. Détails du souffleur, du doigt principal et des serre-fils.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les locomotives du second type les moteurs sont groupés par trois en permanence en série, chacun d'eux étant alors sous 1.000 volts. Le contrôle série-parallèle avec shuntage est appliqué aux quatre groupes de trois moteurs et les combinaisons suivantes sont réalisées :

1° 12 moteurs en série, c'est-à-dire les 4 groupes de 3 moteurs en série, vitesse environ 24 km/h.
2° 6 moteurs en série avec les deux groupements de 6 moteurs en parallèle, vitesse environ 47 km/h.
3° 4 moteurs en série avec les 3 groupements de 4 moteurs en parallèle, vitesse environ 65 km/h.
4° 3 moteurs en série avec les 4 groupes de 3 moteurs en parallèle, vitesse environ 80 km/h.

Dans toutes ces combinaisons les moteurs fonctionnent à plein champ.

5° Une cinquième combinaison est obtenue par shuntage de 50 °/₀ des inducteurs de la quatrième combinaison, donnant une vitesse de 100 km/h environ.

On réalise ainsi 5 vitesses économiques de marche.

Nous ajoutons que le contrôle comporte dans chaque type de locomotive l'emploi de contacteurs sur le principe des équipements à " unités multiples Sprague General Electric " que nous étudierons plus loin (chapitre XIII).

La société Westinghouse a également construit des locomotives courant continu 3.000 volts pour le même réseau du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul (1). Elles sont à 6 essieux moteurs et 12 moteurs de 300 chevaux, chaque essieu moteur étant actionné par deux moteurs jumelés dont nous verrons ultérieurement (chapitre XI) la construction. Ces moteurs sont couplés électriquement en pleine marche par groupes de 4 en série, chacun ayant alors seulement 750 volts à ses bornes. Les locomotives ont neuf vitesses économiques dont six correspondent à des crans de shuntage au contrôleur.

Les combinaisons réalisées sont les suivantes :

Douze moteurs en série, marche sans résistance et marche avec deux crans de shuntage.

(1) Après la mise en service des locomotives de la General Electric 1er type, le C. M. et St P. Ry a commandé, pour achever l'électrification de son réseau, une série de locomotives à la Société Westinghouse suivant le même programme général. Ces locomotives étaient en construction en 1918.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Six moteurs en série, marche sans résistance et marche avec deux crans de shuntage.

Quatre moteurs en série, marche sans résistance et marche avec deux crans de shuntage.

Avec un train de 600 tonnes sur une rampe de 8 m/m par mètre, les vitesses de régime sont les suivantes :

17,7 19,7 22 34,5 39 45 54 60 et 67,5 km/4.

L'équipement de ces locomotives est du type électro-pneumatique à unités multiples que nous étudierons plus loin (chapitre XIII).

Ces locomotives du C. M. S[t] P. sont remarquables à maints points de vue et nous aurons l'occasion d'y revenir à plusieurs reprises, en particulier à propos du mode de transmission de l'effort moteur (chapitre XI) et de la récupération (chapitre XII). Elles figurent parmi les plus puissantes en service et le réseau sur lequel elles fonctionnent constitue l'électrification la plus considérable au monde, actuellement, ainsi que nous avons eu l'occasion de le mentionner à l'*avant-propos* de cet ouvrage.

50. **Remarque générale sur les démarrages.** — Il est bon de remarquer en passant que dans toutes les méthodes précédentes, l'énergie absorbée aux démarrages est relativement considérable. Cela peut occasionner, en cas de démarrages simultanés de forts à-coups à l'usine. Si on a de l'éclairage branché sur le réseau de traction, les sautes de voltage sont manifestes. Ce phénomène est d'ailleurs souvent facile à observer quand on se trouve dans un train électrique dont l'éclairage est sur la ligne d'alimentation.

Les procédés en question sont toutefois suffisamment simples et pratiques pour que leur emploi soit parfaitement justifié.

Dans la méthode que nous allons maintenant étudier, il n'est pas fait emploi de résistances de démarrage.

II. — Alimentation à potentiel variable ou variation de la tension de la source : démarrages sans emploi de résistances

51. — La *ligne d'alimentation* venant de l'usine génératrice est *toujours à potentiel constant (et à fréquence constante pour le cas de courant alternatif)*. Cette règle ne pourrait trouver d'exception que si

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'on avait à considérer une ligne toute spéciale, comprenant par exemple un seul véhicule ou un seul train sur tout son parcours. On comprend, en effet, qu'on pourrait bien dans ce cas régler la vitesse du train en agissant sur les organes mêmes de production de l'énergie à l'usine centrale. C'est le seul cas où la variation de la tension à la centrale est admissible. On trouve un exemple tout à fait typique de ce mode de transmission de l'énergie à potentiel variable dans le trottoir roulant de l'Exposition universelle de Paris en 1900, comme nous le verrons plus loin au chapitre : " Matériels spéciaux ".

Nous supposons donc implicitement que la ligne d'alimentation (*fil aérien ou 3me rail*) est à *potentiel constant*. Dans ces conditions, la méthode en question s'applique seulement aux véhicules portant avec eux une source d'électricité sous forme d'accumulateurs ou de dynamos génératrices fournissant directement le courant nécessaire aux moteurs d'essieu et on cherche à obtenir une différence de potentiel variable aux bornes des moteurs.

La caractéristique des procédés employés est que, dans aucun d'eux, il n'est fait emploi de résistances de démarrage en série avec les moteurs.

Ces procédés sont les suivants :

52. **Méthode des accumulateurs à groupements variables.** — On conçoit que l'on puisse facilement faire varier le nombre des bacs en série et par suite la tension, d'où la vitesse. Comme il n'y a pas de résistances mises en circuit, il n'y a pas de perte d'énergie lors de la marche à vitesse réduite. Il faut toutefois veiller à faire débiter d'une manière à peu près égale les différents bacs en changeant périodiquement ceux qui servent à la mise en vitesse.

Cette méthode est appliquée sur les tramways et automobiles à accumulateurs dont il existe un assez grand nombre d'applications un peu partout.

Nous étudierons plus loin en un chapitre spécial quelques applications du système de traction par accumulateurs.

53. **Méthode de la variation d'excitation de la génératrice.** — (Ward-Léonard, Heilmann).

Cette méthode, préconisée en 1892 aux Etats-Unis par *M. Ward-Léonard* qui en a fait un grand nombre d'applications à des moteurs fixes, surtout pour des ascenseurs a été appliquée en France par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

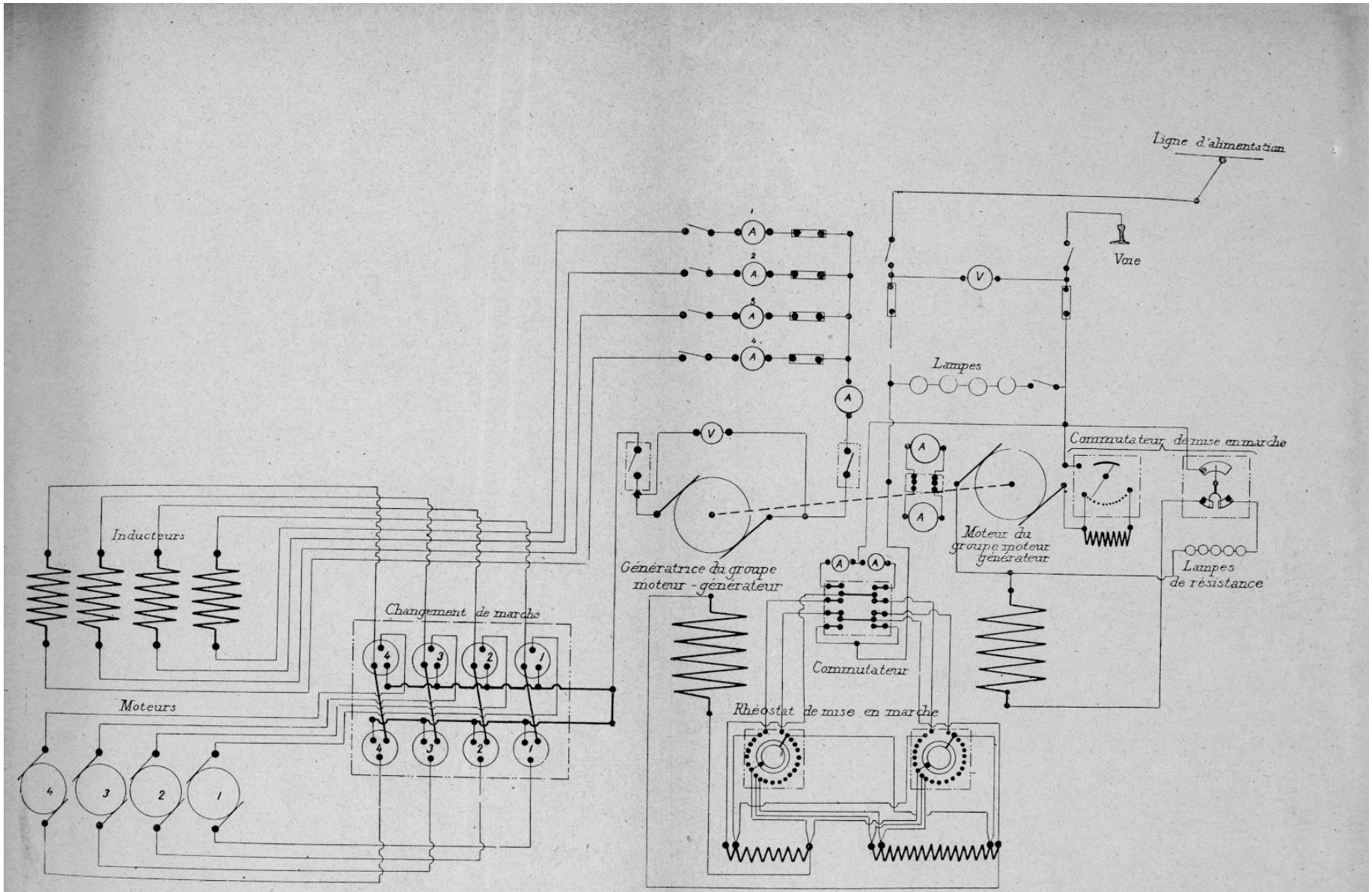


FIG. 60.

Traction à potentiel variable, système Ward-Léonard. Connexions d'une voiture motrice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. Heilmann successivement à des locomotives indépendantes et à des machines à alimentation extérieure.

Le mode de réglage Ward-Léonard consiste à alimenter directement les moteurs par une dynamo génératrice dont on fait varier l'excitation au moyen d'un rhéostat, d'où il résulte une variation correspondante de la tension aux bornes des moteurs : d'où, enfin, régulation de la vitesse. Au démarrage, il est seulement nécessaire de donner à la génératrice l'excitation juste suffisante pour produire le courant requis. Aussitôt la voiture en mouvement, on augmente l'excitation de façon à accélérer l'allure jusqu'au régime normal. La régulation de la marche est obtenue très facilement.

En pratique, cette méthode présente cet inconvénient : en général, on ne produit pas le courant sur le véhicule même, mais à la station où l'on ne peut pas habituellement faire varier le voltage ainsi qu'il a été dit.

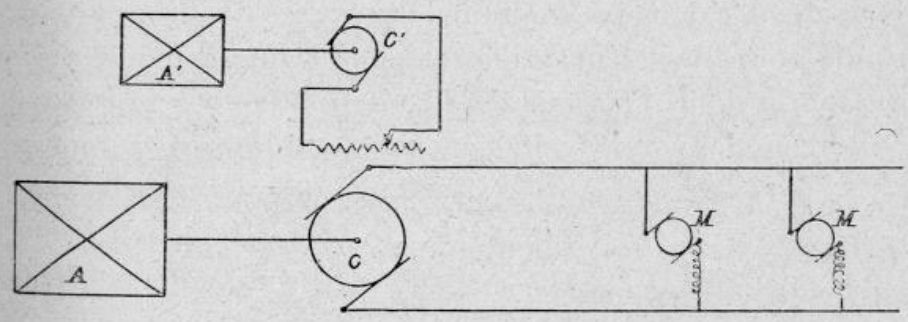


FIG. 61.

Dans l'application de la méthode à la traction, il faut donc placer sur chaque voiture automotrice, un groupe moteur-générateur dont le moteur est à vitesse constante. Remarquons que chacune de ces deux machines doit avoir, en raison des pertes et du rendement, une puissance plus grande que la puissance de l'ensemble des moteurs de traction. C'est là un inconvénient au point de vue emcombrement, poids et prix. En outre, l'entretien et le graissage du transformateur rotatif, constituent une véritable sujétion.

Nous donnons en planche hors-texte (fig. 60) le schéma des connexions d'un équipement Ward-Léonard. La méthode Ward-Léonard a été réalisée sur les locomotives Heilmann comme suit :

a) Locomotive Heilmann indépendante (fig. 61). — Dans la locomotive indépendante Heilmann, les moteurs M des essieux bobinés en série et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

connectés en dérivation sur leur circuit commun d'alimentation recevai le courant d'un groupe électrogène principal constitué par une mach à vapeur A accouplée à une génératrice G à courant continu placée le châssis de la locomotive. La génératrice était à excitation indépenda et le courant d'excitation était fourni par un petit groupe électrog spécial à vapeur A′, G′.

Le groupe électrogène principal était à couple moteur constant, c'e à-dire que la machine à vapeur était à diagramme constant, par suite l'absence de régulateur, la détente étant fixe.

Dans ces conditions, comme le couple résistant de la génératr $(C = \frac{N \Phi I}{2 \pi} 10^{-8})$ augmente avec l'excitation, la machine à vapeur ral tit elle-même sa marche, puisque son travail par tour est constant ; m d'autre part, la tension aux bornes de la génératrice tend à diminuer, par suite le débit I dans les moteurs. La vitesse du groupe tend don prendre une nouvelle valeur qui correspond à une nouvelle position d quilibre. Il suffit donc d'augmenter l'excitation pour réduire la vitesse groupe électrogène, son travail, l'énergie qu'il fournit au moteur et à jante des roues.

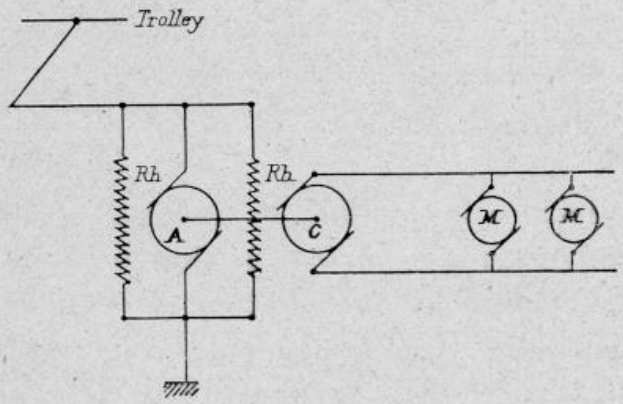


FIG. 62.
Locomotive Heilmann à alimentation extérieure.

L'idée de la locomot automotrice Heilmann été reprise par la « Nor British Locomotive C avec la locomotive à turb générateur dont nous av parlé au début de cet ouvrage.

b) *Locomotive Heilma à alimentation extérieu* — Un autre mode de r lisation de la méthode représenté par le schém de la figure 62, dans lequel est représenté un moteur shunt à cour continu A, alimenté par la ligne trolley. Le moteur étant à char constant, est à vitesse sensiblement constante. L'excitation de la gén ratrice G qu'il entraîne, est prise aux bornes de la distribution princip On règle la tension du courant produit en agissant sur cette excitatio

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce dispositif a été appliqué sur la locomotive Heilmann à alimentation extérieure essayée à Saint-Germain. On voit que la puissance demandée à l'usine, croît à mesure que la vitesse augmente et il n'y a aucune perte d'énergie dans des résistances au démarrage. En effet, si à ce moment la différence de potentiel à la génératrice est de 50 volts et le courant débité 1.000 ampères, on aura 50 Kws, ce qui constitue déjà un effort important malgré le faible voltage ; puis la vitesse augmente en même temps que le voltage et les ampères diminuent en évitant les à-coups à l'usine.

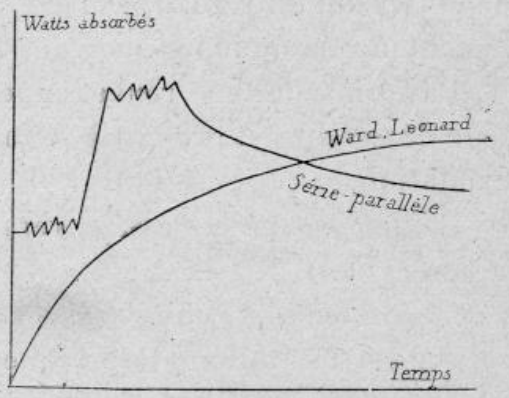


FIG. 63.
Puissances au démarrage.

On peut représenter comme ci-contre (fig. 63) les puissances à fournir aux bornes de deux véhicules comprenant l'emploi : l'un du contrôle série-parallèle et l'autre du contrôle Ward-Léonard. Nous mentionnerons en passant que la méthode a été appliquée avec succès dans des postes fixes et en particulier à des ascenseurs.

Enfin observons que cette méthode est aussi bien applicable au courant alternatif simple (Oerlikon) ; il suffit en effet que le moteur du groupe moteur-générateur soit du type monophasé à collecteur.

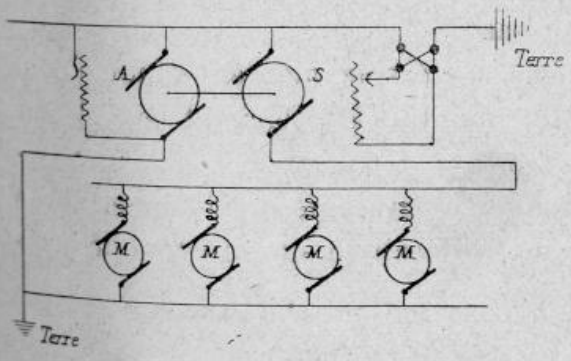


FIG. 64.
Survolteur-dévolteur Ward-Léonard.

54. **Méthodes diverses.** — 1° *Méthode du survolteur-dévolteur Ward-Léonard.* — Le même inventeur a préconisé une autre méthode dont le principe consiste à insérer entre le réseau et les moteurs une force électro-motrice variable et réversible et qu'il a réalisée en remplaçant le groupe moteur générateur précédent par un survolteur-dévolteur S constamment en série avec les moteurs d'essieu M du train, branchés en dérivation sur leur circuit d'alimentation. (fig. 64).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce survolteur-dévolteur qui est à excitation indépendante, est entraîné par un moteur shunt A à vitesse constante, il produit une force électromotrice progressivement variable et réversible, de sorte que la différence de potentiel aux bornes des moteurs varie depuis zéro jusqu'au double de la tension du réseau. Dans ce cas, la puissance du groupe est naturellement moitié moindre que dans le système précédent.

La variation et le renversement de la force électromotrice du survolteur-dévolteur est produit à la main par réglage et renversement de son excitation.

Ce dispositif a été essayé vers 1895, par la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest.

Observons pour comparaison avec le système suivant qu'ici, le démarrage n'est pas automatique, que la *récupération* n'est pratiquement pas possible et qu'en outre, le système ne se prête pas à la commande de trains à unités multiples. Enfin, ce mode de régulation n'est applicable qu'au courant continu.

2° *Méthode nouvelle : Système de traction auto-régulateur à récupération dit système S. T. A. R. des Ateliers de Constructions électriques du Nord et de l'Est.* — Ce système basé sur l'emploi d'un survolteur-dévolteur automatique à intensité constante, est à démarrage automatique et à récupération soit au freinage soit sur les pentes, et s'applique aux trains à unités multiples. Telles sont ses propriétés caractéristiques. Il est de plus, applicable au courant monophasé.

La première application réalisée a été spécialement étudiée pour la Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris et essayée sur la ligne Gambetta-Champerret en 1913.

Nous ne faisons ici que mentionner ce système pour donner plus loin en annexe au chapitre XIII, une note détaillée sur son fonctionnement et à laquelle nous renvoyons le lecteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VI

MOTEURS A COURANT MONOPHASÉ
ÉTUDE ÉLECTRIQUE

SOMMAIRE. — Introduction. — Différents types de moteurs. — Moteurs type série (Eickmeyer, Oerlikon, Siemens-Schuckert, Westinghouse-Lamme). — Moteurs type répulsion et dérivés (Elihu Thomson, Latour, Winter Eichberg, Alexanderson, Thomson-Houston, Ateliers de Constructions électriques du Nord et de l'Est). — *Appendice :* Théorie algébrique élémentaire des moteurs à collecteur série et répulsion. — Détermination du couple moteur.

55. **Introduction.** — Les applications qu'a déjà reçu en Europe et en Amérique le système de traction à courant monophasé, sont relativement nombreuses et importantes, quoi qu'il n'y ait que quelques années que ce système soit entré dans le domaine de la pratique.

Les premières applications pratiques du moteur monophasé à collecteur remontent à 1880 ; elles sont antérieures à la découverte des propriétés spéciales des courants polyphasés. Le moteur polyphasé apparut ensuite et sembla faire oublier le monophasé. Celui-ci reparut vers 1900 sous forme de moteur type série : Lamme, Finzi, etc... ; de moteur type répulsion et dérivés Elihu-Thomson, Latour, Winter-Eichberg, Alexanderson, etc... ; depuis lors, les progrès dans cette voie furent remarquables.

Ces moteurs sont considérés par beaucoup d'ingénieurs comme devant devenir les moteurs les plus convenables pour des réseaux importants et en particulier pour la grosse traction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

56. **Différents types de moteurs.** — Les moteurs monophasés se ramènent à deux types fondamentaux :

Le *moteur série :* Westinghouse, Siemens-Schukert, Oerlikon, Brioschi et Finzi, Felten et Guilleaume, premiers moteurs de la General Electric.

Le *moteur répulsion* Elihu-Thomson dont les dérivés sont nombreux : Latour, Winter-Eichberg (A. E. G.), Alexanderson (General Electric), Thomson-Houston, A. C. E. N. E.

57. **Moteurs type série** (1) (fig. 65). — On sait que le *sens de rotation et le sens du couple d'un moteur série à courant continu ne dépendent que du sens des connexions de l'inducteur à l'induit et non du sens du courant dans l'ensemble :* le moteur peut donc fonctionner en courant alternatif monophasé, le sens de rotation ne changera pas, ni le sens du couple. Les courbes de la variation de la vitesse et du couple en fonction du courant resteront analogues à celles du moteur série courant continu. Le couple est fonction de I^2 comme en courant continu.

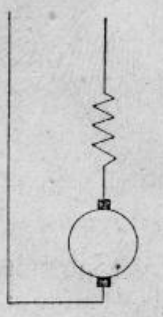


FIG. 65.

Toutefois, par suite de la nature du courant dans les inducteurs, ceux-ci devront être feuilletés au même titre que l'induit et les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans ces inducteurs s'ajouteront à celles de l'induit. C'est là, au point de vue construction, une différence fondamentale avec le moteur série courant continu.

Nous avons, en outre, ici, un élément nouveau qui intervient dans le fonctionnement du moteur : c'est le *facteur de puissance*.

A ce point de vue, il faut observer que la rotation de l'induit dans le flux des inducteurs développe entre les balais une f. é. m. en phase avec le courant qui traverse le moteur ; cette f. é. m. apporte donc de la puissance au moteur ; mais le flux à travers l'induit, dû aux ampère-tours d'induit, développe entre les balais, soit à l'arrêt, soit en vitesse une f. é. m. de self-induction, et le flux à travers les inducteurs crée une autre f. é. m. de self-induction à travers les inducteurs. Ces f. é. m. de self-induction ont pour effet d'abaisser considérablement le facteur de puissance.

(1) Nous donnerons ici seulement des explications générales sur le fonctionnement des moteurs à collecteur, série et répulsion, pour en faire comprendre la marche et nous renvoyons le lecteur à l'appendice à la fin de ce chapitre pour leur théorie mathématique élémentaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le facteur de puissance est minimum au démarrage, il augmente avec la vitesse et ne devient élevé qu'aux grandes vitesses.

Le problème difficile à résoudre est celui de la commutation et celle-ci est fondamentalement mauvaise parce que les conducteurs qui sont mis en court-circuit par les balais sont placés dans un champ variable. On peut se rendre compte de ce qui se passe de la manière suivante :

Le flux des inducteurs induit entre lames sous les balais, des forces électromotrices statiques en $e \cos \omega t$, et le flux de réaction d'induit, en vitesse, donne des forces électro-motrices dynamiques en $e \sin \omega t$. Ces deux f. é. m. s'ajoutent et font circuler des courants sous les balais, rendant la commutation défectueuse.

Le couple n'est pas constant, il est pulsatoire, sa période étant la moitié de celle du courant. Il y a toutefois lieu de remarquer, que cet inconvénient est sensiblement atténué, par l'effet d'inertie de la masse en mouvement du moteur qui joue le rôle de volant. Toutefois, aux démarrages notamment, la nature pulsatoire du couple est nettement perceptible, surtout aux faibles fréquences, 15 par exemple et il s'ensuit que le cœfficient d'adhérence maxima utilisable est inférieur, toutes choses égales d'ailleurs, à celui utilisable pour les moteurs courant continu ou à courants triphasés.

A part cela, le moteur série monophasé possède les propriétés caractéristiques du moteur série à courant continu ; en particulier, au démarrage, courant et couple maximum ; quand la vitesse augmente, le courant et le couple diminuent.

Pour une très faible charge, le moteur peut s'emballer comme un moteur série à courant continu.

Il a l'inconvénient d'absorber à tout régime une puissance magnétisante importante surtout aux fortes charges ($\cos \varphi$ faible). Le fonctionnement est d'autant meilleur ($\cos \varphi$ et puissance maxima plus élevés) que la puissance est plus faible, en particulier la puissance maximum croît en sens inverse de la fréquence.

A ce moteur série-simple succéda le moteur *série-compensé sur l'inducteur d'Eickemeyer*. Le *perfectionnement* qui le caractérise, étudié en vue d'obtenir un meilleur facteur de puissance et une meilleure commutation *consiste à disposer sur le stator* du moteur précédent *un bobinage en court-circuit* (fig. 66) *ou en série avec le rotor* (fig. 67), ayant pour but de créer à chaque instant des ampère-tours égaux et directement opposés à ceux du rotor. Le flux de réaction d'induit peut ainsi être annulé. Le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seul flux existant dans le moteur, en négligeant les fuites magnétiques, est le flux propre des inducteurs. La self-induction du stator reste seule en cause, le facteur de puissance est donc amélioré.

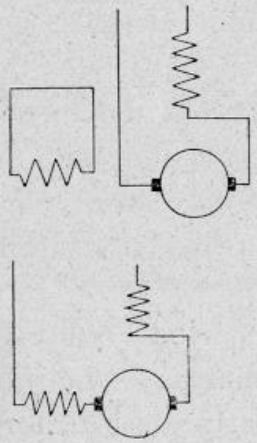


Fig. 66-67.
Schémas du moteur série-compensé sur l'inducteur.

Au point de vue commutation, puisqu'il n'y a plus de réaction d'induit, la seule force électromotrice existante entre lames est celle (de forme $e \cos \omega t$) due au flux inducteur, et notons qu'elle est indépendante de la vitesse du moteur.

Nous donnons ci-après quelques schémas types de moteurs employés. Le schéma ci-contre (fig. 68) est celui d'un moteur monophasé Oerlikon avec bobinage de compensation et aussi pôles de commutation dont le rôle est le même que celui des pôles de même nom pour les moteurs à courant continu.

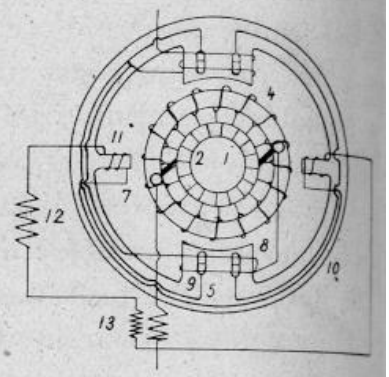


Fig. 68.
Moteur monophasé Oerlikon de 200 chevaux avec bobinage de compensation.

La légende de ce schéma est la suivante :

1 et 2, collecteur ;
4, bobinage de l'armature ;
5 et 8, pôles principaux et bobines magnétisantes ;
7 et 11, pôles et bobines de commutation ;
9 et 10, encoches et bobines de compensation qui peuvent être court-circuitées sur elles-mêmes ou en série avec le circuit principal ;
12, résistance inductive en série avec l'enroulement de commutation ;

Le moteur Siemens-Schuckert est encore de ce même type série-compensé.

La fig. 69 représente un des schémas de cette construction dans lequel :

E est l'enroulement d'excitation (champ principal) ;
C est l'enroulement de compensation en série avec l'induit ;
H est l'enroulement de commutation ;
A un enroulement auxiliaire d'excitation alimenté par un transformateur spécial dit d'excitation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cet enroulement principal est en quadrature avec l'enroulement principal d'excitation et son champ est réglable.

Moteur série Westinghouse-Lamme à connexions résistantes dans l'induit. — *M. Lamme*, de la Westinghouse Co, a obtenu un résultat analogue en cherchant non plus à supprimer la force électro-motrice qui se développe au moment de la commutation dans la spire en court-circuit, par suite du champ variable, mais à augmenter suffisamment la résistance de cette spire pour réduire à une valeur faible l'intensité des courants locaux qui en résultent.

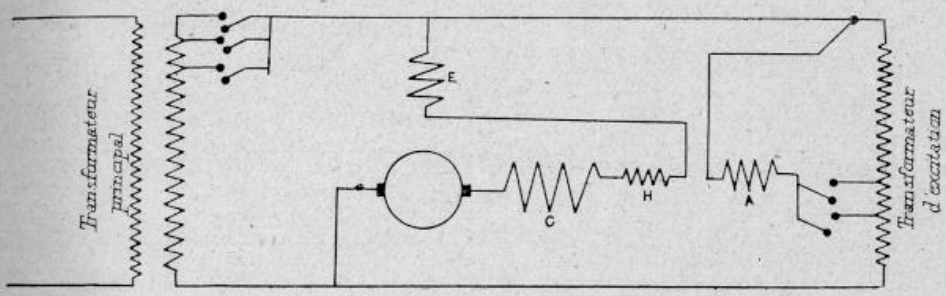


FIG. 69.

Moteur série-compensé Siemens-Schuckert.

Considérons en effet une spire en commutation. Soit r, sa résistance qui est très faible. Cette spire est le siège d'une force électromotrice $e = \frac{-d\Phi}{dt}$ qui produit un courant d'intensité $i = \frac{e}{r}$ qui se ferme sur les balais et qui augmente considérablement la densité du courant sous ceux-ci en se superposant au courant principal I. On voit qu'en augmentant r, on diminuera l'intensité de ce courant parasite et on améliorera par suite la commutation.

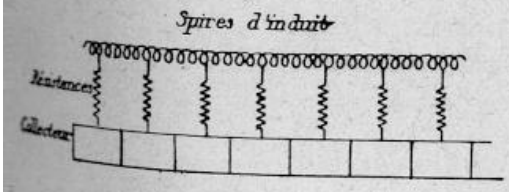


FIG. 70.

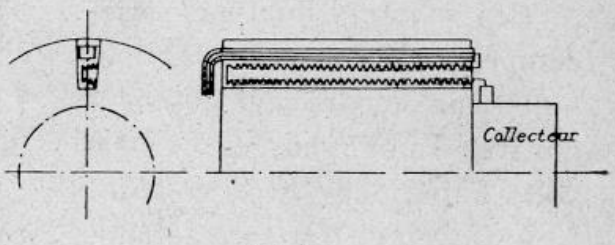


FIG. 71.

Moteur série-Lamme à connexions résistantes.

Partant de ce principe, M. Lamme relie les sections du rotor aux touches du collecteur par des résistances en maillechort qu'il loge au fond de l'encoche sous l'enroulement, suivant les schémas des fig. 70 et 71.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

N'intervenant qu'au moment où les segments du collecteur auxquels elles sont reliées passent par les balais, elles n'ont à supporter le courant de court-circuit que peu de temps.

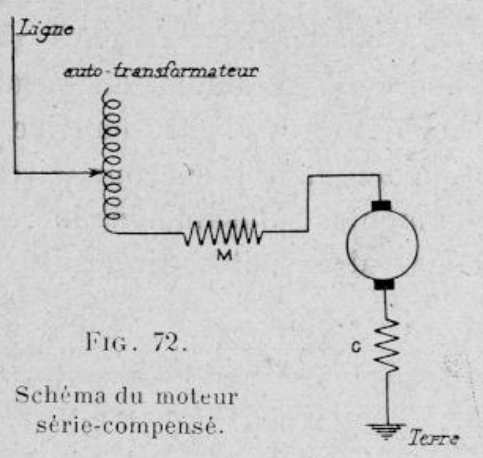


FIG. 72.

Schéma du moteur série-compensé.

Pourtant, si, pour une cause quelconque, les moteurs ne peuvent pas démarrer, ces résistances peuvent atteindre des températures dangereuses, ce qui peut entraîner la destruction du moteur.

Les moteurs récents Lamme comportent en outre sur leur stator, un enroulement de compensation C (fig. 72) en série avec l'enroulement principal.

Dans les premiers modèles, ces enroulements de commutation étaient simplement des bobines court-circuitées sur elles-mêmes, agissant alors en secondaires en court-circuit de transformateur.

La figure 73 donne les caractéristiques du moteur série-compensé Westinghouse de 45 chevaux de la Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon.

Ces moteurs du type série-compensé à connexions résistantes sont encore ceux des locomotives monophasées 11.000 volts 25 périodes du New-York, New-Haven et Hartford à 4 moteurs de 250 chevaux et de la locomotive plus récente d'essai Westinghouse 12.000 volts 16 2/3 périodes de la Compagnie des Chemins de fer du Midi à deux moteurs de 700 chevaux au régime unihoraire et 600 chevaux avec venti-

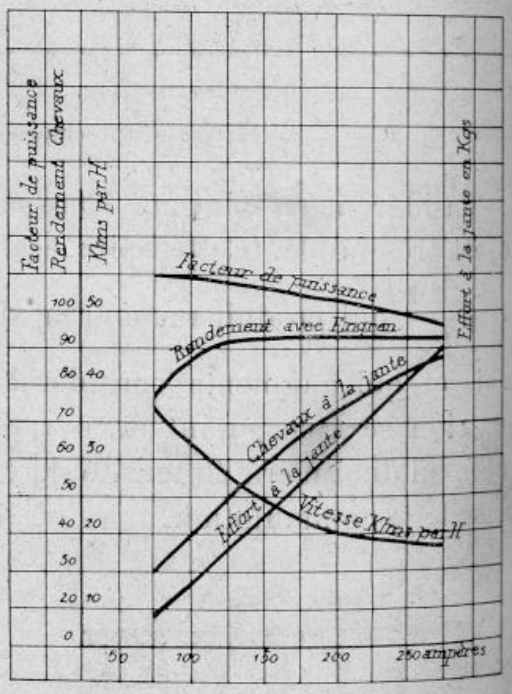


FIG. 73.

Moteur série-monophasé Westinghouse à connexions résistantes et enroulements compensateurs, 45 chevaux, 275 volts, 15 périodes. (Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lation forcée et au régime de 6 heures. La fig. 74 représente les caractéristiques de ces moteurs et nous donnons plus loin en planches hors texte le schéma de l'équipement de la locomotive et aussi celui de la locomotive elle-même. Cette locomotive pèse 82 tonnes.

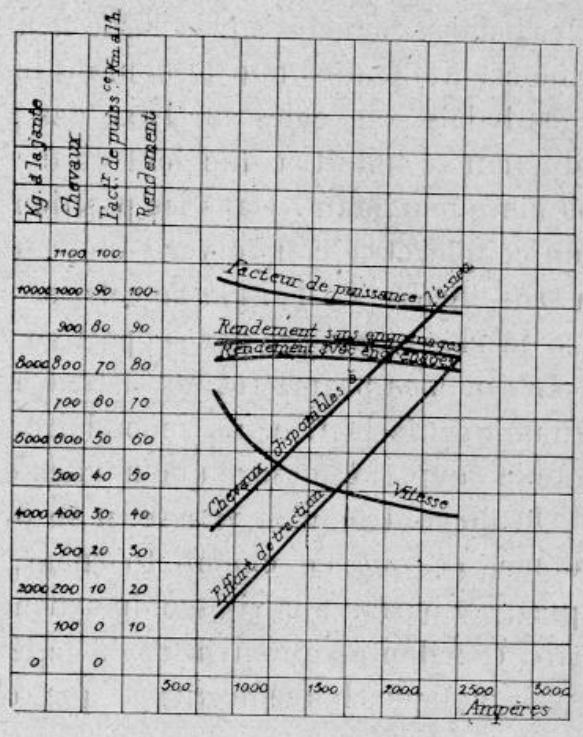


FIG. 74.

Caractéristiques du moteur de traction n° 405 Westinghouse (locomotive d'essai de la Compagnie des Chemins de fer du Midi) 600 chevaux, 420 volts, 16,66 périodes. Roues de 1200 m/m. Rapport d'engrenages : 41/71. Puissance continue avec ventilation forcée 600 chevaux.

58. **Moteurs répulsion. — (Elihu-Thomson 1888).** — Ce moteur présente la même forme mécanique que le moteur série et peut être à stator, genre moteur d'induction ordinaire (bobinage en alternateur monophasé) ou à pôles saillants : il ne diffère du précédent qu'en ce que l'*induit séparé du réseau et fermé en court-circuit, a ses balais distants de 180° et décalés sur le plan neutre.*

L'induit a donc la forme d'un rotor de moteur à courant continu à deux balais distants de 180° et en court-circuit. Ces balais sont calés comme l'indique le schéma de la fig. 75 à 45° environ de la ligne neutre.

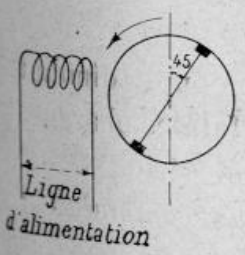


FIG. 75.
Schéma du moteur répulsion.

Les caractéristiques du fonctionnement sont très analogues à celles du moteur série : la self-induction totale est cependant beaucoup plus faible, car ici l'induit exerce l'action démagnétisante d'un secondaire en court-circuit de transformateur, au lieu de constituer une indépendance en série avec celle du primaire, comme dans le moteur série.

Le principe du fonctionnement est le suivant :

Au démarrage, les balais étant supposés calés à une distance angu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

laire quelconque de la ligne neutre, le primaire induit statiquement dans le secondaire des courants et le couple résulte de l'action du champ primaire sur le champ secondaire ainsi créé : il n'y a pas de couple produit si les balais sont calés sur la ligne neutre, parce qu'alors l'induction statique est nulle ainsi que le courant induit ; le couple est également nul si les balais sont calés sur l'axe des pôles parce que les deux champs, inducteur et induit, coïncident en direction, bien que le courant induit soit alors maximum. Dans les positions intermédiaires, il y a production d'un couple et ce couple varie en passant par un maximum. Il est dirigé en sens inverse de l'angle de calage, c'est-à-dire que les balais doivent être décalés en arrière par rapport au sens du mouvement.

Les mêmes propriétés subsistent en marche, sauf que la composante dynamique de la f. e. m. secondaire vient diminuer le courant et par suite le couple, à mesure que la vitesse augmente.

On démontre qu'en vitesse, il se produit un champ tournant dans le moteur, et que ce champ tournant, en négligeant les fuites magnétiques, est parfait à la vitesse du synchronisme. Il en résulte une commutation excellente aux environs de cette vitesse. En effet, le flux tournant dans le moteur a la même vitesse que son bobinage, il n'y a plus de f. é. m. induite entre lames, parce qu'il n'y a pas de variation de flux dans les sections ; et par suite la commutation est théoriquement parfaite.

Le moteur a un facteur de puissance de l'ordre de celui du moteur-série compensé.

Au démarrage, le courant et le couple sont maximum, le cos φ minimum. Pour un courant donné, le *meilleur couple de démarrage est obtenu pour un angle de calage de 45°*. Il y a lieu de remarquer, toutefois, que ce calage n'est pas celui correspondant aux conditions de meilleure commutation. C'est là une difficulté de plus au point de vue de la commutation.

A mesure que la vitesse augmente, le courant et le couple diminuent, tandis que le cos φ augmente pour devenir bon aux faibles charges. La marche des phénomènes est analogue à celle du moteur série.

En résumé, ce moteur se caractérise par sa bonne commutation en vitesse, son point faible est un couple de démarrage un peu moindre que celui du moteur série-compensé.

Nous ajouterons encore que, au démarrage, la puissance apparente absorbée est un peu plus grande que celle consommée par un moteur série compensé, toutes choses égales d'ailleurs. Cela résulte de l'imper-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fection inévitable de l'induction mutuelle entre le stator et le rotor, par suite des fuites magnétiques.

Le moteur répulsion simple Thomson n'est pas employé en traction à cause de la nécessité de décaler les balais.

59. **Moteur répulsion-compensé de M. Latour.** — Ce moteur est une combinaison du moteur série et du moteur à répulsion et il cumule les avantages de ces deux moteurs à savoir : commutation parfaite en vitesse comme le moteur répulsion et couple de démarrage aussi bon que celui du moteur série-compensé. Il a, de plus, le léger avantage d'avoir un facteur de puissance excellent. Le schéma de principe est figuré ci-contre (fig. 76), l'enroulement inducteur est en série avec l'induit. Il y a, par suite, deux paires de balais : les deux balais *aa* court-circuités ont pour effet de créer dans le rotor des ampères-tours qui annulent à chaque instant le flux dû au courant induit dans le stator, autrement dit le flux de réaction d'induit. Deux autres balais *bb* à 90° des premiers, servent à faire passer à travers le rotor le courant venant du stator. On voit ainsi que le même enroulement induit joue simultanément deux rôles : celui de l'induit d'un moteur série ordinaire et celui d'un enroulement compensateur fermé en court-circuit sur lui-même. Il en résulte qu'en définitive, ce moteur est un véritable moteur série-compensé sur l'induit.

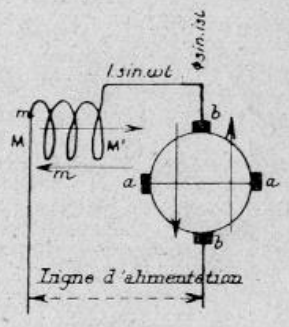


FIG. 76.

Schéma du moteur répulsion-compensé Latour.

Le couple résulte à chaque instant de l'action des ampère-tours du stator sur les ampère-tour du rotor, dus au courant de la ligne traversant les balais *bb*. Le couple est donc bien le même que dans le moteur série ordinaire.

Au démarrage, des étincelles tiendront à naître sous les balais *aa*, par suite du flux unique $\Phi \sin \omega t$ existant dans le moteur et développant statiquement des forces électro-motrices de forme $e \cos \omega t$ entre lames du collecteur sous les balais *aa*. Les balais *bb* ne produisent pas d'étincelles. En effet, les sections sous ces balais ne sont traversées par aucun flux et par suite ne sont le siège d'aucune force électro-motrice.

Les conditions de démarrage sont donc les mêmes que dans le moteur série compensé ; mais nous allons voir que, dès que le moteur tourne, les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conditions de commutation s'améliorent pour devenir excellentes au voisinage du synchronisme. Il est évident que l'on peut tolérer pendant 2 à trois secondes, à l'instant précis du démarrage, des étincelles qui deviendraient inadmissibles d'une manière continue.

Voici la raison pour laquelle les étincelles disparaissent en vitesse :

Le flux $\Phi \sin \omega t$ tend à faire naître, en vitesse, entre les balais aa une f. é. m. $e \sin \omega t$, mais par suite du court-circuit et de la self-induction du rotor, un courant en $i' \cos \omega t$ circulera dans le rotor.

Nous aurons donc dans le court-circuit, en vitesse, deux courants, l'un en $i \sin \omega t$ destiné à annuler le flux du stator, l'autre en $i' \cos \omega t$, faisant naître, dans l'axe a,a, un flux en $\Phi \cos \omega t$. On démontre qu'au synchronisme et dans l'hypothèse d'une répartition sinusoïdale du flux le long de l'entrefer (hypothèse très approchée pratiquement), c'est-à-dire à la vitesse du moteur synchrone de même nombre de pôles, les ampère-tours $i' \cos \omega t$ dans l'axe a,a sont égaux en valeur efficace aux ampère-tours en $I \sin \omega t$ dans l'axe b,b. Cela revient à dire que les seuls ampère-tours engendrant des flux dans le moteur, produiront, au synchronisme, un champ tournant parfait. La commutation en vitesse deviendra donc parfaite comme dans le moteur répulsion.

Le facteur de puissance pourra être amené au voisinage de l'unité. En effet, au synchronisme, le courant $I \sin \omega t$ traversant le moteur, rencontre d'abord la force électro-motrice du stator, et comme le seul flux existant dans l'axe a,a est un flux en $\cos \omega t$, le voltage qu'il induit dans le stator est en $\sin \omega t$. D'autre part, au synchronisme, le champ tournant a la même vitesse que le rotor, il n'y a plus de voltage induit entre les balais b,b aux chutes ohmiques près, puisqu'il n'y a plus de variation de flux dans le rotor. Le courant traversant le moteur ne rencontre donc plus qu'une force électro-motrice, qui est celle du stator, et cette force électro-motrice étant en phase avec le courant, le facteur de puissance est égal à 1.

Pratiquement, les conditions théoriques supposées ne sont pas entièrement réalisées ; le flux ne se répartit pas rigoureusement suivant la loi sinusoïdale, et en outre, il faut que le courant de charge $I \sin \omega t$ soit précisément celui qui convient pour induire un courant de court-circuit $i' \cos \omega t$ égal à $I \cos \omega t$, et convenable pour l'excitation. Pour ces raisons, le facteur de puissance n'est en réalité que très voisin de l'unité.

On voit qu'au synchronisme, le rotor joue le rôle d'un inducteur de moteur synchrone.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

60. **Moteurs dérivés.** — 1° *Moteur répulsion-composé Winter-Eichberg. A. E. G.* Les constructeurs ont établi un assez grand nombre de types dérivés du précédent, dans le but d'arriver à une bonne commutation et à un décalage aussi faible que possible dans toutes les conditions de fonctionnement. Nous citerons le moteur *Winter-Eichberg* de l'A.E.G., dans lequel l'induit reçoit le courant par l'intermédiaire d'un transformateur à deux enroulements ou d'un auto-transformateur (A.T.), c'est-à-dire d'un transformateur à un seul enroulement.

La figure 77 représente le schéma simplifié d'un tel moteur.

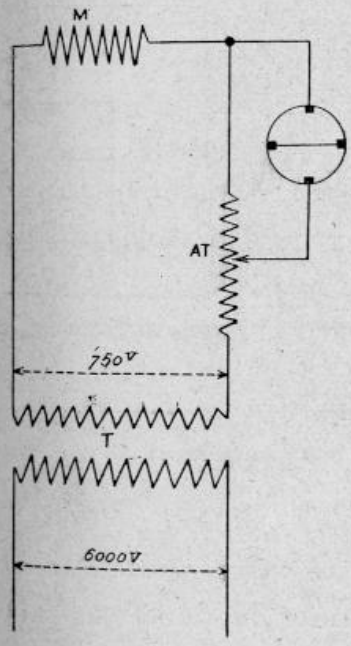


FIG. 77.

Schéma simplifié du moteur répulsion-compensé Winter-Eichberg.

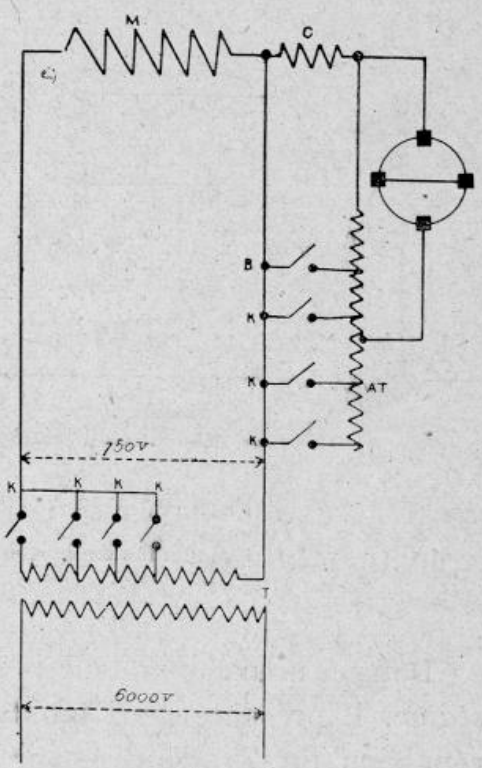


FIG. 78.

Schéma des connexions du moteur série-compensé Winter-Eichberg du London Brighton and South Coast Ry.

La figure 78 représente un des derniers modes de connexions qui est, entre autres, celui réalisé pour les moteurs de 115 chevaux du London-Brighton and South Coast Ry. M est l'enroulement principal ou magnétisant, C est celui de commutation, AT l'auto-transformateur d'excitation, T le transformateur principal, B un interrupteur fermé pour assurer une bonne commutation sous forte charge, K des interrupteurs manœuvrés par des électro-aimants au moyen du contrôleur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La régulation de la vitesse est effectuée en changeant simultanément les rapports de transformation du transformateur principal et du transformateur d'excitation.

2° *Moteur série-répulsion Alexanderson de la General Electric Co.* — La General Electric Co, après avoir d'abord essayé un moteur de traction répulsion simple Elihu-Thomson, l'a abandonné pour construire ensuite un moteur série-compensé (Slichter). Son dernier moteur dit *série-répulsion*, dû à M. Alexanderson, se rapproche, en principe, du moteur répulsion-compensé précédent.

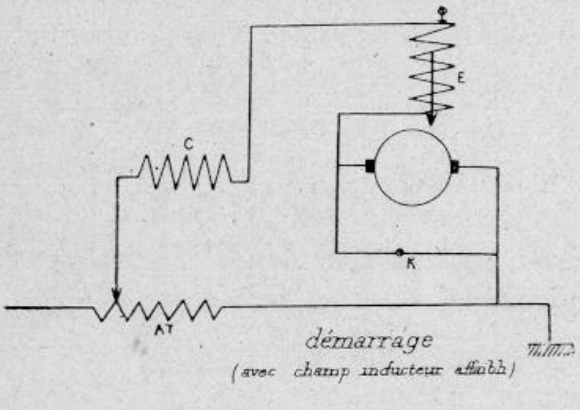


FIG. 79.

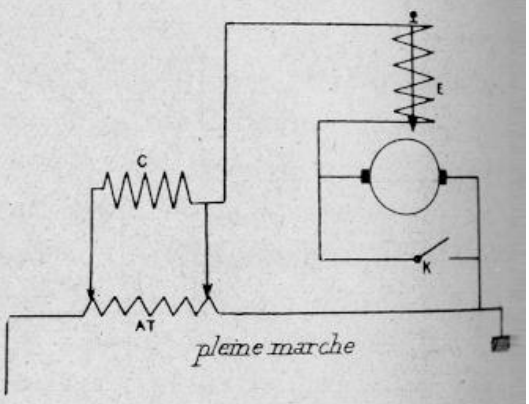


FIG. 80.

Schémas du moteur série-répulsion Alexanderson.

Dans ce nouveau moteur, le *courant est amené au rotor aussi bien qu'au stator*. Il présente deux montages : l'un pour le démarrage, montage répulsion (fig. 79), l'autre pour la pleine marche, montage série (fig. 80).

AT est un auto-transformateur, K est un interrupteur qui permet au démarrage de court-circuiter les balais (montage en *répulsion*) et en pleine marche de couper ce court-circuit (montage en *série*).

3° *Moteur répulsion-série-répulsion Thomson-Houston.* — On y retrouve les éléments du précédent. C'est en particulier le moteur des locomotives Thomson-Houston de la Compagnie des Chemins de fer du Midi et celui des tramways du réseau de Libourne.

Les moteurs de la locomotive du Midi, au nombre de deux par machine, sont d'une puissance uni-horaire de 750 chevaux et d'une puissance continue au régime de 6 heures, avec ventilation forcée de 600 chevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La locomotive est alimentée en courant monophasé 12.000 volts 16 2/3 périodes. Elle pèse 89 tonnes.

Comme dans le cas des moteurs précédents, les induits sont bobinés au tambour, les inducteurs comportent deux enroulements en quadrature : celui d'excitation proprement dit produisant le couple moteur, l'autre de compensation assurant la bonne commutation dans toutes les conditions de marche du moteur.

Ces moteurs démarrant en répulsion afin d'avoir la meilleure commutation possible pendant cette période qui nécessite de grands couples à faible vitesse.

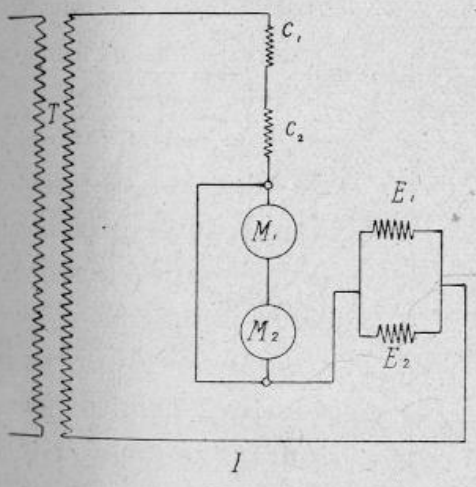


FIG. 81.

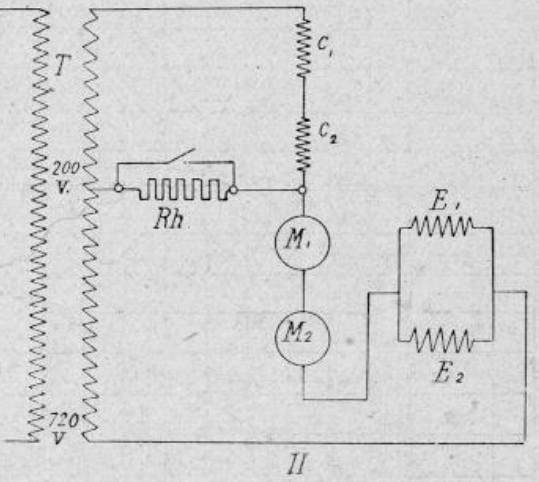


FIG. 82.

Schémas de montage des deux moteurs Thomson-Houston A T H-85 de la locomotive du Midi. (I Montage en répulsion. — II Montage en série-répulsion).

Au-dessus du synchronisme qui correspondant à 100 t/m ou environ 25 km/h, c'est-à-dire pour toutes les vitesses normales de marche, les moteurs fonctionnent en série-répulsion.

Le passage d'un mode de connexion à l'autre est réalisé automatiquement au moyen d'un commutateur spécial.

Le groupement électrique des deux moteurs de la locomotive correspond au couplage général en série, comme indiqué sur les schémas des figures 81-82. Toutefois, tandis que les induits M_1, M_2 forment un groupe en série, et de même les enroulements compensateurs C_1 C_2, les enroulements d'excitation E_1 E_2 sont groupés en parallèle, leur ensemble étant en série avec le circuit précédent.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour réaliser le montage-répulsion, les balais sont mis en court-circuit, les enroulements d'excitation et ceux de compensation sont mis en série entre eux (ces derniers restant toutefois connectés en parallèle) et avec le secondaire du transformateur.

Pour la marche série-répulsion, le groupe des enroulements compensateurs C_1 C_2 est alimenté sous tension constante par une prise spéciale à 200 volts sur le secondaire du transformateur. Ce secondaire comprenant en plus 7 prises à 260, 320, 400, 480, 560, 640 et 720 volts, pour l'alimentation des moteurs et le réglage de leur vitesse.

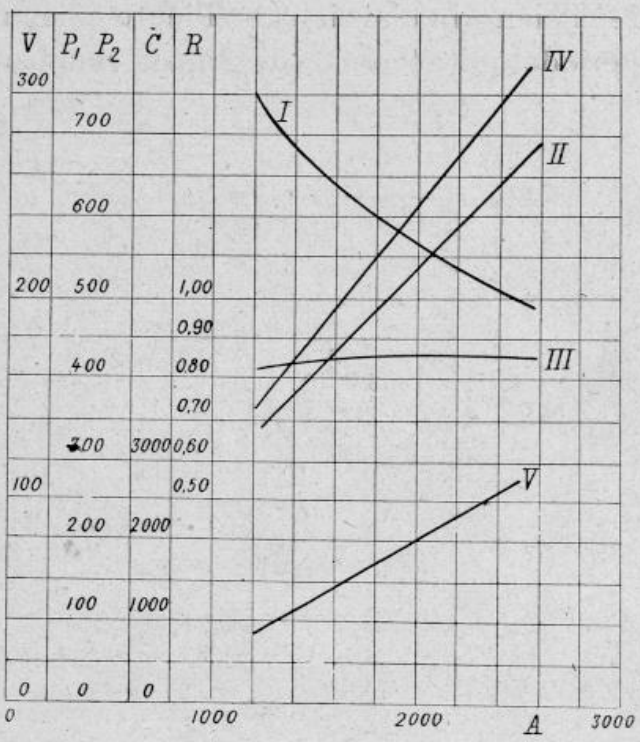


FIG. 83.

Caractéristiques du moteur A T H-85 (Midi).

I. Caractéristiques des vitesses en t/m (échelle d'ordonnées V).
II. Puissance totale fournie au moteur en kw (échelle P_1).
III. Rendement (échelle R).
IV. Puissance effective en chevaux (échelle P_2).
V. Couple (échelle C).

Par suite des variations du flux qui se produisent dans le moteur au moment du passage répulsion à série-répulsion, et qui se traduiraient par des à-coups sensibles dans le fonctionnement de la machine, et par suite dans les attelages, on ménage une position dite de « transition » en intercalant temporairement une résistance Rh entre la prise à 200 volts et les enroulements de compensation. Elle ne reste d'ailleurs en circuit qu'un temps très court.

La figure 83 représente les caractéristiques du moteur ci-dessus.

Nous donnons plus loin, en planche hors texte, le schéma des connexions des équipements des locomotives en question équipées avec ces moteurs, et aussi celui de la locomotive elle-même.

4° *Moteur série-compensé-répulsion des Ateliers de Constructions Electriques du Nord et de l'Est* (Jeumont).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour déterminer cette étude, nous mentionnerons les moteurs du troisième type des locomotives d'essai du Midi, celui construit par les Ateliers de Constructions Electriques du Nord et de l'Est (1).

Ces moteurs sont du type série-répulsion avec champ de compensation.

Au démarrage et aux faibles vitesses, jusqu'au synchronisme, (environ 25 Km/h), ils fonctionnent en répulsion (schéma fig. 84) et au delà en série-compensé (schéma fig. 85).

Pour cette dernière marche — marche normale — la compensation de

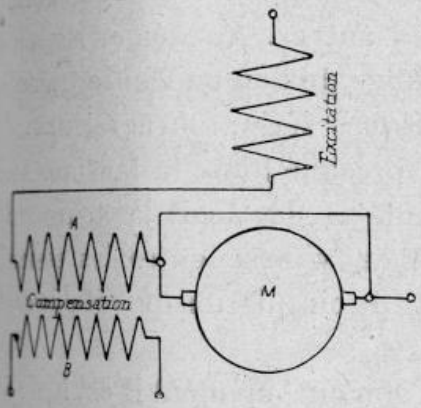


FIG. 84.

Montage en répulsion.

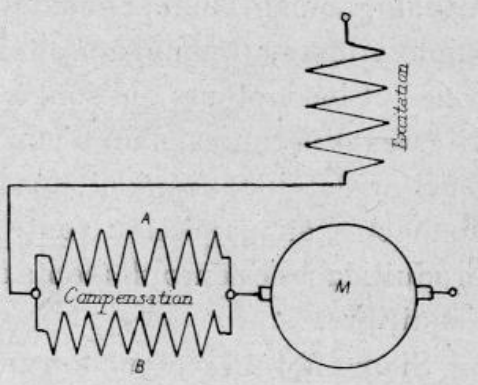


FIG. 85.

Montage en série-compensé.

Schémas de montage des moteurs de la locomotive d'essai des Ateliers de Constructions Electriques du Nord et de l'Est pour la Compagnie des chemins de fer du Midi.

la réaction d'induit et la commutation sont assurées par deux enroulements A et B logés dans les mêmes encoches et connectés en parallèle. Le courant J qui traverse l'induit, passe en parallèle dans ces deux enroulements, d'où compensation de la réaction d'induit et création d'un champ de commutation analogue à celui d'une machine à courant continu. D'autre part, les enroulements A et B ayant des sections et des nombres de spires différents, sont le siège d'un courant de circulation décalé sur J. Ce courant possède une composante "j" en quadrature avec J et capable de compenser exactement à une certaine vitesse la tension produite par

(1) La Compagnie des Chemins de fer du Midi avait commandé à plusieurs constructeurs une locomotive d'essai d'après un même programme. Les trois locomotives dont nous venons de parler, W, T-H et A.C.E.N.E. ont satisfait aux essais et ont été finalement acquises par le Midi. Ces trois locomotives sont actuellement en service.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le champ d'excitation alternatif dans la spire en court-circuit dans les balais au moment de la commutation.

Il est intéressant de noter que ce courant j est proportionnel à J et indépendant de la vitesse.

Pour le fonctionnement aux faibles vitesses (inférieures au synchronisme), les moteurs travaillent en répulsion et l'enroulement B n'est pas connecté à l'enroulement A, il joue un rôle spécial intéressant, que nous allons voir.

Les locomotives dont il s'agit sont à trois moteurs, chacun attaquant un essieu par engrenages et transmission élastique. Les essieux sont mécaniquement indépendants les uns des autres. Au démarrage et à faible vitesse, il peut se produire un patinage de l'un ou l'autre train de roues et les moteurs qui sont à caractéristiques série, tourneraient à des vitesses différentes, l'un d'eux absorbant presque toute la tension. Afin d'éviter cet inconvénient, les enroulements B des trois moteurs sont connectés en parallèle : toute différence de vitesse entre les essieux produit dans ces enroulements des courants de circulation qui rétablissent l'équilibre.

Si en effet un moteur tourne plus vite, son enroulement B est le siège d'une f.é.m. plus grande que celle de chacun des enroulements correspondants des autres moteurs et un courant de circulation prend naissance dans un sens tel qu'il fait augmenter la vitesse des autres, en faisant ralentir celui qui tourne le plus vite.

Ce couplage des enroulements B constitue un véritable « bielle électrique » et permet la suppression des bielles d'accouplement sujettes à rupture.

Nous ajouterons que les moteurs ci-dessus sont d'une puissance unihoraire de 500 chevaux et d'une puissance continue avec ventilation forcée au régime de 6 heures de 400 chevaux.

La locomotive pèse 86 tonnes.

Nous donnons plus loin, en planche hors texte, le schéma général des connexions de l'équipement de cette locomotive ainsi qu'un schéma montrant son aspect.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

APPENDICE

THÉORIE ALGÉBRIQUE ÉLÉMENTAIRE DES MOTEURS MONOPHASÉS A COLLECTEUR SÉRIE ET RÉPULSION DÉTERMINATION DU COUPLE MOTEUR

SOMMAIRE. — **Moteur série.** — Force électromotrice induite entre balais. — Moteur série-compensé. — Equation du moteur série-compensé et diagramme du fonctionnement. — Courant. — Puissance. — Couple. — Facteur de puissance.

Moteur répulsion. — Fonctionnement. — Calage des balais. — Sens de rotation. — Force électromotrice induite entre balais. — Calcul du couple. — Couple maximum. — Angle de calage théorique des balais pour couple de démarrage maximum. — Moteur Latour sans décalage des balais. — Diagramme de fonctionnement du moteur répulsion. — Voir lettre ci-jointe à l'élève.

I. — Moteur série

61. **Force électromotrice instantanée induite entre balais.** — Ainsi que nous l'avons vu, le moteur série monophasé est analogue en principe et identique comme schéma au moteur série courant continu, le courant traverse à la fois inducteurs et induit. Il n'en diffère que par des détails résultant de la nature du courant d'alimentation. L'inducteur qui est feuilleté, est généralement bobiné en stator d'alternateur. Le moteur est dans ce cas à entrefer constant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La f. é. m. induite dans l'enroulement induit dépend du flux résultant de la composition des flux de l'inducteur et de l'induit. La direction de ce flux résultant ne se confond avec celle du flux inducteur que si l'action des ampères-tours de l'induit est annulée.

Considérons un induit à collecteur, bipolaire, pour fixer les idées, et à N génératrices périphériques, tournant avec une vitesse angulaire Ω dans un champ alternatif simple de pulsation ω.

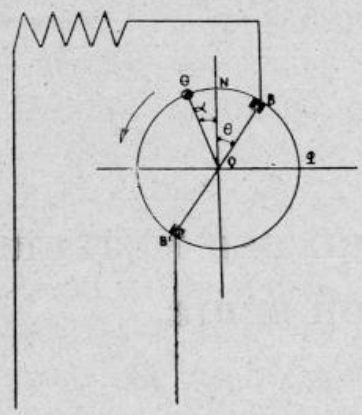


FIG. 86.

Sur le collecteur (fig. 86) sont deux balais diamétralement opposés BB' et calés d'un angle θ sur la ligne ON normale à la direction du flux résultant Φ. Dans l'hypothèse d'une répartition simusoïdale du flux, la valeur instantanée du flux résultant total embrassé par l'induit à l'instant t est :

$$\Phi = \Phi_o \sin \omega t.$$

En prenant pour origine du temps l'instant où le plan d'une génératrice G est suivant ON, l'angle qu'il fait avec cette direction à l'instant t est : $\alpha = \Omega t$ et la composante normale du flux qui le traverse alors est

$$\Phi_t = \frac{\Phi_o}{2} \sin \omega t . \cos \alpha .$$

La f. é. m. instantanée qui y est induite est :

$$e_t = -\frac{d\Phi_t}{dt} = \frac{\Phi_o}{2} \left(\sin \omega t \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt} - \omega \cos \alpha \cos \omega t\right).$$

Mais

$$\frac{d\alpha}{dt} = \Omega,$$

donc :

$$e_t = \frac{\Phi_o}{2} (\Omega \sin \alpha \sin \omega t - \omega \cos \alpha \cos \omega t)$$

dont la valeur moyenne entre balais, c'est-à-dire de $\alpha = -\theta$ à $\alpha = -\theta + \pi$ est :

$$e_m = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{-\theta+\pi} e_t \, d\alpha$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c'est-à-dire, toutes réductions faites :

$$e_m = \frac{1}{\pi} \Phi_o \, (\Omega \cos\theta \sin\omega t - \omega \sin\theta \cos\omega t).$$

Par suite, la f. é. m. totale moyenne induite entre balais, c'est-à-dire pour les $\frac{N}{2}$ génératrices d'une voie de l'enroulement induit est

$$(1) \qquad E = \frac{N}{2} e_m = \frac{N\Phi_o}{2\pi} (\Omega \cos\theta \sin\omega t - \omega \sin\theta \cos\omega t).$$

On voit ainsi que la *pulsation de la f. é. m. induite entre balais est égale à celle du flux inducteur ;* mais cette f. é. m. est, en général, décalée par rapport à lui d'un angle ψ tel que :

$$tg\,\psi = \frac{\omega}{\Omega} tg\,\theta.$$

On peut en effet écrire identiquement :

$$E = \frac{N\Phi_o}{2\pi} \rho \sin(\omega t - \psi)$$

en posant :

$$\rho = \sqrt{\Omega^2 \cos^2\theta + \omega^2 \sin^2\theta}$$

ce qui montre clairement la propriété énoncée. On voit encore bien sous cette forme que E est de pulsation ω.

Reprenons l'équation (1).

Elle montre que E est la résultante de deux f. é. m. en quadrature (figure 87), savoir :

1) L'une :

$$E_1 = \frac{N\Phi_o}{2\pi} \Omega \cos\theta \sin\omega t$$

dont le vecteur est :

$$(E_1) = \frac{N\Phi_o}{2\pi} \Omega \cos\theta = \overline{OA}.$$

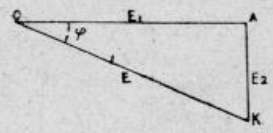


FIG. 87.

Cette f. é. m. E, est *en phase avec le flux et dépend de* Ω. C'est la composante wattée. C'est une f. é. m. *dynamique* due à la rotation de l'induit dans le champ. Elle est maxima quand les balais sont calés dans le plan neutre et nulle quand ils sont placés sur l'axe des pôles. Son amplitude est égale à la f. é. m. engendrée dans la machine fonctionnant en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant continu avec un flux inducteur constant Φ_o. Si en effet on remplace ω par $2\pi n$, n étant la vitesse en t/sec et $\Phi_o \cos\theta \sin\omega t$ par $\Phi_{\omega t}$ on retrouve la formule connue $E_1 = nN\Phi_o$.

2) L'autre : $$E_2 = -\frac{N\Phi_o}{2\pi}\omega \sin\theta \cos\omega t$$

dont le vecteur est :

$$(E_2) = \frac{N\Phi_o}{2\pi}\omega \sin\theta = \overline{AK}.$$

Cette f. é. m. est *en quadrature avec le flux et est indépendante de* ω. C'est la composante déwattée. C'est une f. é. m. *statique*, due aux spires de l'induit agissant en secondaire de transformateur, car elle est engendrée par la variation du flux inducteur dans l'induit supposé immobile. Elle est nulle quand les balais sont calés dans le plan neutre et maxima quand ils sont sur l'axe des pôles.

On voit sur le diagramme (figure ci-dessus) que $AoK = \psi$ dont la tangente est $\frac{\omega}{\Omega} tg\,\theta$.

Le vecteur de la f. é. m. totale E est évidemment $\overline{OK}$.

62. **Moteur série-compensé.** — La composante du flux qui donne naissance à E_1, watté, est seule utile pour produire le couple, l'autre, dû aux ampères-tours de l'induit, n'a aucun effet utile, mais elle donne naissance à E_2, déwatté, qui tend à diminuer le facteur de puissance et elle crée dynamiquement sous les balais dans les spires en court-circuit une f. é. m. nuisible au point de vue de la commutation. On peut annuler cette seconde composante du flux au moyen d'un enroulement de compensation C qui rappelle le rôle des pôles supplémentaires dans les moteurs à courant continu.

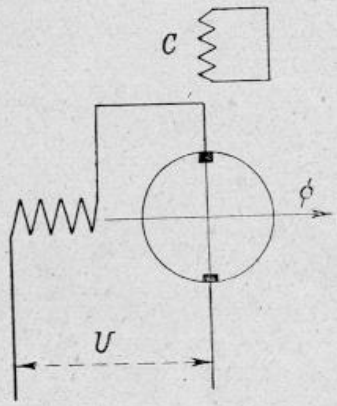


FIG. 88.

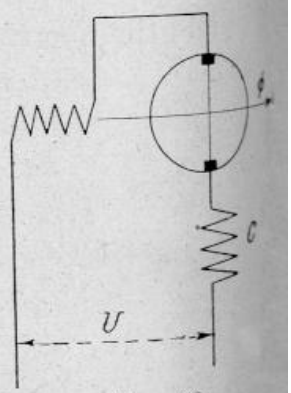


FIG. 89.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cet enroulement compensateur sera tel que le flux qu'il produise soit perpendiculaire au flux inducteur. Il pourra être de faible résistance et en *court-circuit* sur lui-même (schéma fig. 88) ; il jouera alors le rôle du secondaire en court-circuit d'un transformateur ou en *série* avec l'induit (fig. 89). Il sera de toute manière logé dans des encoches de l'inducteur. C'est le moteur *série-compensé* d'Eickmeyer.

Dans ces conditions, les *balais seront calés sur la ligne neutre* $\theta = o$ et l'expression de la f. é. m. induite totale entre balais devient simplement en observant que $\Phi_o \sin \omega t = \Phi$

$$(2) \qquad E = + \frac{N\Phi_o}{2\pi} \Omega \sin \omega t = \frac{N\Omega}{2\pi} \Phi$$

qui est celle de la f. é. m. dynamique, la f. é. m. statique étant annulée.

On retrouve ainsi incidemment et suivant une remarque déjà faite la valeur connue de la f. c. é. m. du moteur série-courant continu de forme $nN\Phi$. ($\Omega = 2\pi n$ et $\Phi = c^{te}$), mais ici il s'agit de la f. é. m. totale E et non plus seulement d'une composante.

63. — **Équation du moteur série-compensé et diagramme du fonctionnement.** — Soit alors le moteur série à enroulement compensateur défini ci-dessus, avec balais dans le plan neutre et alimenté sous une tension alternative.

$$U = U_o \sin \omega t$$

de valeur efficace :

$$u = \frac{U_o}{\sqrt{2}}$$

Soient : I l'intensité instantanée du courant inducteur
R la résistance totale du circuit du moteur ;
L son coefficient total de self-induction ;
(propre et mutuel, inducteur et induit).
N_1 le nombre de spires de l'enroulement inducteur ;
$\mathcal{R}$ la réluctance effective du circuit magnétique du moteur.

L'équation du moteur est évidemment :

$$(3) \qquad U = U_o \sin \omega t = RI + L \frac{dI}{dt} + E$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'ailleurs, d'après (2) on a :

$$E = \frac{N\Omega}{2\pi} \cdot \Phi.$$

D'autre part, on sait que :

$$\Phi = 4\pi \frac{N_1 I}{\mathcal{R}}$$

donc :

$$E = \frac{2NN_1}{\mathcal{R}} \Omega I$$

que nous écrirons

$$E = M\Omega I$$

en posant

$$M = 2\frac{NN_1}{\mathcal{R}}$$

M n'est autre qu'un coefficient d'induction mutuelle entre l'induit et l'inducteur.

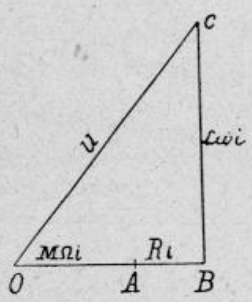


FIG. 90.

L'équation devient donc

$$U = (R + M\Omega) I + L\frac{dI}{dt} \qquad (4)$$

que l'on peut construire graphiquement en prenant (fig. 90) :

$$\overline{OA} = M\Omega i, \quad \overline{AB} = Ri \quad \text{et} \quad \overline{BC} = L\omega i.$$

On déduit : $\overline{OC} = u$.

L'équation (4) montre que tout se passe comme si la résistance R du moteur était augmentée d'une quantité proportionnelle à la vitesse de rotation Ω de celui-ci.

En résolvant cette équation, on obtient, l'état de régime étant supposé obtenu :

$$I = \frac{U_0}{\sqrt{(R + M\Omega)^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi)$$

avec la condition

$$tg\varphi = \frac{\omega L}{R + M\Omega}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La *valeur efficace du courant* I est évidemment

$$i = \frac{u}{\sqrt{(R + M\Omega)^2 + \omega^2 L^2}}$$

La *puissance utile* instantanée de l'induit est :

$$P_t = EI$$

I étant en phase avec E. D'ailleurs $E = M\Omega I$.

Donc :

$$P_t = M\Omega I^2$$

P_t étant proportionnelle à I^2, la puissance moyenne pour une période est égale à la puissance efficace :

$$P = M\Omega i^2$$

d'où l'expression du *couple* correspondant :

$$c = \frac{P}{\Omega} = M \frac{u^2}{(R + M\Omega)^2 + \omega^2 L^2}.$$

Au démarrage $\Omega = o$, C est maximum, de même que I. De plus, C est nul pour Ω infini, le moteur est donc susceptible de s'emballer aux faibles charges comme le moteur série-courant continu.

Le *facteur de puissance* est

$$\cos\varphi = \frac{R + M\Omega}{\sqrt{(R + M\Omega)^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{(R + M\Omega)^2}}}.$$

Pour qu'il soit élevé, il faut donc que L soit faible, c'est-à-dire que la dispersion soit la plus petite possible ; enfin, il faut chercher à augmenter $R + M\Omega$. On ne peut pas augmenter beaucoup R. On augmentera M en diminuant $\mathcal{R}$, c'est-à-dire en prenant un faible entrefer et on cherchera à ce que Ω soit voisin du synchronisme.

Au démarrage $\Omega = o$, donc $\cos\varphi$ est minimum. Quand la vitesse croît, le courant et le couple diminuent, le $\cos\varphi$ augmente. Enfin, le fonctionnement sera d'autant meilleur ($\cos\varphi$ et couple maximum plus élevés) que ω, c'est-à-dire la fréquence du courant d'alimentation, sera plus faible ; d'où la tendance actuelle d'adopter de faibles fréquences pour les lignes à traction monophasée, soit, 16 2/3 et 15 périodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il ne semble pas qu'il y ait d'avantages à descendre au-dessous de cette fréquence car, étant donnée la nature pulsatoire du couple instantané, les vibrations auxquelles il donne lieu sont d'autant plus accentuées que la fréquence est plus faible. Enfin il y a aussi à considérer l'augmentation de poids et de prix aux faibles fréquences du transformateur à installer sur le véhicule pour l'alimentation des moteurs.

II. — **Moteur répulsion**

64. **Fonctionnement. Angle de calage des balais. Sens de rotation du moteur.** — Le courant alternatif simple inducteur passe seulement dans l'inducteur fixe feuilleté et bobiné en stator d'alternateur. L'induit séparé du réseau est en apparence celui d'un moteur courant continu qui aurait deux balais BB′ à 180° fermés en court-circuit sur eux-mêmes (fig. 91). Le moteur est à entrefer constant. Supposons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse d'un induit bipolaire.

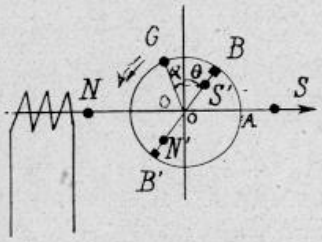


FIG. 91.

Nous avons vu (§ 58) que le couple électromagnétique de l'induit, résultant de l'action du champ primaire (inducteur) sur le champ secondaire (induit) est nul quand les balais sont sur la ligne neutre ou sur l'axe des pôles. Dans les positions intermédiaires il y a production d'un couple. Pour ces positions, les balais doivent être calés en *sens inverse du mouvement*.

En effet, la f. é. m. induite statiquement dans l'armature par le flux inducteur retarde de $\frac{\pi}{2}$ sur ce dernier et le courant produit (la self-induction de l'induit étant considérable par rapport à sa résistance) retarde encore d'*environ* $\frac{\pi}{2}$ sur la f. é. m. Le courant induit est donc finalement presque en opposition — ou du moins l'angle de décalage est très obtus — avec le courant inducteur et le flux de l'induit presque en opposition avec le flux inducteur.

Le flux induit est alors suivant O B′ tandis que le flux inducteur est suivant O A.

Si donc les pôles inducteurs sont en N et S, tout se passe comme si

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on avait un pôle induit N′ sur OB′ et un pôle induit S′ sur OB. Les deux pôles voisins, inducteur et induit, sont donc des pôles de même nom, passant par leur induction maxima sensiblement au même instant et ils se *repoussent*, d'où le nom donné au moteur.

Le moteur démarre dans le sens inverse du calage des balais par rapport à la ligne neutre. L'angle θ de calage devra donc bien être dans le sens inverse du mouvement et plus petit que 90°.

65. **Force électromotrice instantanée induite entre balais.** — L'expression de la f. é. m. totale induite entre balais est évidemment la même que dans le cas du moteur série soit en conservant les mêmes notations que précédemment :

$$(1) \qquad E = \frac{N\Phi_0}{2\pi}(\Omega \cos\theta \sin\omega t - \omega \sin\theta \cos\omega t)$$

que l'on peut mettre sous la forme :

$$E = E_0 \sin.\ (\omega t - \psi)$$

en posant

$$(2) \qquad E_0 = \frac{N\Phi_0}{2\pi}\sqrt{\Omega^2 \cos^2\theta + \omega^2 \sin^2\theta}$$

et

$$(3) \qquad tg\,\psi = \frac{\omega}{\Omega} tg\,\theta.$$

Comme précédemment E est la résultante de 2 f. é. m. induites ; l'une :

$$E_1 = \frac{N\Phi_0}{2\pi}\Omega \cos\theta \sin\omega t.$$

dont le vecteur est (fig. 92)

$$(E_1) = \frac{N\Phi_0}{2\pi}\Omega \cos\theta = \overline{OA}.$$

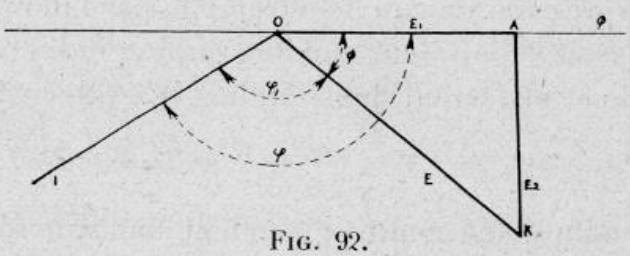


FIG. 92.

Cette f. é. m. E_1 est dynamique et en phase avec le flux inducteur, l'autre

$$E_2 = \frac{N\Phi_0}{2\pi}\omega \sin\theta \cos\omega t$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont le vecteur est :

$$(E_2) = \frac{NS}{2\pi}\,\omega \sin 0 = \overline{AK}$$

Cette f. é. m. E_2 est statique et en quadrature avec le flux inducteur.

La f. é. m. totale E est encore de même pulsation ω que le flux inducteur Φ et décalé sur lui de l'angle ψ défini ci-dessus. Son vecteur est $\overline{OK}$.

La valeur efficace E_a de E est

$$E_a = \frac{E_o}{\sqrt{2}} \qquad (4)$$

E_o étant défini par l'équation (2).

L'intensité efficace I_a est :

$$I_a = \frac{E_a}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \qquad (5)$$

où R et L sont les résistances et le coefficient de self-induction propre de l'armature.

Le courant I est décalé sur E d'un angle φ_1 (figure précédente) tel que :

$$tg\,\varphi_1 = \frac{\omega L}{R}$$

et sur le flux inducteur de l'angle φ tel que :

$$\varphi = \psi' + \varphi_1.$$

66. **Calcul du couple moteur.** — Nous nous proposons de calculer l'expression du couple développé par l'induit.

Soit Φ_o la valeur maxima du flux inducteur de pulsation ω sortant d'un pôle et pénétrant dans l'induit. La valeur du flux à l'instant "t" sera :

$$\Phi = \Phi_o \sin \omega t.$$

en admettant comme précédemment une répartition sinusoïdale du flux.

Soit C_t la valeur du couple électromagnétique à l'instant t sur une génératrice G faisant un angle α avec le plan neutre. A cet instant t le plan OG de cette génératrice sera traversé par un flux.

$$\Phi_t = \frac{\Phi_o}{2} \sin \omega t.\, \cos \alpha.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En évaluant le travail produit par un déplacement angulaire $d\alpha$ de l'induit, on obtient :

$$C_t \, d\alpha = \frac{I}{2} \, d\Phi_t$$

I étant le courant induit.

On déduit

$$C_t = \frac{I}{2} \cdot \frac{d\Phi_t}{d\alpha} = -\frac{I}{4} \Phi_o \sin \omega t. \sin \alpha.$$

dont la valeur moyenne pendant le déplacement de la génératrice considérée d'un balai à l'autre, c'est-à-dire de

$$\alpha = -\theta \quad \text{à} \quad \alpha = -\theta + \pi,$$

est :

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{-\theta+\pi} C_t d\alpha = \frac{\Phi_o I}{2\pi} \sin \omega t. \cos \theta.$$

Par suite, le couple total, pour les N génératrices de l'enroulement induit sera ;

$$C_m = \frac{N \Phi_o I}{2\pi} \sin \omega t. \cos \theta.$$

D'ailleurs

$$I = I_a \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi)$$

par suite

$$(6) \qquad C_m = \frac{N \Phi_o}{2\pi} \cdot I_a \sqrt{2} \cos \theta. \sin \omega t. \sin (\omega t - \varphi).$$

Finalement, la valeur moyenne dans le temps du couple pendant une période est

$$C = \frac{\omega}{2\pi} \int_o^{\frac{2\pi}{\omega}} C_m dt.$$

Pour calculer cette intégrale, observons que :

$$\sin \omega t. \sin (\omega t - \varphi) = \frac{1}{2} \left[\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi) \right]$$

et que

$$\int \cos (2\omega t - \varphi) \, dt = \frac{1}{2\omega} \sin (\omega t - \varphi) + c^{te},$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce qui montre que :

$$\int_o^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos(2\omega t - \varphi)\, dt = o.$$

On voit par suite que l'intégration de o à $\frac{2\pi}{\omega}$ du produit des sinus de l'expression (6) de C_m donne simplement :

$$\frac{1}{2} \cos \varphi . \frac{2\pi}{\omega}.$$

On a donc, toutes réductions faites et arrangeant les facteurs :

$$C = \frac{N\Phi_o}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cos\theta . I_a \cos\varphi \qquad (7)$$

$I_a \cos\varphi$ représente la composante wattée dans le flux de la valeur efficace I_a du courant induit I.

En remplaçant dans cette expression du couple, I_a par sa valeur donnée par l'équation (5) et explicitant les valeurs de E_a et de E_o au moyen des équations (4) et (2), on obtient :

$$C = \frac{N\Phi_o}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos\theta . \frac{1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \cdot \frac{N\Phi_o}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\Omega^2 \cos^2\theta + \omega^2 \sin^2\theta} . \cos\varphi$$

ou :

$$C = \left(\frac{N\Phi_o}{2\pi}\right)^2 \cos\theta \cos\varphi \frac{\sqrt{\Omega^2 \cos^2\theta + \omega^2 \sin^2\theta}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \qquad (8)$$

D'ailleurs,

$$\cos\varphi = \cos(\psi + \varphi_1)$$

avec

$$tg.\psi = \frac{\omega}{\Omega} tg\,\theta$$

et

$$tg\,\varphi_1 = \frac{\omega L}{R}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En explicitant le second membre de cos φ, et calculant les cos et sin des angles ψ et φ_1 au moyen des deux équations ci-dessus, on obtient :

$$\cos\varphi = \frac{R\Omega\cos\theta - \omega^2 L\sin\theta}{\sqrt{\Omega^2\cos^2\theta + \omega^2\sin^2\theta}\,.\,\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Finalement en portant cette valeur de cos φ dans l'équation (8) on obtient toutes réductions faites :

$$(9)\quad C = \frac{1}{2}\left(\frac{N\Phi_o}{2\pi}\right)^2 \frac{\cos\theta}{R^2 + \omega^2 L^2}\left(R\Omega\cos\theta - \omega^2 L\sin\theta\right)$$

Telle est l'expression cherchée.

La *valeur maxima* du couple C en fonction de l'angle de calage des balais sera obtenue en posant

$$\frac{dC}{d\theta} = o$$

ce qui donne, tous calculs faits :

$$tg\,2\theta = -\frac{\omega^2 L}{\Omega R}$$

Si donc on veut que le couple soit maximum au *démarrage*, on fera dans cette expression $\Omega = o$, ce qui donne $\theta = 45°$ et en arrière du mouvement, d'où ce résultat :

Pour que le couple soit maximum au démarrage, les balais devront être calés théoriquement a 45° sur la ligne neutre et en arrière du mouvement.

Pratiquement d'autres considérations interviennent : fuites magnétiques, actions mutuelles des enroulements, etc..., et on doit caler les balais plus près de la ligne des pôles, généralement entre 15 et 25° de cet axe et dans le sens inverse de celui de la rotation.

La conséquence de ce qui précède est qu'il faut changer le calage des balais quand on inverse le sens de rotation du moteur. Ce moteur est donc *fondamentalement impropre* à la traction.

Le *moteur de M. Latour*, qui est en définitive un moteur répulsion avec excitation dans le rotor, mais qu'on peut envisager comme étant une combinaison du moteur répulsion et du moteur série, jouit de propriétés assez analogues à ce dernier, mais *il fonctionne sans décalage des balais.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est donc propre à un service de traction. Toutefois, sa vitesse varie très vite avec le couple ; il est donc moins souple que le moteur type série. Enfin, la double ligne de balais est un inconvénient.

67. Diagramme du fonctionnement du moteur répulsion. — Soient :

I_1 le courant primaire de pulsation ω,

L_1 le coefficient de self-induction propre du primaire,

M le coefficient de self-induction mutuelle des deux enroulements, coefficient dépendant de la position des balais.

La tension u appliquée aux bornes primaires devra faire équilibre, d'une part à la f. é. m. de self-induction propre du primaire de forme $L_1 \omega I_1$, et, d'autre part, à la f. é. m. induite par le secondaire de forme $M\omega I$.

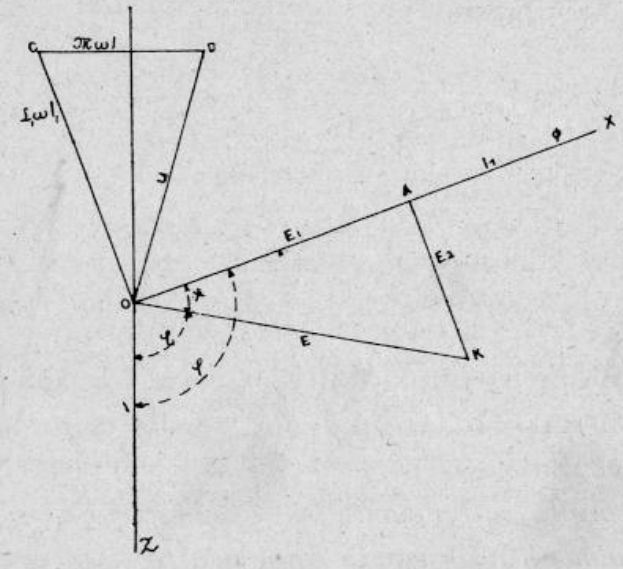


FIG. 93.

Soit alors OX (fig. 93) la direction du courant primaire I_1 (ou du flux inducteur Φ) ; OZ celle du courant secondaire faisant avec OX l'angle $\varphi = \varphi_1 + \psi$ défini précédemment. On prend OC perpendiculaire à OX et égal à $L_1 \omega I_1$, puis CD perpendiculaire à OZ et égal à $M\omega I$.

On a évidemment $OD = u$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VII

COURANT ALTERNATIF MONOPHASÉ
RÉGULATION DE LA MARCHE DES VOITURES.

SOMMAIRE. — Procédés employés pour la régulation : transformateur, auto-transformateur, régulateur d'induction. — Exemples de schémas d'équipements monophasés. — Systèmes monophasés mixtes : systèmes monophasé-continu (méthode Ward-Léonard. Emploi du courant redressé par le redresseur Auvert et Ferrand. Emploi du redresseur de courant à vapeur de mercure, système Westinghouse). — Système mono-triphasé Westinghouse et Pennsylvania. — Applications du système monophasé. — Remarques générales sur le système monophasé : Lignes à alimentation mixte : courant continu et courant monophasé. — Lignes monophasées à haute et basse tension. — Fréquence du courant d'alimentation. — Forme du couple développé par les moteurs monophasés. Poids et coût d'entretien du matériel monophasé. — Influence perturbatrice des lignes de traction monophasées sur les circuits téléphoniques et télégraphiques voisins. — Dispositif employé sur la ligne principale du New-York-New-Haven et Hartford. — Méthode Girousse. — Méthode des transformateurs-suceurs. — Conclusion.

68. **Procédés employés pour la régulation.** — La méthode employée pour assurer la régulation de la marche d'un véhicule équipé avec des moteurs monophasés est extrêmement simple et pratique. Elle consiste à faire varier la tension aux bornes des moteurs et ceci quel que soit le type du moteur. A chaque tension correspond une vitesse économique de marche.

La ligne d'alimentation sera alors à haute tension : 6.000, 10.000, 15.000 et même 20.000 volts (Chemin de fer suédois à Stokholm), per-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mettant un transport économique de l'énergie électrique jusqu'au véhicule. Un transformateur sera installé sur la voiture pour alimenter alors directement les moteurs au voltage voulu. La tension maximum d'alimentation des moteurs monophasés actuels ne dépasse pas 250 à 300 volts pour le type série et 600 volts environ pour le type répulsion compensé. C'est à la tension maxima que correspond la vitesse maxima. Le démarrage et les vitesses intermédiaires sont obtenues à des voltages moindres, mais sans interposition de résistances.

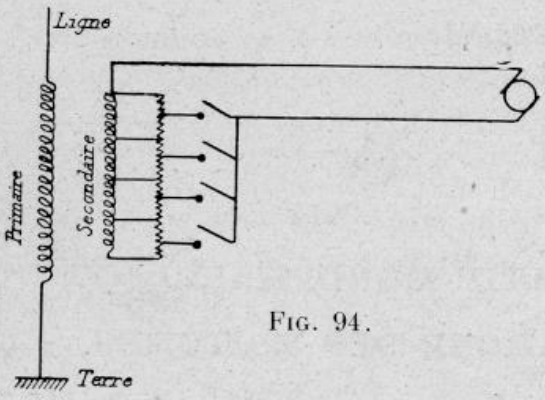


FIG. 94.

Pour faire varier la tension d'alimentation des moteurs, on se sert le plus généralement d'un *transformateur à rapport de transformation variable*.

On obtient ce résultat :

1° en faisant varier le nombre de spires du secondaire au moyen d'un appareil analogue à un réducteur de batterie, et en ayant soin de ne pas mettre en court-circuit par les touches une section du secondaire sans interposer une bobine de self limitant la valeur du courant dans ladite section (schéma fig. 94).

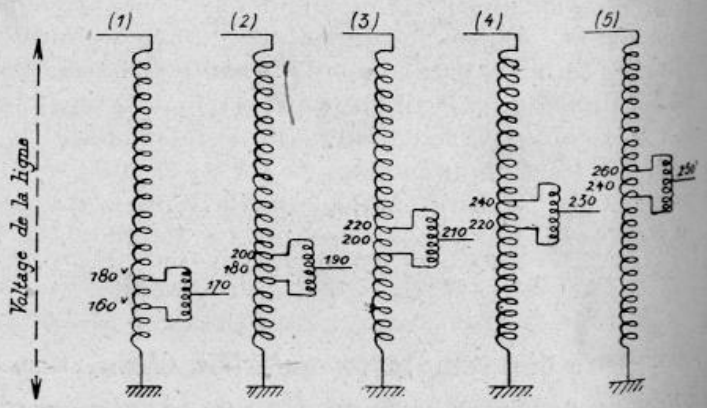


FIG. 95.

2° en employant un *auto-transformateur*, c'est-à-dire un transformateur à un seul enroulement présentant des prises de courant échelonnées et dont une extrémité de l'enroulement est à la terre. Le schéma ci-après (fig. 95) montre les connexions d'un auto-transformateur Westinghouse, avec bobine de self de protection.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le contrôleur est prévu pour alimenter les moteurs sous 170, 190, 210, 230 ou 250 volts, d'où cinq vitesses économiques.

3° *Par l'emploi d'un régulateur d'induction.* — Le principe du réglage par régulateur d'induction est bien connu. On ajoute à une tension fixe obtenue par un transformateur du type usuel, une tension variable en grandeur et en signe, obtenue dans un appareil construit comme un moteur d'induction monophasé, avec primaire fixe et secondaire mobile, commandé mécaniquement, décalable autour de son centre, de sorte qu'il peut embrasser plus ou moins complètement le flux statorique. Le primaire (stator) du régulateur est alimenté sous la tension constante du secondaire du transformateur fixe et son secondaire (rotor) est mis en série avec le secondaire du même transformateur.

Une application remarquable de ce procédé est celle réalisée par les Ateliers de Constructions électriques du Nord et de l'Est, pour leur locomotive d'essai de la Compagnie du Midi, dont nous avons déjà parlé à propos des moteurs.

Cette locomotive comporte deux transformateurs à rapport de transformation fixe 12.000/240, dont les primaires sont en parallèle sous la tension du trolley 12.000 volts et les secondaires en série. A chaque transformateur est adjoint un régulateur d'induction du type précédent, dont le stator est alimenté à tension constante, 240 volts à vide, par le transformateur correspondant. Son rotor est le siège d'une *f.é.m.* qui, à vide, est exactement en phase avec la tension appliquée aux bornes du stator et varie suivant le calage entre + et — 140 volts, de sorte que les secondaires des deux transformateurs et des deux régulateurs de la locomotive étant en série, la tension disponible pour l'alimentation des moteurs varie entre

$$2 \times (240 - 140) = 200 \text{ volts}$$

et

$$2 \times (240 + 140) = 760 \text{ volts.}$$

Dans ce régulateur, une connexion de court-circuit est en outre disposée sur son stator entre deux points diamétralement situés et à 90° des points d'alimentation. Cette connexion joue le rôle spécial suivant : le courant basse tension traversant le rotor, crée un flux ayant une direction fixe par rapport au rotor, mais variable avec la position de celui-ci. Ce flux peut être décomposé en deux flux rectangulaires, l'un ayant la direction du flux du transformateur, l'autre une direction perpendiculaire. Le premier se compose avec celui du transformateur, le second donne naissance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à un courant dans la connexion de court-circuit, ce courant produit un flux de sens contraire au second flux et l'annule presque complètement (si ce flux n'était pas annulé, il produirait une assez forte chute inductive).

Grâce à l'emploi de cette connexion de court-circuit et à diverses dispositions de détails prises pour l'exécution des enroulements dans le but

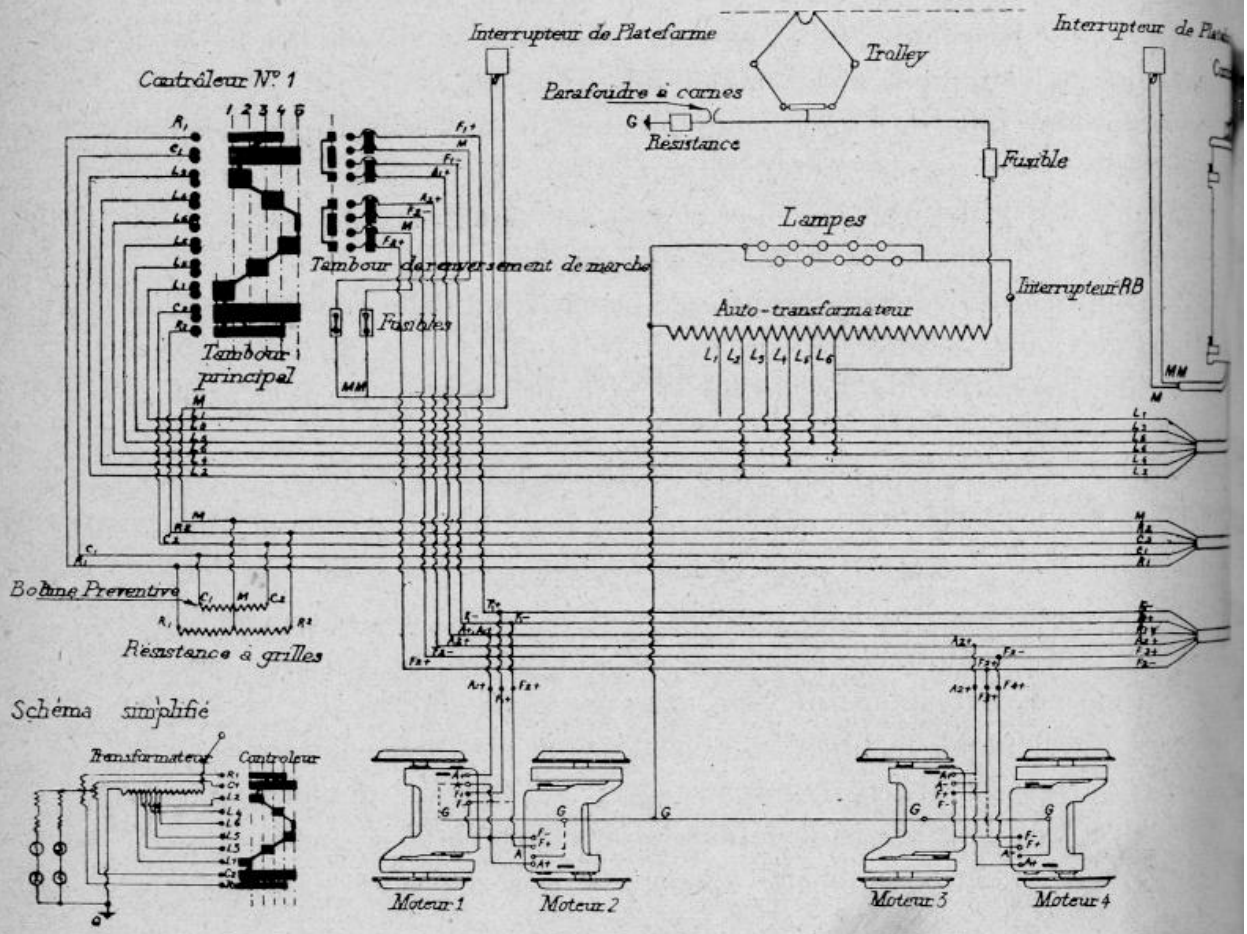


FIG. 96.

Schéma des connexions d'un équipement monophasé type, système Westinghouse.

d'assurer une égale répartition du flux dans les deux dérivations du circuit magnétique du régulateur et la superposition des ondes des tensions du transformateur et du régulateur, pour toute position du rotor, le facteur de puissance du transformateur et du régulateur combinés n'est que légèrement inférieur à celui d'un transformateur à prises multiples.

La rotation du rotor du régulateur d'induction est obtenue au moyen d'un petit moteur dont le mouvement de rotation lui est transmis par deux réductions par vis sans fin de rapports 1/31 et 1/33.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, un contrôleur auxiliaire placé sur le transformateur et commandé par chaîne Galle, permet d'obtenir l'asservissement du courant de commande, d'après la position du rotor du régulateur.

Le régulateur d'induction évite l'emploi de nombreux contacteurs et l'inconvénient que présentent les prises multiples du transformateur des méthodes précédentes de ne permettre qu'un réglage de la tension par

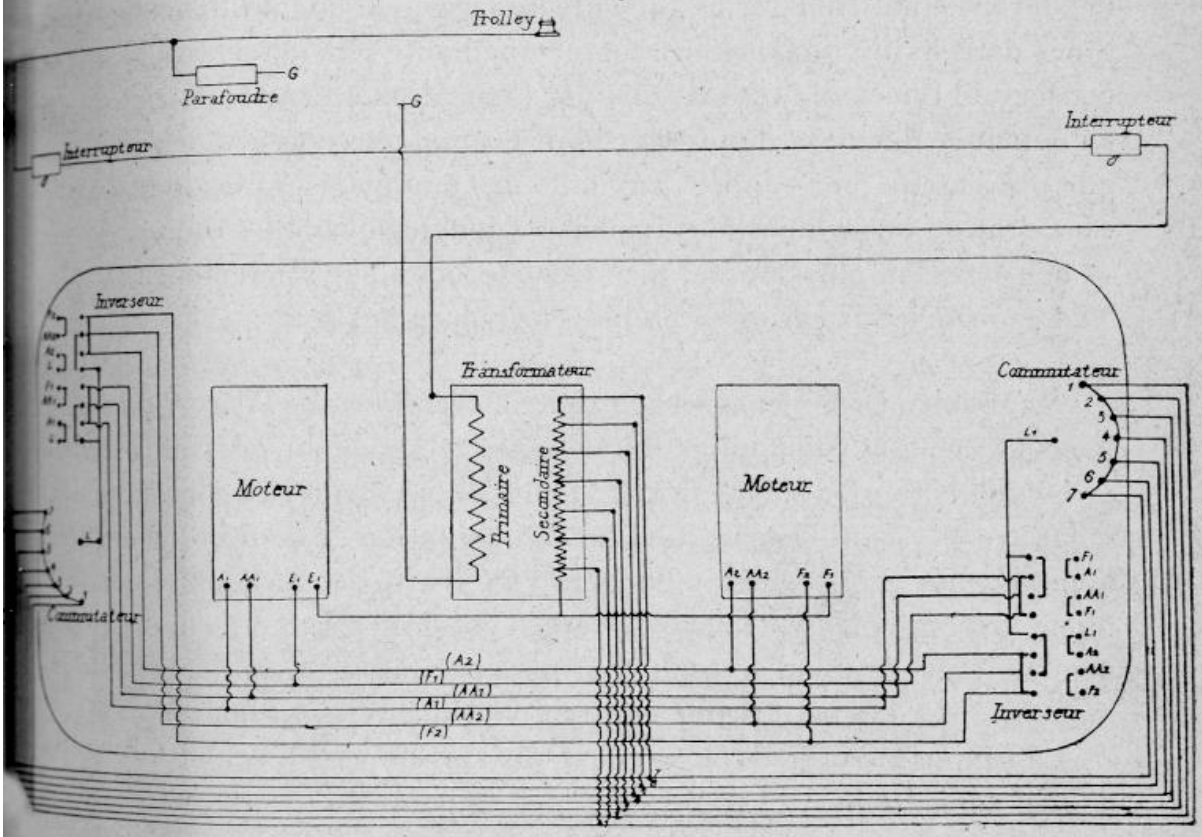


FIG. 97.
Voiture monophasée de Malakoff. — Schéma général de l'équipement.

à-coups. Il procure en effet un réglage progressif et continu. Par contre, il ajoute une complication à l'équipement, il est lourd et encombrant et contribue à abaisser le facteur de puissance du système.

69. **Exemples de schémas d'équipements monophasés.** — Comme exemples de schémas d'équipements monophasés, nous donnons ci-dessus, le schéma d'un équipement monophasé type, système Westinghouse (fig. 96) et celui de l'équipement Thomson-Houston à moteurs Latour de l'ancienne ligne expérimentale de Malakoff, à Paris (fig. 97) et en planches hors texte ceux des différentes locomotives d'essai du Midi, dont nous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avons déjà parlé : Westinghouse (fig. 98), Thomson-Houston (fig. 99) Ateliers de Constructions électriques du Nord et de l'Est (fig. 100).

70. **Systèmes monophasés mixtes.** — Dans ces systèmes, le courant d'alimentation du trolley est monophasé et les moteurs d'essieu sont, soit des moteurs à courant continu, soit des moteurs asynchrones triphasés, le courant étant transformé sur la locomotive elle-même. Ils ont été imaginés dans le but de pouvoir adopter une haute tension au trolley tout en conservant une seule ligne, (ceci par opposition au système triphasé qui en demande deux), et de profiter pour les moteurs d'essieu des avantages que présentent, par rapport aux moteurs monophasés, les moteurs courant continu ou asynchrones triphasés (couple constant — non pulsatoire — construction plus simple, plus robuste, meilleur rendement).

Les principaux systèmes employés dans ce but sont :

71. **Systèmes monophasé-continu.** — 1) *Méthode de Ward-Léonard.* — Nous avons déjà vu l'application de cette méthode au courant continu, à propos de la Régulation de la marche des automotrices en courant continu (chapitre V). Dans le cas actuel de l'alimentation en courant monophasé, le moteur du groupe moteur-générateur Ward-Léonard sera un moteur monophasé à collecteur du type répulsion, qui entraînera comme précédemment une dynamo courant continu à excitation variable, laquelle alimentera les moteurs d'essieu courant continu, type ordinaire.

La Compagnie Œrlikon a construit sur ce principe une locomotive d'essai de 45 tonnes. L'inconvénient est le poids du groupe moteur générateur et son entretien.

2) *Emploi du courant redressé par le redresseur-régulateur Auvert-Ferrand.* — MM. Auvert et Ferrand ont imaginé de transformer le courant monophasé d'alimentation en un courant *redressé* se rapprochant comme forme du courant continu et en ayant les avantages.

Le système comprend un transformateur statique abaisseur de tension et un *redresseur-régulateur* donnant du courant redressé et même du courant ondulé à voltage variable pour l'alimentation des moteurs d'essieu.

Le redresseur permet de retourner les demi-ondes négatives de la tension sinusoïdale monophasée (fig. 101), de façon à obtenir aux bornes une tension toujours de même sens, qui donnera un courant également de même sens.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour exposer le principe du fonctionnement du redresseur, nous nous bornerons à examiner le cas simple d'un redresseur bipolaire à collecteur unique.

Considérons (fig. 102) (1) un anneau lamellé SS formé de tôles minces autour duquel sont placés deux enroulements E F, occupant chacun le quart de la circonférence de l'anneau et réalisant ainsi deux portions d'anneau Gramme.

Sur le même axe que celui-ci est monté un collecteur incomplet de dynamo à courant continu formé de deux secteurs X et Y d'ouverture 90° composé de lames de collecteur et deux secteurs P, Q pleins, remplissant les intervalles et reliés respectivement à deux bagues L et M.

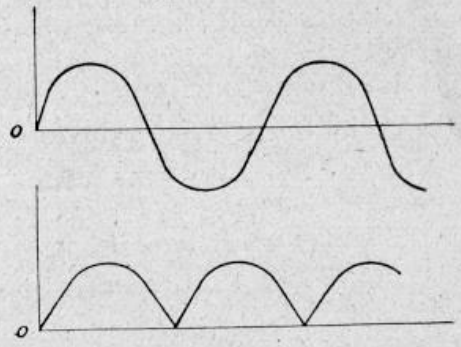


FIG. 101.

Les lames des secteurs X Y sont connectées aux différentes sections des enroulements et les extrémités de ceux-ci sont reliés en *f.g.h.k.* aux secteurs P et Q. Le système est complété par deux jeux de balais A,B et C,D disposés comme l'indique la figure et le schéma de principe précédent. Le courant monophasé arrive par A et B.

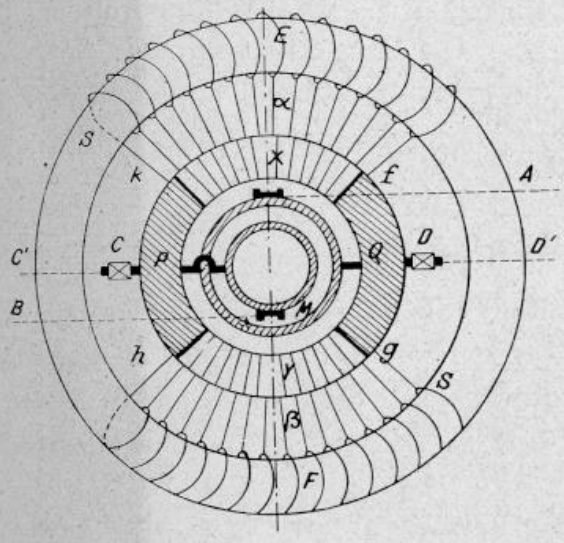


FIG. 102.
Schéma du redresseur Auvert et Ferrand.

Supposons d'abord l'appareil immobile, on voit que le courant alternatif arrivant par A et B parcourra les enroulements E F de telle sorte que les flux magnétiques engendrés dans les deux parties de l'anneau soient concordants.

Le flux total parcourant l'anneau sera fermé sur lui-même comme dans le noyau d'un transformateur.

(1) La description de cet appareil et la figure qui l'accompagne sont extraits de l'*Industrie électrique* du 25 avril 1907.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons maintenant qu'on fasse tourner l'anneau au synchronisme, au moyen d'un moteur synchrone par exemple et de telle sorte que les balais C D soient au milieu des secteurs pleins P Q, au moment où la tension alternative est maximum. On voit dans ces conditions que la moitié α Q β du collecteur, a toujours la même polarité que le point A, tandis que la deuxième moitié α Q β a toujours la même polarité que le point B.

L'anneau tournant à la vitesse du synchronisme, chacune des moitiés du collecteur passera devant chacun des frotteurs C D, précisément dans le temps où elle aura une polarité déterminée et celle-ci changera de signe au moment même où chaque moitié du collecteur quittera un frotteur pour venir en contact avec l'autre frotteur.

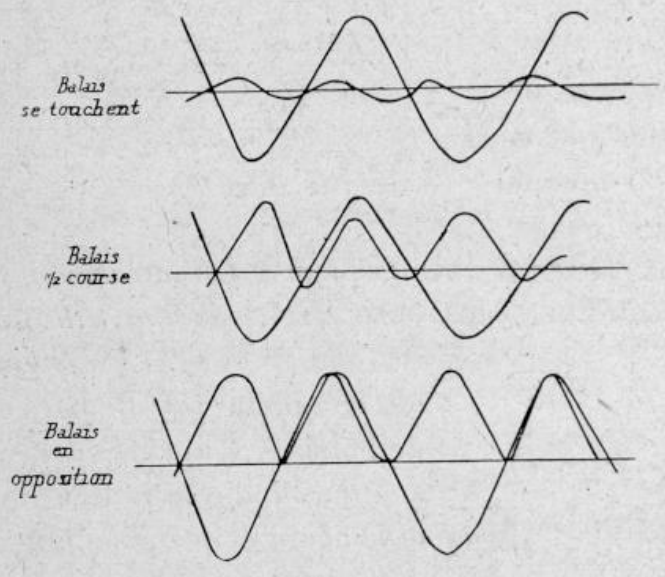


FIG. 103.

En d'autres termes, la tension aux frotteurs CD sera toujours de même sens et l'appareil fournira du courant redressé. Ce courant redressé traversera d'ailleurs tout ou partie des enroulements suivant la position du collecteur, mais la somme algébrique des ampère-tours variables développés dans les enroulements de part et d'autre de chaque balai est toujours, à chaque instant, celle qui, dans la marche à vide, est nécessaire pour créer une *f.é.m.* de self-induction égale et contraire à celle de la source.

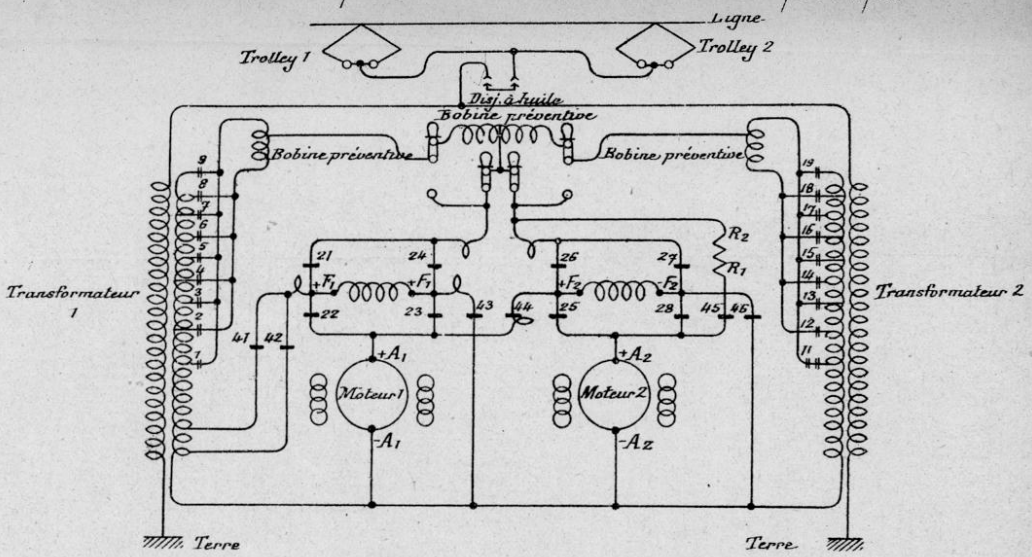
Tant que les balais C et D sont opposés à 180°, la tension moyenne aux bornes ne changera pas ; mais si on rapproche progressivement un balai de l'autre, celui-ci étant supposé fixe, l'appareil jouera le rôle d'un transformateur à coefficient de transformation variable et la tension moyenne aux bornes diminuera à mesure que le balai mobile se rapprochera de l'autre. Il résulte de ceci un moyen de réglage de la tension et par suite de la vitesse et de l'effort de traction.

En pratique, MM. Auvert et Ferrand emploient un redresseur tétra-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 98. Locomotive Westinghouse de la Cie des Chemins de fer du Midi.

Schéma simplifié des connexions du circuit principal



Crans du Manipulateur	Marche - (AV). Fermeture des Contacts.																													
	Disj.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	41	42	43	44	45	46
Arrêt	○																																
1	○	○									○									○		○		○		○							
2	○	○	○								○	○								○		○		○		○							
3	○	○	○								○	○								○		○		○		○							
4	○		○	○								○	○							○		○		○		○							
5	○		○	○									○	○						○		○		○		○							
6	○			○	○								○	○						○		○		○		○							
7	○			○	○									○	○					○		○		○		○							
8	○				○	○								○	○					○		○		○		○							
9	○				○	○									○	○				○		○		○		○							
10	○					○	○								○	○				○		○		○		○							
11	○					○	○									○	○			○		○		○		○							
12	○						○	○								○	○			○		○		○		○							
13	○						○	○									○	○		○		○		○		○							
14	○							○	○									○		○		○		○		○							
15	○							○	○									○	○	○		○		○		○							
16	○								○	○								○	○	○		○		○		○							
17	○								○	○									○	○		○		○		○							

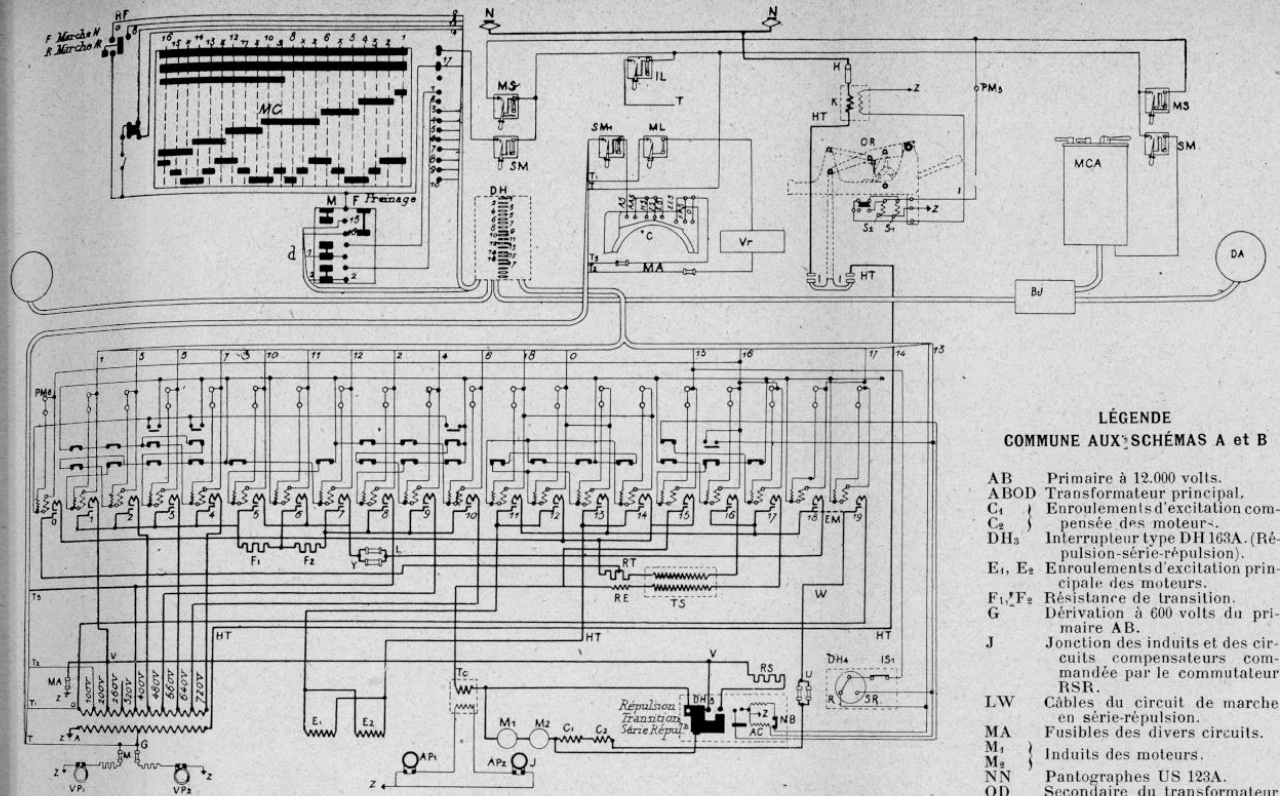
Pour la marche AR, les contacts : 22_24_26_28, remplacent les contacts 21_23_25_27.

Crans du Manipulateur	Récupération - (à petite vitesse). Fermeture des contacts.																													
	Disj.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	41	42	43	44	45	46
Arrêt	○																																
1	○									○									○									○		○	○	○	○
2	○								○	○									○									○		○	○	○	○
3	○								○	○								○	○									○		○	○	○	○
4	○							○	○									○	○									○		○	○	○	○
5	○							○	○								○	○										○		○	○	○	○
6	○						○	○									○	○										○		○	○	○	○
7	○						○	○								○	○											○		○	○	○	○
8	○						○								○	○												○		○	○	○	○
9	○					○	○								○	○												○		○	○	○	○
10	○				○	○									○	○												○		○	○	○	○
11	○				○	○								○	○													○		○	○	○	○
12	○			○	○	○								○														○		○	○	○	○
13	○			○	○								○	○														○		○	○	○	○
14	○		○	○									○	○														○		○	○	○	○
15	○		○	○								○	○															○		○	○	○	○
16	○	○	○									○	○															○		○	○	○	○
17	○	○	○								○	○																○		○	○	○	○

Pour la récuperation à grande vitesse, le contact 42 remplace le contact 41.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 99. — Equipement monophasé Thomson-Houston de la Locomotive des Chemins de fer du Midi.



A. — SCHÉMA DÉTAILLÉ

ABRÉVIATIONS OU RENVOIS RELATIFS A LA FIGURE 99.

AP1 AP2. Ampèremètres des postes de commande P1 et P2.
AC Electro de commande du clapet de commutateur RSR.
BJ Boîte à 20 branchements.
C Compresseur.
DA Coupleur à 20 contacts.
DB Relais pour changer les connexions série-répulsion et série-compensée ou inversement.
DH Boîte de sectionnement général, à 20 connexions.
DH4 Interrupteur Type DA 164A.
EM Enclanchement des contacteurs 18-19.
H Fusible à expulsion Type T, Forme D., 12.000 volts-200 ampères.
HT Circuit intérieur à 12.000 volts.
IL Contacts de rupture du circuit 12.000 volts dans l'interrupteur à huile OR.
IL1 Interrupteur d'éclairage.
IS Interrupteur d'isolement pour substituer l'un à l'autre mode de commande du commutateur RSR.
K Transformateur-série Type D21 pour déclenchement de l'interrupteur à huile OR en cas de surcharge sur l'électro S1. Rapport de transformation 40/12. Capacité 200 ampères.
M Fusibles de voltmètres. (VP1 ou VP2 suivant le poste.)
MC Un des contrôleurs en développement (voir en fin de légende colonnes 4 et 5 *a*), *b*), *c*), *d*).
MCA L'autre contrôleur.
ML Interrupteur du groupe ventilateur Vr2, sur la ligne sous-câble T1, T2 à 100 volts.
MS Désigne chacun des deux interrupteurs commandant l'interrupteur à huile à haute tension.
OR Interrupteur à huile à enclanchement manuel (direct ou pneumatique) et à déclenchement électrique automatique ou déterminé par le conducteur.
PM5 Tube de rhéostat Type 5.
PM6 Tube de rhéostat Type 6.
S1 Electro de déclenchement de l'interrupteur OR à 12.000 volts en cas de surcharge.
S2 Electro de déclenchement de l'interrupteur OR à 12.000 volts, pour la transmission électrique de sa commande manuelle à distance.
SM Chacun des deux interrupteurs du circuit de commande (par la ligne sous câble TT à 600 volts).
SM1 Interrupteur du groupe compresseur C sur la ligne sous câble T4, T5 à 320 volts.
Tc Transformateur du courant pour les ampèremètres des deux postes de commande AP1, AP2.
T5 Transformateur interposé lors du freinage.
TG Lignes alimentées par la dérivation G à 600 volts.
VP1 VP2. Voltmètres des postes de commande P1 et P2, tension 750 volts, échelle 14.000 volts, Type R3, montés sur suspension élastique en plan vertical.
V1 Ventilateur.

Organes accessoires du contrôleur NC.

a) Cylindre de changement de marche enclenché pour ne pas pouvoir être changé de position, à moins que le cylindre principal et le cylindre de freinage ne soient ouverts, et pour que ces autres cylindres ne puissent être manœuvrés quand il est à l'arrêt.

b) Interrupteur à utiliser dans les cas où RSR doit être manœuvré à la main. Il suffit d'appuyer la main jusqu'à ce qu'il s'enclenche pour donner la connexion répulsion. Cet interrupteur s'ouvre automatiquement en arrivant au cran 9 pour donner la position série répulsion, et reste ainsi à moins qu'on n'appuie de nouveau.

c) Interrupteur à ouvrir pour le passage automatique répulsion-série-répulsion et vice-versa, et à fermer pour la manœuvre à la main en cas de nécessité.

d) Enclenchement réglable du cylindre principal et du cylindre du freinage.

Le cran 1 correspond à la position dans laquelle le cylindre principal est enclenché pour ne pouvoir dépasser une position déterminée si le cylindre de freinage est à la position « freinage ».

Le cran 2, à la position dans laquelle le cylindre de freinage est enclenché pour ne pouvoir être actionné que si le cylindre principal est à la position coupure. Enclenchement amovible.

NB. — Ces contacts s'ouvrent quand le solénoïde AC fonctionne.

LÉGENDE COMMUNE AUX SCHÉMAS A et B

AB Primaire à 12.000 volts.
ABOD Transformateur principal.
C1, C2 Enroulements d'excitation compensée des moteurs.
DH3 Interrupteur type DH 163A. (Répulsion-série-répulsion).
E1, E2 Enroulements d'excitation principale des moteurs.
F1, F2 Résistance de transition.
G Dérivation à 600 volts du primaire AB.
J Jonction des induits et des circuits compensateurs commandée par le commutateur RSR.
LW Câbles du circuit de marche en série-répulsion.
MA Fusibles des divers circuits.
M1, M2 Induits des moteurs.
NN Pantographes US 123A.
OD Secondaire du transformateur principal.
R Abréviation de répulsion (R...)
SR Abréviation de série-répulsion (S... R...)
Re Réactance.
RS Réhostat de réglage. (Répulsion-série-répulsion).
TS Transformateur interposé lors du freinage.
U ou Y Fusible de circuits principaux.
V Ligne à 200 volts de l'excitation C1, C2 compensée.
WL Câbles du circuit de marche en série-répulsion.
Z Terre.

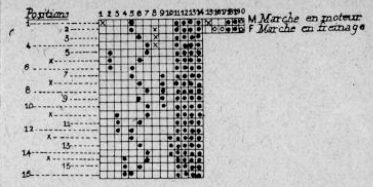


SCHÉMA INDICATEUR DES POSITIONS DU CONTROLEUR ET DES CONTACTEURS

La désignation des contacteurs fermés à tout instant, par rapport aux crans de contrôleurs correspondants, est donnée par les signes :

× Pour la période de fonctionnement en moteur.
○ Pour la période de fonctionnement en freinage.
● Pour l'une et l'autre période.

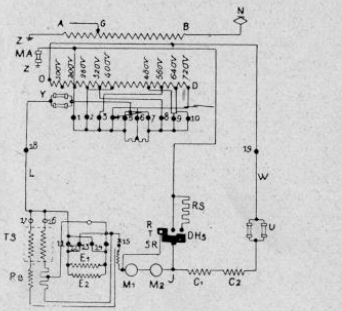
Les crans numérotés 0 à 19 correspondent :
Nos 0 à 13 au cylindre principal ;
Nos 13 à 19 au cylindre de freinage.

Les positions désignées à la gauche du tableau dans la colonne XX correspondent à des crans de contrôleur sur lesquels on ne reste pas, leur seule fonction étant d'insérer lors du passage au cran suivant la résistance F1, F2 (fig. 3) ; ces positions ne sont pas marquées par des arrêts de la grande manette du contrôleur.

Les deux colonnes voisines indiquent par des chiffres :

Celle de gauche les positions sur lesquelles la marche peut être maintenue indéfiniment.

Celle de droite, les positions dans lesquelles le rhéostat est intercalé en série avec les moteurs.



B. — SCHÉMA SIMPLIFIÉ

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

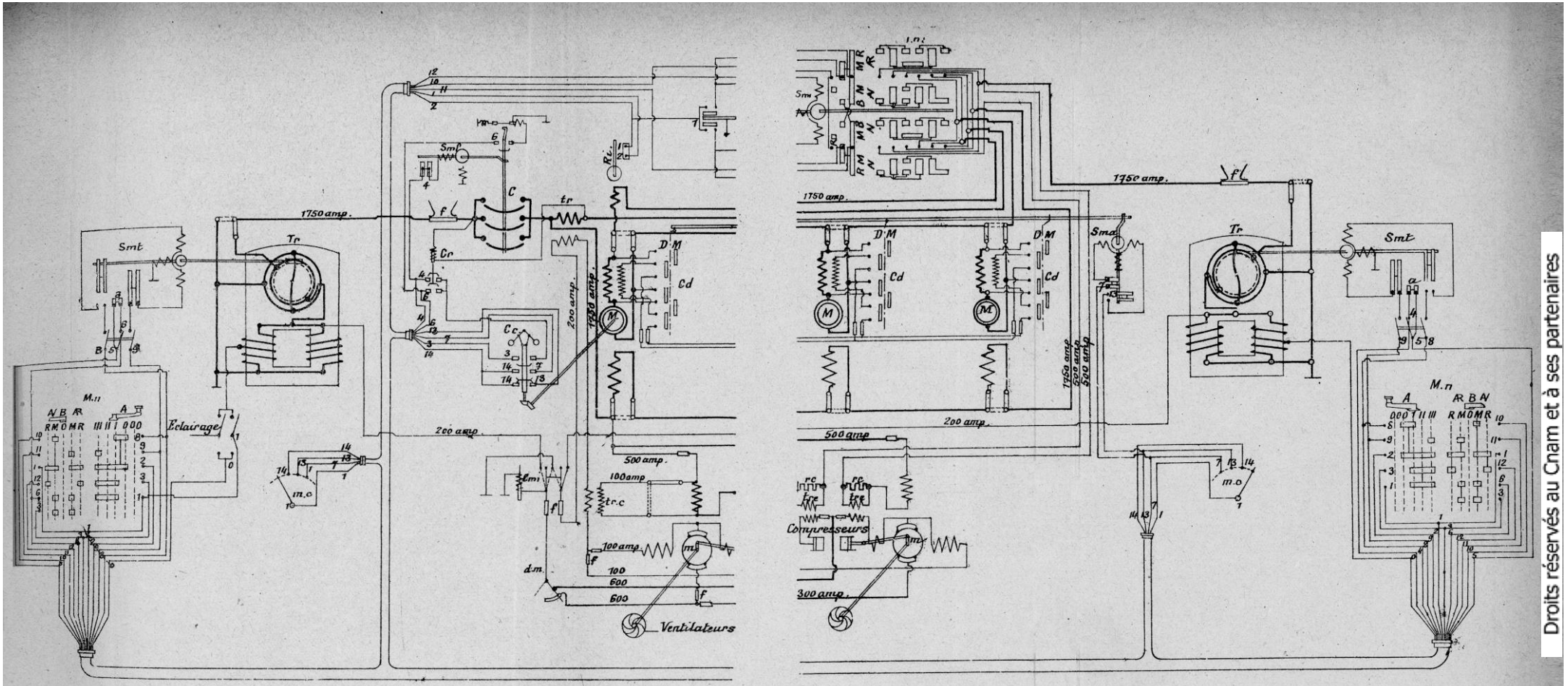


Fig. 100. Locomotive des Ateliers de Jeumont pour la Cie des Chemins de fer du Midi. Schéma des connexions.

Tr, Transformateurs principaux. M, Moteurs principaux. m, Moteurs compresseurs. tr, transformateur statique de récupération. C, Conjoncteur principal. In, Inverseur de marche et de récupération. Cc, Contacteur centrifuge. Cr, Contacteur de récupération. Cd, Controllers de démarrage. Mn, Manipulateurs. Smt, Servomoteur des régulateurs de tension. Smc, Servomoteurs du conjoncteur principal. Smi, Servomoteur de l'inverseur. Smd, Servomoteurs des controllers de démarrage. d.m. Démarreur des moteurs compresseurs. Cmi, Commutateur à minimum pour moteurs compresseurs. tre, transformateur de compensateur de la self du transformateur tr; tre transformateur d'excitation (moteurs des compresseurs) rc, Résistance de compoundage; mc, manivelle de commande des controllers. f. Fusibles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

polaire et utilisant tout le fer de l'induit au moyen de deux collecteurs décalés de 90° et mettent l'appareil en marche par un moteur synchrone monophasé.

Pour une tension alternative de 165 volts, la tension moyenne du courant redressé est de 280 volts au maximum

Les schémas ci-dessus (fig. 103) donnent les tensions obtenues par le décalage des balais, dans le cas où ceux-ci se touchent, sont à 90° ou sont en opposition.

On obtient les rendements suivants :

Pleine charge.....	88 à 89 p. 0/0.
1/2 charge.....	86 à 87 p. 0/0.
1/4 charge.....	79 à 80 p. 0/0.

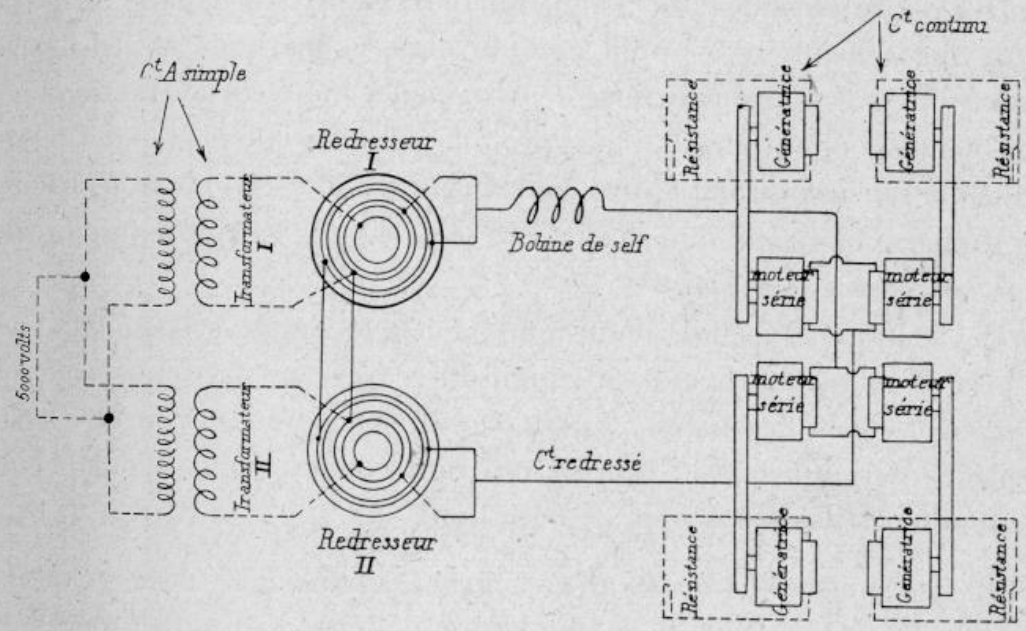


FIG. 104.

Schéma du montage du redresseur régulateur Auvert et Ferrand pour les essais.

Nous donnons, à titre d'indication, le schéma de montage (fig. 104) du redresseur régulateur, pour essais en plate-forme, sans entrer toutefois dans le détail de ceux-ci.

Il est à noter que l'emploi du courant ondulé demande des moteurs à inducteurs feuilletés comme pour le courant alternatif.

Cet appareil pèse environ 8 tonnes pour une puissance de 400 Kws, soit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

environ 20 tonnes pour 1.000 Kws, ce qui est important. Toutefois, ultérieurement, on est arrivé à réduire ce poids à 12 ou 14 tonnes.

La Société Alioth a construit sur ce principe une locomotive expérimentale, qui a été essayée sur la ligne Cannes-Grasse, fin 1910. L'énergie fournie était sous forme de courant monophasé 12.000 volts, 25 périodes. Le transformateur abaisseur de tension, monté sur la locomotive, alimentait deux redresseurs.

Un des résultats remarquables obtenus avec cette méthode, est que la puissance demandée au réseau, au moment du démarrage, est très réduite ; c'est ainsi que la mise en marche d'un train ayant absorbé 150 Kws, la puissance nécessaire pour le maintenir ensuite à la vitesse normale, a été de 1.000 Kws.

Ce fait tient à ce que dans ce système, on règle la marche de la locomotive par le décalage des balais du redresseur. Au départ, on démarre sous une tension très faible comme dans la méthode Ward-Léonard, juste celle nécessaire pour maintenir dans les moteurs de traction le courant correspondant au couple à produire, tandis qu'en pleine vitesse on utilise la tension totale, après avoir décalé progressivement les balais.

Remarquons enfin que ce système se prête à la récupération de l'énergie, car il est réversible.

Les critiques sont les mêmes que pour la locomotive Heilmann : poids et prix de la locomotive et entretien du redresseur particulièrement important à cause des balais. Aussi ce système paraît devoir être avantageusement remplacé par l'un des suivants conçus dans le même but. Il n'a d'ailleurs pas été mis en exploitation.

3) *Locomotive à redresseur de courant à vapeur de mercure, système Westinghouse.* — Dans le même ordre d'idées, la Compagnie Westinghouse a résolu le problème en employant sur la locomotive, un redresseur de courant à vapeur de mercure Cooper-Hewitt. Dans cette méthode, il n'est pas non plus fait emploi de résistances pour le démarrage et comme dans le cas précédent, les moteurs d'essieu doivent être à circuit magnétique feuilleté.

Le courant de la ligne, monophasé à 11.000 volts, est abaissé à 1.200 volts, courant continu par un transformateur statique et un redresseur Cooper-Hewitt. A cet effet (schéma fig. 105), le centre du secondaire du transformateur est connecté au pôle négatif du redresseur à travers les quatre moteurs série, groupés en série-parallèle, d'une puissance de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

250 chevaux chacun et deux prises variables, mais équidistantes du centre, permettant de modifier à volonté la tension entre 0 et 1.200 volts, sont connectés aux deux bornes positives du redresseur. Enfin, le point milieu du circuit des moteurs, deux d'un côté et deux de l'autre, en dérivation, est mis à la terre, pour limiter à 600 volts maximum. la tension effective entre les bornes de chaque moteur et les masses métalliques de la locomotive. Le courant d'excitation du redresseur est fourni par un petit groupe moteur-générateur.

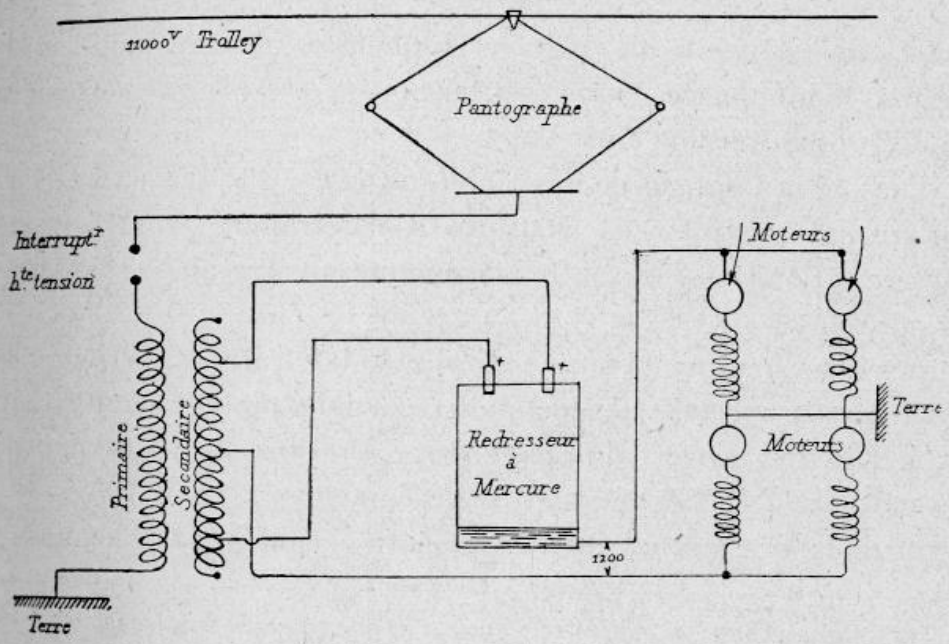


FIG. 105.

Equipement de locomotive avec redresseur à mercure Cooper-Hewitt. Schéma simplifié du circuit principal.

Le redresseur lui-même se compose d'un cylindre en acier de 500 mm. de hauteur. Les électrodes traversent la paroi supérieure à travers des bornes isolées. L'encombrement de l'ensemble est très réduit.

La chute de tension dans le redresseur est à peu près de 25 volts et à 750 ampères (qui est le courant de pleine charge de la locomotive), la puissance perdue est seulement d'environ 18 3/4 chevaux. Le rendement global est très élevé.

Une locomotive d'essai, pesant environ 70 tonnes, équipée de cette manière, a été mise en service en 1914, sur la ligne de New-Canaan du New-York-New-Haven et Hartford.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette méthode constitue une application nouvelle et originale et marque une étape remarquable dans la solution de la traction sur grandes lignes en utilisant le courant monophasé à la ligne d'alimentation (1).

72. **Système mono-triphasé Westinghouse et Pennsylvania.** — Nous verrons au chapitre suivant après l'étude des moteurs triphasés, deux applications de ce système.

Applications du système monophasé.

Nous avons déjà cité au chapitre II quelques-unes des applications de la traction monophasée. Nous ajouterons encore quelques exemples de lignes de grosse traction en Europe.

Lignes de la Compagnie des Chemins de fer du Midi en cours d'électrification (lignes exploitées : Perpignan-Villefranche, Tarbes-Bagnères-de-Bigorre, Lourdes-Pierrefitte, Lannemezan-Arreau), à 12.000 volts 16 2/3 périodes.

Lignes des Chemins de fer suédois à 15.000 volts 15 périodes, de Kiruna-Riksgraüssen, avec des locomotives à deux moteurs de 200 chevaux. Oerlikon et Brown-Boveri, du Lœtschberg, 15.000 volts, 16 2/3 périodes (2) à deux moteurs de 1.250 chevaux, série-compensé.

Ligne de la Wiesenthal 10.000 volts, 15 périodes, des Chemins de fer

---

(1) Nous signalerons ici un autre genre d'application des redresseurs à la traction, au point de vue *sous-station*. Ces appareils commencent en effet à être avantageusement employés aux lieu et place de groupes convertisseurs. Nous signalerons dans cet ordre d'idées l'application récente réalisée par la Société Brown-Boveri, fin 1915, à la sous-station de Juvieh-Dietikon, du tramway de la vallée de la Limma, près de Zurich, où deux groupes moteurs-générateurs de 80 Kws (600 volts), réunis en parallèle ont été remplacés par deux redresseurs à vapeur de mercure de 150 Kws, un seul étant d'ailleurs suffisant pour assurer le service. L'énergie primaire triphasée 6.000 volts 50 périodes, est transformée en courant hexaphasé 530 volts par phase, au moyen d'un transformateur alimentant les redresseurs, dont la tension entre deux anodes est 1.060 volts. Le rendement global de l'installation est donnée égal à 93,2 °/₀ entre la demi-charge et la pleine charge.

Nous citerons encore l'application faite en 1917 aux tramways de Deuben, près Dresde, où sont en service deux redresseurs de 200 Kws (520 volts) et celle du chemin de fer Lausanne-Moudon (courant continu 800 volts).

Il semble qu'il y ait là un champ d'application nouveau très fécond de ces appareils.

(2) La fréquence du courant sur la ligne du Lœtschberg était primitivement de 15 périodes ainsi que sur les lignes des C. F. F. Elle a été élevée récemment à 16 2/3 pour faciliter la transformation de l'énergie en courants triphasés 50 périodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

badois avec des locomotives à deux moteurs série compensé Siemens-Schuckert de 475 chevaux.

Pour la ligne en construction du Saint-Gothard 15.000 volts 16 2/3 périodes, différents types de locomotives sont en construction avec des moteurs série-compensé Oerlikon ou Brown-Boveri : locomotives pour trains express, type léger avec deux moteurs de 825 chevaux, et type lourd à quatre moteurs de 825 chevaux et type lourd à quatre moteurs de 560 chevaux, locomotives pour trains de marchandises à quatre moteurs de 500 chevaux.

Et pour mémoire, aux Etats-Unis, les lignes à 11.000 volts 25 périodes du New-York-New-Haven et du Pennsylvania.

73. **Remarques générales sur le système monophasé.** — 1° *Lignes à alimentation mixte : courant continu et courant monophasé.* — Aux Etats-Unis, la grande majorité des lignes monophasées comprennent deux sections, l'une à courant continu 500/600 volts pour les traversées des villes, l'autre à courant monophasé haute tension 3.300, 6.600, 11.000 volts pour les parcours en rase campagne. Les moteurs doivent fonctionner indifféremment sur l'une et l'autre section. C'est une condition essentielle.

Les moteurs monophasés à collecteur se prêtent bien au fonctionnement sous courant continu et sous courant monophasé. Il faut toutefois remarquer que cela conduit à un double équipement (il n'y a que quelques organes accessoires qui soient communs) pour les appareils de contrôle : le contrôle étant rhéostatique série-parallèle pour le courant continu et par transformateur pour le monophasé. Il est évident que dans ces conditions, le poids — et le prix — des automotrices est sensiblement accru. En outre, l'expérience semble avoir prouvé que les frais d'entretien de semblables équipements étaient trop élevés.

Pour ce mode d'alimentation mixte, les sections de ligne courant monophasé et courant continu, sont séparées l'une de l'autre, par une section neutre où, par la manœuvre de commutateurs appropriés, automatiques ou non, on met en circuit l'un ou l'autre des circuits de contrôle, soit celui à résistances, si on va entrer dans la section à courant continu, soit celui à transformateur si on va entrer dans celle à courant monophasé.

Nous avons déjà cité comme application en France de cette double alimentation, la ligne Lyon-Miribel-Jons, avec 6.600 volts courant mo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nophasé, 15 périodes et 600 volts courant continu, avec des moteurs Westinghouse-Lamme du type série avec connexions résistantes et enroulements compensateurs. Le schéma de ces équipements est donné en planche hors texte (fig. 106).

Nous citerons de plus comme application remarquable de ce système à la grosse traction, les locomotives de 110 tonnes Baldwin-Westinghouse (1912), du type dit « articulé » des lignes du New-York-New-Haven et Hartford à quatre essieux moteurs et huit moteurs série-compensé Lamme de 170 chevaux. Ces locomotives circulent sur la ligne principale monophasée 11.000 volts 25 périodes, et sur la section courant continu 650 volts. Nous reviendrons sur ces locomotives à propos du mode de montage de leurs moteurs.

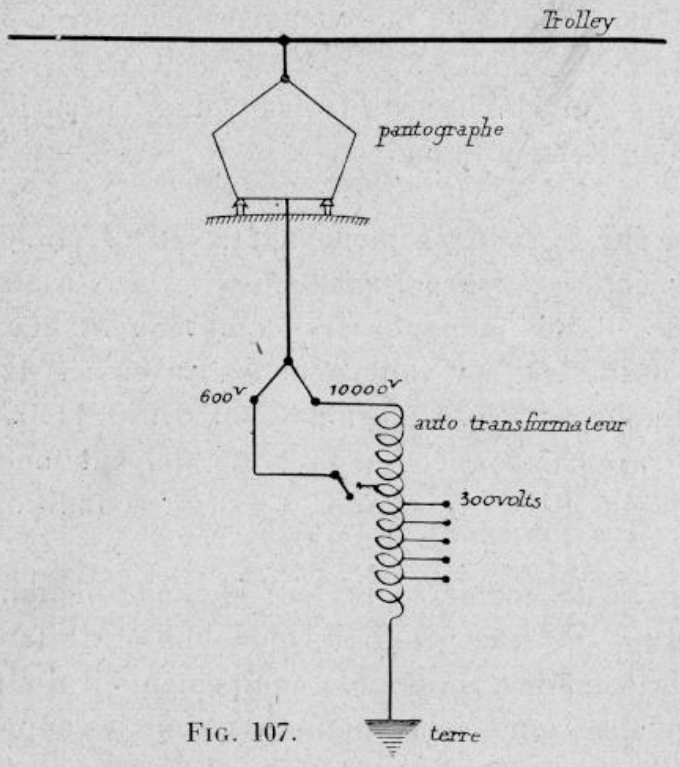


FIG. 107.

Schéma simplifié des équipements monophasés 10.000/600 volts de la Haute-Vienne.

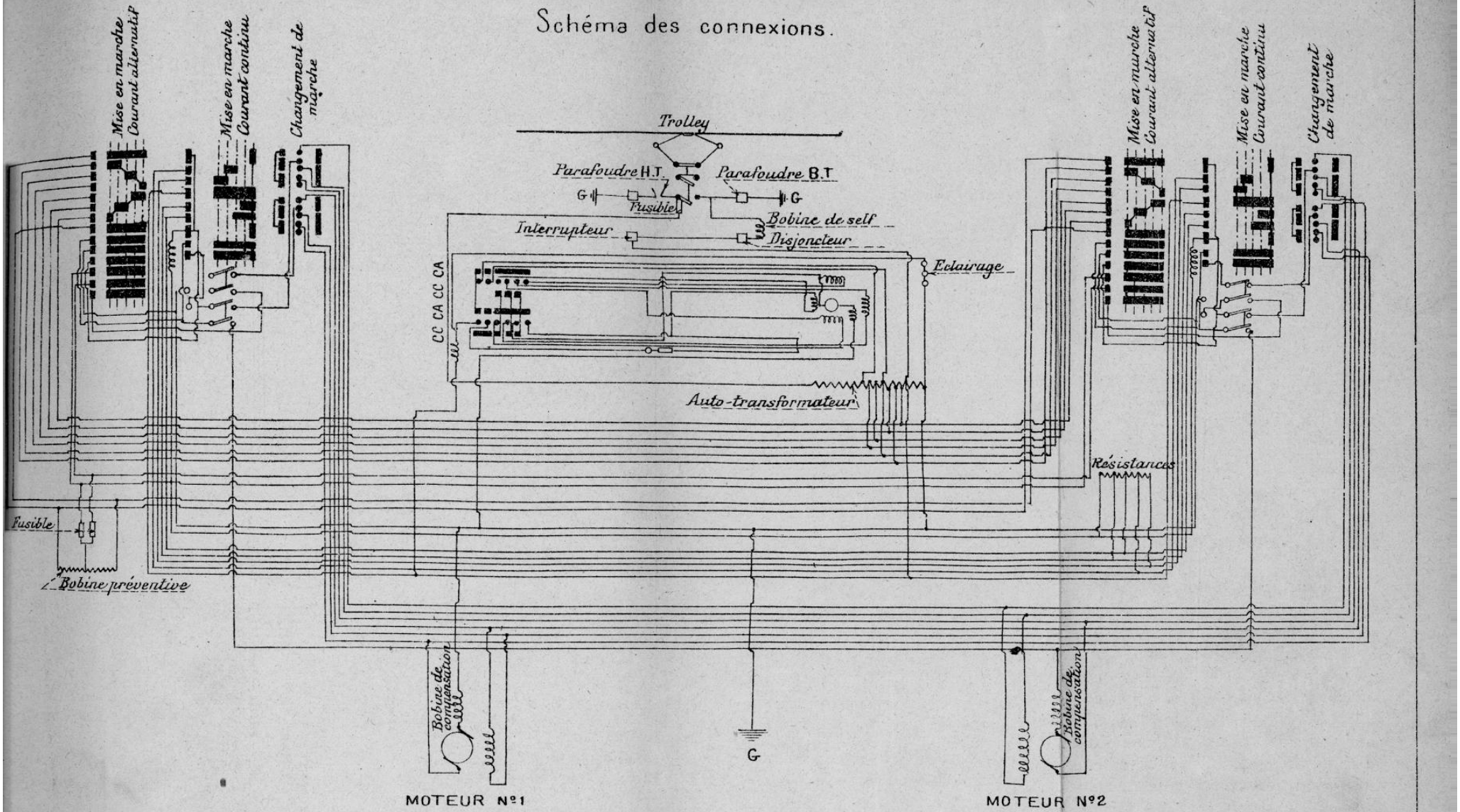
2° *Lignes monophasées à haute et basse tension.* — Au lieu d'avoir une section basse tension courant continu pour les traversées d'agglomérations habitées, on peut avoir une section monophasée basse tension. On n'est plus alors obligé d'avoir un double équipement. C'est ce qui a été réalisé aux Chemins de fer départementaux de la Haute-Vienne, où les lignes sont à 10.000 volts 25 périodes, sauf à la traversée de Limoges qui est à 600 volts également monophasé. Au point de vue équipement des voitures, cette double alimentation nécessite simplement l'addition sur l'auto-transformateur d'une seconde prise, prise 600 volts, et en outre un commutateur à deux directions, suivant le schéma de la figure 107. Le schéma complet des équipements de ces voitures est donné en planche hors texte figure 108. Les moteurs sont du type série-compensé Siemens, construits par la Compagnie de Creil.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 106 TRACTION MIXTE (CONTINU ET MONOPHASÉ)

VOITURE MOTRICE DE LA LIGNE DE TRAMWAYS LYON – MIRIBEL

Schéma des connexions.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

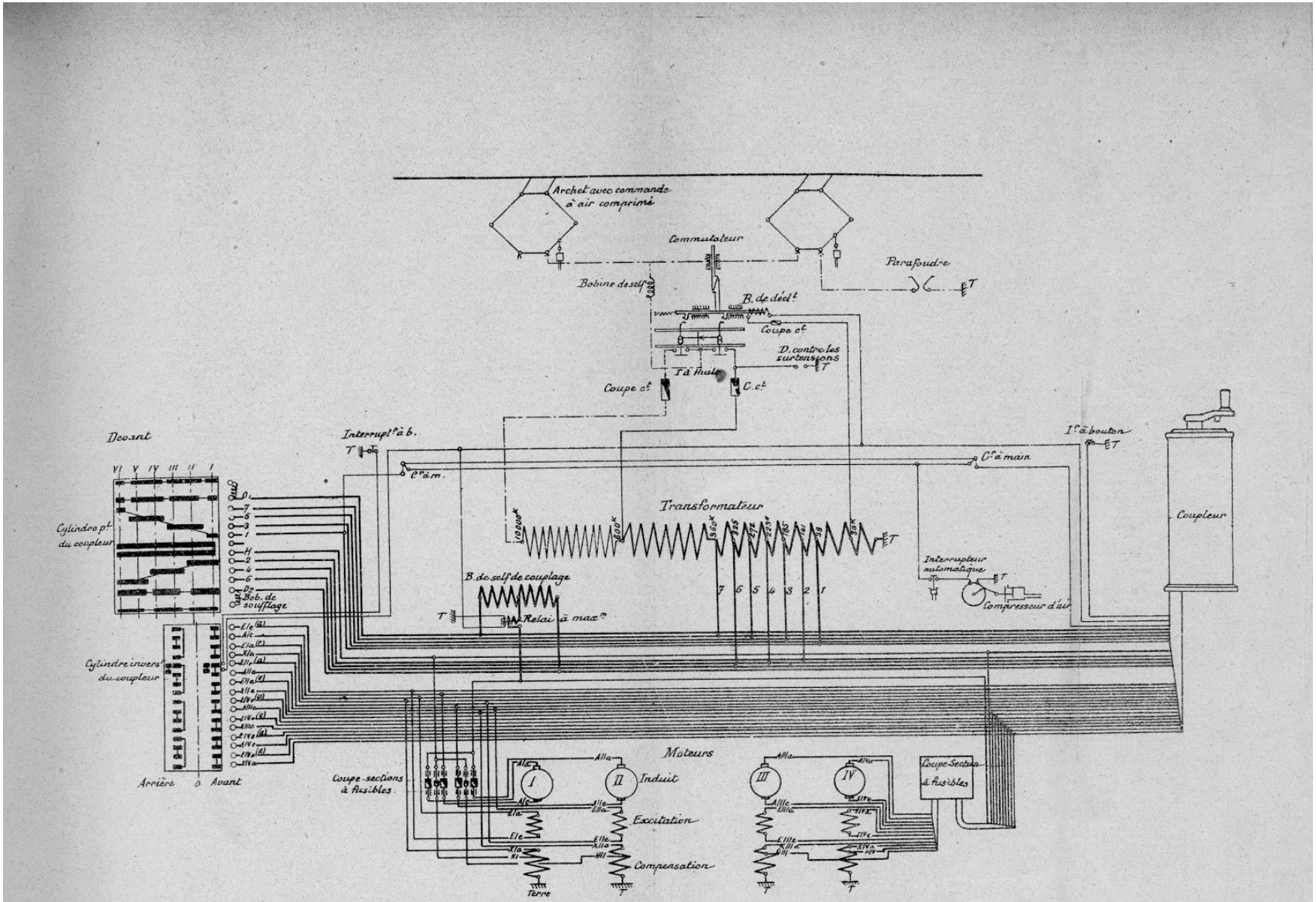


Fig. 108 Chemins de fer departementaux de la Haute-Vienne.

Courant alternatif monophasé 10000 volts et 600 volts

SCHEMA DES CONNEXIONS D'UNE AUTOMOTRICE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° *Fréquence du courant d'alimentation.* — La majorité des lignes installées, comportent l'emploi de courant monophasé à 25 périodes; toutefois, la tendance est d'adopter des fréquences plus basses, soit 16 2/3 ou 15 périodes, en vue d'améliorer le fonctionnement des moteurs. C'est ainsi que la fréquence adoptée pour l'électrification des Chemins de fer suisses (Lœtschberg, Saint-Gothard), est 16 2/3 (1) périodes ; 15 pour la ligne électrifiée des Chemins de fer suédois, celle adoptée par la Compagnie des Chemins de fer du Midi est 16 2/3 périodes.

Les avantages que l'on peut invoquer en faveur de la fréquence 15 ou 16 2/3 peuvent être résumés ainsi :

1° Augmentation d'environ 30 à 35 0/0 de la puissance d'un moteur d'encombrement donné, par suite pour une puissance donnée, un moteur construit pour 15 ou 16 2/3 périodes est meilleur marché ;
2° Rendement et facteur de puissance plus élevés ;
3° Poids mort de l'appareillage électrique sur l'automotrice moins considérable pour une même puissance ;
4° Pertes en ligne plus faibles.

Tandis qu'en faveur de la fréquence 25, on ne peut guère qu'invoquer les raisons suivantes :

1° Cette fréquence est d'un emploi plus général comme convenant mieux à un réseau de distribution d'énergie;
2° Les transformateurs sont moins chers et moins lourds;
3° Caractère légèrement moins pulsatoire du couple et diminution correspondante des vibrations.

4° *Forme du couple développé par les moteurs monophasés.* — Une critique du moteur monophasé est que son couple n'est pas constant mais pulsatoire. Il est en effet de forme C. $\mathrm{Cos}^2\,\omega t$. Or :

$$\mathrm{C.\ Cos}^2\,\omega t = \frac{\mathrm{C}}{2}(1+\cos 2\,\omega t)$$

Il peut donc être considéré comme se composant d'un couple constant $\frac{\mathrm{C}}{2}$ plus un couple alternatif $\frac{\mathrm{C}}{2}\cdot\cos 2\,\omega t$ d'une fréquence double de celle du réseau. Autrement dit sa valeur absolue passe $2f$ fois par seconde par son maximum, f étant la fréquence des courants d'alimentation. Le couple maximum est ainsi théoriquement double du couple moyen. Pra-

(1) Primitivement : 15 périodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiquement, toutefois, à cause de l'inertie des masses et de l'élasticité des organes de transmission (on voit l'avantage particulier que présentent ici les transmissions élastiques), cet inconvénient est notablement réduit. En fait, le couple maximum n'est guère que 80 0/0 supérieur au couple moyen. Cette différence est néanmoins très appréciable.

Les moteurs à courant continu ou à courants triphasés ont, au contraire, un couple constant.

La forme pulsatoire du couple provoque d'autre part des vibrations qui se propagent dans toutes les parties mécaniques du véhicule, ce qui est un autre inconvénient sérieux et n'est pas étranger aux ruptures fréquentes de pièces diverses : engrenages, bielles, manivelles, etc., que l'on constate dans les locomotives à moteurs monophasés, surtout quand les organes de transmission du couple moteur à l'essieu sont complètement rigides (locomotives d'essais Seebach-Wettingen et Lœtschberg).

5° *Poids et coût d'entretien du matériel monophasé*. — Une critique plus grave à faire à la traction monophasée, critique que l'expérience semble justifier jusqu'alors, porte sur les poids et sur les dépenses d'entretien du matériel roulant, qui apparaissent comme étant plus élevés que pour les autres systèmes.

Remarquons en particulier qu'une des circonstances qui influent sur le poids des moteurs est la forme pulsatoire du couple. Il est évident en effet, que les moteurs courants continu ou triphasés qui sont à couple constant, seront plus légers que les moteurs à courant monophasé et plus économiques pour une même puissance. En outre, pour le même effort de traction, le poids adhérent doit être plus considérable pour une locomotive monophasée que pour une locomotive courants continu ou triphasés ; sinon, en forçant la puissance développée par la première, on finirait par obtenir un patinage qui serait périodique. Pratiquement toutefois, ainsi que nous l'avons vu, cet inconvénient est notablement réduit du fait de l'inertie des masses et de l'élasticité des organes de transmission.

Le moteur monophasé est en outre plus lourd que le moteur à courant continu, du fait que sa carcasse constitue en réalité un poids mort, n'étant pas utilisée au point de vue magnétique, tandis que pour le moteur à courant continu, elle l'est.

On peut, en résumé, considérer que pour une même puissance, le moteur monophasé est de 15 à 20 0/0 plus lourd que le moteur à courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Notons enfin que le rendement d'un moteur monophasé est légèrement inférieur à celui d'un moteur courant continu de même puissance.

Le moteur monophasé est en outre employé concurremment avec un transformateur, d'où pertes et un poids supplémentaire. Par contre, les résistances de démarrage du moteur à courant continu sont évitées, ce qui constitue un avantage marqué.

En ce qui concerne la question de poids de trains complets dans les deux systèmes courant continu et courant monophasé, la comparaison faite pour services de banlieue sur les lignes comparables du New-York Central (courant continu) et du New-York-New-Haven (courant monophasé), qui comprennent toutes deux l'emploi de rames à automotrices, a conduit aux résultats suivants : (1)

	N-Y-C 2 moteurs	N-Y-N-H 4 moteurs
Puissance d'une automotrice (chevaux).....	480	600
Poids des automotrices (tonnes).....	48	79
Puissance totale des automotrices d'un train (chevaux).....	2400	600
Poids total du train (tonnes).....	351	170
Puissance par tonne de train (chevaux).....	6,8	3,5
Poids de train par cheval (Kgs).....	14,6	28,4
Nombre de places offertes.....	518	228
Poids par place offerte (Kgs).....	670	750

Ainsi, en résumé, on peut disposer d'une puissance de 6,8 chevaux par tonne de train en courant continu et seulement de 3,5 chevaux pour le monophasé. Parallèlement les poids morts par place offerte sont respectivement de 670 Kgs. et 750 Kgs.

Des résultats analogues sont obtenus si on compare les *locomotives* en service sur les mêmes lignes de banlieue.

	N-Y-C	N-Y-N-H
Poids de la locomotive (derniers types) (tonnes)	108	102
Poids adhérent (tonnes)	65	75
Puissance (chevaux).....	2400 (ventilation naturelle)	1000 (ventilation forcée)

(1) Les renseignements statistiques qui suivent sont extraits d'une communication de M. Parodi à la Société Internationale des Electriciens (17 avril 1913).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puissance par tonne de locomotive ou *puissance spécifique* (chevaux)	22,2	9,8
Poids de la locomotive par cheval, ou *poids spécifique* (Kgs.)	45	102
Poids total du train (tonnes)	472	375
Puissance par tonne de train (chevaux)	5,1	2,68
Nombre de places offertes	608	456
Poids par place offerte (Kgs.)	776	820

De là il résulte que même en supposant que les dépenses de traction soient exactement les mêmes dans les deux systèmes, courant monophasé et courant continu, l'exploitation par courant monophasé coûtera plus cher que par courant continu du fait seul de l'augmentation de poids du premier système par rapport au second.

En ce qui concerne *les frais d'entretien*, une comparaison faite dans des mêmes conditions de trafic et de service sur plusieurs réseaux de tramways, tant courant continu que courant monophasé, a conduit aux résultats suivants : les dépenses d'entretien et de réparation des automotrices et lignes de prise de courant ainsi que la dépense de conduite des sous-stations, le tout rapporté à la voiture-kilomètre, ont donné comme moyennes : en courant continu 7,95 centimes contre 17,6 centimes en courant monophasé, soit un excès pour ce dernier de 9,65 centimes par voiture-kilomètre, c'est-à-dire, une augmentation de plus de 120 0/0 par rapport au premier.

De même en ce qui concerne les locomotives déjà comparées des lignes de banlieue du New-York Central, et du New-York-New-Haven on arrive aux résultats suivants :

Dépenses d'entretien et de réparation par locomotive-kilomètre :

Pour les premières qui sont de 2.200 chevaux 0,106 fr. (en 1912), et pour les secondes qui sont de 1.000 chevaux 0,22 fr. (en 1911). (Les résultats pour les mêmes années n'ont pas été publiés.)

A noter enfin que sur une section commune aux lignes du New-York Central et du New-York-New-Haven (Sud de Woodlawn Junction), la consommation par tonne-kilomètre des trains monophasés N-Y-N-H, a été trouvée de 15 à 25 0/0 supérieure à la consommation correspondante de trains courant continu du N-Y-C.

Les différences précédentes en ce qui concerne les puissances et les poids spécifiques ne se vérifient toutefois pas pour les locomotives récentes de grandes lignes, l'inverse aurait même lieu si on compare le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seul réseau actuel de grande ligne courant continu, celui de Milwaukee (locomotives de 260 tonnes, puissance 3.440 chxevau. puissance spécifique 13,2 chevaux par tonne, poids spécifique 75,5 Kg. par cheval).

A ce point de vue, les locomotives triphasées sont très supérieures aux autres : leur poids spécifique est en effet très réduit. C'est ainsi que les locomotives triphasées du type Giovi, des chemins de fer italiens, pèsent 60 tonnes seulement pour une puissance de 2.000 chevaux, ce qui fait ressortir un poids spécifique de 30 Kg. par cheval et une puissance spécifique de 33,33 chevaux par tonne.

Les dépenses d'entretien semblent toutefois toujours être plus considérables pour le système monophasé que pour les autres. Mais comme contre-partie, il y a à considérer en même temps les *dépenses totales* de premier établissement qui apparaissent comme étant moindres en courant monophasé.

6° Une autre objection que l'on peut formuler contre le système monophasé et qui se traduit par des dépenses supplémentaires importantes est la suivante, que nous allons examiner avec quelques détails.

74. **Influence perturbatrice des lignes de traction monophasées sur les circuits téléphoniques et télégraphiques voisins.** — Une autre grave critique du système, résulte de l'influence perturbatrice exercée par les lignes monophasées de traction sur les circuits téléphoniques et télégraphiques voisins et le problème est loin d'être résolu d'une manière générale et complète.

Cette influence perturbatrice est due à des effets d'induction soit électromagnétique, soit électrostatique.

Ces derniers ne sont pas, dans l'ensemble, aussi nuisibles que les premiers et on peut les réduire notablement en disposant entre le fil trolley et les fils télégraphiques ou téléphoniques, un fil mis au sol.

Les premiers sont beaucoup plus graves.

Le courant alternatif de la ligne produit en effet un champ magnétique variable qui, rencontrant les lignes téléphoniques et télégraphiques voisines, y détermine une $f.é.m.$ d'induction qui peut arriver à rendre toute transmission impossible.

Il est à remarquer que les effets inductifs produits seraient éliminés s'il était possible de disposer les conducteurs d'aller et retour de la ligne monophasée, de manière que les courants qui les parcourent, agissent avec la même intensité sur les lignes téléphoniques et télégraphiques et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c'est précisément parce que ces conducteurs, dans les lignes de chemins de fer, occupent des positions très différentes et agissent par suite très différemment, que les effets inductifs sont beaucoup plus nuisibles que dans le cas des lignes ordinaires de transport d'énergie.

Sur les lignes à *double fil*, qui est le cas général pour les téléphones, il a été relativement facile d'éliminer suffisamment les troubles qui se manifestaient soit sous la forme de friture, soit sous la forme de secousses désagréables au personnel. Il a suffi de prendre les précautions de bien soigner l'isolement des lignes, de croiser régulièrement et fréquemment les circuits et d'employer par exemple des bobines de décharge, permettant l'écoulement à la terre des décharges statiques.

Pour les lignes à *simple fil*, qui est le cas des circuits télégraphiques, le problème est beaucoup plus complexe. Cette différence entre les façons dont se comportent ces deux sortes de lignes — à double fil et à fil simple — s'explique facilement en considérant les causes principales des troubles : l'induction électromagnétique et la différence de potentiel créée par le retour des courants de traction entre les divers points du sol.

Pour les lignes à simple fil, on résoudrait bien le problème en les éloignant suffisamment des lignes de traction ou en les doublant, mais ces solutions sont inapplicables dans la plupart des cas, et de toute manière très onéreuses. Il a fallu chercher autre chose.

La question a été très étudiée en particulier sur les lignes du New-York-New-Haven et Hartfort RR aux Etats-Unis et du Chemin de fer du Midi en France, où les effets en question ont donné lieu à de très sérieuses difficultés. Différents moyens ont été successivement essayés pour y remédier. Nous allons sommairement les indiquer :

1° *Dispositif employé sur la ligne principale du New-York-New-Haven et Hartford.* — Cette ligne qui est celle de Woodlawn-Stamford-New-Haven, était à 11.000 volts et aux difficultés qui nous occupent particulièrement ici, s'en ajoutait une autre résultant du fait que le trafic s'accroissant considérablement, la tension de 11.000 volts devint insuffisante. Or, pour remédier à cette difficulté, on ne pouvait évidemment songer, pour des raisons d'ordre économique, à élever notablement la tension au trolley lui-même ; car cette mesure aurait exigé comme corollaire, le renforcement de l'isolement sur près de 600 kilomètres de ligne, sur tout le matériel roulant, et sur une foule d'appareils accessoires. Après

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de nombreuses recherches, une disposition a été trouvée qui a résolu heureusement d'un seul coup, les deux difficultés signalées.

Les figures 109 et 110 (1) représentent schématiquement les connexions

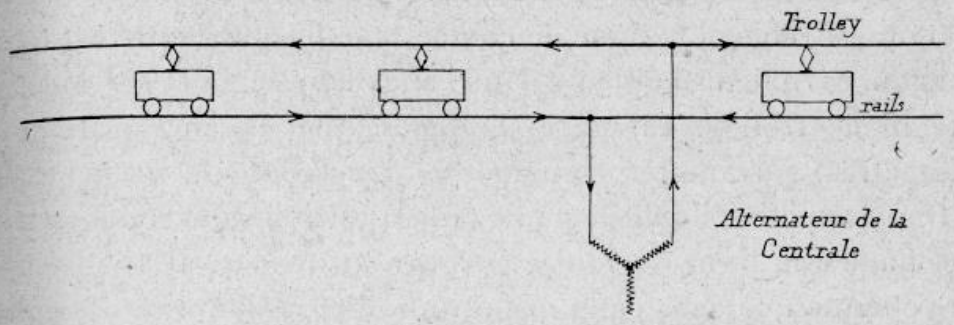


FIG. 109.

Schéma de la distribution dans le système primitif à 11.000 volts.

dans l'ancien et le nouveau système. Dans l'ancien (fig. 109), on voit que de chaque côté du point d'alimentation, le courant a une direction uniforme exerçant par suite une action électromagnétique pour ainsi dire

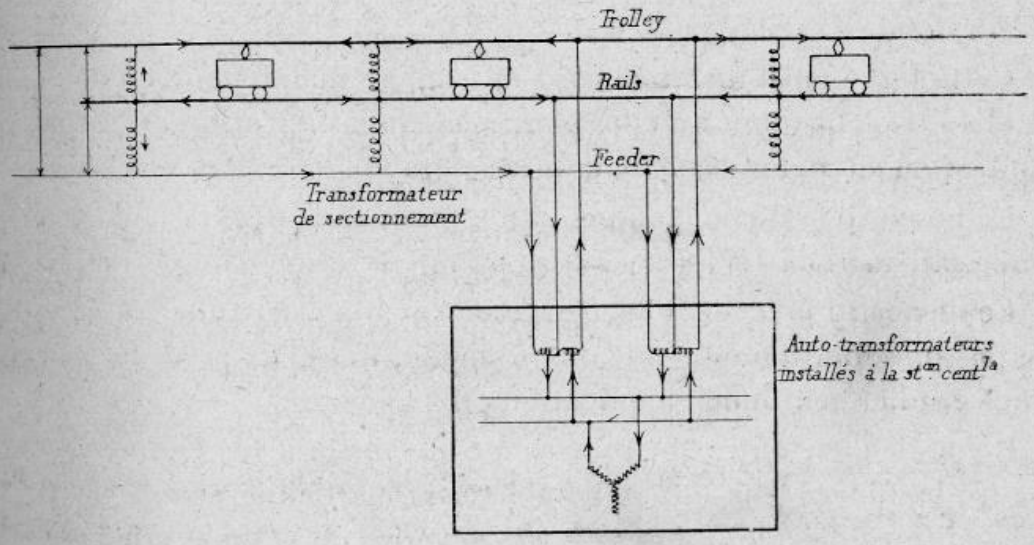


FIG. 110.

Schéma de la distribution dans le nouveau système à 11.000/22.000 volts.

« cumulative » sur les circuits téléphoniques ou télégraphiques adjacents.

Dans la disposition nouvelle (fig. 110), les alternateurs ne sont plus reliés directement à la ligne de contact ; des auto-transformateurs « com-

(1) Empruntées à la *Revue électrique* du 3 juillet 1914.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pensatenrs » sont interposés, dont le point milieu est mis à la terre par l'intermédiaire des rails. La tension aux bornes des alternateurs est comme précédemment de 11.000 volts, mais les auto-transformateurs élèvent cette tension à 22.000 volts. Une des bornes de chaque auto-transformateur est reliée à la ligne de contact, tandis que l'autre est reliée aux feeders qui existaient d'ailleurs dans l'ancien système et servaient à doubler le fil de trolley. En outre, de distance en distance (variant de 3 à 15 kilomètres, suivant les commodités d'installation), on a installé des auto-transformateurs dont le point milieu est relié aux rails et les deux bornes l'une à la ligne de contact, l'autre au feeder. Il est facile de se rendre compte que dans cette disposition, d'après la forme des circuits et en tenant compte de l'importance des courants qui y circulent, et ceci quelle que soit la position d'un train dans une section, l'influence due à l'induction électro-magnétique est neutralisée. Quant à l'influence de l'induction électrostatique, le fil de contact et le feeder étant installés à peu près symétriquement par rapport aux circuits influencés, elle est très appréciablement réduite.

Les auto-transformateurs employés sont d'une puissance de 2.000 kws et leur nombre est 17.

Cette ligne ainsi modifiée n'est en somme maintenant qu'une distribution à trois fils dont l'un des ponts seulement est utilisé. C'est la seule application en monophasé réalisée de cette manière.

Le nouveau système d'alimentation fonctionne depuis janvier 1914 et donne satisfaction. La ligne sous sa première forme date de 1907.

Le dispositif précédent est certainement très particulier et ne constitue pas une solution générale du problème. Les deux procédés que nous allons étudier sont d'une application plus générale.

Il y a lieu en outre de remarquer que le procédé en question s'est montré inefficace sur un embranchement particulièrement chargé, où les conditions d'exploitation sont très sévères, de la ligne principale dont il s'est agi ci-dessus; cet embranchement est celui de New-Canaan Branch sur lequel on a finalement appliqué avec succès la méthode des transformateurs-suceurs que nous examinerons plus loin.

2° *Méthode Girousse.* — Dans cette méthode, on se propose d'agir sur les appareils récepteurs eux-mêmes de façon à les soustraire à l'action du courant alternatif perturbateur en observant que le courant de travail est un courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ce but, on utilise les propriétés des circuits en résonance ; un circuit composé d'une bobine ayant une self L, une résistance R et un condensateur C, en résonance pour un courant alternatif de pulsation ω, se comporte à l'égard de ce courant comme une simple résistance R. On peut ainsi constituer des circuits ayant une résistance aussi faible qu'on le veut pour le courant alternatif ω et une résistance infinie pour le courant continu.

L'application la plus simple de ce principe consiste à monter une dérivation self-capacité entre l'arrivée du fil télégraphique et la terre. On arrive à éliminer ainsi l'action d'une force électromotrice perturbatrice d'une dizaine de volts environ.

Mais on obtient une efficacité beaucoup plus grande en employant un récepteur (fig. 111) à deux enroulements égaux (même résistance et même nombre de spires) connectés de telle façon que les actions d'un courant qui se partage également entre les deux circuits, s'annule (montage en différentiel). Un des enroulements est monté en série avec une capacité C et une self LR en résonance pour la fréquence perturbatrice, l'autre avec une résistance R égale à celle de la bobine de self ; le courant alternatif se partage en deux parties égales et de même phase, et par suite, l'action sur le récepteur est nulle.

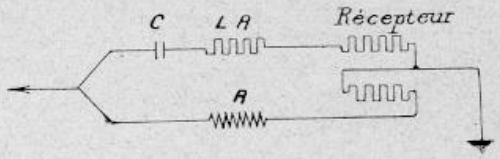


FIG. 111.

Le principe de ces appareils est relativement simple. Mais il faut tenir compte des variations possibles du courant perturbateur ; il ne faut pas, en second lieu, que le dispositif de protection nuise à la propagation du courant télégraphique de travail ; il faut enfin se préoccuper des nécessités de l'exploitation télégraphique. L'application pratique du principe est donc délicate. Néanmoins on est arrivé à obtenir des résultats satisfaisants sur des lignes avoisinant des installations de traction de puissance assez faible (réseaux de tramways, chemins de fer d'intérêt local), mais pour des installations de grande puissance (Midi), les résultats sont insuffisants.

Le schéma de la figure 111 peut très bien s'appliquer en utilisant comme récepteur un appareil télégraphique ordinaire (Morse, Sounder, cadran, Hughes, Baudot), il suffit dans ce cas de bobiner spécialement l'électro. Mais les administrations télégraphiques préfèrent en général,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec raison, employer un relais spécial et conserver sans modification leurs installations habituelles. L'avantage du relais est qu'il est aisé de le régler une fois pour toutes et de le mettre hors de la portée du personnel d'exploitation, qui en cherchant à trop bien régler le récepteur, arrive parfois à le dérégler. La figure 112 indique le montage dans le cas d'un poste où le fil aboutit normalement à un Morse. D'autres montages correspondent au cas des fils bifurqués, au cas des fils reliés à des tableaux, etc.

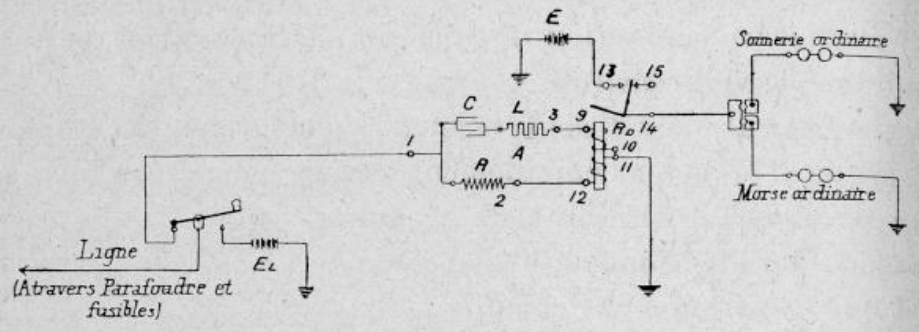


FIG. 112.

Des appareils ainsi construits sont en service dans la Haute-Vienne (tramways à 10.000 volts, 25 périodes), dans les Alpes-Maritimes (réseau du Sud-France à 6.000 volts, 25 périodes, intensité atteignant 150 ampères ; parallélisme à une distance moyenne de 4 mètres sur une longueur de 25 kilomètres).

3° *Méthode des transformateurs-suceurs* (1). — Dans cette méthode, on agit sur la cause même qui produit les effets perturbateurs, c'est-à-dire sur le système de distribution de l'énergie. Son application a, en particulier, fait récemment (1917), l'objet d'essais rigoureux par la Compagnie du Midi, sur sa ligne de Perpignan à Villefranche.

La méthode consiste à installer le long de la ligne de traction des transformateurs d'intensité dits « suceurs » dont le montage le plus simple correspond au schéma de la figure 113, l'enroulement primaire est en série avec le trolley et l'enroulement secondaire est en série avec le circuit de voie.

(1) Voir pour plus de détails la *Revue générale de l'électricité* des 3 mars et 7 avril 1917, « Application des transformateurs-suceurs à la ligne monophasée de Perpignan à Villefranche de la Compagnie des chemins de fer du Midi », par M. Dachary, d'où nous avons extrait la plupart des renseignements donnés dans notre étude.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour en comprendre l'effet, remarquons que la valeur de la f. é. m. d'induction électro-magnétique sur un circuit dont le retour se fait par la terre est d'autant plus petite que la portion du courant revenant par le sol est plus réduite (ceci montre en passant pourquoi, au point de vue qui nous occupe, on se trouve dans de meilleures conditions, dans le cas des lignes ordinaires de transport d'énergie où il n'y a pas de retour par le sol). Il s'agit par suite, dans le cas d'une ligne de traction à retour du courant par les rails, de faire en sorte que la plus grande partie, tout au moins, sinon la totalité du courant, revienne par les rails.

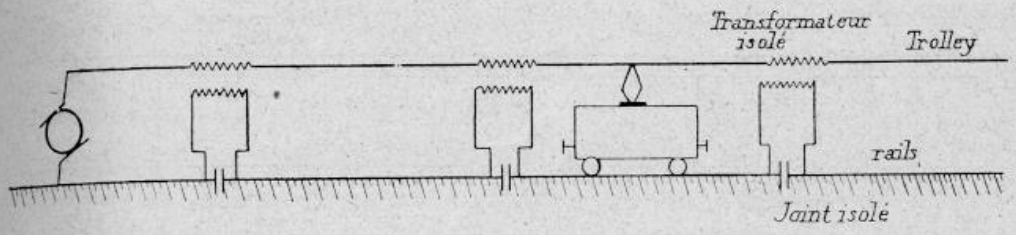


FIG. 113.

Transformateurs-suceurs sur la voie.

On sait qu'en traction électrique, en vue de favoriser la circulation du courant de retour par les rails, il est fait usage de connexions électriques longitudinales aux joints des rails et transversales entre les deux files de rails. Cette précaution est très insuffisante en courant alternatif par suite de la résistance offerte par des rails au passage du courant (1) (effet Kelvin, réactance), et la proportion du courant qui revient par les rails n'est en réalité qu'une très faible fraction du courant du trolley.

Remarquons en passant qu'en courant continu même, l'insuffisance de telles connexions dans la voie se manifeste par la production de phénomènes d'électrolyse sur les conduites voisines.

On pourrait améliorer le retour du courant monophasé par les rails en employant, comme cela se fait en courant continu, un conducteur de retour doublant les rails. Mais le calcul et l'expérience montrent que ceci est encore insuffisant pour empêcher la diffusion d'une partie importante du courant dans le sol, qui peut encore facilement être de l'ordre de 50 pour 100 de la valeur du courant du trolley.

(1) Le rapport des résistances offertes au passage du courant, courant monophasé et courant continu, a été trouvé égal à 2,5 pour les rails du Midi et pour la fréquence de 15 périodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est dans ces conditions que l'on a eu recours aux transformateurs d'intensité qui nous occupent et dont le rôle est comparable à celui des machines dévoltrices utilisées en traction à courant continu : ce sont donc des transformateurs-dévolteurs dits encore « suceurs » eu égard à leur fonction qui est de « sucer » dans les rails tout le courant de retour, d'où le nom donné à ce procédé : *procédé du retour forcé du courant par les rails.*

Dans les conditions d'emploi les plus simples, ces transformateurs sont montés suivant le schéma déjà vu de la figure 113.

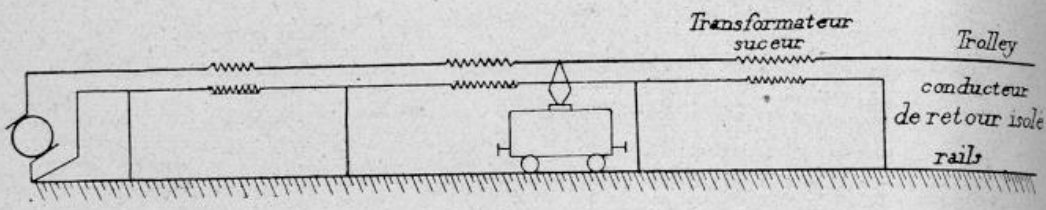


FIG. 114.

Schéma n° 1.

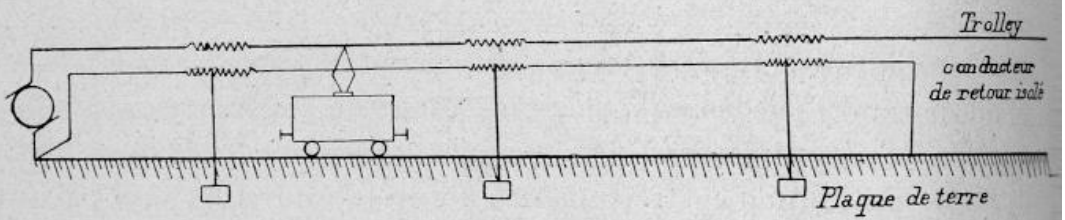


FIG. 115.

Schéma n° 2.

Transformateurs-suceurs avec conducteur de retour isolé.

Avec cette disposition, le courant de retour étant presque complètement drainé dans les rails, l'induction électromagnétique dans les lignes à faible courant voisines de la ligne de traction sera considérablement réduite. Quant à la compensation du champ électrostatique, elle sera améliorée si le transformateur-suceur draine le courant de retour dans un conducteur placé à côté du fil trolley. Ce procédé conduit aux deux schémas des figures 114 et 115.

Au cours d'essais effectués sur la ligne de Perpignan à Villefranche, de la Compagnie du Midi, on a pu évaluer que par ces montages, la tension induite était réduite d'environ 92 pour 100, d'où une réduction correspondante des troubles d'origine électromagnétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le deuxième schéma, caractérisé par la connexion du conducteur de retour à la voie au droit du transformateur, présente l'avantage de rassembler en un seul point toutes les liaisons des conducteurs entre eux et par conséquent de rendre plus faciles la surveillance et l'entretien de l'installation.

Il est bon en outre de mettre les rails à la terre par des plaques de terre ainsi qu'il est indiqué sur le deuxième schéma, car sur une section dans laquelle se trouve une locomotive, la tension de la voie de roulement peut atteindre dans le cas d'un isolement plus ou moins parfait une valeur, sinon dangereuse, du moins désagréable pour le personnel (1).

Nous ajouterons que sur la ligne d'essais déjà citée, de Perpignan à Villefranche, les transformateurs-suceurs sont à une distance moyenne de 3 kilomètres 500 les uns des autres, et que leur puissance est prévue pour un débit maximum de 200 ampères. Ils sont enfin installés sur l'accotement de la voie au droit des pylônes supportant la ligne trolley.

L'emploi des transformateurs-suceurs a également été adopté pour diverses lignes monophasées américaines, en particulier pour les lignes du Norfolk et Western Ry et du Pennsylvania R. R. (ligne de Philadelphie-Paoli). Pour chacune de ces deux lignes, les transformateurs-suceurs sont à une distance moyenne de 1 à 2 kilomètres les uns des autres et leur puissance est de 100 kva pour le premier réseau, et de 80 kva pour le second. Les primaires des transformateurs sont bien en série dans les lignes de contact, mais les secondaires sont ici placés dans le circuit du rail de retour et non dans un circuit de retour spécial relié au rail, comme c'est le cas du Midi. La protection ainsi obtenue est moindre et ne paraît pas être suffisante.

Cette méthode a encore été adoptée, ainsi que nous l'avons déjà signalé, sur l'embranchement de New-Canaan de la ligne principale du New-York-New-Haven et Hartford où ils sont placés à un intervalle moyen de 800 mètres. Etant données les conditions exceptionnelles qui caractérisent cet embranchement, où en raison du mode d'alimentation, le courant de court-circuit à New-Canaan atteint 2.500 ampères, soit 10 fois l'intensité maximum en exploitation et où en raison de l'impédance relativement élevée de la voie simple qui provoquait la dérivation par la terre d'une importante partie du courant de retour, on a constaté des tensions

(1) Sur certaines lignes du Midi il a été mesuré, sur la voie une perte de charge kilométrique de 0,185 volts par ampère.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

induites de l'ordre de 1.000 volts dans les circuits téléphoniques, il a fallu compléter la protection donnée par les transformateurs-suceurs en prenant diverses précautions particulières telles que :

1° Amélioration de l'éclissage électrique de la voie ;

2° Insertion dans le trolley, près de sa jonction avec la ligne principale, d'une bobine de réactance destinée à limiter le courant de court-circuit ;

3° Réglage du disjoncteur au point d'embranchement de manière à assurer la rupture immédiate.

Cette installation est en cours d'exécution, et les résultats déjà obtenus permettent d'espérer une solution satisfaisante.

4° *Solution radicale. — Conclusion.* — Les méthodes précédentes ont permis dans chaque cas particulier de réduire considérablement, et souvent à des proportions acceptables en pratique, les effets d'induction qui nous occupent et la méthode des transformateurs-suceurs paraît être la plus efficace. Dans aucun cas cependant, les résultats obtenus ne sont pleinement satisfaisants, et il semble bien que la seule solution générale, radicale et sûre, soit celle qui consiste à écarter suffisamment les lignes télégraphiques et téléphoniques et à employer des câbles à circuits bifilaires sous plomb, aériens ou souterrains, pour les lignes devant obligatoirement, pour une raison quelconque, rester à proximité des voies. C'est la solution qui, finalement, a été adoptée, en particulier par l'Administration fédérale des téléphones et télégraphes de Berne (Loetschberg, Saint-Gothard).

Les perturbations qui nous occupent n'ont, en aucun cas, pu être corrigées par un dispositif simple et peu onéreux, et les dépenses entraînées par l'adoption de l'un ou l'autre des procédés décrits ci-dessus ont toujours dû être supportées par les compagnies de chemin de fer. Les frais de premier établissement des lignes de traction monophasées se trouvent ainsi grevés d'une charge importante qui est à considérer très sérieusement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VIII

MOTEURS A COURANTS TRIPHASÉS
ÉTUDE ÉLECTRIQUE

SOMMAIRE. — Introduction. — Rappel des propriétés fondamentales du moteur asynchrone triphasé : Glissement. Vitesse. Changement du sens de rotation. Couple. Puissance et rendements. — Caractéristiques électro-mécaniques. — Caractéristique mécanique. Stabilité de marche. — Réversibilité du moteur asynchrone. Fonctionnement en récupération. — Résumé des propriétés principales du moteur asynchrone.

75. **Introduction.** — La première application du moteur triphasé à la traction électrique fut celle faite par la Compagnie Brown-Boveri en 1896, aux tramways de Lugano (400 volts, 40 périodes), suivie en 1899 par celle du chemin de fer de Burgdorf-Thoune (750 volts, 40 périodes), également de Brown-Boveri. La ligne d'alimentation comprenait deux fils de trolley, la troisième phase était reliée aux rails, ce qui est le dispositif actuel. La régulation de la vitesse était obtenue au moyen de résistances en série avec les rotors des moteurs.

Ensuite vinrent les chemins de fer de la Valteline (Ganz), où la tension d'alimentation est 3.000 volts (15 périodes) puis le Simplon (Brown-Boveri) également à 3.000 volts (16 2/3 périodes). Au Great Northern (Montagnes Rocheuses-General Electric), la tension est de 6.000 volts qui est le maximum actuellement réalisé (fréquence du courant 25 périodes). Plus récemment, les chemins de fer de l'Etat italien (Giovi, Savone,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mont-Cenis), équipés par la Société italienne Westinghouse à 3.000 volts, 16 2/3 périodes. Enfin, un assez grand nombre de lignes de chemins de fer à crémaillère, notamment en Suisse.

76. Rappel des propriétés fondamentales des moteurs d'induction à courants triphasés. — Les moteurs employés sont des moteurs asynchrones triphasés dont nous rappellerons seulement le principe du fonctionnement et les propriétés, en nous étendant davantage sur celles particulièrement utilisées en traction.

Un moteur asynchrone comporte un primaire ou inducteur ordinairement fixe (stator), et un secondaire ou induit ordinairement mobile (rotor).

Le primaire est bobiné en alternateur triphasé. Les courants qu'il reçoit développent un champ tournant dans l'espace avec une vitesse angulaire $\frac{\omega_1}{p} = \omega_0$, $2p$ étant le nombre de pôles du bobinage et ω_1 la pulsation des courants primaires ($\omega_1 = 2\pi f_1$, f_1 étant leur fréquence).

Le secondaire se compose d'un bobinage polyphasé quelconque dont les phases ne sont pas nécessairement en même nombre que celles du primaire et qui est *fermé sur lui-même ;* il sera en cage d'écureuil ou bobiné et à bagues, donnant alors la possibilité d'y intercaler des résistances.

Le champ tournant primaire induit des courants dans l'enroulement secondaire supposé au repos. Ces courants donnent naissance à un champ secondaire. L'action qui s'exerce entre ces deux champs provoque le démarrage du moteur, car le champ secondaire induit tend à être entraîné avec la vitesse du champ tournant primaire et dans le même sens. Quand le moteur est arrivé à son régime, le secondaire tourne dans le sens du champ tournant primaire avec une vitesse angulaire que nous appellerons ω.

Cette vitesse ω est nécessairement inférieure à celle du champ tournant ω_0 ou *vitesse du synchronisme*, car si elle lui était égale, le champ primaire serait fixe par rapport à l'enroulement secondaire et n'y induirait aucun courant : il n'y aurait donc pas de mouvement, le travail développé serait nul. Comme l'induit ne peut tourner que s'il reçoit une quantité d'énergie suffisante pour surmonter les résistances passives, la vitesse du synchronisme ω_0 ne sera jamais atteinte par la seule action du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

champ inducteur sur l'induit : c'est une limite vers laquelle tend l'allure du moteur à mesure que le couple résistant diminue.

La vitesse relative du champ primaire par rapport au secondaire, est :

$$\omega_0 - \omega = \frac{\omega_1}{p} - \omega_0$$

et les courants induits dans le secondaire sont de pulsation $\omega_1 - p\omega$ et de fréquence

$$\frac{\omega_1 - p\omega}{2\pi}.$$

1° *Glissement*. — On appelle *coefficient de glissement* ou simplement *glissement* de l'induit dans le champ le rapport :

$$g = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \tag{1}$$

c'est-à-dire

$$g = \frac{\frac{\omega_1}{p} - \omega}{\frac{\omega_1}{p}} = \frac{\omega_1 - p\omega}{\omega_1}. \tag{2}$$

Remarquons qu'au démarrage $g = 1$, car $\omega = o$ et qu'au synchronisme $g = o$ car $\omega = \omega_0 = \frac{\omega_1}{p}$.

Soient maintenant en t/m : n_0 la vitesse de synchronisme du moteur, (c'est-à-dire celle du champ tournant), et n celle de l'induit pour une charge donnée. On a :

$$n_0 = 60.\frac{f_1}{p}$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p} = 2\pi\frac{n_0}{60}$$

et :

$$\omega = 2\pi\frac{n}{60},$$

par suite en portant ces valeurs de ω_0 et ω dans l'équation (1) on obtient :

$$g = \frac{n_0 - n}{n_0}. \tag{3}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le glissement est, en général, inférieur à 5 pour 100 pour les moteurs d'une puissance supérieure à une dizaine de chevaux.

2° *Vitesse.* — Le glissement étant donné, on a pour expression de la vitesse angulaire de l'induit d'après la formule (1) :

$$\omega = (1 - g)\,\omega_0 = (1 - g)\frac{\omega_1}{p}.$$

La vitesse d'un tel moteur est, comme celle d'un moteur shunt, sensiblement constante, quelle que soit la charge. C'est là une propriété importante, surtout sur les lignes à parcours accidentés.

3° *Changement du sens de rotation.* — Comme le champ produit par un système de courants triphasés — et, plus généralement polyphasés — tourne dans le sens des phases décroissantes, pour renverser le sens de rotation d'un moteur triphasé, il suffira de permuter entre elles deux phases.

4° *Couple.* — On démontre en électrotechnique que l'expression du couple développé par un moteur asynchrone à $2p$ pôles peut se mettre sous la forme (1)

$$(5) \qquad C = \frac{pg\,\omega_1\,\Phi^2\,Nr}{8(r^2 + g^2\,\omega_1^2\,\lambda^2)}$$

avec

$$g = \frac{\omega_1 - p\omega}{\omega_1}$$

en désignant par :

Φ le flux correspondant à un des pôles tournants ;

N le nombre de génératrices périphériques sur l'induit ;

r la résistance ohmique d'une de ces génératrices ;

λ son coefficient de self-induction.

On voit ainsi que *le couple est proportionnel au carré du flux inducteur*. Comme d'ailleurs ce flux est proportionnel à la tension aux bornes, on peut dire que :

Le couple d'un moteur asynchrone à champ tournant est proportionnel au carré de la tension d'alimentation aux bornes ; résultat fort important à retenir.

---

(1) Voir en particulier MONNIER, *Cours d'électricité industrielle*, page 738. Bernard et Cie, édition 1903.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A titre de comparaison avec les moteurs courant continu et les moteurs monophasés à collecteur, on notera que la *tension ici n'influe pas sur la vilesse*. C'est là une différence fondamentale, au point de vue des applications.

Au démarrage : $\omega = o$, $g = 1$, la valeur du couple est :

$$C_o = \frac{p\omega_1 \Phi^2 Nr}{8(r^2 + \omega_1^2 \lambda^2)}, \tag{6}$$

valeur positive, par conséquent, si le couple résistant n'a pas une trop grande valeur, le moteur démarre de lui-même et sa vitesse augmente progressivement jusqu'à ce que le travail résistant fasse équilibre au travail moteur.

Le couple varie avec la vitesse angulaire ω du moteur ; en différentiant l'équation (5) on trouve, en observant que d'après (2) :

$$g\omega_1 = \omega_1 - p\omega$$

$$\frac{dC}{d\omega} = \frac{p^2 \Phi^2 Nr}{8} \cdot \frac{g^2 \omega_1^2 \lambda^2 - r^2}{(r^2 + g^2 \omega_1^2 \lambda^2)^2},$$

ce qui montre que le couple du moteur augmente avec la vitesse tant que l'on a :

$$g\omega_1 \lambda > r.$$

Il passe par un maximum pour

$$g\omega_1 \lambda = r.$$

Il diminue ensuite et s'annule à la vitesse du synchronisme.

La condition du maximum :

$$g\omega_1 \lambda = r$$

peut s'écrire en remplaçant $g\omega_1$ par sa valeur $g\omega_1 = \omega_1 - p\omega$:

$$(\omega_1 - p\omega)\lambda = r,$$

ce qui donne pour la valeur correspondante de la vitesse :

$$\omega = \frac{1}{p}\left[\omega_1 - \frac{r}{\lambda}\right] \tag{7}$$

valeur que nous désignerons par ω_m.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quant à la valeur du couple maximum, elle est :

$$C_{max.} = \frac{pN\Phi^2}{16\lambda}.$$

A titre d'exemple, la figure 116 représente la courbe du couple d'un moteur de 30 chevaux, 6 pôles, 45 périodes. La puissance normale de 30 chevaux correspond à $n = 865$ t/m et un glissement de $g = 0{,}04$. Sa vitesse de synchronisme est

$$n_o = \frac{60 \times 45}{3} = 900 \ t/m.$$

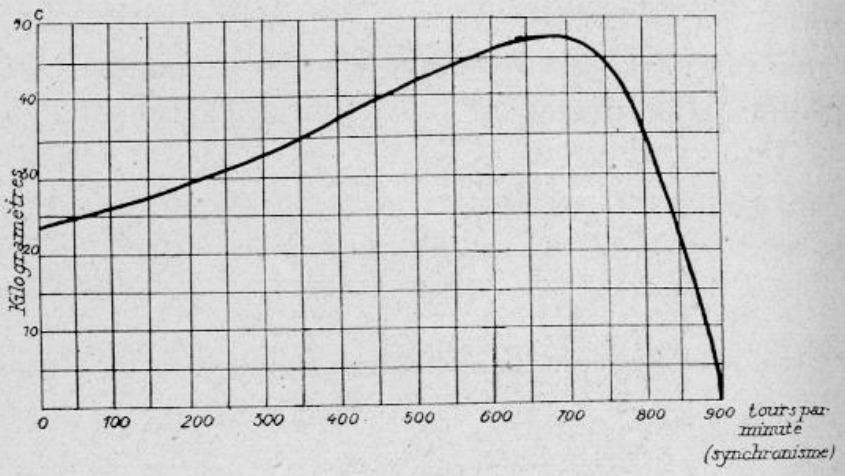


FIG. 116

Couple d'un moteur asynchrone de 30 chevaux.

L'équation 7 montre qu'en général le couple n'est pas maximum au démarrage, puisque pour que cela ait lieu il faudrait que l'on eût

$$\omega_m = \frac{1}{p}\left(\omega_1 - \frac{r}{\lambda}\right) = 0,$$

c'est-à-dire $\omega_1 = \frac{r}{\lambda}$.

Si l'on veut cependant que le couple moteur soit maximum au démarrage sans que la condition ci-dessus soit remplie, il faut recourir à un artifice qui consistera en général à intercaler une résistance r' en série avec le circuit induit telle que avec $g = 1$ on ait :

$$r + r' = \omega_1 \lambda$$

que l'on supprimera lorsque le moteur aura atteint sa vitesse de régime.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'examen de la condition du couple maximum (7) montre encore qu'à chaque vitesse angulaire ω correspond une certaine résistance r du rotor pour laquelle le couple moteur est maximum, ce qui est bien mis en évidence par la figure ci-contre (fig. 117), où nous avons tracé les courbes des variations du couple moteur en fonction de la vitesse angulaire ω et pour différentes résistances r du rotor ; le champ tournant et la self-induction λ du rotor étant supposés constants. Le synchronisme correspond à $\omega = 100$.

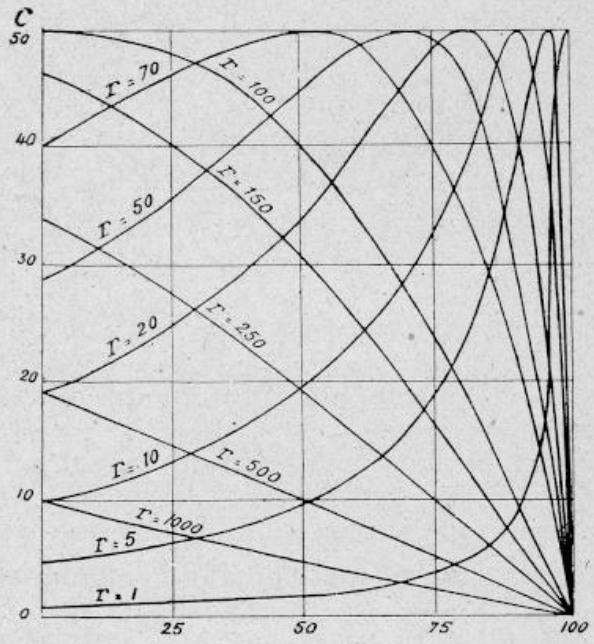


FIG. 117.

Variations du couple en fonction de ω pour différentes résistances r du rotor.

On voit d'après ce qui précède que la loi de variation du couple du moteur asynchrone triphasé diffère essentiellement de celle du couple du moteur série, courant continu ou courant monophasé. La même observation existe en ce qui concerne la vitesse. En fait, les propriétés du moteur asynchrone se rapprochent de celles du moteur shunt.

5° *Puissances et rendements.* — La *puissance motrice* P_0 c'est-à-dire la *puissance du champ tournant*, dont la vitesse est $\omega_0 = \frac{\omega_1}{p}$ est :

$$P_0 = C\omega_0 = C\frac{\omega_1}{p},$$

c'est-à-dire en remplaçant C par sa valeur (5)

$$P_0 = \frac{g\omega_1^2 \Phi^2 Nr}{8(r^2 + g^2\omega_1^2\lambda^2)}.$$

La *puissance développée par l'induit* est

$$P = C\omega$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'induit tournant à la vitesse ω, ce qui donne en remplaçant C par sa valeur :

$$P = \frac{p g \omega_1 \omega \Phi^2 N r}{8 (r^2 + g^2 \omega_1^2 \lambda^2)}$$

ou en observant que

$$g\omega_1 = \omega_1 - p\omega$$

$$P = \frac{p (\omega_1 - p\omega) \omega \Phi^2 N r}{8 \left(r^2 + (\omega_1 - p\omega)^2 \lambda^2 \right)}$$

sous cette forme on voit immédiatement que la puissance développée est nulle pour $\omega = \frac{\omega_1}{p}$ (synchronisme) et pour $\omega = o$ (démarrage). Elle passe par suite par un maximum pour une certaine valeur de la vitesse ω que l'on obtiendrait facilement en calculant l'expression

$$\frac{dP}{d\omega} = o.$$

La valeur obtenue, de même que la valeur correspondante pour le maximum de P ne présentant pas d'intérêt particulier, nous ne faisons qu'indiquer cette propriété.

La *puissance perdue* c'est-à-dire absorbée par le glissement du rotor dans le champ est :

$$P_p = C (\omega_o - \omega) = P_o - P$$

c'est-à-dire en remplaçant P_o et P par leurs valeurs

$$P_p = \frac{g \omega_1 \Phi^2 N r (\omega_1 - p\omega)}{8 \left[r^2 + g^2 \omega_1^2 \lambda^2 \right]}$$

et finalement comme $\omega_1 - p\omega = g\omega_1$

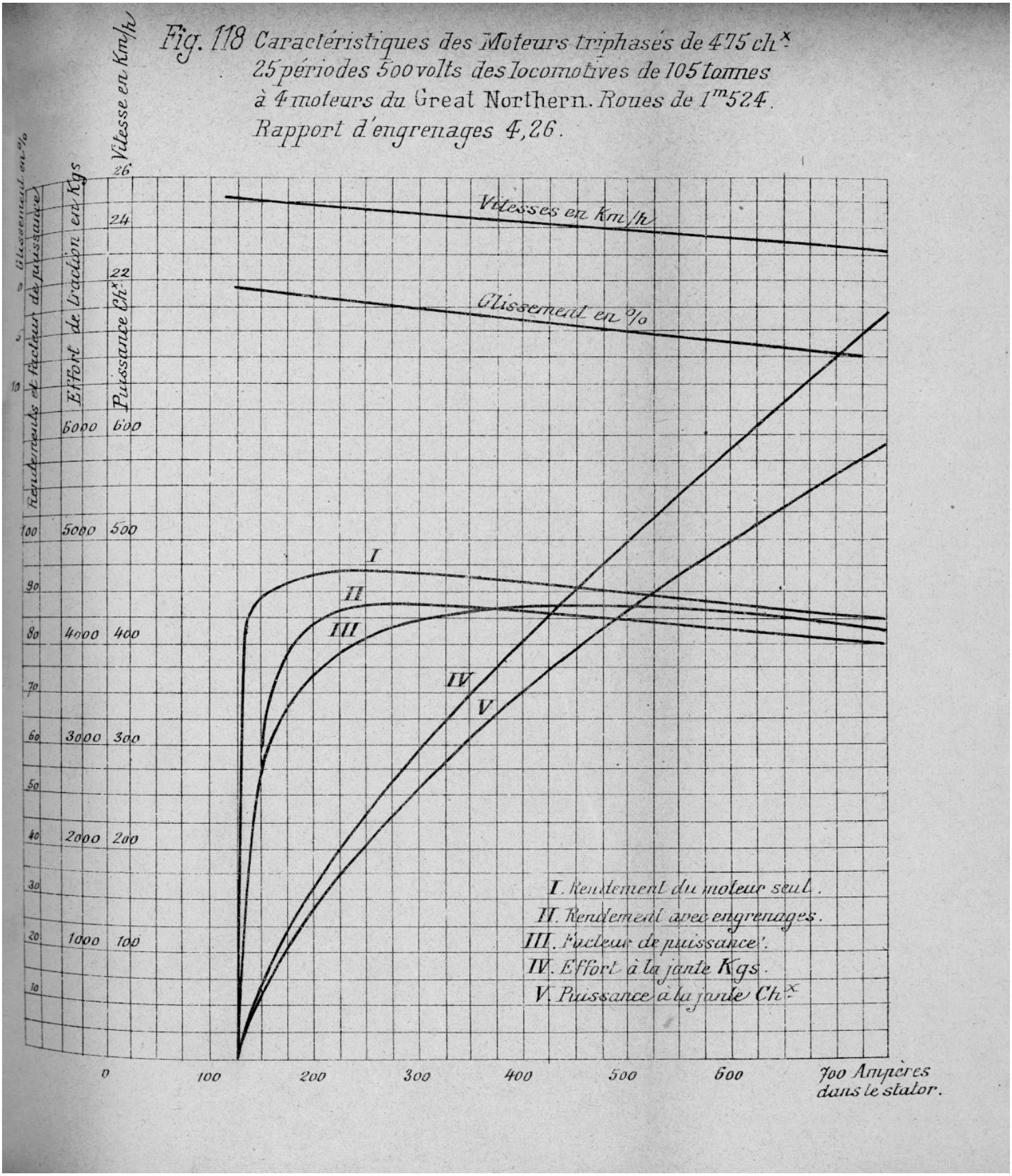
$$P_p = P_o g.$$

Ainsi, pour une puissance P_o donnée, la puissance perdue est proportionnelle au glissement.

Le *coefficient économique* η_o de la transformation de l'énergie dans le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 118 Caractéristiques des Moteurs triphasés de 475 ch^x 25 périodes 500 volts des locomotives de 105 tonnes à 4 moteurs du Great Northern. Roues de 1^m524. Rapport d'engrenages 4,26.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

champ ou *rendement propre* de l'induit est défini par le rapport de la puissance développée par l'induit à la puissance du champ. On a ainsi :

$$\eta_{io} = \frac{P}{P_o} = \frac{P}{P + P_p} = \frac{\omega}{\omega_o}$$

et on voit qu'il ne dépend que du rapport des vitesses angulaires du champ et de l'induit. Il est égal à l'unité lorque le synchronisme est atteint, mais alors la puissance produite est nulle.

Remarquons encore que cette expression de η_{io} peut s'écrire

$$\eta_{io} = \frac{\omega}{\omega_o} = 1 - g$$

et sous cette forme elle montre que le coefficient de glissement g représente la perte relative dans l'induit due au glissement. On voit ainsi qu'il faut faire travailler le moteur à aussi faible glissement que possible.

Pour avoir *le rendement organique du moteur* η_i, rapport de la puissance utile à la puissance absorbée, il suffit, en se reportant à l'expression de η_{io}, de retrancher de P les pertes par frottements, soit P_f et d'ajouter à la somme $P + P_o$ les pertes P'_o par effet Joule dans le primaire (P'_o n'est autre que les pertes par effet Joule dans l'induit) et les pertes π dans le fer par courants de Foucault et hystérésis. On obtient ainsi :

$$\eta_{io} = \frac{P - P_f}{P + P_o + P'_o + \pi}.$$

77. **Caractéristiques électromécaniques.** — Les courbes sont ici celles de la vitesse, du couple ou de l'effort produit, du facteur de puissance, du glissement et du rendement, en fonction du courant primaire, courbes auxquelles on ajoute souvent la courbe de la puissance développée en chevaux.

A titre d'exemple, nous avons représenté sur la figure 118 les courbes caractéristiques des moteurs triphasés dont sont équipées les locomotives du Great Northern (4 moteurs de 475 chevaux par locomotive), de la General Electric Co.

78. **Caractéristique mécanique. Stabilité de marche.** — En construisant comme nous l'avons fait pour les moteurs à courant continu, la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

caractéristique mécanique, c'est-à-dire la courbe du couple en fonction de la vitesse, on obtient une courbe telle que ABC (fig. 119) présentant d'après ce que nous avons vu un maximum pour une certaine vitesse ω_m définie par l'équation 7. La vitesse augmentant, le couple commence par croître (portion AB de la courbe), puis passe par un maximum B puis décroît (BC), pour devenir nul à la vitesse du synchronisme ω_0.

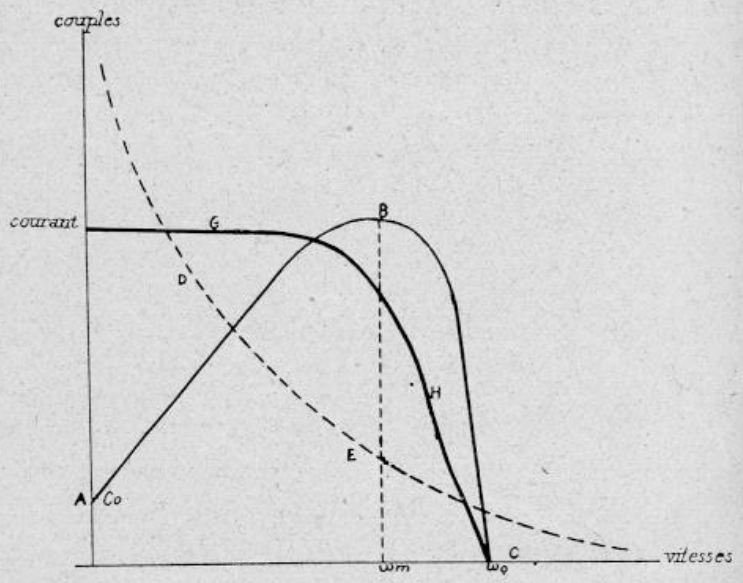


FIG. 119.

Caractéristique mécanique.

Cette courbe est bien moins avantageuse que celle correspondante des moteurs série, courant continu ou courant monophasé, pour lesquels le couple décroît toujours quand la vitesse augmente. Nous avons tracé en DE sur la même figure, pour comparaison, cette dernière courbe.

De là il résulte que, en se reportant à la définition de la stabilité de marche donnée à propos des moteurs série courant continu (§ 17), le moteur asynchrome ne présente une marche stable que dans les limites de vitesses assez rapprochées, c'est-à-dire entre la vitesse de synchronisme ω_0 et celle ω_m qui correspond au couple maximum, ce que l'on exprime aussi en disant que la marche n'est stable que dans un champ de glissement très petit. Dès que le moteur se ralentit au-dessous de ω_m il ne produit qu'un couple de plus en plus faible et arrive par suite à l'arrêt si le couple résistant reste constant.

Il est intéressant de reporter sur la même figure la courbe du courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

absorbé. Nous l'avons tracé en GH. On constate que le courant est à peu près constant au-dessous d'une certaine vitesse et qu'il s'annule à la vitesse de synchronisme.

79. **Réversibilité du moteur d'induction. Fonctionnement en récupération.** — Nous avons vu (§ 76-5°) que la puissance développée par un moteur à champ tournant avait pour expression

$$P = \frac{p\,(\omega_1 - p\omega)\,\omega\,\Phi^2\,Nr}{8\left(r^2 + (\omega_1 - p\omega)^2\,\lambda^2\right)}$$

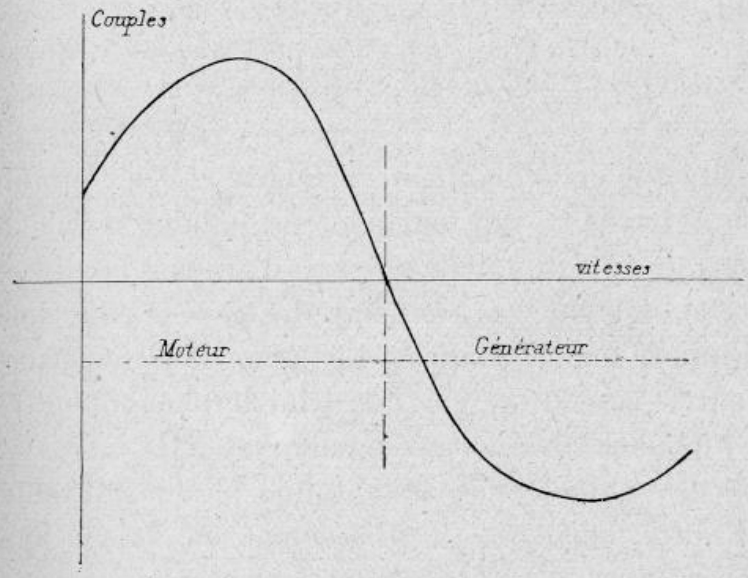


FIG. 120.

elle est donc positive pour toutes les valeurs de ω comprises entre o et $\frac{\omega_1}{p}$, elle est nulle pour $\omega = \frac{\omega_1}{p}$ et devient négative pour $\omega > \frac{\omega_1}{p}$; c'est-à-dire que pour donner au moteur une vitesse supérieure à celle du synchronisme, il faut dépenser un travail mécanique. Le glissement change également de signe.

En traction, cette circonstance se produira naturellement si le véhicule descend une pente telle que l'influence de la gravité devienne supérieure aux résistances à vaincre.

Le couple de moteur devient résistant et sa courbe passe au-dessous de l'axe des vitesses (fig. 120).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ces conditions, où $\omega > \frac{\omega_1}{p}$, le courant induit change de signe et son flux renforce celui qui est fourni par le courant primaire ; le travail mécanique dépensé — par action de la gravité — se transforme en énergie électrique.

Les courants secondaires, dont la fréquence est $\frac{p\omega - \omega_1}{2\pi}$ produiront un champ tournant en sens inverse du flux primaire ; comme le secondaire est entraîné mécaniquement dans le sens de rotation du champ primaire avec une vitesse angulaire ω, le flux secondaire se déplacera dans l'espace avec la vitesse

$$\omega - \left(\omega - \frac{\omega_1}{p}\right) = \frac{\omega_1}{p};$$

elle est la même que celle du champ primaire et les courants développés dans le primaire par le travail fourni au secondaire *auront la même fréquence que ceux du réseau*, quelle que soit d'ailleurs la vitesse de rotation du secondaire au delà du synchronisme. Le moteur peut donc, comme l'a indiqué la première fois M. Maurice Leblanc, fonctionner en génératrice asynchrone sur le réseau, ce qui constitue le phénomène de la *récupération* sur lequel nous reviendrons au chapitre XII.

Reprenons le véhicule descendant une pente suffisante. La vitesse continue à croître ainsi que le glissement en valeur absolue, et ce, jusqu'au moment où le couple résistant du moteur fonctionnant en générateur fait équilibre au couple accélérateur développé sur l'essieu, lequel est fourni par l'action de la pesanteur diminuée de celle des résistances au mouvement du véhicule. A ce moment, la vitesse devient constante. On réalise ainsi automatiquement un freinage, et il est à remarquer que pour obtenir ce résultat, il n'y a *aucun changement de connexions* à faire entre le moteur et la ligne.

En se reportant à la figure 120, on voit que d'après la forme du couple, si le couple moteur du véhicule était trop élevé, on pourrait atteindre la zône extrême. A partir de ce moment, il y aurait instabilité. La vitesse croîtrait de plus en plus et il se produirait un véritable décrochage.

Il est important de noter qu'une condition formelle du fonctionnement du système est que le moteur reçoive continuellement le courant déwatté nécessaire à son excitation, sans quoi il y aurait immédiatement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

décrochage et annulation du couple. Par conséquent, le moteur devra rester en permanence relié électriquement à la ligne d'alimentation, ou sinon il devra recevoir son excitation d'un petit alternateur excitateur monté sur le véhicule.

80. **Résumé des propriétés principales du moteur asynchrone.** — Résumant et précisant ce qui précède, on peut formuler les règles suivantes :

La marche d'un moteur asynchrone triphasé n'est stable que dans des limites assez rapprochées ou, ce qui revient au même, dans un champ de champ de glissement très petit.

Au démarrage, le couple est très faible si l'on n'intercale pas de résistances supplémentaires dans le secondaire.

Le courant primaire reste sensiblement constant jusqu'au couple maximum pendant le démarrage.

Le couple est proportionnel au carré de la tension aux bornes.

La vitesse est sensiblement constante quelle que soit la charge.

Le glissement varie en sens inverse de la vitesse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IX

COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS. RÉGULATION DE LA VITESSE DES VOITURES

SOMMAIRE. — Différents modes de régulation : couple ou vitesse. — Etude du démarrage.

Procédés de régulation du couple : Transformateur-survolteur à rapport de transformation variable ; modification du groupement des enroulements inducteurs : étoile-triangle, série-parallèle.

Procédés de régulation de la vitesse : Contrôle rhéostatique ; modification du nombre des pôles ; groupement en cascade ou tandem. Cascade triple Ganz. — Régulation de la vitesse par combinaison de la modification du nombre de pôles et du groupement en cascade. — Système mixte mono-triphasé (split phase). — Remarques générales sur le système triphasé.

81. **Différents modes de régulation : couple ou vitesse.** — Il résulte immédiatement des propriétés des moteurs triphasés que les moyens employés pour la régulation de la marche des voitures équipées avec de tels moteurs sont différents suivant qu'on se propose de faire varier le couple en maintenant constante — du moins sensiblement constante — la vitesse, ou de faire varier la vitesse sous une même charge. Nous examinerons donc les deux questions séparément.

1° *Pour le réglage du couple*, on agit sur la tension aux bornes du moteur, ce qui peut être réalisé de plusieurs façons que nous indiquerons plus loin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° *Pour le réglage de la vitesse*, on peut avoir recours à divers procédés :

Contrôle rhéostatique ;
Modification du nombre de pôles ;
Groupement des moteurs en cascade.

Avant d'examiner en détail ces différentes méthodes, nous allons étudier le démarrage.

82. **Etude du démarrage.** — Quelle que soit la méthode employée pour le réglage du couple ou de la vitesse, il faut étudier spécialement le problème du démarrage dans lequel il s'agit d'obtenir un couple élevé sans dépense exagérée de courant. D'après ce que nous avons vu à l'étude électrique des moteurs asynchrones, la solution générale consiste à intercaler des résistances variables dans le circuit de l'induit qui devra par suite être bobiné et à bagues. Elle n'est donc pas applicable aux moteurs à cage d'écureuil qui sont ceux des locomotives du Simplon type 1908 pour lesquelles le démarrage est obtenu par l'emploi combiné de la variation de la tension et de la modification du nombre des pôles, ainsi que nous le verrons plus loin.

En dehors de ce cas, l'emploi de résistances réglables constitue la méthode généralement employée.

Nous avons vu (§ 76-4°) que l'expression du couple était :

$$(1) \qquad C = \frac{pg\,\omega_1\,\Phi^2\,N r}{8\,(r^2 + g^2\,\omega_1{}^2\,\lambda^2)},$$

d'autre part, on démontre que la valeur efficace du courant dans une génératrice de l'induit est :

$$(2) \qquad i = \frac{g\,\omega_1\,\Phi}{2\sqrt{2}\sqrt{r^2 + g^2\,\omega_1{}^2\,\lambda^2}}.$$

On a en outre entre ces deux quantités la relation :

$$C = \frac{N r i^2}{g\,\frac{\omega_1}{p}}.$$

La formule (1) peut s'écrire en mettant en évidence le rapport $\frac{g}{r} = m$

$$C = \frac{p\,\omega_1\,\Phi^2\,N m}{8\,(1 + g^2\,\omega_1{}^2\,\lambda^2)},$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de même :

$$i = \frac{\omega_1 \Phi m}{2\sqrt{2}\sqrt{1 + m^2 \omega_1^2 \lambda^2}},$$

ce qui montre que si on ne modifie pas l'enroulement de l'induit, ω_1 étant alors sensiblement constant, entre certaines limites tout au moins le couple et le courant sont seulement des fonctions du rapport $m = \frac{g}{r}$ du glissement à la résistance secondaire. Par suite, en modifiant r par l'addition d'une résistance r' extérieure, on obtiendra les mêmes valeurs du courant et du couple pour un glissement g' plus grand que g et tel que

$$\frac{g'}{g} = \frac{r' + r}{r}, \tag{3}$$

ce qui veut dire que *l'insertion d'une résistance dans le circuit de l'induit produit un glissement proportionnel à la résistance totale du circuit induit*.

Notons en passant que c'est sur cette proposition qu'est basée la régulation de la vitesse par la méthode rhéostatique que nous étudierons plus loin.

En ce qui concerne le démarrage, il s'agit de déterminer la résistance R à insérer dans le circuit de l'induit à l'origine du démarrage afin d'obtenir à ce moment le couple maximum, le moteur étant alimenté sous une tension déterminée. Or, soit g_m le glissement correspondant au couple maximum sans rhéostat, relevé expérimentalement, le glissement étant égal à 1 à l'arrêt, la résistance de démarrage minima R est donnée par application de la formule (3) qui donne ici :

$$\frac{1}{g_m} = \frac{R + r}{r},$$

d'où

$$R = r\left(\frac{1}{g_m} - 1\right).$$

Si le courant ainsi obtenu est trop fort pour la section du fil inducteur, on le réduira en augmentant la résistance jusqu'à ce que l'intensité ainsi réduite soit acceptable ; on sera sûr d'avoir de la sorte le couple maximum réalisable, sous la tension considérée. Remarquons que, au contraire, si l'on fait varier cette tension, on doit chercher à réaliser non

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seulement le couple maximum supportable, mais encore le couple maximum réalisable avec un courant donné (constant). Or, d'après la condition du couple maximum que nous avons établie antérieurement (§ 76-4°), on doit avoir :

$$R' + r = \omega_1 \lambda,$$

ce qui donne une autre valeur de R′ qui sera en général plus grande que celle trouvée dans la première hypothèse.

Les résistances de démarrage employées sont soit métalliques et refroidies artificiellement par des ventilateurs (Simplon), soit plutôt liquides avec électrodes plus ou moins plongeantes, la variation du niveau liquide étant obtenue par de l'air comprimé et le refroidissement soit par tubes à ailettes (Valteline), soit par circulation au moyen d'une pompe centrifuge (Norfolk et Western, Giovi).

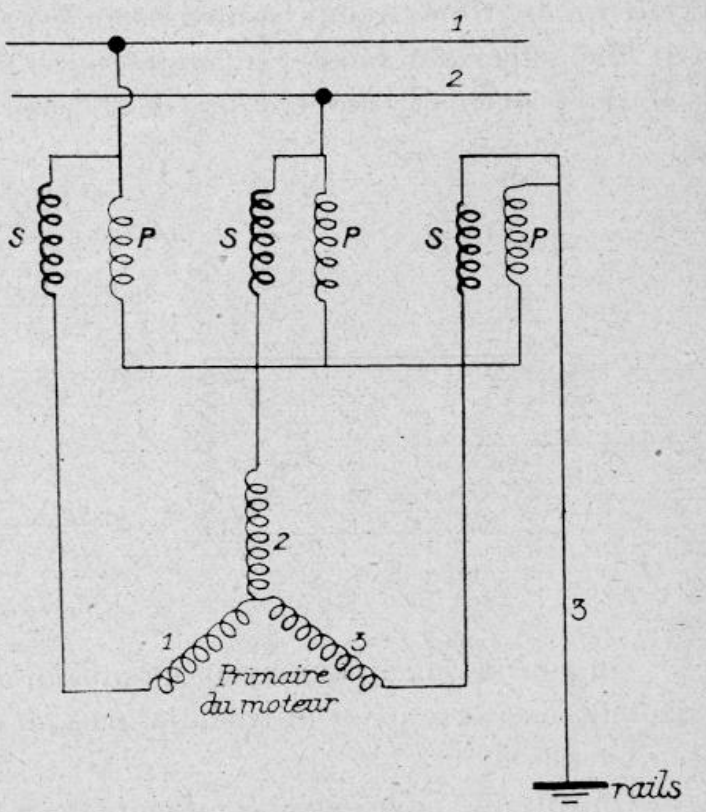


FIG. 121.

Emploi d'un transformateur-survolteur en triphasé.

83. Procédés de réglage du couple. — La méthode consiste à modifier la tension aux bornes du moteur.

Ainsi que nous l'avons vu au chapitre précédent, une modification de la tension aux bornes influe sur le couple, proportionnel au carré de cette tension, mais n'entraîne aucune variation appréciable de la vitesse : c'est donc bien uniquement un mode de réglage du couple.

Cette méthode n'est d'ailleurs utilisée que lorsque l'on a besoin de renforcer momentanément l'effort de traction, soit au moment des démarrages, soit sur les fortes rampes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Elle peut être réalisée de différentes façons :

1° *Au moyen d'un transformateur-survolteur à rapport de transformation variable* dont le primaire P (fil fin) est relié directement aux trois phases de la ligne (fig. 121) et le secondaire S (gros fil) est monté en série avec le moteur au démarrage ou quand on veut augmenter le couple.

2° *Par une modification du groupement des enroulements inducteurs ou montage étoile-triangle.* — Soit U_1 la tension primaire efficace entre deux fils de ligne.

Si les trois phases de l'inducteur sont groupées en triangle (fig. 122), chacun des trois circuits primaires recevra le courant à la tension U_1; si l'inducteur est monté en étoile (fig. 123), la différence de potentiel entre le centre de l'étoile et une des bornes du circuit sera seulement

$$U'_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = 0{,}577\, U_1.$$

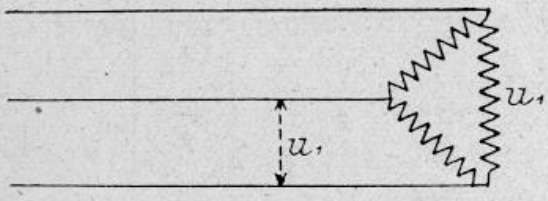


FIG. 122.

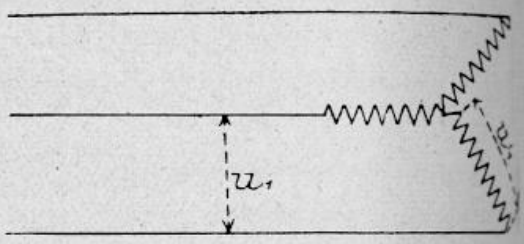


FIG. 123.

On pourra donc, pour avoir un plus grand couple, faire démarrer le moteur sur le groupement triangle, puis on établira le groupement étoile en vitesse.

On voit que pour passer d'un montage à l'autre, il faut avoir au moteur 6 sorties libres de câbles.

3° *Par groupement série-parallèle.* — La disposition en tant que montage est analogue à celle des moteurs courant continu, mais les *résultats sont totalement différents*, car on n'agit ici que sur le couple.

Dans le montage-série (figure 124), la tension est 1/2 par moteur et le couple est 1/4, mais les *vitesses sont les mêmes* que dans le montage en parallèle (fig. 125).

84. **Procédés de réglage de la vitesse.** — Ce réglage peut être obtenu par les procédés suivants :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° *Contrôle rhéostatique* (M. Maurice Leblanc). — Nons avons vu comment l'insertion d'une résistance appropriée en série avec l'induit, qui doit alors être bobiné et à bagues, permettait d'obtenir un couple maximum au démarrage. Nous allons maintenant examiner l'influence d'une telle résistance sur la vitesse, ce qui justifiera l'emploi de la méthode pour la régulation de la vitesse.

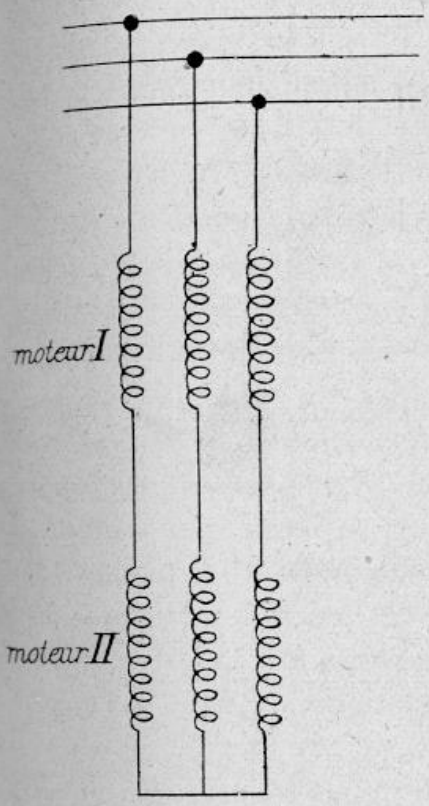


FIG. 124.

Montage série.

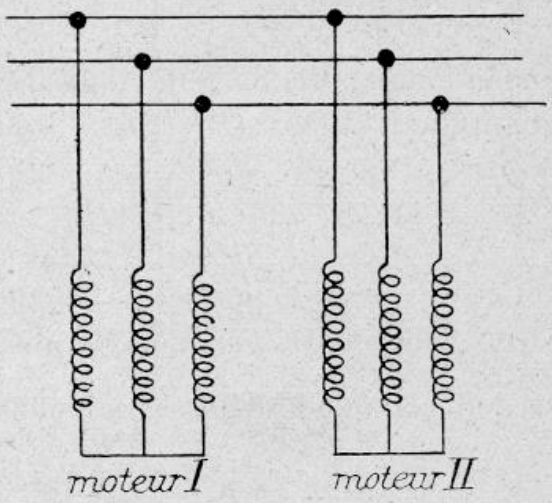


FIG. 125.

Montage parallèle.

Or, suivant une remarque déjà faite à propos de l'étude du démarrage : *l'insertion d'une résistance r' en série avec l'induit produit un glissement proportionnel à la résistance totale du circuit induit*, ce qui se traduit par la formule connue

$$\frac{g'}{g} = \frac{r' + r}{r} \qquad (4)$$

dans laquelle g est le glissement pour le moteur sans résistance additionnelle et g' le glissement pour le moteur avec la résistance additionnelle r'; la résistance de l'induit étant r.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On pourra donc, pour toute valeur de l'effort moteur, réduire, sans changer cet effort la vitesse normale V dans un rapport quelconque $\frac{V'}{V}$, V' étant la nouvelle vitesse, en ajoutant simplement à l'induit une résistance r' telle que l'on ait, ω et ω' étant les vitesses angulaires de l'induit :

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{1-g'}{1-g} = \frac{V'}{V} \tag{5}$$

ce qui donne, toutes réductions faites, en éliminant g' entre les deux équations (4) et (5)

$$r' = r\left(\frac{1-g'}{g}\right) = \left(1 - \frac{V'}{V}\right).$$

Cette expression permet de calculer très aisément les rhéostats à employer. On prendra, par exemple, dans un cas simple, trois touches choisies de façon que les vitesses soient successivement $\frac{V}{4}$, $\frac{V}{2}$ et $\frac{3}{4}$ V et l'on admettra pour valeur de g celle qui correspond au régime moyen sans rhéostat.

Ce procédé de régulation est simple et commode et il permet d'agir très progressivement sur la vitesse, mais il est peu économique à cause de l'énergie consumée en pure perte dans le rhéostat r'. C'est exactement la même critique que pour le contrôle rhéostatique appliqué aux moteurs courant continu.

D'autre part, la vitesse décroît quand le glissement augmente. Or, pour un couple donné, la puissance absorbée par le moteur reste la même, le rendement est donc diminué dans le même rapport que la vitesse. L'énergie perdue est d'autant plus grande que la vitesse est plus réduite ou le glissement plus grand.

L'emploi de cette méthode n'est vraiment théoriquement justifié qu'aux démarrages et, exceptionnellement, lors de la nécessité absolue d'un ralentissement momentané.

On peut comparer cette méthode à celle de la régulation d'un moteur shunt (dont le moteur asynchrone a d'ailleurs la même caractéristique de vitesse) par intercalation de résistances dans le circuit de l'induit.

Le rôle de la résistance est différent ici de celui qu'elle a dans un moteur à courant continu, car ainsi que nous l'avons vu, la caractéristique-vitesse du moteur triphasé ne présente une marche stable que dans des limites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de vitesses assez rapprochées. En intercalant une résistance dans le circuit du rotor, on augmente le glissement et la zône de stabilité est ainsi augmentée, ce qui apparaît nettement sur la figure 126 sur laquelle nous avons tracé les courbes du couple avec des résistances R_1 et R_2 ($R_2 > R_1$). On voit en outre que le couple de démarrage est très augmenté, ce qui est avantageux. Pour l'application de la méthode, un rhéostat triphasé est d'abord mis en circuit avec le rotor (fig. 127), le courant est alors fermé sur le stator; puis on diminue progressivement la résistance jusqu'au court-circuit. La manœuvre du rhéostat est la plupart du temps obtenue au moyen d'une transmission funiculaire à partir des plates-formes (Burgdorf-Thoune, Lugano), afin d'éviter des câbleries électriques compliquées. Comme applications de cette méthode nous citerons celles réalisées par la Compagnie Brown-Boveri aux tramways

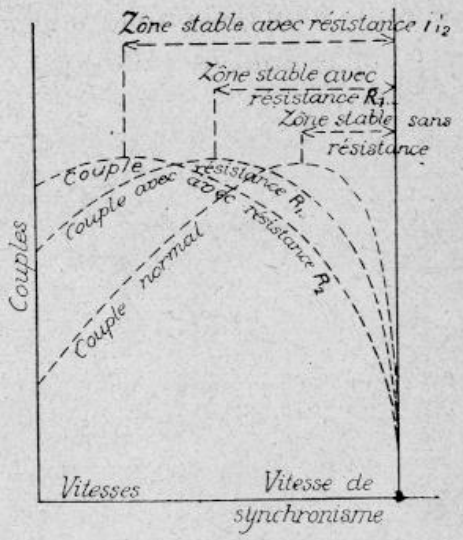


FIG. 126.

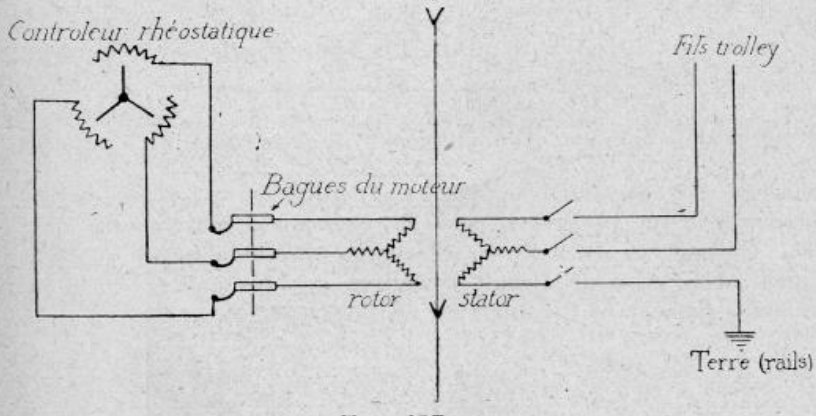


FIG. 127.

de Lugano (1896) et au chemin de fer de Burgdorf-Thoune (1899), par la société Ganz aux premières locomotives de la Valteline (1901) (1), à

(1) En même temps que ces locomotives, la Société Ganz mettait en service des automotrices à bogies à 4 moteurs, mais pour lesquelles eu égard aux démarrages fréquents et rapides du service qu'elles avaient à assurer, la méthode du couplage en cascade que nous étudierons plus loin a été adoptée. Le mode de montage de leurs moteurs était toutefois le même que pour les locomotives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4 moteurs de 150 chevaux à attaque directe (emploi d'un arbre creux ainsi que nous le verrons plus loin § 96) et plus récemment (1909) par la General Electric aux locomotives du Great Northern qui fonctionnent généralement accouplées par deux ou trois. Dans ces applications, les résistances sont métalliques.

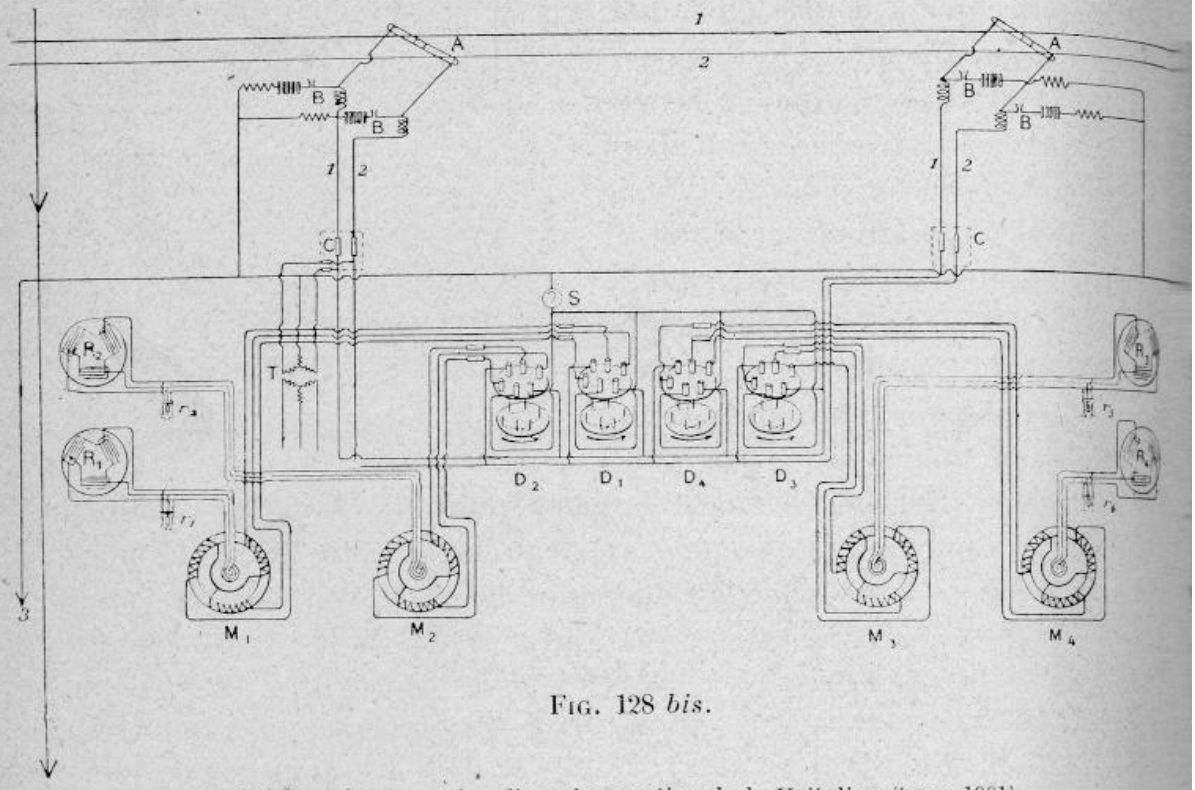


FIG. 128 *bis*.

Schéma de connexion d'une locomotive de la Valteline (type 1901)

A, prise de courant. — B, parafoudres. — C, point de distribution à 3.000 volts. — D_1,D_2,D_3,D_4, appareil interrupteur et inverseur pour la commande individuelle des 4 moteurs. — M_1,M_2,M_3,M_4, moteurs. — R_1,R_2,R_3,R_4, résistances individuelles de réglage. — r_1, r_2, r_3, r_4, appareils pour mise en court-circuit définitive des résistances. — S, ampèremètre. — T, transformateur alimentant les appareils accessoires.

Nous donnons à titre d'exemple en planches hors texte les schémas des connexions générales des locomotives de Burgdorf-Thoune (fig. 128) et des locomotives de la Valteline ci-dessus (fig. 128 *bis*).

2° *Modification du nombre de pôles des moteurs.* — On sait que la vitesse du synchronisme d'un moteur asynchrone est en t/m.

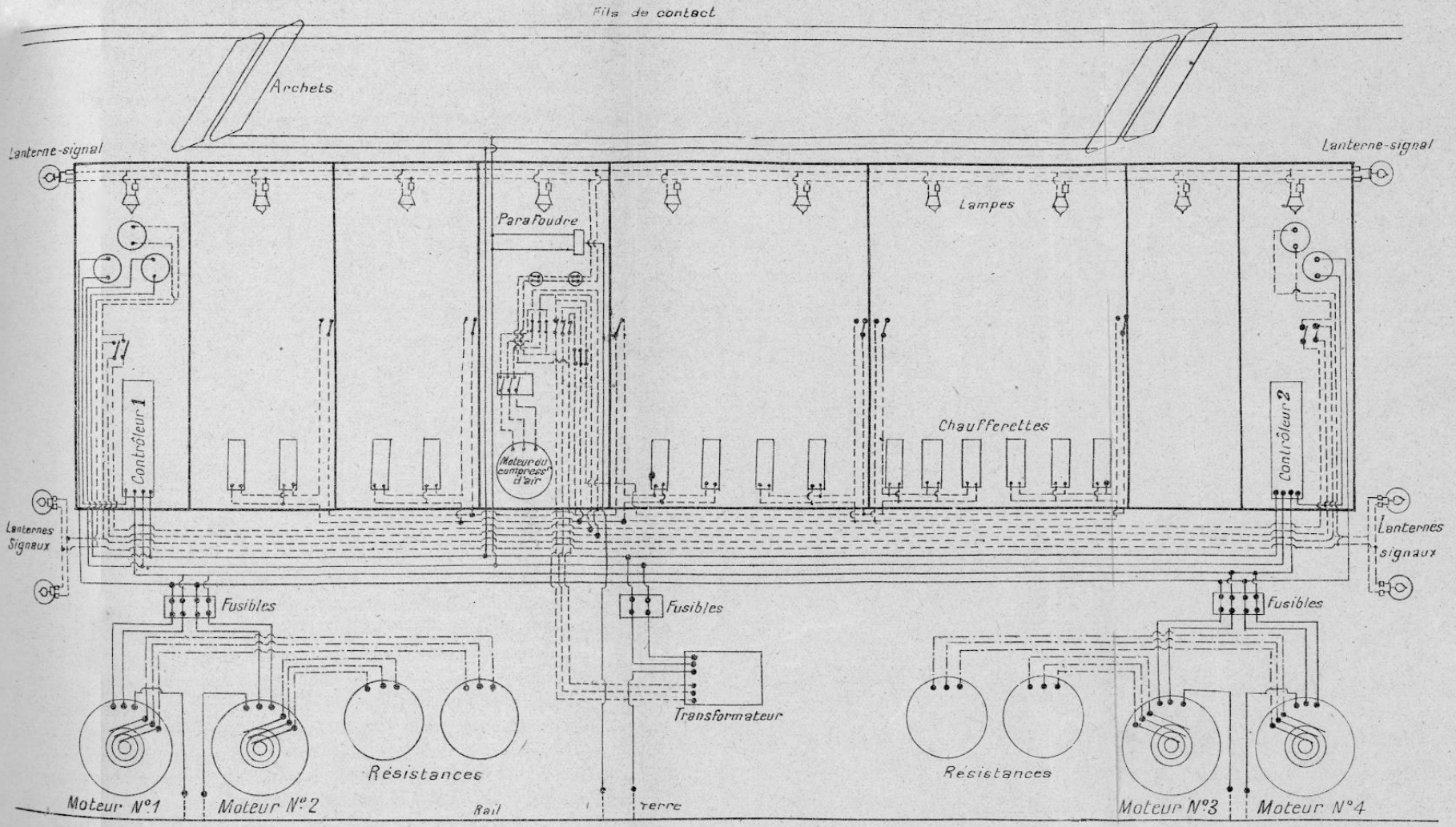
$$n = 60\,\frac{f}{p}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 128 .. Traction electrique par courants triphasés

LIGNE BURGDORF-THOUNE

Schéma des connexions d'une locomotive



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si donc, par un moyen quelconque réalisant un changement de connexions sur le primaire, on diminue de moitié le nombre de pôles, la vitesse sera doublée. De là le moyen d'avoir deux vitesses économiques et, en complétant le système par des résistances appropriées dans le circuit du secondaire, on aura un mode de réglage de la vitesse, très comparable comme effet au système série-parallèle pour le courant continu.

C'est ce qui a été réalisé sur les premières locomotives (type 1906) du Simplon à 2 moteurs de 575 chevaux et qui ont deux vitesses de régime

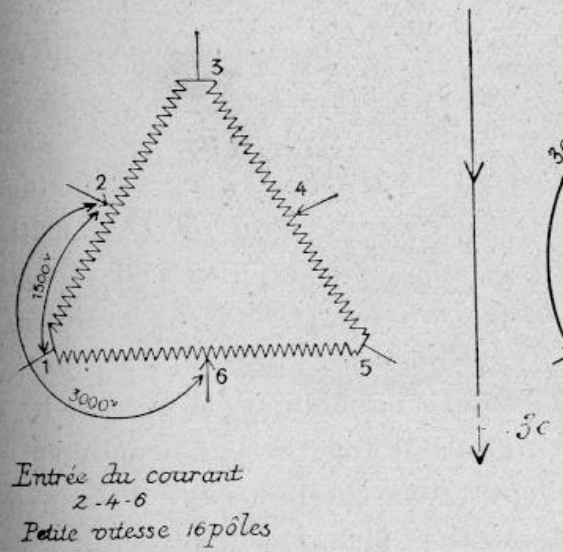


FIG. 129.

(Entrées du courant 2-4-6)
petite vitesse : 16 pôles.

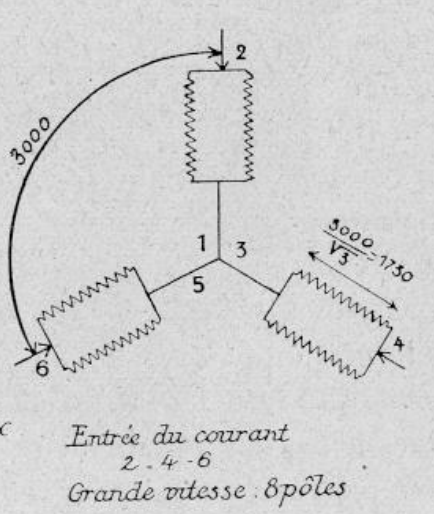


FIG. 130.

(Entrées du courant 2-4-6)
grande vitesse : 8 pôles.

(35 et 70 kilomètres-heure environ) correspondant à des modifications de couplage des enroulements des primaires des moteurs donnant respectivement 16 et 8 pôles. En outre, les rotors de ces moteurs sont bobinés et à bagues permettant l'emploi de résistances.

En fait, la réalisation de ce procédé entraîne quelques complications. En effet, il est facile de combiner le stator pour permettre le changement du nombre de pôles. A cet effet, il suffit, comme cela a été réalisé au Simplon, de le munir de 6 bornes auxquelles aboutissent les points 1. 2. 3. 4. 5. 6 de l'enroulement (fig. 129 et 130) que l'on peut alors, au moyen d'un commutateur approprié, connecter soit en triangle pour la petite vitesse correspondant à 16 pôles, soit en étoile pour la grande vitesse correspondant à 8 pôles. Dans ce dernier couplage, l'étoile est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

formée de deux faisceaux parallèles, ce qui permet d'utiliser dans les deux vitesses tout le cuivre du stator.

Il est toutefois plus compliqué de réaliser des rotors bobinés dont les connexions ne peuvent changer et doivent se prêter néanmoins au changement de position de pôles qui y sont induits. Il y a là une difficulté qui a été résolue sur les moteurs des locomotives en question en employant des rotors à deux enroulements triphasés ordinaires aboutissant chacun à un jeu de 3 bagues. De cette façon, lors de la commutation du nombre de pôles au stator, la disposition des champs ne demande aucune modification des enroulements. Les deux jeux de bagues sont disposés à raison de un jeu de chaque côté du rotor. Cette disposition nécessite évidemment deux jeux de résistances.

On voit ainsi que pour la réalisation de deux vitesses économiques, le rotor est déjà compliqué ; c'est ce qui fait qu'avec ce type de moteur à rotor bobiné, on est pratiquement limité dans l'application de la méthode, à deux vitesses de régime ce qui peut être insuffisant pour l'exploitation.

Les difficultés rencontrées ainsi dans l'application de cette méthode et la limitation pratique du nombre possible de vitesses de régime à deux, ont conduit la Société Brown-Boveri à abandonner par la suite les rotors bobinés à bagues et en même temps le réglage peu économique de la vitesse par résistances, pour adopter des rotors à cage d'écureuil pour lesquels la limitation précédente n'existe plus, car de tels moteurs fonctionnent évidemment avec *un nombre quelconque de pôles*. C'est effectivement avec de tels moteurs que sont équipées les locomotives du Simplon type 1908, qui sont à 2 moteurs. Les conducteurs des rotors sont constitués par des tubes en cuivre disposés pour permettre la circulation de l'air, ce qui assure ainsi un refroidissement énergique des rotors.

Les photographies (figures 131 et 132) montrent respectivement un des moteurs de ces locomotives et son rotor séparé.

En plus, afin d'augmenter le nombre des vitesses de régime, on a muni chacun des deux stators de deux enroulements distincts, ce qui a permis de réaliser 4 vitesses de régime.

A cet effet, le premier bobinage des stators donne 12 et 6 pôles pour chaque moteur. On a choisi ces nombres de pôles afin d'obtenir les mêmes vitesses, soit respectivement 35 et 70 kilomètres à l'heure, qu'avec les premières locomotives (type 1906) qui n'avaient que ces deux vitesses de régime afin que les machines des deux séries puissent être accouplées.

Le second bobinage des stators donne pour chaque moteur 16 et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

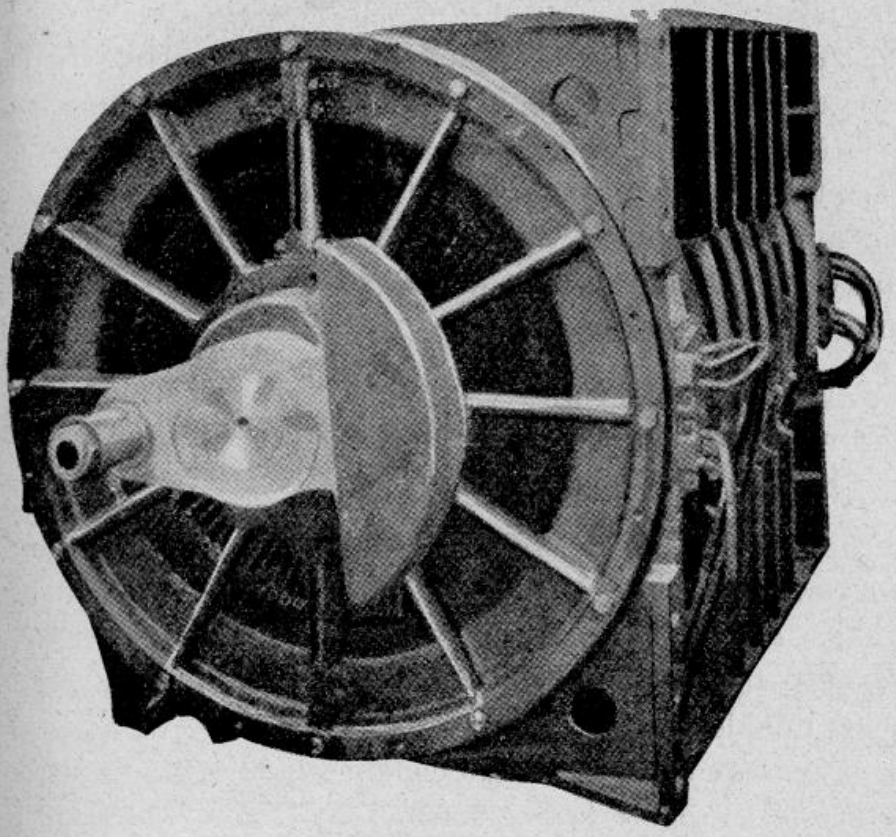


FIG. 131.

Ensemble d'un moteur triphasé. — Locomotive du Simplon (1908).

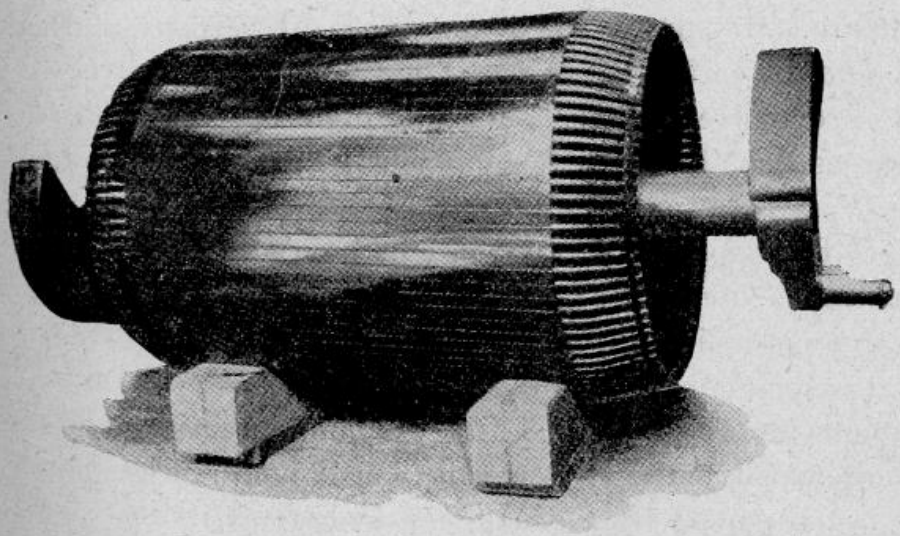


FIG. 132.

Rotor d'un moteur triphasé. — Locomotive du Simplon (1908).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8 pôles correspondant respectivement aux vitesses 26 et 52 kilomètres à l'heure.

Enfin les connexions sont établies en triangle pour 16 et 12 pôles (faibles vitesses) et en étoile pour 8 et 6 pôles (grandes vitesses).

Le système fonctionne en réalité comme s'il comprenait un double équipement à 4 moteurs ayant respectivement 16, 12, 8 et 6 pôles.

Les combinaisons obtenues et les puissances primaires correspondantes développées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Nombre de pôles	16	12	8	6
Vitesse en kilomètres à l'heure	26	35	52	70
Puissance unihoraire des moteurs en chevaux	550	650	750	850
Puissance totale en chevaux	1.100	1.300	1.500	1.700

Avec de tels moteurs à cage d'écureuil, le démarrage ne peut évidemment pas être réalisé sur résistances : il est obtenu uniquement par variation de la tension appliquée. En outre, pendant cette période, les deux enroulements statoriques peuvent être mis en parallèle, ce qui permet de réaliser des couples moteurs très élevés.

Pour le réglage de la tension, à chaque stator est adjoint un double transformateur à rapport de transformation variable, réduisant la tension et la graduant par crans progressifs jusqu'à sa valeur maximum qui doit avoir lieu pendant les démarrages. Ces transformateurs reçoivent le courant à 3.000 volts par l'intermédiaire de coupe-circuit pour les deux phases aériennes et d'un transformateur d'intensité pour la phase connectée aux rails. Ils sont munis de dix prises qui permettent d'augmenter la tension de 200 en 200 volts à partir de 1.000 volts qui est la valeur sous laquelle on démarre jusqu'à la tension totale de 3.000. Les résistances sont insérées dans le circuit au moment du passage d'une tension à la suivante.

Avec cette disposition on peut obtenir un réglage très parfait de la vitesse entre les vitesses de régime proprement dites : on utilise pour cela les deux moteurs qui, pour une vitesse donnée, n'ont pas le même glissement.

Pratiquement, on opère ainsi : les « commutateurs de pôles » étant sur la combinaison petite vitesse, soit 16 et 12 pôles, et la manette de réglage de la tension des transformateurs sur la touche 1.000 volts, le mécanicien fait progressivement augmenter la tension jusqu'à 3.000 volts. Il supprime ensuite les enroulements à 16 pôles, ne laissant en circuit que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la combinaison 12 pôles, correspondant à la vitesse de 35 kilomètres à l'heure.

Pour obtenir une vitesse supérieure, le mécanicien réduit le voltage aux transformateurs, puis branche les enroulements à 8 pôles en laissant ceux à 12, ramène le voltage à 3.000 et finit par mettre hors circuit les enroulements à 12 pôles, et ainsi de suite de façon à n'avoir plus à la fin que les enroulements à 6 pôles, correspondant à la vitesse maximum de 70 kilomètres à l'heure.

Ancienne locomotive (1906). Deux vitesses 36-72 Km/h.

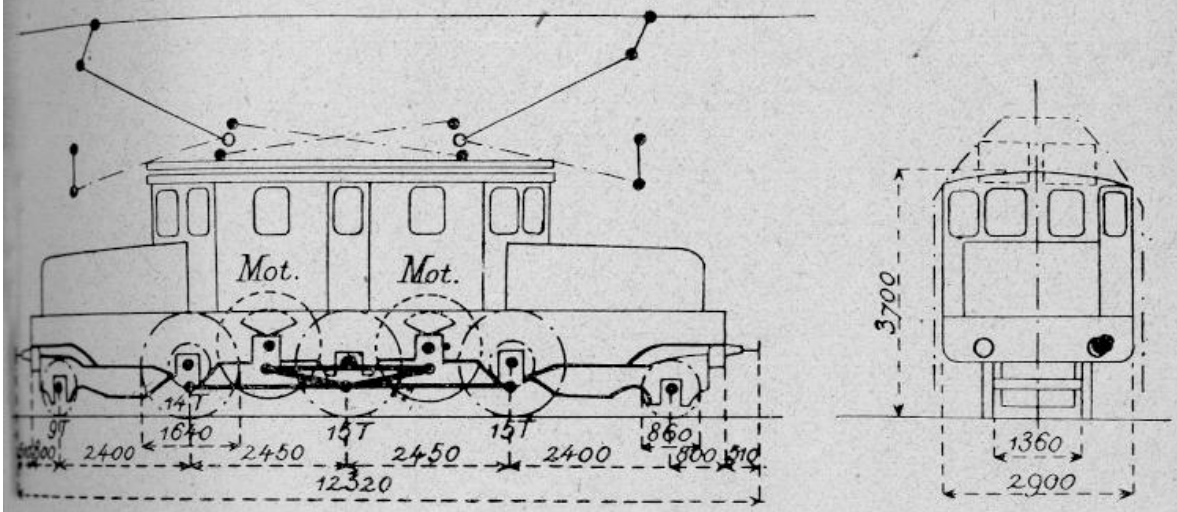


FIG. 133.

Locomotive du Simplon. (Brown-Boveri).
Poids total : 62 tonnes. Puissance normale : 1.150 chevaux. Effort au crochet à la vitesse de 72 Km/h. 3.500 kgs.

Les locomotives du Simplon, anciennes et nouvelles, sont ainsi que nous l'avons vu, à 2 moteurs ; elles pèsent respectivement 62 et 68 tonnes ce qui correspond à des puissances spécifiques très élevées, soit 20 et 25 chevaux.

Les moteurs transmettent leur couple au moyen de bielles et manivelles. Les premières étaient du type 1-C-1 à 3 essieux moteurs couplés et 2 essieux porteurs, les secondes sont du type 0-D-0 à 4 essieux moteurs couplés et adhérence totale.

Les figures 133 et 134 représentent respectivement les deux locomotives en question et nous donnons en planche hors texte, figures 135 et 136 les schémas de leurs connexions sur lequel on voit que leur équipe-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment est divisé en deux groupes identiques et symétriques, chacun comprenant un moteur avec son transformateur et tous les appareils de commande, de contrôle et de sécurité correspondants. En cas d'avarie à un groupe, on peut continuer le service en utilisant seulement l'autre.

Ce genre d'équipement est tout spécialement à signaler par sa robustesse.

Cette méthode de réglage de la vitesse par modification du nombre de pôles a été appliquée plus récemment aux locomotives mono-triphasées à convertisseur de phase du Norfolk et Western Ry que nous étudierons plus loin avec quelques détails.

Nouvelle locomotive (1906). Deux vitesses 36-72 Km/h.

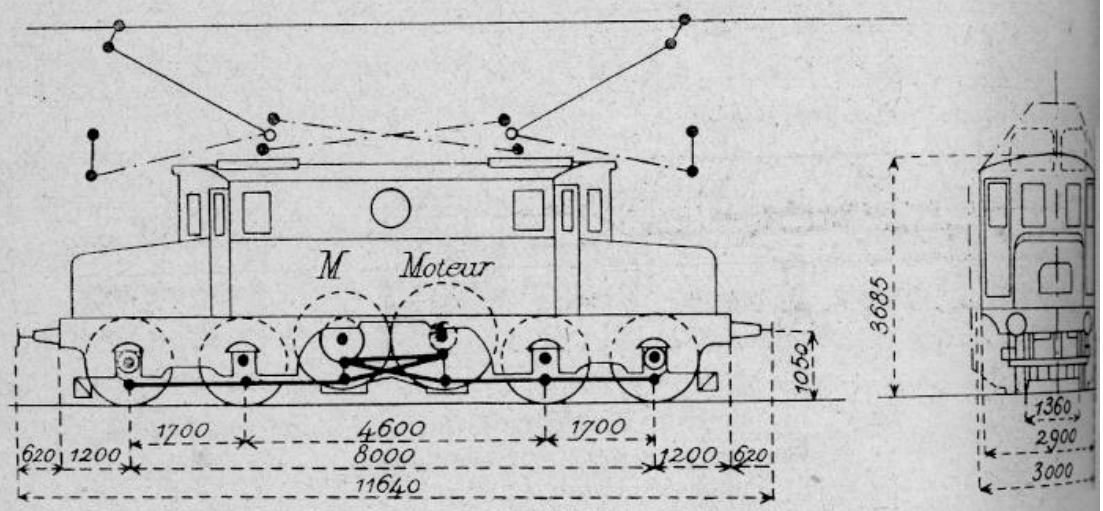


FIG. 134.

Locomotive du Simplon. (Brown-Boveri).
Poids total : 68 tonnes. Puissance normale 1.700 chevaux. Effort au crochet à la vitesse de 72 Km/h 4.800 kgs.

3° *Groupement en cascade ou tandem.* — C'est le correspondant du *groupement série parallèle* des moteurs série courant continu.

Cette méthode a été introduite en Europe par M. Georges, de la maison Siemens et Halske, et en Amérique par Steinmetz, de la General Electric Co. Elle permet, avec deux moteurs, la réalisation de *deux vitesses économiques de marche*, l'une étant sensiblement la moitié de l'autre.

La première application de cette méthode semble avoir été faite par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

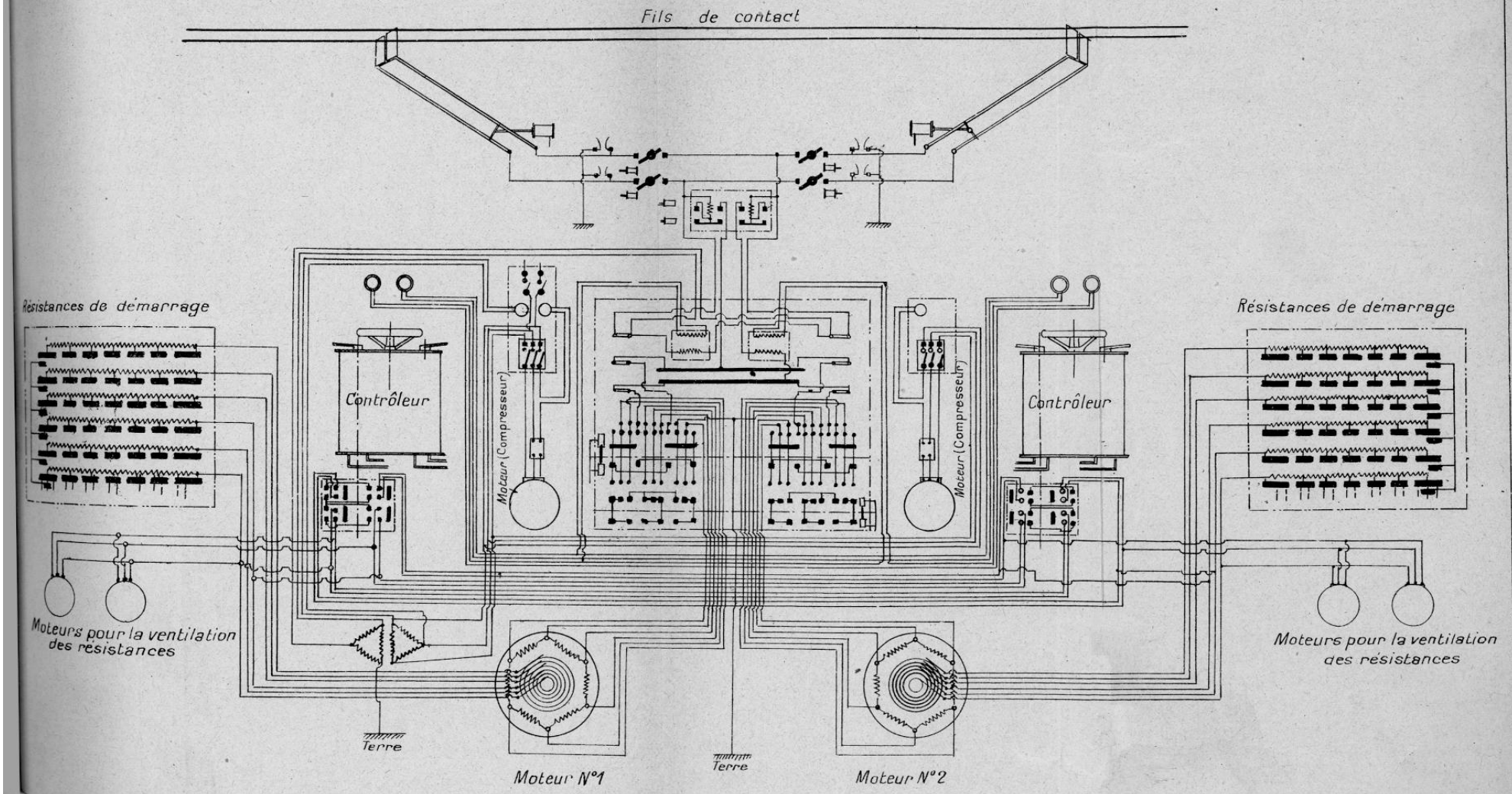
Fig 135 Traction électrique par courants triphasés

"LOCOMOTIVE DU SIMPLON" premier type BROWN-BOVERI. 1906.

Réglage de la vitesse par changement du nombre de poles et rhéostats

Locomotives à 2 vitesses

Schéma des connexions



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Locomotive triphasée à 4 vitesses du Simplon. (Deuxième type) Brown-Boveri (1908).
Réglage de la vitesse par seul changement du nombre de pôles dans chaque moteur.

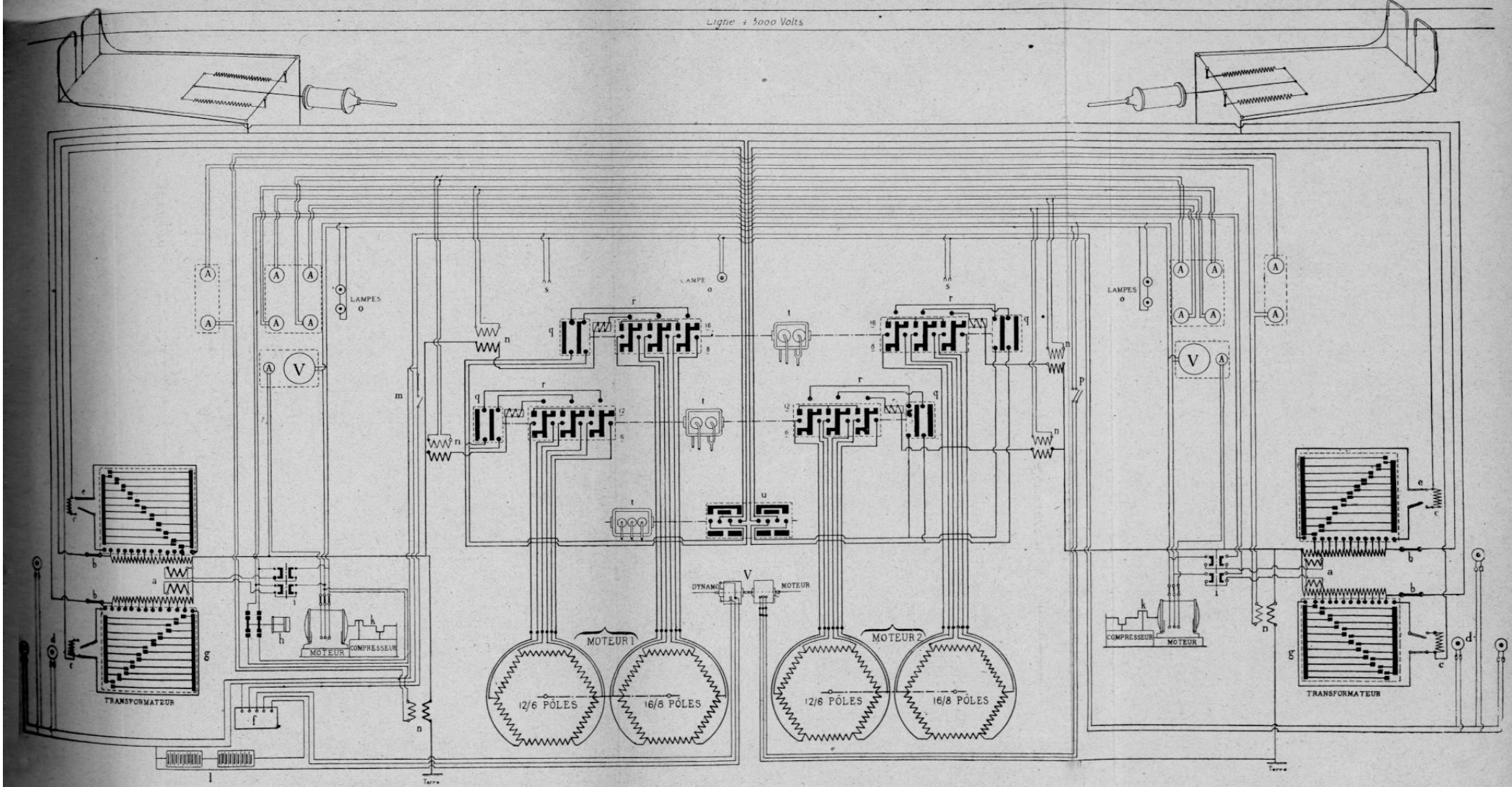


FIG. 136. — Schéma général des connexions de l'équipement électrique.

LÉGENDE

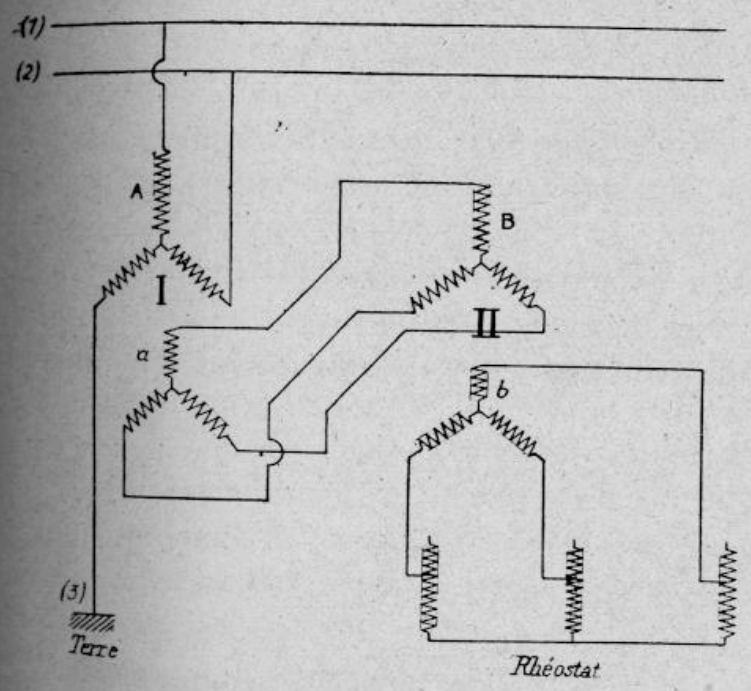
a, transformateur du compresseur et de l'éclairage;
b, fusibles;
c, résistances;
d, lampes des signaux;
e, souffleurs magnétiques;
f, régulateur automatique pour l'éclairage;
g, contrôleurs des transformateurs principaux;
h, régulateur automatique de pression de l'air;
i, commutateurs des compresseurs;
k, compresseurs automoteurs;
l, batterie-tampon;
m, interrupteur d'éclairage;
n, inverseurs;
o, lampes;
p, interrupteur du moteur d'éclairage;
q, disjoncteurs haute tension;
r, commutateurs du nombre de pôles des moteurs de traction
s, prises de contact pour lampes mobiles;
t, appareils de commande à air comprimé;
u, inverseur du sens de marche;
v, moteur d'éclairage;
A, ampèremètres;
V, voltmètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la Société Ganz à des automotrices des lignes de la Valteline (1901).

Le principe de la méthode est le suivant :

Soient (fig. 137) deux moteurs triphasés I et II semblables à $2p$ pôles chacun ; le primaire B du second est alimenté par les courants induits



A, a primaire et secondaire du premier moteur.

B, b primaire et secondaire du second moteur.

FIG. 137.

Montage en cascade de deux moteurs.

dans le secondaire (a) du premier dont le primaire A est seul relié au réseau (phases 1. 2. 3.). Les deux moteurs sont en outre *assujettis mécaniquement à tourner à la même vitesse*.

Le secondaire (b) du second moteur est, en général, fermé sur un rhéostat réglable.

Soit g le glissement de l'induit "a" dans son champ A, ω_1 la pulsation des courants inducteurs. La vitesse angulaire du champ inducteur A dans l'espace est

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p}$$

et la vitesse ω du premier moteur est :

$$\omega = (1 - g)\frac{\omega_1}{p}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La pulsation des courants qui se développent dans l'induit a et qui arrivent dans B en y jouant le rôle de courants inducteurs est :

$$\omega_1 - p\omega = g\omega_1 .$$

Par suite, le champ de B tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire

$$\omega_1' = \frac{g\omega_1}{p}$$

et si g' est le glissement du second moteur, sa vitesse sera évidemment

$$\omega' = (1 - g') \times \left(\frac{g\omega_1}{p}\right).$$

Mais les deux moteurs sont assujettis mécaniquement à tourner à la même vitesse, donc

$$\omega = \omega',$$

c'est-à-dire

$$(1 - g)\frac{\omega_1}{p} = (1 - g')\frac{g\omega_1}{p},$$

d'où

$$g = \frac{1}{2 - g'} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{g'}{2}},$$

et, comme g' ne dépasse pas ordinairement 4 à 5 p. 100, g est sensiblement égal à 1/2, c'est-à-dire que les *deux moteurs tournent sensiblement à demi-vitesse*. D'autre part, pour $g = 1/2$, on a $g' = o$, donc l'induit b tournera synchroniquement avec son champ et le courant induit en b sera nul; il en sera de même du courant que a fournit à B ; le mouvement de rotation cessera et il ne passera plus en A que le courant correspondant aux pertes par hystérésis et courants de Foucault.

On voit en outre que la *fréquence des courants induits* dans le secondaire du moteur I et qui alimentent le primaire du moteur II *est la moitié de celle des courants du réseau*, puisque leur pulsation est :

$$g\omega_1 = \frac{1}{2}\omega_1.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi, *quand deux moteurs d'induction sont couplés en cascade et que leurs induits sont assujettis mécaniquement à tourner à la même vitesse, la vitesse de synchronisme du système correspond à la moitié de la vitesse du champ fourni par le réseau.*

Cette disposition permet donc de réduire de moitié la vitesse normale des moteurs sans nuire au rendement et le résultat est bien le même que celui que l'on obtient par le montage en série de deux moteurs à courant continu excités en série sur une distribution à potentiel constant.

Pour appliquer utilement cette méthode de montage en cascade, il faut naturellement que la charge soit également partagée entre les deux moteurs et faire en sorte, à cet effet, que leurs flux inducteurs restent égaux; on obtiendra sensiblement ce résultat en réduisant la *f. é. m.* aux bornes du second moteur proportionnellement à la fréquence, c'est-à-dire en la faisant égale à la moitié de la tension du réseau. Les enroulements induits du premier moteur devront donc être calculés en vue de donner cette *f. é. m.* à demi-vitesse. Donc, en négligeant les pertes dues à l'impédance du premier moteur, le rapport des nombres de tours des enroulements primaire et secondaire devra être égal à l'unité. Dans ces conditions, les couples déclassés par les deux moteurs seront sensiblement égaux.

Comme conséquence, on voit qu'avec le montage en cascade, on obtient dans l'ensemble un couple total et une puissance totale doubles pour un courant absorbé donné, ou une puissance absorbée donnée, car, si le second moteur n'existait pas, l'énergie qu'il utilise devrait être dissipée — en pure perte — dans des résistances mises en série dans le rotor du premier moteur pour obtenir la demi-vitesse du synchronisme.

Remarquons que lorsque les moteurs sont ainsi couplés, la perte du premier moteur n'est plus proportionnelle à son glissement g comme dans le cas du moteur ordinaire (§ 76 - 5^{e}), parce que l'énergie consommée sans son induit par glissement est utilisée presque entièrement pour actionner le second moteur.

En marche normale, les deux moteurs sont couplés en parallèle et pour réaliser la vitesse moitié au démarrage, ils sont montés en cascade. On complète le réglage de la vitesse par un rhéostat intercalé dans l'induit du second moteur.

Pratiquement, les connexions successives sont généralement réalisées comme suit (Ganz) (fig. 138) :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a) Le stator S_1 (inducteur) du premier moteur est directement relié à la ligne, les bagues de son rotor R_1 (induit) sont alors reliées au stator S_2 (inducteur) du second moteur dont le rotor R_2 (induit) est relié à une résistance non inductive (rhéostat à eau). Les moteurs démarrent alors avec un grand couple. Leur vitesse maxima reste inférieure à la moitié de celle d'un seul moteur connecté directement au réseau.

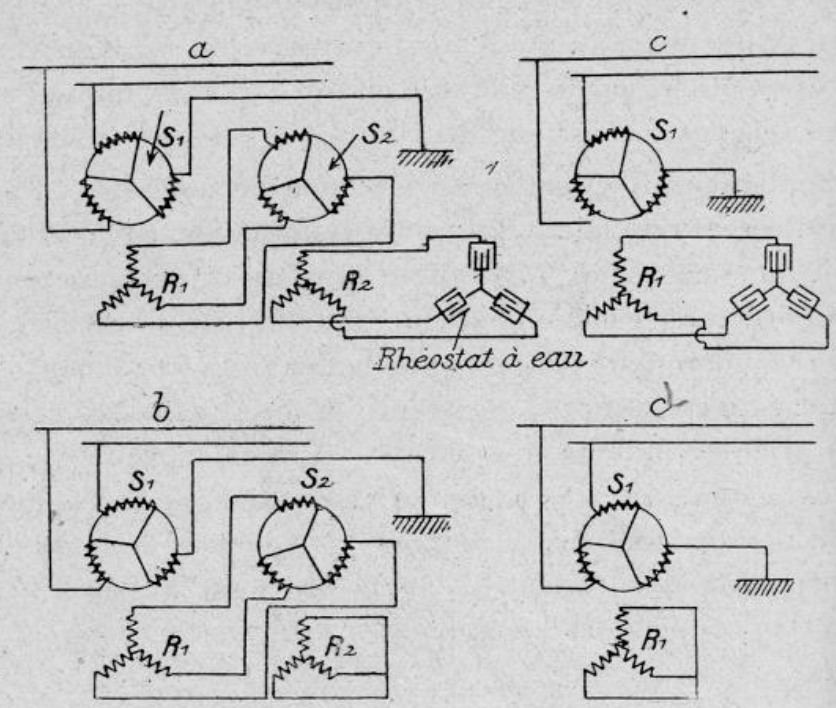


FIG. 138.

Connexions du système Ganz (Cascade).

b) On coupe progressivement les résistances sans toucher aux connexions des deux moteurs entre eux.

c) Le stator du premier moteur est alors relié au circuit des rails, mettant ainsi hors circuit le second moteur, les résistances étant mises en série avec le rotor du premier moteur.

d) Le premier moteur restant comme en (*c*), toutes les résistances sont progressivement supprimées.

L'application du contrôle pour le couplage en cascade exige au moins un groupe de deux moteurs.

S'il y a plus de deux moteurs, mais en nombre pair, ils seront employés par paires.

Il est à remarquer que la méthode est tout à fait générale et *n'exige nullement que les deux moteurs soient de la même puissance ou construction*. Dans ce cas, la vitesse de synchronisme de l'ensemble des deux mo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs non semblables, mais assujettis mécaniquement à tourner à la même vitesse, sera celle correspondant à la *somme des nombres de pôles des deux moteurs*.

Il est encore à remarquer que les connexions électriques entre les deux moteurs ne sont pas nécessairement réalisées comme nous l'avons supposé, à savoir : rotor ou secondaire du premier moteur alimentant le

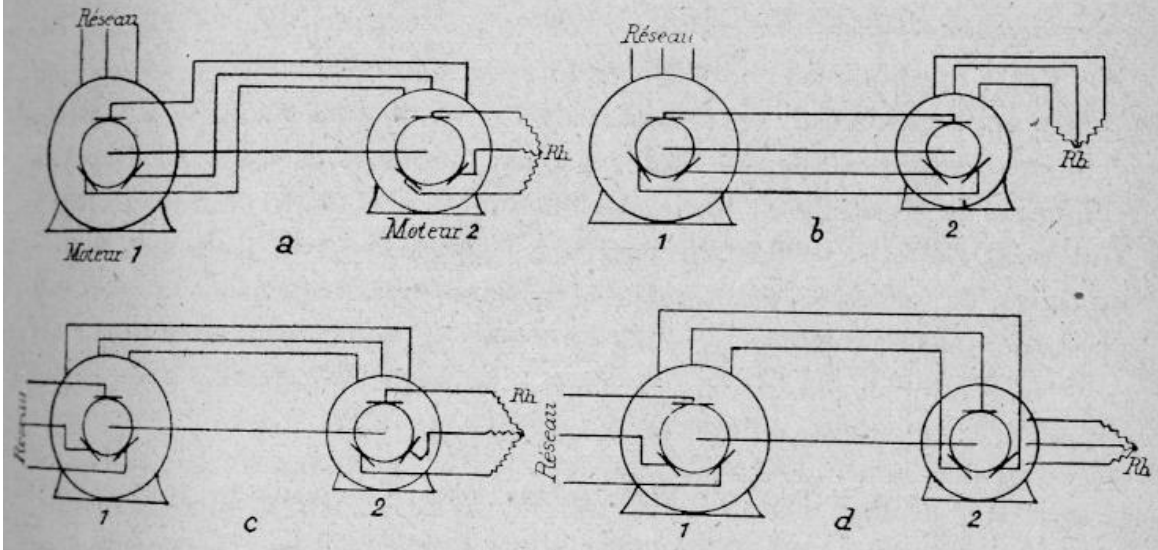


FIG. 139 à 142.

Différentes méthodes de couplage en cascade de deux moteurs triphasés.

stator du second moteur. La propriété précédente est en effet encore vraie pour les *trois autres* modes de connexions possibles et qui sont :

b) 1er moteur alimenté par son stator sur le réseau ;
2me moteur alimenté par son rotor par les courants induits dans le rotor du premier.

c) 1er moteur alimenté par son rotor sur le réseau ;
2me moteur alimenté par son stator par les courants induits dans le stator du premier.

d) 1er moteur alimenté par son rotor sur le réseau ;
2me moteur alimenté par son rotor par les courants induits dans le stator du premier.

Il y a par conséquent 4 modes de couplage électrique possibles.

D'ailleurs le système est réversible, c'est-à-dire qu'on peut interchanger les rôles des 2 moteurs, ce qui produit au total 8 modes de couplages possibles.

Nous donnons ci-dessus les schémas (fig. 139 à 142) des 4 premiers

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couplages. Le schéma " *a* " est celui généralement suivi, c'est, en particulier celui des figures 137 et 138.

Ainsi, quelle que soit la façon dont on relie le moteur 1 au moteur 2 et dont on alimente l'ensemble : la vitesse de synchronisme de l'ensemble des deux moteurs assujettis mécaniquement à tourner à la même vitesse est celle correspondant à un champ ayant la *somme du nombre des pôles des deux moteurs*.

Cette méthode du couplage des moteurs en cascade a reçu ses principales applications sur les automotrices et les locomotives de la Valteline construites par la Société Ganz, sur les locomotives du type Giovi des chemins de fer de l'Etat Italien [(lignes du Giovi (1910), de Savone (1914), du Mont-Cenis (1912-1915)] construites par la Société italienne Westinghouse, et sur les locomotives américaines monotriphasées à convertisseur de phases du Pennsylvania dont nous parlerons plus loin.

Nous allons examiner les caractéristiques principales de ces installations.

a) Aux automotrices de la Valteline (1901), le couplage des moteurs a été réalisé d'une façon assez particulière comme suit :

Ces automotrices sont à bogies et à 4 moteurs, et les deux moteurs de chaque bogie jouent un rôle différent. Un des essieux porte un moteur dit primaire de 150 chevaux, fonctionnant à haute tension (3.000 volts), et l'autre essieu porte un moteur dit secondaire de 75 chevaux, fonctionnant seulement en basse tension (300 volts, alimenté par le moteur primaire) ou restant inactif. Pour la marche à demi-vitesse, on groupe en cascade les deux moteurs de chaque bogie, et pour la marche à grande vitesse on met en circuit les moteurs primaires seuls. On voit ainsi que dans les deux cas, la puissance totale de l'automotrice est de 300 chevaux. Dans le montage en cascade, le rotor du moteur primaire alimente le stator du moteur secondaire et pour compléter le réglage de la vitesse, des résistances liquides sont insérées dans le circuit de l'induit des moteurs.

Les deux groupes de deux moteurs — correspondant aux deux bogies — fonctionnent simultanément de la même manière. Chaque groupe est sous la commande d'un contrôleur et les deux contrôleurs (un à chaque poste de commande), sont reliés mécaniquement par une chaîne. L'équipement électrique est en somme double.

La manette de chaque contrôleur n'a que trois positions : dans la première les moteurs sont hors circuit, dans la seconde ils sont couplés en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cascade et dans la troisième, les moteurs haute tension seuls sont maintenus en service, c'est-à-dire que le circuit secondaire à 300 volts est interrompu.

Les résistances sont à liquide et on fait varier leur résistance au-dessus du niveau du liquide par une admission d'air comprimé.

La figure 143 (1) donne le schéma des connexions de ces automotrices.

b) Dans les locomotives type 1903 (2) de la Valteline, la méthode de montage en cascade a été réalisée différemment comme suit :

Ces locomotives sont à deux moteurs de 450 chevaux à 8 pôles. Chaque moteur est en réalité double : la même carcasse contenant à la fois un moteur primaire et un moteur secondaire. Dans le premier l'inducteur est fixe et l'induit tourne; dans le second, l'inducteur est mobile et l'induit est fixe. Les enroulements des deux parties tournantes sont connectés ensemble d'une façon invariable, et leurs sorties communes sont reliées à trois bagues extérieures. Pour le démarrage et la marche à demi-vitesse, les moteurs primaire et secondaire d'une même carcasse sont connectés en cascade et des résistances variables (à liquide) sont insérées dans le circuit induit (fixe) du moteur secondaire. Pour la marche à grande vitesse, le moteur primaire travaille seul. Pour les vitesses de transition, on introduit des résistances variables dans le circuit de son induit (mobile) par l'intermédiaire des bagues.

La figure 143 *bis* en planche hors-texte représente le schéma des connexions de ces locomotives.

Ces locomotives, ainsi que les automotrices précédentes, sont établies pour deux vitesses, environ 32 et 64 kilomètres à l'heure.

On voit par ce qui précède que le montage adopté pour les automotrices correspond au schéma (*a*) des figures 139 à 142 et que celui adopté pour les locomotives correspond au schéma (*b*).

c) Pour les locomotives de la Valteline, mises en service en 1907, le réglage de la vitesse est plus complet et a lieu par une combinaison du montage en cascade avec l'utilisation de nombres de pôles différents aux moteurs.

Elles sont comme les précédentes à 2 moteurs, mais ces moteurs sont simples et bobinés l'un pour 8 pôles et l'autre pour 12 pôles. On peut ainsi

(1) Empruntée à l'*Industrie électrique* du 10 mai 1903.
(2) Les locomotives type 1901 étaient à contrôle rhéostatique, voir page 220.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 143.

Schéma de connexions d'une voiture motrice de la Valteline.

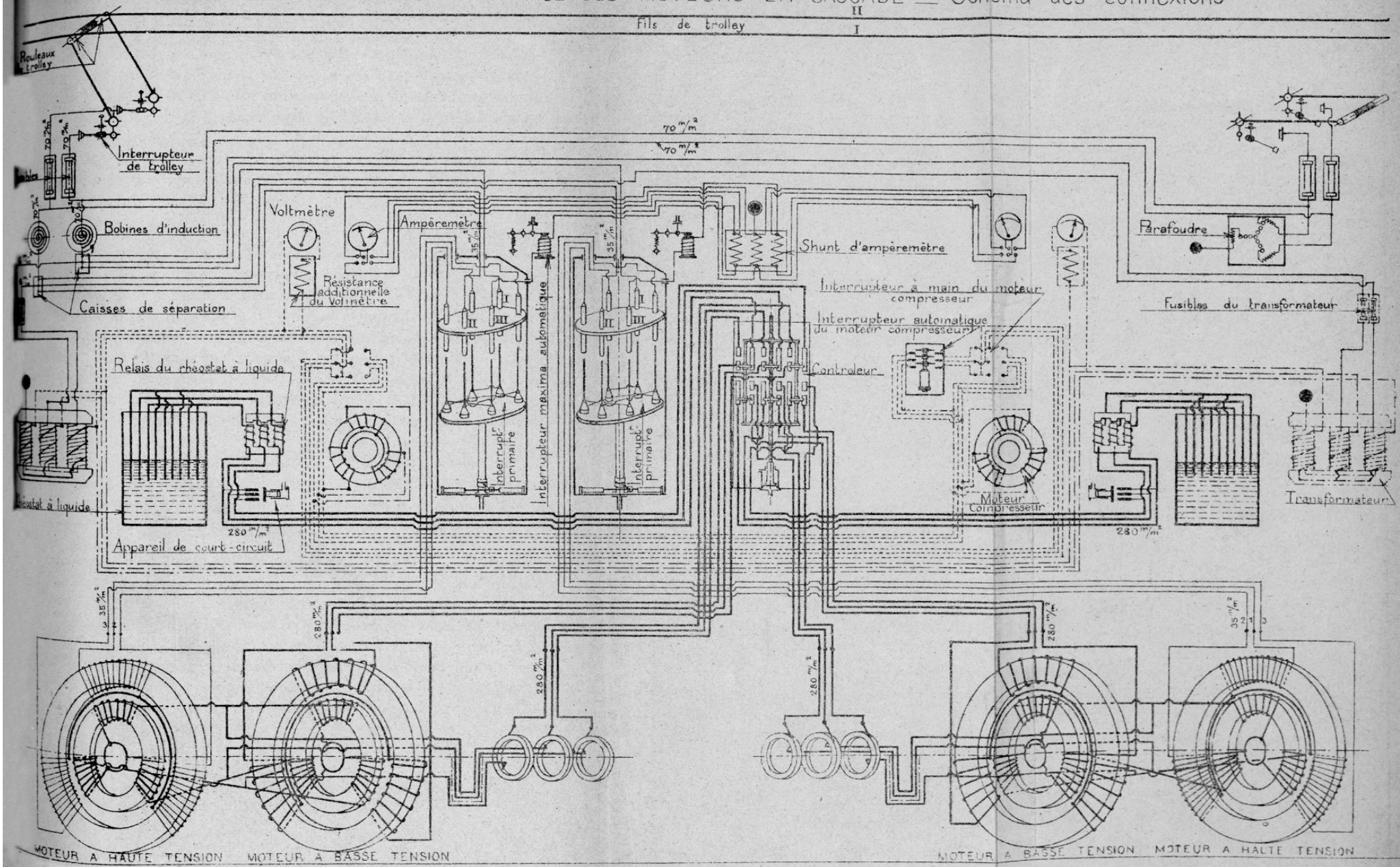
A, prise de courant. — B, parafoudres protégeant l'équipement. — C, régulateur de marche par couplage en cascade des moteurs primaires et secondaires ou seulement de ceux-là à 3.000 volts. — D, appareil interrupteur et inverseur à 3.000 volts. — K, appareil établissant le court-circuit sur le secondaire. — R, résistances liquides de réglage. — M_1, M_2, moteurs primaires à 3.000 volts. — M_1', M_2' moteurs secondaires. — T, transformateur alimentant moteurs et compresseurs, lampes et radiateurs. — V, appareil distribuant à la voiture le courant des trolleys, et comportant des plombs fusibles pour protéger l'équipement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig 143 bis

TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANTS TRIPHASÉS_LOCOMOTIVE DE LA "VALTELINE"

RÉGLAGE DE LA VITESSE PAR MISE DES MOTEURS EN CASCADE _ Schéma des connexions



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

obtenir 3 vitesses de régime : 25,5 42 et 64 kilomètres à l'heure en employant soit les deux moteurs en cascade, soit le moteur à 12 pôles, soit le moteur à 8 pôles seul. Pour la marche en cascade, réalisée suivant le schéma "*a*" des figures 139 à 142, on modifie le groupement des bobines du stator du moteur à 12 pôles, de façon à abaisser la tension (montage en étoile).

Les vitesses de transition sont obtenues, comme précédemment, au moyen de rhéostats liquides intercalés dans les circuits induits des deux moteurs par l'intermédiaire des bagues.

d) Enfin, pour les locomotives plus récentes du type Giovi des chemins de fer de l'Etat italien, et qui sont à deux moteurs de 1.000 chevaux, les moteurs sont simples et à 8 pôles. Leur couplage en cascade est réalisé suivant le schéma (*a*) des figures 139 à 142 où le stator du second moteur est alimenté par le rotor du premier moteur. Il y a deux vitesses de régime qui sont environ 25 et 50 kilomètres à l'heure. Pour la marche à grande vitesse, chacun des deux rotors est mis en communication avec un rhéostat de démarrage, et pour la marche à vitesse réduite le seul rotor du moteur secondaire est relié à son rhéostat. Les rhéostats sont comme précédemment à liquide avec emploi d'air comprimé pour faire varier le niveau.

Un régulateur à puissance constante est en outre inséré dans ce rhéostat, ce qui en rend la manœuvre automatique en maintenant la puissance constante (1) quelle que soit la variation de la tension d'alimentation entre 2.700 et 3.700 volts.

Cascade triple Ganz. — Pour un service suburbain, *plus de deux vitesses économiques sont nécessaires.* Aussi la Compagnie Ganz a proposé d'employer trois moteurs (*cascade triple*) au lieu de deux pour un groupe. Ces trois moteurs, construits sous la forme d'un *moteur triple*, consistent en un moteur principal à 4 pôles et deux moteurs auxiliaires, un à 6 pôles et un à 2 pôles. Avec une telle disposition, quatre combinaisons sont possibles du moteur principal et des deux auxiliaires donnant *quatre vitesses économiques* correspondant respectivement aux groupements, vitesses et puissances suivantes :

---

(1) Dans les premières locomotives, le régulateur fonctionnait pour maintenir constante l'intensité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	NOMBRE DE pôles utilisés	VITESSE DE synchronisme n'_0	VITESSES EN Km/h.	PUISSANCES EN chevaux
1) Moteur principal et les deux moteurs auxiliaires	4 + 6 + 2 = 12	300 t/m.	19	200
2) Moteur principal et le moteur auxiliaire à 6 pôles.....	4 + 6 = 10	360	23	260
3) Moteur principal et le moteur auxiliaire à 2 pôles.....	4 + 2 = 6	600	38	300
4) Moteur principal seul...	4	900	57	350

Pour la première vitesse économique, le rotor du moteur principal est connecté au stator du premier moteur auxiliaire dont le rotor est connecté au stator du second moteur auxiliaire, dont enfin le rotor est connecté à un rhéostat à eau à résistance réglable qui, lorsqu'elle est supprimée, donne cette première vitesse de régime.

Pour la seconde vitesse économique, le second moteur auxiliaire est mis hors circuit et le rotor du premier moteur auxiliaire est relié au rhéostat à eau réglable.

Pour la troisième vitesse économique, le second moteur auxiliaire est substitué au premier du montage précédent.

Enfin, pour la quatrième et dernière vitesse économique, il ne subsiste que le moteur principal.

Il faut noter que, dans cette méthode de cascade triple, chaque locomotive sera, en principe, équipée avec trois moteurs, chacun entraînant un essieu.

4° *Régulation de la vitesse par combinaison de la modification du nombre de pôles et du groupement en cascade.* — Nous avons vu que pour les locomotives de la Valteline type 1907, on utilisait pour la régulation de la vitesse le montage en cascade, et qu'en même temps les deux moteurs étaient à nombres de pôles différents, mais invariables, ce qui donnait 3 vitesses de régime.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le but d'obtenir un réglage plus complet en vue de réaliser 4 vitesses de régime, la Société Brown-Boveri a combiné pour une nouvelle locomotive du Simplon (type 1915) et pour les locomotives de l'Etat italien (type 1915-1916), un système de régulation par couplage des moteurs en cascade et modification du nombre de pôles.

La locomotive du Simplon ci-dessus destinée à un service de voyageurs et de marchandises est à 4 essieux moteurs et 1 essieu porteur à chaque extrémité (type I-D-I) et à 2 moteurs à rotors bobinés de 1.400 chevaux avec accouplement par bielles et manivelles. Son poids est de 86 tonnes dont 68 adhérentes. Son aspect très différent des autres locomotives du Simplon est donné sur planche spéciale hors-texte. Son équipement électrique et son fonctionnement sont analogues à celui des locomotives italiennes Brown-Boveri que nous allons examiner avec quelques détails.

Locomotives à grande vitesse des chemins de fer de l'Etat italien. — Ces dernières locomotives, dont 18 ont été commandées et dont les premières unités ont d'abord été mises en service sur la ligne Milan-Lecco sont à 3 essieux moteurs et 2 essieux porteurs à chaque extrémité (type 2-C-2) et à 2 moteurs à rotors bobinés de 1.400 chevaux avec accouplement par bielles et manivelles. Leur poids est de 92 tonnes dont 50 adhérentes. Leur aspect est également donné sur planche spéciale hors-texte. Leur fonctionnement est le suivant (1) :

Le moteur primaire reçoit par son stator le courant de ligne (3.000/3.700 volts) et le moteur secondaire est alimenté par son stator de la ligne dans le montage en parallèle (pleine vitesse), tandis qu'il est alimenté par son rotor du moteur primaire dans le montage en cascade (faibles vitesses). Il y a ainsi dans le cas actuel application du schéma (*b*) des figures 139 à 142.

En outre, les moteurs fonctionnent soit à 8 pôles soit à 6 pôles, aussi bien dans le montage en cascade que dans le montage en parallèle, d'où deux vitesses de régime pour chacun de ces couplages et finalement quatre vitesses de régime au total.

Les résistances de démarrages sont groupées en étoile dans le montage en cascade à 8 ou à 6 pôles, et sont seulement branchées aux bornes du stator du moteur secondaire.

(1) Nous renvoyons le lecteur pour plus de détails à la *Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiana*, du 15 novembre 1916, d'où nous avons extrait les renseignements donnés ici, et aussi à la *Revue Brown-Boveri*, de mai-juin 1918.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Elles sont branchées en triangle dans le montage en parallèle et reliées aux bornes des rotors des deux moteurs; les mêmes résistances servent par suite pour les deux moteurs.

A la première vitesse, les 3 phases du stator du moteur ordinaire sont reliées en triangle au moyen d'un commutateur spécial. De cette façon, les résistances qui sont branchées en étoile aux bornes de ce stator ne reçoivent au moment du démarrage que la tension simple qui est au maximum $\frac{3.700}{\sqrt{3}}$ soit environ 2.000 volts.

A la seconde vitesse, par contre, les phases du stator sont couplées en étoile.

Aux grandes vitesses, montage en parallèle, les enroulements des stators des deux moteurs sont en étoile.

Ainsi, seul l'enroulement du stator du moteur secondaire peut être disposé soit en étoile, soit en triangle.

Nous résumons ci-dessous les conditions de fonctionnement précédentes en indiquant les vitesses correspondantes pour la fréquence de 16,7 périodes.

1° *Démarrage et faibles vitesses, couplage en cascade :*

a) Enroulement statorique seul du moteur secondaire en triangle et moteurs à 8 pôles, vitesse 37,5 kilomètres à l'heure ;

b) Enroulements statoriques des deux moteurs en étoile et moteurs à 6 pôles, vitesse 50 kilomètres à l'heure.

2° *Grandes vitesses, couplage en parallèle :*

Enroulements statoriques des deux moteurs en étoile :

a) Moteurs à 8 pôles, vitesse 75 kilomètres à l'heure ;

b) Moteurs à 6 pôles, vitesse 100 kilomètres à l'heure.

Les efforts de traction aux jantes des roues et au régime horaire des moteurs sont les suivantes, pour une tension de 3.300 volts à la ligne :

9.000	kilogs	à la vitesse de	37,5 kilomètres à l'heure.
9.000	—	50	—
9.500	—	75	—
6.000	—	100	—

Ce qui correspond aux puissances développées de 1.250, 1.670, 2.640 et 2.220 chevaux.

Les figures 144 et 145 donnent respectivement le schéma général des connexions de ces locomotives et les schémas des différentes combinaisons réalisées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 1.

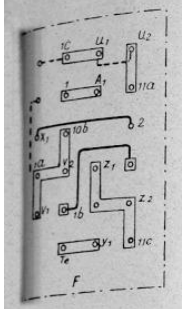


Fig. 2.

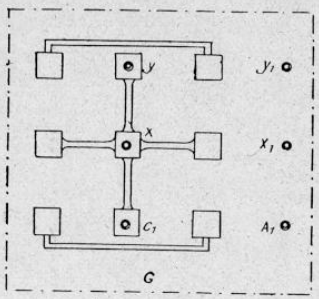


Fig. 3.

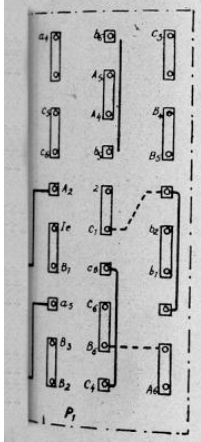
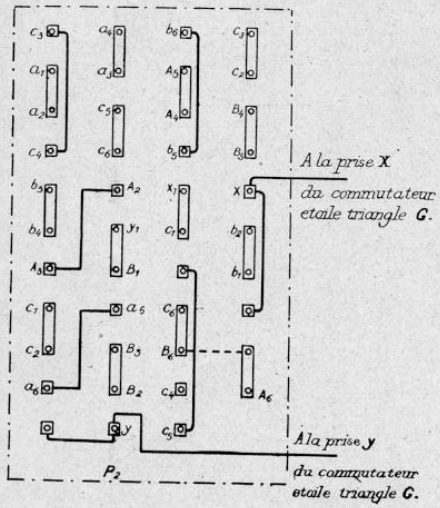
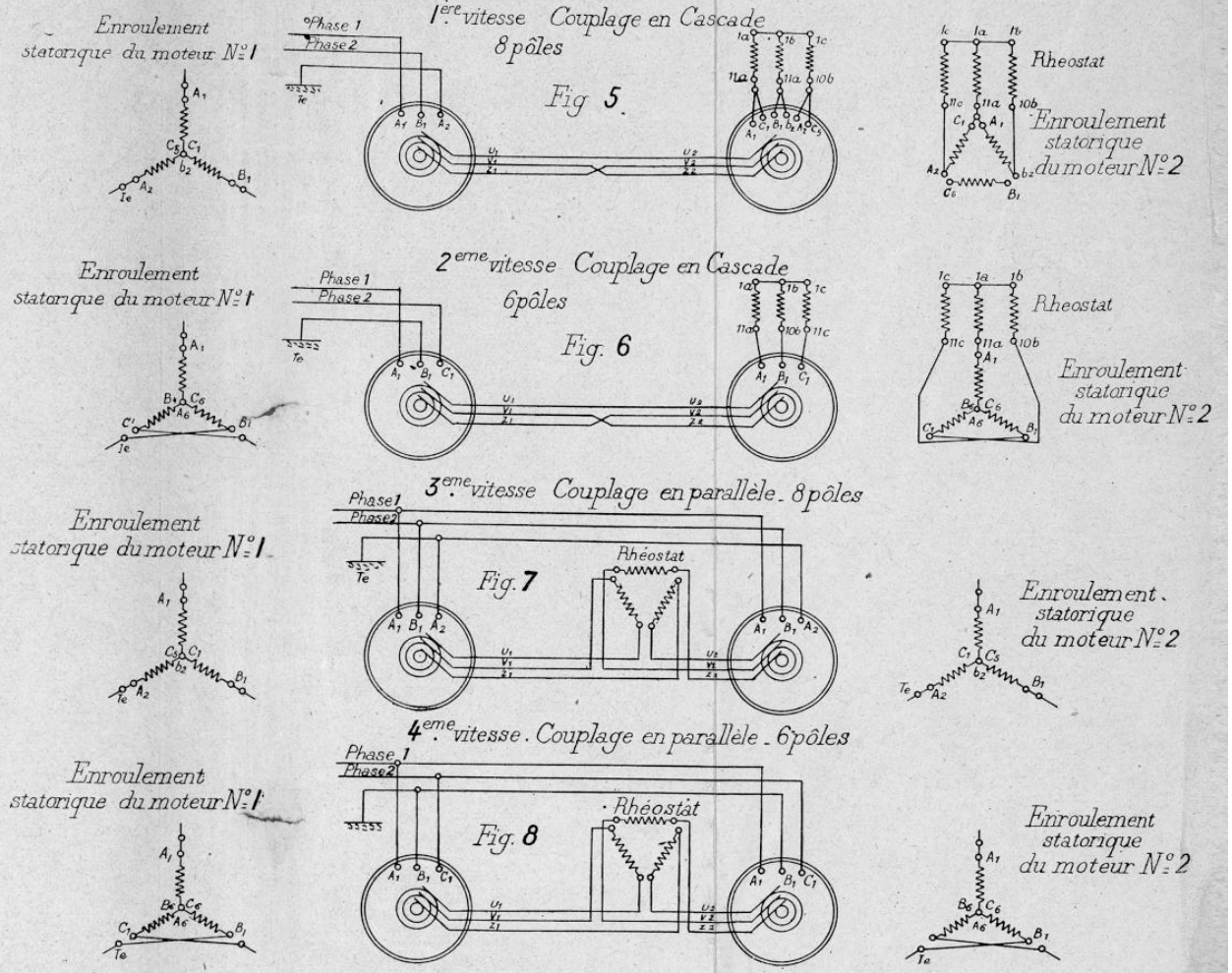


Fig. 4.



Représentation schématique du régulateur de vitesse, du commutateur étoile triangle et des commutateurs des pôles des stators, pour la vitesse de 100 Km/h.



Représentation schématique des connexions entre les deux moteurs de traction et avec leurs rhéostats correspondant aux quatre vitesses de régime.

Fig. 145. — Schémas des connexions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le passage d'une vitesse de régime à l'autre est obtenue en modifiant les connexions des rotors et des stators au moyen de commutateurs spéciaux, dits commutateurs rotoriques et commutateurs statoriques. Ces appareils sont à commande pneumatique.

Pour les stators, chaque phase comprend 6 parties d'enroulement à 2 extrémités, soit au total 36 extrémités d'enroulement qui sortent d'un stator. Ces 36 câbles sont reliés à un commutateur à 2 positions, qui opère les combinaisons de couplage. La première position du commutateur correspond à la première et à la troisième vitesse de régime et la seconde aux deux autres.

Pour les rotors où les mêmes couplages doivent être effectués, on ne pouvait songer, étant données les valeurs élevées de la tension et du courant (1.270 volts, 750 ampères), à faire sortir 36 extrémités de câbles. On adopta alors un commutateur monté concentriquement sur l'arbre du rotor et tournant avec lui.

Le système de commande des organes de contrôle est ici très particulier, et sa description sortirait du cadre de cet ouvrage. Nous nous bornerons à mentionner les autres appareils principaux de commande employés qui comprennent :

Un « commutateur de cascade » qui sert à brancher les résistances de démarrage sur le stator du moteur secondaire ou sur les deux rotors et à établir les connexions des moteurs pour la marche en cascade ou en parallèle.

Un « commutateur étoile-triangle » qui combine les phases du stator du moteur secondaire en triangle ou en étoile, suivant le mode de branchement du moteur sur les résistances.

Un « commutateur de démarrage » qui effectue la mise hors circuit graduelle des divers éléments de résistances, tandis qu'un autre commutateur dit « combinateur de résistances » permet d'employer au choix l'un ou l'autre groupement de résistances.

Le démarrage de la locomotive s'opère au moyen de résistances en rubans de nickeline, refroidis continuellement par les ventilateurs qui servent également au refroidissement des moteurs de traction. Ces résistances peuvent être groupées de deux manières différentes. Dans la marche en double traction (1), où deux locomotives sont attelées à un même train

(1) Nous étudierons avec quelques détails au chapitre XIII le fonctionnement des locomotives en double traction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

généralement une en tête, l'autre en queue, elles servent aussi, comme il est dit plus loin, au réglage du glissement pour obtenir une égale répartition de la charge entre les deux locomotives.

Au point de vue constructif, la plupart des commutateurs sont exécutés d'après le principe des contrôleurs ordinaires. Le commutateur de démarrage cependant y fait exception ; cet appareil est constitué, d'après le système Brown-Boveri, par des interrupteurs à marteaux actionnés par des cames. Tous ces appareils, à l'exception du combinateur de résistances et des commutateurs de pôles du rotor, sont à bain d'huile, avec cuves mobiles ; ils sont tous commandés pneumatiquement, et ceci n'est pas une des caractéristiques les moins intéressantes de ces machines.

Les deux contrôleurs de commande installés dans les postes du mécanicien ne comprennent, eux aussi, que des parties pneumatiques. Au moyen d'une combinaison de cames et de leviers, ils actionnent des valves qui ont pour fonction de mettre les cylindres de commande des divers appareils en communication avec le réservoir à air comprimé ou avec l'air extérieur.

Les détails principaux de la commande pneumatique ressortent de l'examen du schéma de la figure 145 *bis*.

Les contrôleurs de démarrage comportent pour chaque groupement des résistances, en étoile (pour le montage en cascade) ou en triangle (pour le montage en parallèle), 11 crans dont les 6 premiers correspondent à la mise hors circuit d'un nombre égal d'éléments dans les trois phases. Ces 6 crans embrassent un grand intervalle de réglage et ne servent qu'au démarrage, tandis que les 5 crans suivants correspondent à des éléments de résistance de faible valeur, dont la mise hors circuit s'opère inégalement dans les diverses phases. De cette façon, le passage d'un cran à l'autre est moins brusque, et s'obtient sans qu'il y ait lieu de subdiviser trop les éléments de résistances tout en réduisant au minimum le nombre de doigts de contact du commutateur. Ce réglage plus fin sur les derniers crans de résistances a pour but de permettre la marche en double traction de deux locomotives ayant des diamètres de roues différents, en modifiant simplement le glissement des moteurs. Dans ces conditions, deux locomotives, présentant une différence de 55 millimètres dans les diamètres des roues motrices, peuvent être accouplées en produisant sensiblement le même travail (1).

(1) Nous reviendrons à la fin de ce chapitre, au § 86-6° sur cette condition d'égal répartition de la charge entre deux locomotives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces locomotives Brown-Boveri à 4 vitesses font le service sur les lignes de Monza-Lecco et Gênes-Savone pour les trains de voyageurs marchant à la vitesse de 75 kilomètres à l'heure. La vitesse de 100 kilomètres à l'heure n'est pas employée actuellement à cause de l'état des voies.

Sur ces mêmes lignes sont aussi en service des locomotives de construction Oerlikon, très analogues aux précédentes, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique et également des locomotives Westinghouse. Ces dernières diffèrent toutefois sensiblement des précédentes, et nous allons examiner sommairement (1) leur fonctionnement au point de vue électrique. Elles fonctionnent au *triphasé-diphasé* avec montage Scott.

Elles sont encore à 4 vitesses. Leurs poids est de 73 tonnes, dont 45 adhérentes pour 2.600 chevaux. Elles sont à 3 essieux moteurs couplés et 2 essieux porteurs, type 1-C-1 et 2 moteurs. Elles sont inspirées de celles de Giovi comme constructions et détails d'équipement.

La gamme des 4 vitesses est obtenue par l'emploi de deux groupements différents d'un même bobinage, donnant l'un du triphasé à 8 pôles et l'autre du diphasé à 6 pôles, au rotor comme au stator, et par le montage en parallèle ou en cascade des moteurs ainsi combinés.

Le schéma, figure 145 *ter*, permet de comprendre le mécanisme des combinaisons réalisées.

Le stator comprend 12 enroulements indépendants, répartis régulièrement sur la périphérie (ces enroulements qui se chevauchent en réalité à la façon habituelle, ont été représentés raccourcis de moitié pour la clarté de la figure), et les 24 extrémités sont libres et réunies à un combinateur différent pour le moteur primaire et le moteur secondaire. En reliant les bobines portant la même lettre et d'indice quelconque comme des bobines d'une même phase (en série ou en parallèle, puis en étoile ou en polygone), on obtient avec la disposition de gauche un bobinage triphasé à 4 paires de pôles, embrassant respectivement les arcs A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, C_3, A_4, B_4, C_4; en reliant, au contraire, ces bobines, suivant le même principe, mais d'après les notations de droite, on réalise un bobinage diphasé à 3 paires de pôles, M_1, N_1, P_1, Q_1, M_2, N_2, P_2, Q_2, M_3, N_3, P_3, Q_3.

(1) Voir pour plus de détails la *Rivista tecnica delle Ferrovie Italiana*, des 15 juillet et 15 août 1915.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

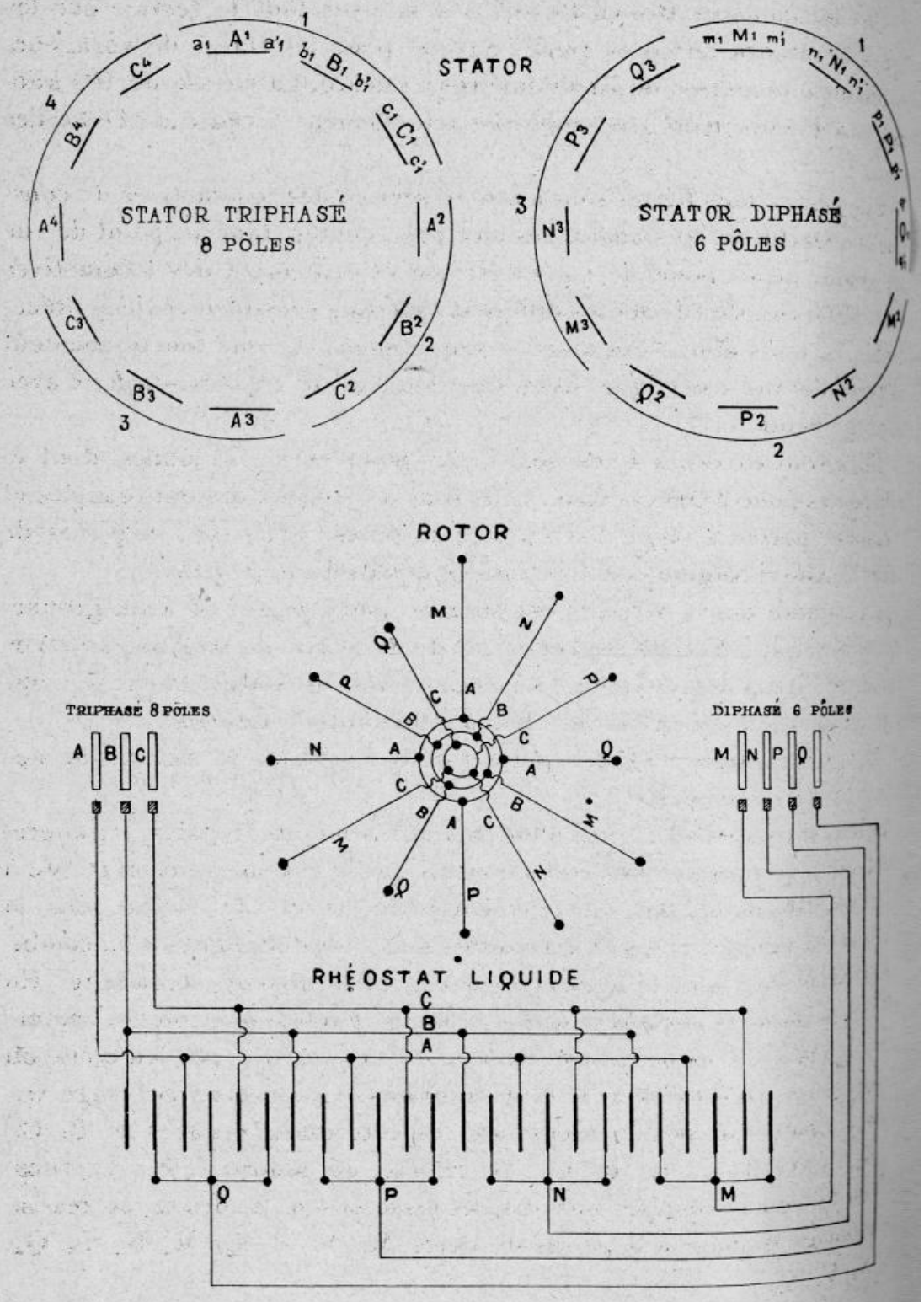


FIG. 145 *ter*.

Moteur triphasé-diphasé de la locomotive Westinghouse E 330 type 1-C-1.
Schéma des combinaisons du couplage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

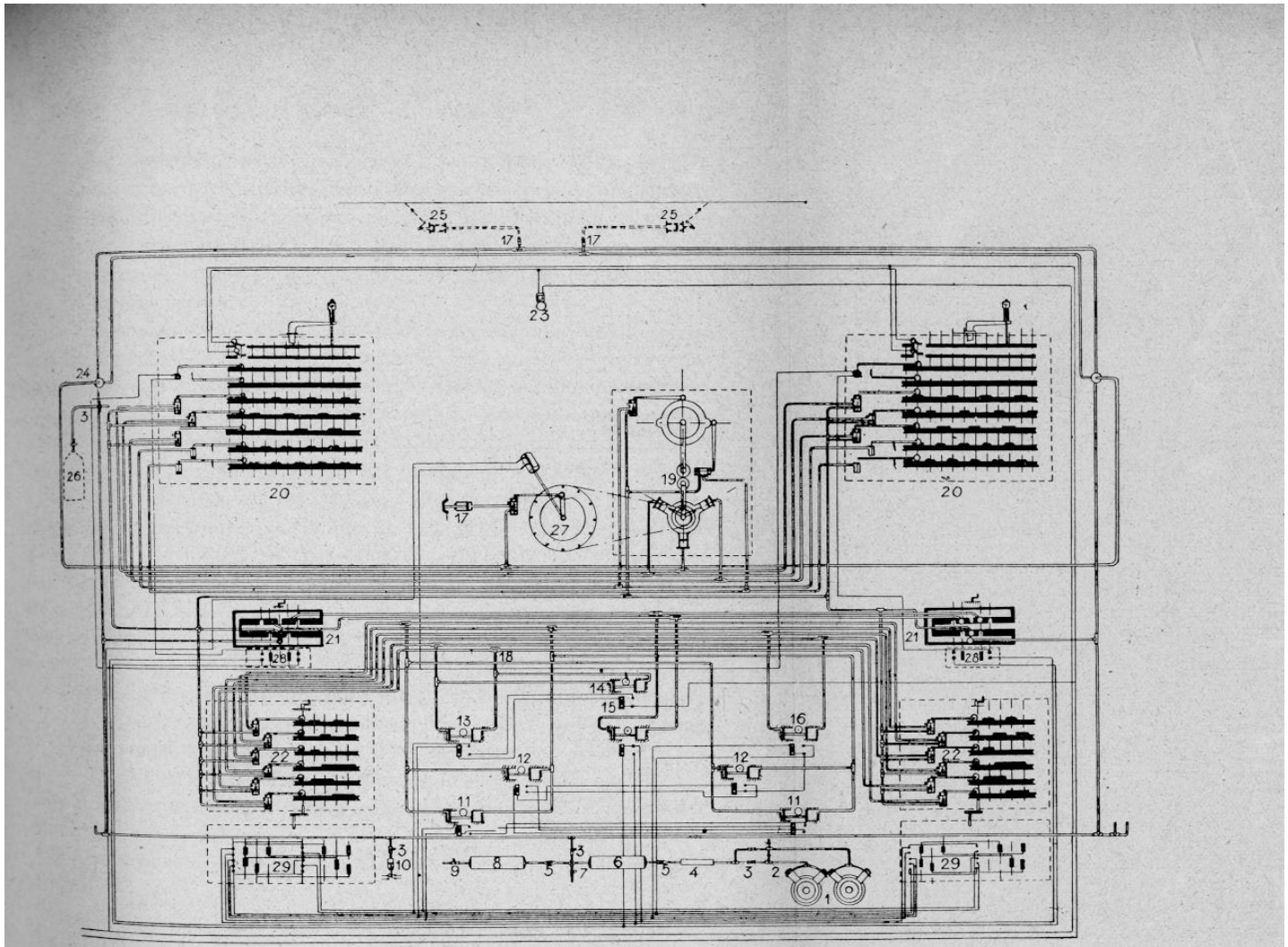


FIG. 145 *bis*. — Schéma des conduites pneumatiques.

1 Groupes moteur-compresseur.
2 Valve de sûreté.
3 Robinet à 3 voies.
4 Séparateur d'huile.
5 Valve de retenue.
6 Réservoir d'air pr les appareils.
7 Robinet d'arrêt.
8 Réservoir d'air pour le frein.
9 Raccord pour la conduite de frein.
10 Régulateur de pression.
11 Commutateurs statoriques.
12 Commutateurs rotoriques.
13 Commutateur de cascade.
14 Combinateur de résistance.
15 Inverseur de marche.
16 Commutateur étoile-triangle.
17 Interrupteur principal.
18 Valve de retenue double.
19 Commutateur de démarrage.
20 Contrôleurs de démarrage.
21 Valve de l'inverseur de marche.
22 Contrôleur de vitesse.
23 Cloche d'alarme.
24 Robinet de commande des prises de courant.
25 Prises de courant.
26 Réservoir de secours transportable.
27 Commande de l'interrupteur principal.
28 Contacts de verrouillage de la valve de l'inverseur de marche.
29 Contacts de verrouillage du contrôleur de vitesse.
30 Raccord de la conduite des sablières.
31 Raccord spécial de prise d'air

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut également, par le groupement des bobines d'une phase en parallèle ou en série, puis de ces phases en étoile ou en polygone, obtenir des tensions diverses de fonctionnement du stator et pour le moteur secondaire, réaliser un stator à haute tension pour la marche normale et un stator à basse tension pour le couplage en tandem de ce stator sur le rotor du moteur primaire.

Le rotor porte d'un côté 4 bagues pour le fonctionnement en diphasé et de l'autre côté 3 bagues, pour le triphasé; les bagues sont reliées aux points portant les mêmes lettres, connectés tous en parallèle. Les barres radiales de la figure représentent chacune une des douze bobines réparties sur la périphérie; par une de leurs extrémités, ces bobines sont connectées en parallèle de 3 en 3 aux trois bagues du triphasé et par l'autre de 4 en 4 aux quatre bagues du diphasé (cette dernière connexion a été omise pour ne pas compliquer la figure). Lorsqu'on met en court-circuit les bagues d'un des systèmes (par exemple les 4 bagues du diphasé), on obtient un rotor triphasé à bobines en parallèle dans chaque phase et à groupement en étoile, dont les quatre bagues court-circuitées sont le point neutre et les trois autres bagues les bornes extérieures et inversement.

Ce rotor est formé au démarrage sur un rhéostat liquide spécial, à 24 électrodes, disposées comme l'indique la figure, d'un côté en 3 groupes de 4 reliés au triphasé et de l'autre côté en 4 groupes de 3 reliés au diphasé. Quand on se sert d'un système (diphasé ou triphasé), les électrodes de l'autre sont toutes reliées en parallèle par le court-circuit des bagues correspondantes.

De la grande à la petite vitesse, les connexions sont établies comme suit :

Vitesse 100 kilomètres à l'heure. — Les deux stators sont groupés en diphasés six pôles; les bobines d'une phase sont toutes en série et le groupement en étoile (ou plus exactement en deux circuits indépendants, dont l'un contient en série les bobines :

$$+ M_1 - P_1 + M_2 - P_2 + M_3 - P_3$$

et l'autre :

$$+ N_1 - Q_1 + N_2 - Q_2 + N_3 - Q_3$$

le signe — indiquant que les bobines correspondantes sont inversées dans la série en reliant $M_1 - M'_1$, $P'_1 - P_1$, P_2, etc.). Les rotors sont fermés sur le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rhéostat liquide par leurs systèmes à 4 bagues en parallèle, les systèmes à 3 bagues étant en court-circuit.

Les stators sont alimentés en diphasé à 3.600 volts par phase au moyen d'un auto-transformateur Scott, disposé entre les fils de contact et les stators.

Vitesse normale 75 kilomètres à l'heure. — Les deux stators sont groupés en triphasé 8 pôles, les bobines d'une phase étant en série et les phases en étoile, à la façon habituelle. Les rotors sont fermés sur le rhéostat liquide par les 3 bagues, l'ensemble des 4 bagues étant en court-circuit. Les stators sont branchés sur les lignes de contact et le rail à la façon normale.

Vitesse 50 kilomètres à l'heure. — Le stator du moteur primaire est connecté en diphasé et relié au réseau par l'auto-transformateur Scott, comme à la vitesse de 100 kilomètres à l'heure. Son rotor est fermé (par les 4 bagues) en cascade sur le stator du second moteur, groupé en diphasé basse tension à deux circuits indépendants, comprenant l'un en parallèle les bobines + M et — P, l'autre les bobines + N et — Q. Le rotor du moteur secondaire est fermé sur le rhéostat par 4 bagues; les deux ensembles 3 bagues des rotors sont en court-circuit.

Vitesse 35 kilom. 500 à l'heure. — Le stator du moteur primaire est en triphasé, série et étoile, et relié au réseau comme à la vitesse 75 kilomètres à l'heure; son rotor, côté 3 bagues, est fermé en cascade sur le stator du moteur secondaire, groupe en triphasé, basse tension, avec les bobines en parallèle dans chaque phase et les phases en triangle. Le rotor du moteur secondaire est relié par le côté 3 bagues au rhéostat; les groupes 4 bagues sont en court-circuit.

Le reste de l'équipement électrique est analogue à celui des locomotives du Giovi; les contrôleurs commandent, par courant à basse tension, des relais électro-pneumatiques actionnant les combinateurs et inverseurs. La petite manette du contrôleur donne successivement les 4 vitesses de marche et la grande manette agit sur le rhéostat liquide de démarrage; un régulateur à puissance constante est inséré dans ce rhéostat, comme dans les locomotives du Giovi.

Le rhéostat liquide est analogue, mais beaucoup plus important comme dimensions, avec ses 24 électrodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

85. **Système mixte monophasé-triphasé (split-phase) Westinghouse des locomotives à convertisseur de phases du Norfolk et Western Railway et du Pennsylvania.** — *1° Locomotives du Norfolk et Western Ry.* — Ces locomotives, dont le principe électrique constitue une innovation, circulent sur la ligne très accidentée de Bluefield à Vivian sur une longueur de 48 kilomètres, comprenant le tunnel d'Elkhorn de 9 kilomètres, en rampe de près de 1 p. 100. Elles assurent un important trafic de charbonnages, et remorquent des trains de 3000 tonnes en moyenne. Elles sont d'une puissance de 3.600 chevaux au régime uni-horaire des moteurs.

Elles sont alimentées en courant monophasé 11.000 volts 25 périodes, qui est transformé sur les locomotives elles-mêmes en courants triphasés alimentant les moteurs d'essieu qui sont du type asynchrone ordinaire.

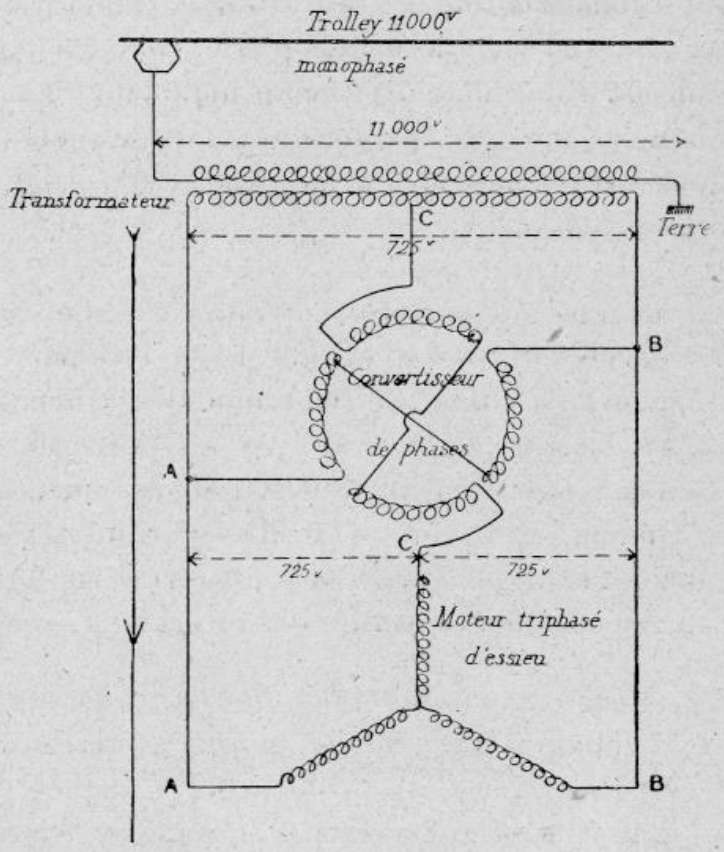


FIG. 146.

Schéma des connexions du convertisseur de phases et des moteurs d'essieu des locomotives du Norfolk and Western Ry.

La transformation est effectuée au moyen d'un convertisseur de phases (split-phase), constitué par un moteur d'induction monophasé comportant un rotor en court-circuit du type cage d'écureuil, et un stator à deux enroulements dont un seul est relié aux bornes du secondaire du transformateur monophasé abaisseur de tension qui l'alimente. Le schéma du système est donné sur la figure 146.

Le fonctionnement du système repose sur la propriété générale suivante des moteurs asynchrones :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un moteur d'induction polyphasé peut fonctionner comme moteur monophasé sur une seule phase d'un circuit polyphasé si ce moteur est amené par un dispositif quelconque à la vitesse du synchronisme et, de plus, un tel moteur fonctionne en convertisseur de phases.

En effet, en se bornant au cas actuel où le primaire est, en définitive, bobiné en diphasé, le courant primaire induit dans les conducteurs du rotor jouant le rôle de transformateur, une f. é. m. statique d'où résulte un courant secondaire monophasé. En même temps, par suite de la rotation du rotor dans le champ inducteur monophasé, une f. é. m. dynamique et par suite un nouveau courant décalé de 90° par rapport au premier, prend naissance dans le rotor, de sorte que deux courants en quadrature y circulent.

Le courant engendré par la rotation du rotor se comporte comme un second courant magnétisant qui, combiné avec le courant inducteur venant de la ligne, produit un champ tournant comme si la machine fonctionnait en diphasé. Sous l'action de ce champ, le rotor développe le couple moteur.

Ce champ tournant traverse le second enroulement et y engendre une f. é. m. en quadrature avec celle de la ligne, ce second enroulement fonctionnant en secondaire de transformateur. Enfin, la combinaison de ce courant avec le courant de la ligne, donne un courant diphasé qu'il est alors facile, au moyen de connexions appropriées, de transformer en un système triphasé étoile (transformation Scott), pour alimenter les moteurs d'essieu.

Le schéma précédent, figure 146, montre comment ce résultat est atteint.

Le convertisseur y est schématiquement représenté par ses deux enroulements primaires et sans rotor : ce dernier ne présentant aucune particularité.

Le premier enroulement est, comme nous l'avons dit, relié aux deux bornes extrêmes du secondaire du transformateur.

Une extrémité de l'enroulement en quadrature est connecté en un point C, milieu de l'enroulement secondaire du transformateur statique, tandis que l'autre extrémité est reliée à une phase du moteur, les deux autres phases de celui-ci étant reliées directement aux deux bornes extrêmes du secondaire du transformateur. Enfin, l'enroulement du convertisseur est réalisé de telle sorte que la tension entre C et C soit suffisante pour produire une tension égale et également décalée entre A et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C, C et B, B et A. Dans ces conditions, les moteurs d'essieu sont bien alimentés en courants triphasés.

Avec ce dispositif, comme deux phases du moteur de traction sont alimentées directement par le secondaire du transformateur, on voit qu'il est seulement nécessaire de transformer au convertisseur une partie du courant utilisé dans les moteurs de traction. La plus grande partie provenant directement du transformateur.

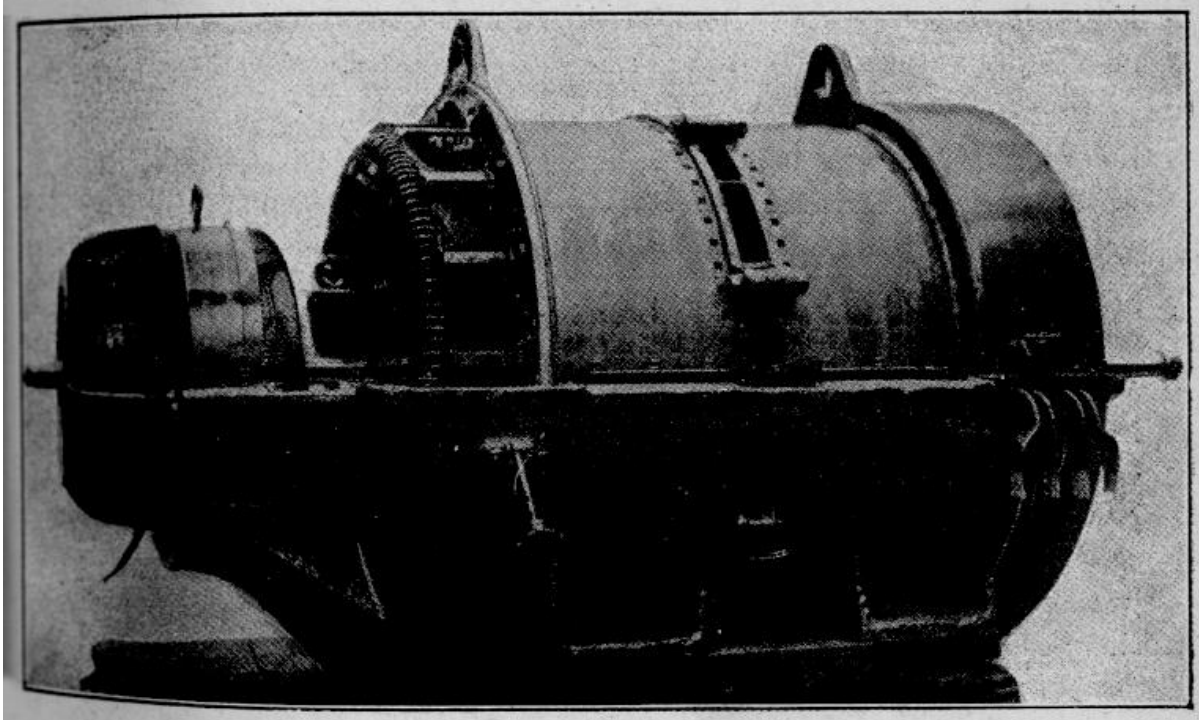


FIG. 147.

Convertisseurs de phases du Norfolk and Western Ry.

Enfin, le convertisseur fonctionne d'une façon continue tant que la locomotive est en service, et son démarrage est obtenu par un moteur monophasé série à collecteur, calé directement sur son arbre.

La photographie ci-dessus (fig. 147) montre l'aspect du convertisseur de phases des locomotives qui nous occupent.

Nous ajouterons que ces locomotives dont le schéma d'ensemble est donné en planche hors-texte, pèsent 240 tonnes et sont constituées par 2 unités accouplées de 120 tonnes, chaque unité comprenant 4 paires de roues motrices disposées en 2 trucks reliés par une cheville d'articulation type Mallet. Chaque truck est ainsi à 2 essieux moteurs, et la locomotive

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

complète comprend 8 moteurs. Nous verrons au chapitre XI les particularités du mode de transmission du couple moteur.

Les moteurs, d'une puissance individuelle uni-horaire de 450 chevaux, sont du type d'induction triphasé avec rotor bobiné et à bagues, pour permettre le démarrage rhéostatique (rhéostat liquide). Les enroulements de leur stator sont en outre disposés pour permettre leur répartition en 8 ou 4 pôles correspondant respectivement aux vitesses de 22,5 et 45 kilomètres à l'heure, les moteurs étant couplés en parallèle dans chaque cas. Enfin, les rotors de ces moteurs comportent deux bobinages à 4 et 8 pôles comme les stators, et sont par suite munis de 6 bagues.

2° *Locomotives mono-triphasées du Pennsylvania Railroad.* — Ces locomotives, qui circulent sur la ligne montagneuse d'Altona, vers Pittsburg, sont construites sur le même principe électrique que les précédentes. Comme celles-ci, elles sont alimentées en courant monophasé 11.000 volts, 25 périodes, et comportent l'emploi d'un convertisseur de phases. Elles sont à peu près du même poids (un peu moindre cependant: 220 tonnes), mais ne comportent que 4 moteurs, qui sont par contre d'une puissance uni-horaire de 1.200 chevaux, donnant ainsi une puissance totale de 4.800 chevaux; au démarrage, elles peuvent développer 7.000 chevaux. La régulation de la vitesse se fait par le couplage en cascade des deux moteurs de chaque paire pour les faibles vitesses, et en parallèle pour les grandes vitesses. Elle est complétée par l'emploi d'un rhéostat pour chaque moteur.

Ces locomotives sont les plus puissantes actuellement en service. Elles sont, comme les précédentes, constituées par deux unités accouplées, chacune montée sur un truck, les deux trucks étant reliés par un attelage central flexible. Chaque unité est à trois essieux moteurs, les roues étant reliées par des bielles latérales. Nous donnons en planche hors texte le schéma de ces locomotives, et la figure 148 (1) ci-après en donne le schéma des connexions.

On voit représenté sur ce schéma un moteur série compensé. Ce moteur sert au démarrage du convertisseur jusqu'au synchronisme. Après que cette vitesse est atteinte, c'est-à-dire pendant la marche normale, il fonctionne en dynamo à courant continu (excitée par un petit groupe moteur générateur triphasé-continu 30 volts non représenté) pour exciter un enroulement E (analogue à un inducteur d'alternateur), placé

(1) Empruntée à *The Electrician* du 1er mars 1918.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur le rotor du convertisseur, ce qui a pour but de diminuer l'appel de courant magnétisant fait par le convertisseur en le transformant en moteur synchrone.

L'intérêt de cette disposition est de combattre l'affaiblissement du facteur de puissance, qui, déjà médiocre en triphasé, est encore réduit en monophasé par suite du courant magnétisant nécessaire au fonctionnement du convertisseur synchrone.

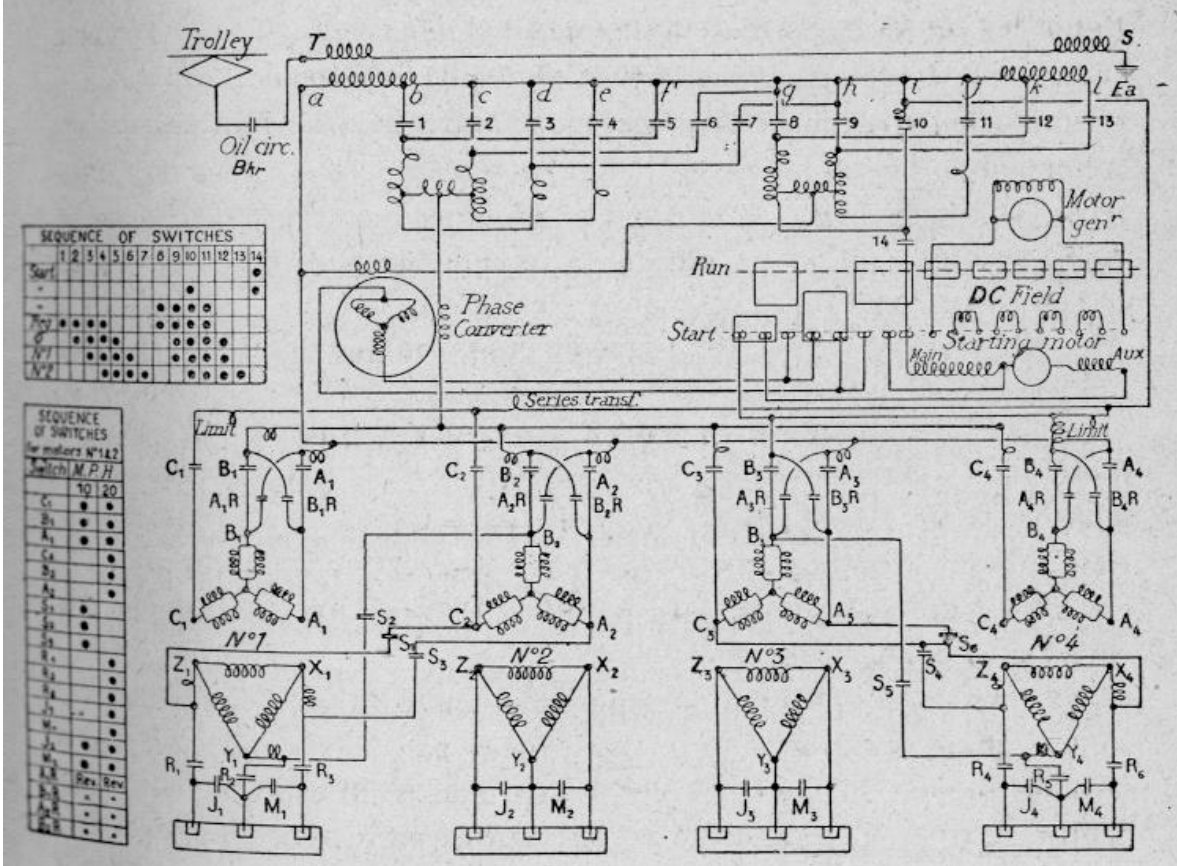


FIG. 148.

Locomotive mono-triphasée du Pennsylvania R. R.
Schéma général des connexions.

86. Remarques générales sur le système triphasé. — Pour terminer cette étude, il y a lieu de signaler particulièrement les points suivants :

1° *Actuellement, 6.000 volts paraît être le voltage maximum possible pratique* avec deux conducteurs aériens. Il n'y a qu'un exemple à 6.000 volts : c'est celui des locomotives du Great Northern (1909), de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

General Electric Co. Elles sont à prise de courant par trolley, perches et roulettes.

Les installations de la Valteline, du Simplon, de Giovi, sont à 3.000/3.700 volts et prises de courant par archet.

La nécessité d'avoir deux lignes aériennes, s'ajoute en effet aux difficultés d'isolement, aux croisements, par exemple. En outre, il faut deux appareils de prise de courant sur les voitures, un pour chaque phase, et ces appareils doivent naturellement être isolés les uns des autres. Or, l'espace dont on dispose est limité par le gabarit.

Il y a là évidemment une difficulté, mais l'expérience acquise sur les chemins de fer italiens en particulier, montre qu'il ne faut pas s'en exagérer l'importance.

2° *Il n'y a pas possibilité de rattraper le temps perdu en forçant la vitesse,* celle-ci étant limitée par celle du synchronisme, en d'autres termes, la possibité des grandes variations de vitesse que peuvent donner le courant continu ou le courant monophasé n'est pas possible ici. Par contre, la marche à vitesse constante de régime est assurée quel que soit l'effort à développer, ce qui constitue une propriété importante, surtout sur les lignes à profil accidenté (Great Northern, lignes italiennes, etc.).

Le moteur triphasé est en effet, au point de vue exploitation à vitesse constante, le moteur idéal, mais au point de vue du couple, il existe de grosses difficultés. Si on met un moteur relativement faible, on est rapidement limité pour la puissance disponible et on ne peut monter de rampes sérieuses, le couple maximum étant insuffisant.

Si on a quelques fortes rampes à franchir et si on prend des moteurs suffisamment puissants pour les gravir convenablement, outre la question de l'augmentation de prix de premier établissement, on est conduit à des moteurs qui fonctionnent la plupart du temps à faible charge, et par suite avec un *cos* φ et un rendement déplorable, ceci d'autant plus que le moteur de traction, fort malmené, nécessite un entrefer relativement grand et, par suite, un grand coefficient de dispersion. Il faut donc, pour obtenir un couple maximum suffisant, admettre un fort couple magnétisant d'où un *cos* φ très faible.

3° *Les locomotives triphasées ont une puissance spécifique remarquablement élevée,* comparativement aux autres locomotives, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer à l'occasion de l'étude des systèmes monophasés et dans laquelle nous avons donné des chiffres comparatifs de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puissance spécifique de diverses locomotives. Les plus remarquables à ce point de vue sont celles du Giovi qui pèsent 60 tonnes et développent 2.000 chevaux, ce qui fait ressortir leur puissance spécifique à 33,3 chevaux, ce qui est le maximum atteint.

Le poids des locomotives triphasées est ainsi extrêmement réduit pour une puissance donnée.

4° *Le système triphasé se prête facilement au fonctionnement des moteurs en récupération*, phénomène sur lequel nous reviendrons plus loin, à l'occasion de l'étude du freinage. C'est là une propriété importante pour un fonctionnement économique du système et particulièrement pour les lignes à profil accidenté.

5° *Le moteur triphasé ne se prête pas bien à une forte accélération au démarrage*, d'où il suit qu'une vitesse maximum plus grande doit être obtenue pour assurer un même horaire que s'il s'agissait d'un système à courant continu ou à courant monophasé.

6° *Répartition de la charge entre les moteurs d'une même locomotive ou entre deux locomotives attelées à un même train.* — En traction triphasée, il y a une précaution à prendre quand deux locomotives sont accouplées, car pour obtenir une bonne répartition de l'effort, il faut que, à toute charge, les deux locomotives marchent également à la même vitesse. Autrement, il peut arriver non seulement que la locomotive à vitesse supérieure doive traîner tout le train, y compris la seconde locomotive, mais encore que les moteurs de celles-ci débitent en génératrices asynchrones sur le réseau. Les moteurs de la première locomotive seraient par suite surchargés. Cela se produira par exemple lorsque les bandages des roues des deux locomotives de même construction seront à un état d'usure trop différent. Dans ce cas, on agira sur le glissement des moteurs de la locomotive dont la vitesse est la plus élevée, de façon à obtenir qu'à la même vitesse les deux locomotives développent sensiblement le même effort de traction.

Ces observations ne sont d'ailleurs pas exclusives à l'emploi de plusieurs locomotives accouplées : elles s'appliquent aussi bien, quoique à un degré d'importance moindre, aux différents essieux moteurs d'une locomotive dont les diamètres des roues peuvent être à un état différent d'usure.

C'est pour tenir compte de ces circonstances qu'aux locomotives triphasées du Great Northern à 4 moteurs (General Electric), qui sont à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

contrôle rhéostatique à contracteurs, sur le principe des unités multiples que nous étudierons ultérieurement (chapitre XIII), chaque moteur a son propre circuit de contrôle avec son propre jeu de résistances, un transformateur alimentant toutefois deux moteurs. Dans ces conditions, il est possible, par un groupement approprié des résistances dans chaque circuit secondaire, de faire fonctionner chaque moteur avec un glissement convenable. Il faut toutefois avoir un nombre de crans assez grand au contrôleur pour permettre un réglage suffisamment précis. Les contrôleurs des locomotives en question comprennent 13 crans.

Nous avons vu d'autre part à propos des locomotives triphasées Brown-Boveri des chemins de fer de l'Etat italien, comment la même condition avait été remplie en double traction. Nous aurons l'occasion d'y revenir au chapitre XIII, à propos de la « double traction symétrique ».

7° *Perturbations apportées par les lignes triphasées sur les lignes téléphoniques et télégraphiques voisines.* — Les réactions dues aux lignes triphasées sur les lignes des P. T. T., ne diffèrent pas essentiellement de celles du monophasé. Les proportions numériques peuvent être seulement modifiées. Le retour par le rail est le seul qui existe dans des conditions analogues. Les actions électro-statiques sont plus faibles qu'en monophasé, car la tension d'alimentation est de l'ordre 300 V. au lieu de 11.000 ou 15.000, mais l'induction électro-magnétique est au moins du même ordre de grandeur, les intensités de courant étant plus grandes du fait de la diminution de la tension. En fait, les perturbations produites sur les lignes à faibles courants sont considérables et comme en monophasé, la seule solution radicale et complète consiste à éloigner suffisamment les lignes téléphoniques et télégraphiques et à employer des câbles à circuits bifilaires et sous plomb, aériens ou souterrains, pour les lignes devant obligatoirement, pour une raison quelconque, rester à proximité des voies. C'est ce qui a été réalisé sur les lignes italiennes où on se propose cependant d'essayer l'emploi de transformateurs-compensateurs pour éviter dans l'avenir de déplacer les lignes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X

CONSTRUCTION DES MOTEURS DE TRACTION

SOMMAIRE. — Conditions mécaniques générales d'établissement d'un moteur de traction.

I. — **Moteurs à courant continu :**

Conditions générales. — Détails de construction : Carcasse inductrice. Paliers d'induit. Paliers à billes. Armature. Pôles inducteurs. Enroulements des inducteurs. Balais et porte-balais. Isolants. Engrenages et carters. — Remarques sur les moteurs à courant continu haute tension.

II. — **Moteurs à courants alternatifs :**

Moteurs monophasés. Moteurs triphasés.

III. — **Moteurs ventilés : courant continu ou alternatif.**

87. **Conditions mécaniques générales d'établissement d'un moteur de traction.** — Les premiers moteurs électriques qui furent adaptés à la traction ne différaient pas sensiblement des moteurs fixes. On employa d'abord des moteurs d'ateliers fixés au châssis du véhicule et commandant les essieux par une transmission quelconque, mais nécessairement élastique, à cause de la flexion des ressorts. L'idée de suspendre le moteur paraît être due à *J.-C. Henry*, qui l'appliqua sur la ligne de Kansas-City (Missouri) en 1884. Ensuite, on logea le moteur, toujours quelconque, dans un truck étudié spécialement ; enfin, on est arrivé au type spécial : moteur de traction.

Le moteur de traction doit laisser libre un espace d'au moins 8 à 10 cm. au-dessus de la voie et même 12 cm. quand la voie est établie sur chaus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sée pavée, ce qui conduit à un jeu de 9 à 10 cm. sous le carter. Les organes doivent être protégés contre les intempéries et l'humidité et, par suite, le moteur doit être complètement fermé. Les organes de transmission du couple moteur sont enfermés dans des carters protecteurs renfermant un lubrifiant. Les organes du moteur, surtout le collecteur pour les moteurs à courant continu et ceux à courant monophasé, doivent être facilement accessibles, toutes les pièces facilement démontables et interchangeables, la construction de l'induit très robuste pour résister aux chocs et trépidations qui rendent le cuivre cassant. L'ensemble d'ailleurs doit être prévu très robuste.

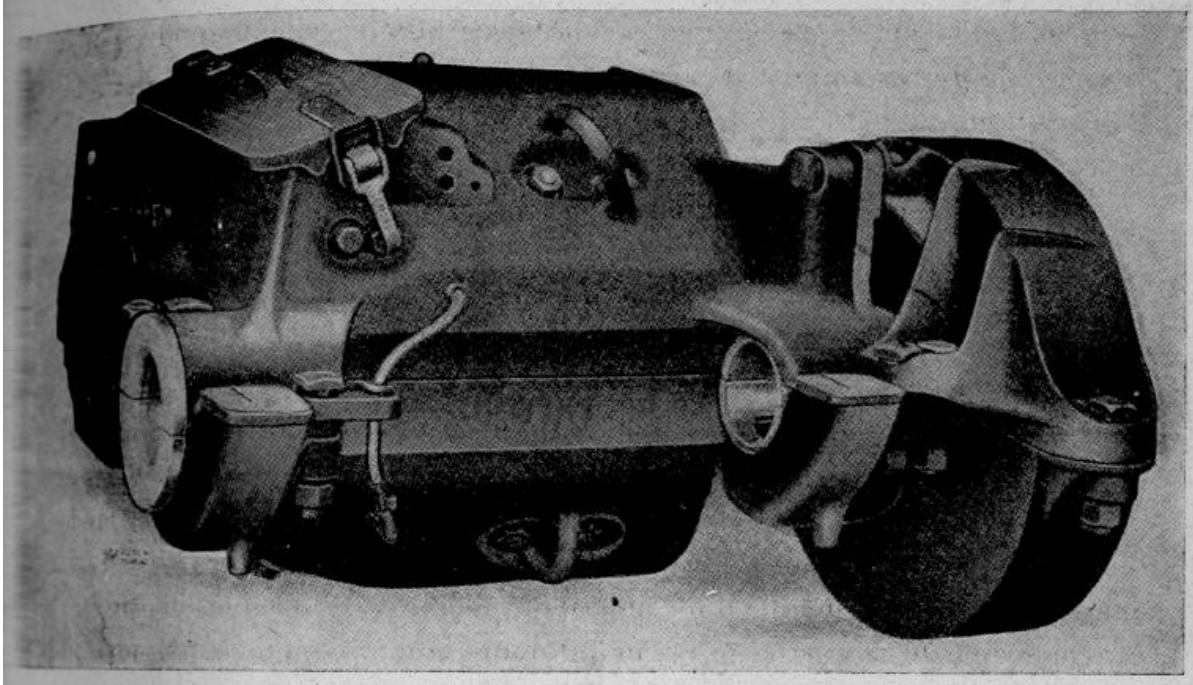
I. — **Moteurs à courant continu.**

88. **Conditions générales.** — La tension est le plus généralement 500 à 600 volts. Il faut concilier autant que possible un faible poids et une faible vitesse, ce qui nécessite une utilisation excellente des matériaux, d'où emploi de tôles très douces, isolées entre elles, circuits magnétiques courts en acier peu réluctant, bobines plates et enserrant de près l'induit. Toutefois, l'entrefer ne doit pas être trop faible. (Il est généralement supérieur à 3 mm.), car les coussinets des paliers s'usant, il en résulte du jeu et un excentrage de l'induit par rapport à la carcasse inductrice.

L'induit est denté pour diminuer l'action tangentielle, ce qui réduit en outre la réluctance de l'entrefer, et de diamètre aussi grand que possible. Son bobinage est en tambour, inducteurs multipolaires (4 pôles généralement, quelquefois 6 dans les gros moteurs de chemins de fer); balais de charbon graphité, pour faciliter la commutation sans décalage et réduire l'usure du collecteur; nombre de lames au collecteur assez élevé, soit 85 à 90 au moins, de manière à ne pas dépasser 15 à 20 volts entre lames; rapport des ampères-tours induits aux ampères-tours inducteurs aussi petit que possible afin de réduire la valeur théorique de l'angle de calage des balais (angle que l'on fait d'ailleurs pratiquement égal à zéro).

Les inducteurs sont enroulés en série. Il y a à cela plusieurs avantages: très bon couple de démarrage des moteurs série, régulation automatique de la charge et de la vitesse, en outre, isolement plus faible à réaliser. En effet, avec un tel enroulement, la $d.d.p.$ des différents points de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



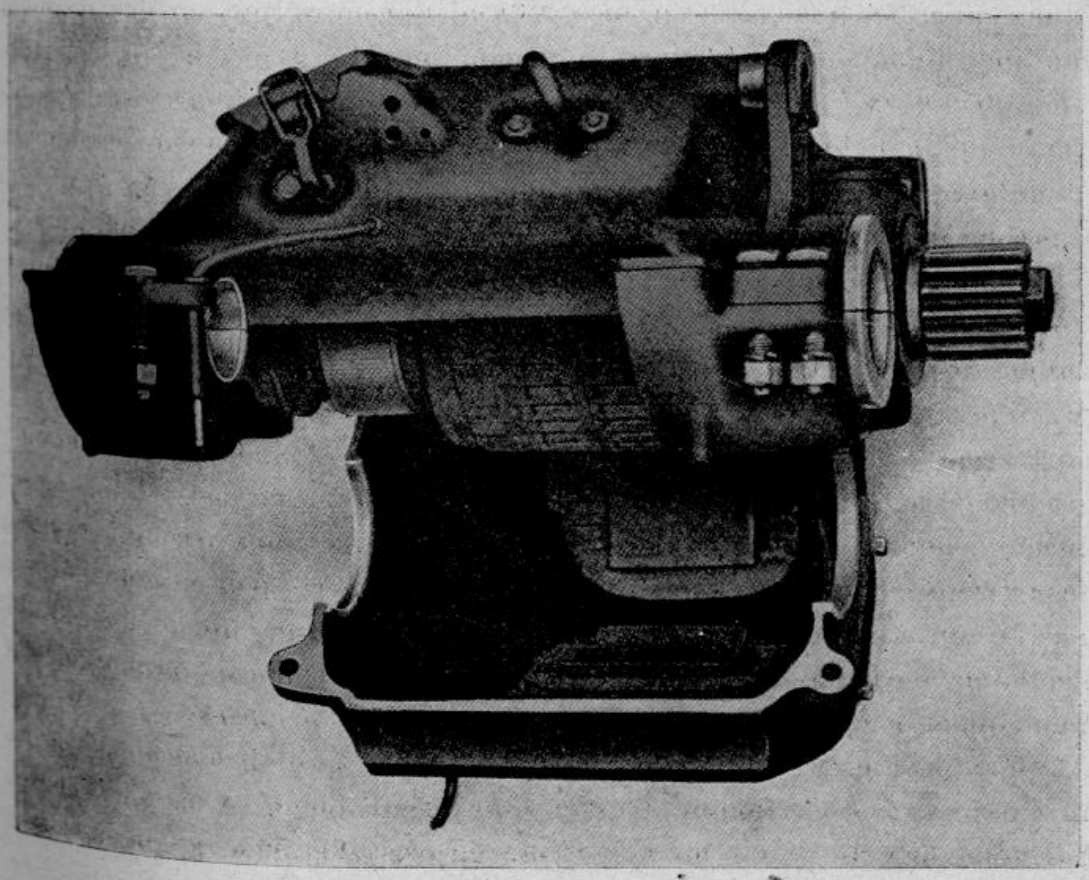


FIG. 149 et 150.

Moteur à carcasse fendue de la General Electric Co. Type G.-E.-88-B. 40 chevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'enroulement entre eux et avec la masse est faible, car on connecte toujours les bobines au pôle relié au rail ; d'autre part, le fil est gros et par suite solide.

89. **Détails de construction.** — *a) Carcasse inductrice ou stator.* — Toujours complètement fermée, en acier coulé de haute perméabilité. On a fait des carcasses fendues s'ouvrant par le haut puis par le bas pour faciliter la visite du moteur et l'enlèvement de l'induit. Cette dernière disposition paraît préférable à ce point de vue, car on est plus à l'aise pour inspecter le moteur dans une fosse de visite que dans la voiture, où les banquettes constituent un obstacle très gênant. L'induit est disposé de façon qu'il reste à volonté relié à la partie supérieure. Les deux moitiés de la carcasse sont réunies et maintenues l'une contre l'autre au moyen de quatre boulons dont deux d'un même côté forment charnière.

La forme de la carcasse est maintenant généralement octogonale à coins arrondis ; les pôles étant de 45° sur l'horizontale, la coupure passe donc entre les pôles. Les figures 149 et 150 montrent un des derniers moteurs de la General Electric Co répondant à ce genre de construction (moteur GE-88-B de 40 HP.). L'inconvénient de la coupure est l'assemblage amenant forcément un matage des parties en contact en cet endroit et le joint magnétique qu'elle amène. Les photographies fig. 151-152 représentent un moteur plus moderne de ce type, c'est le moteur à pôles de commutation et contrôle par le champ W. 307 de la Société Westinghouse ; il est de 50 chevaux sous 600 volts et est employé en particulier sur un certain nombre de voitures de la Compagnie des Tramways de l'Est Parisien.

Le mode de construction, qui semble être de plus en plus adopté par les principaux constructeurs, consiste à faire une carcasse d'une seule pièce de section droite circulaire ou octogonale à coins arrondis et dont les extrémités ouvertes sont munis de flasques porte-paliers pour l'arbre de l'induit. Ces porte-paliers sont démontables. Par l'un ou l'autre, ou seulement par celui comportant la plus grande ouverture, on peut facilement introduire ou retirer les pièces polaires et l'armature.

Certains constructeurs construisent le même moteur avec deux sortes de carcasse : l'une fendue, l'autre d'une seule pièce. Ainsi la General Electric construit le moteur GE-88 des figures 149-150 avec une carcasse ~~d'une seule pièce.~~ d'une seule pièce.

Comme applications récentes de ce dernier mode de construction, nous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

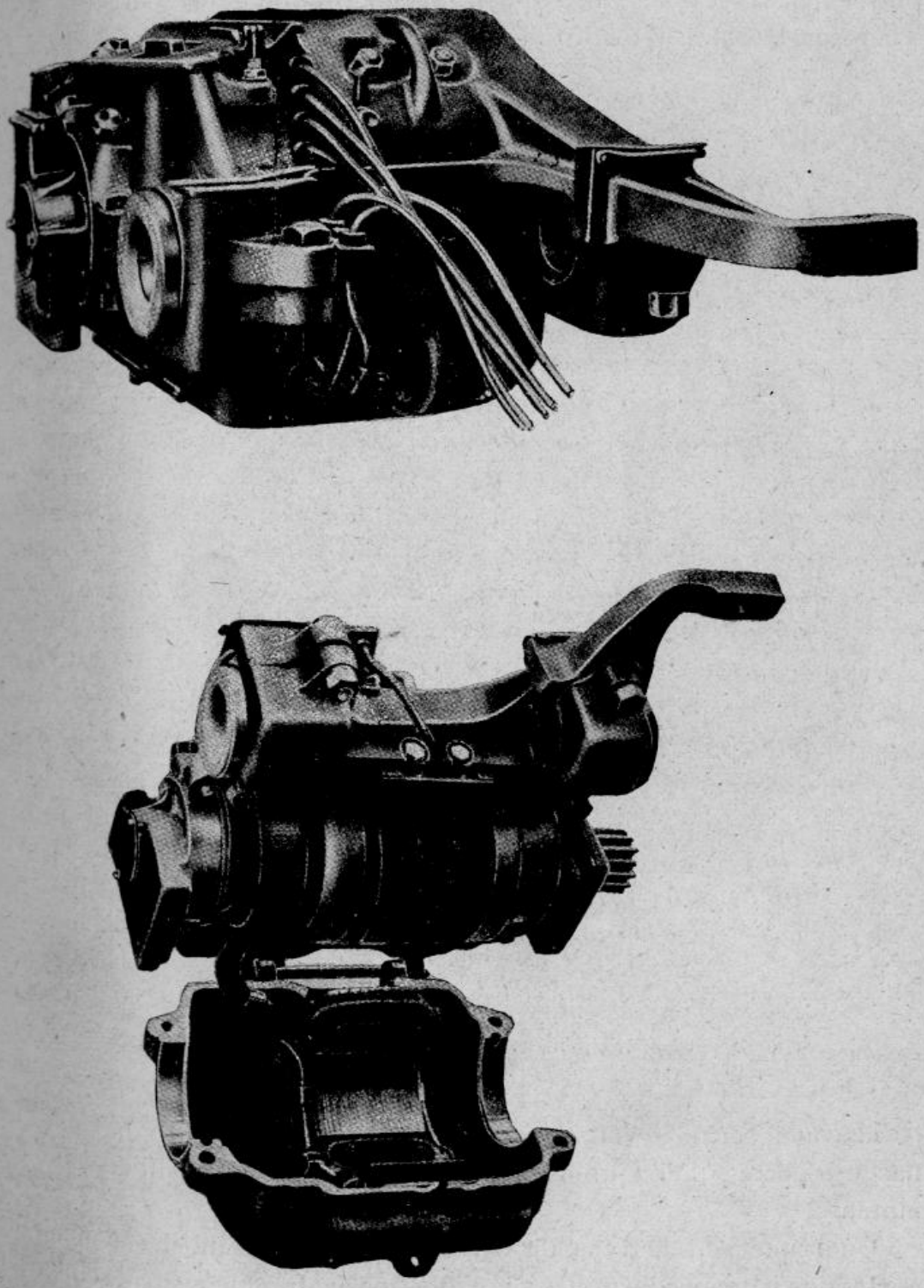


FIG. 151 et 152.

Moteur à carcasse fendue de la Westinghouse type W-307.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donnons les photographies fig. 153 et 154 des deux types de moteurs employés par la Compagnie Générale des Omnibus de Paris, moteurs Thomson-Houston GE-216 de 50 chevaux sous 600 volts et TH-523 de

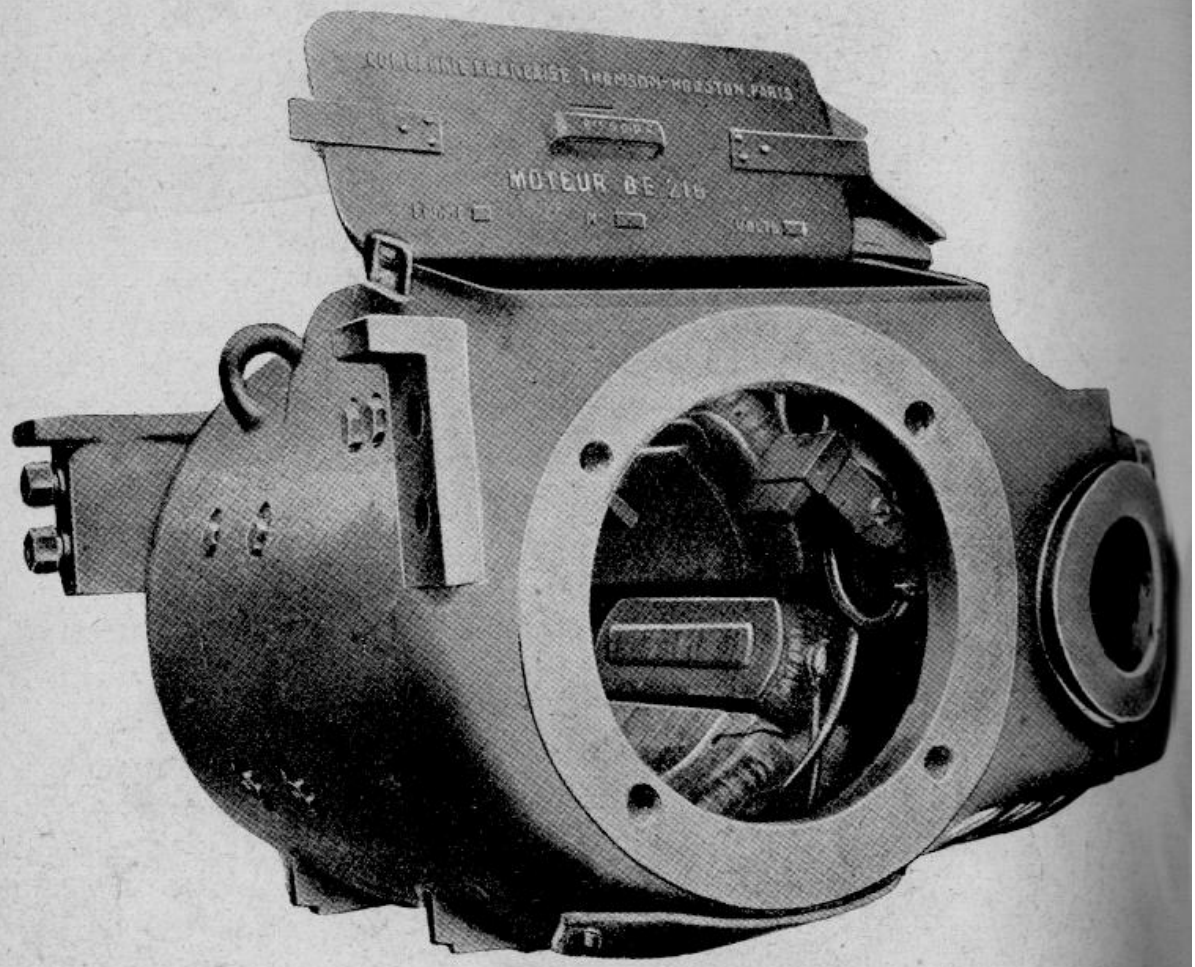


FIG. 153.

Moteur de traction Thomson-Houston, type GE-216 de 50 chevaux de la Compagnie générale des Omnibus de Paris.
Couronne inductrice après démontage des paliers.

60 chevaux, sous 600 volts et dont la photographie (fig. 155), montre les flasques porte-paliers qui ont le même aspect pour l'un ou l'autre de ces moteurs.

Quel que soit le type de carcasse adoptée, celle-ci est munie de portes de visite ou couvercles amovibles, permettant la visite de l'intérieur du moteur, notamment du collecteur et des balais. Ces couvercles sont maintenus par une fermeture à ressort à lame.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

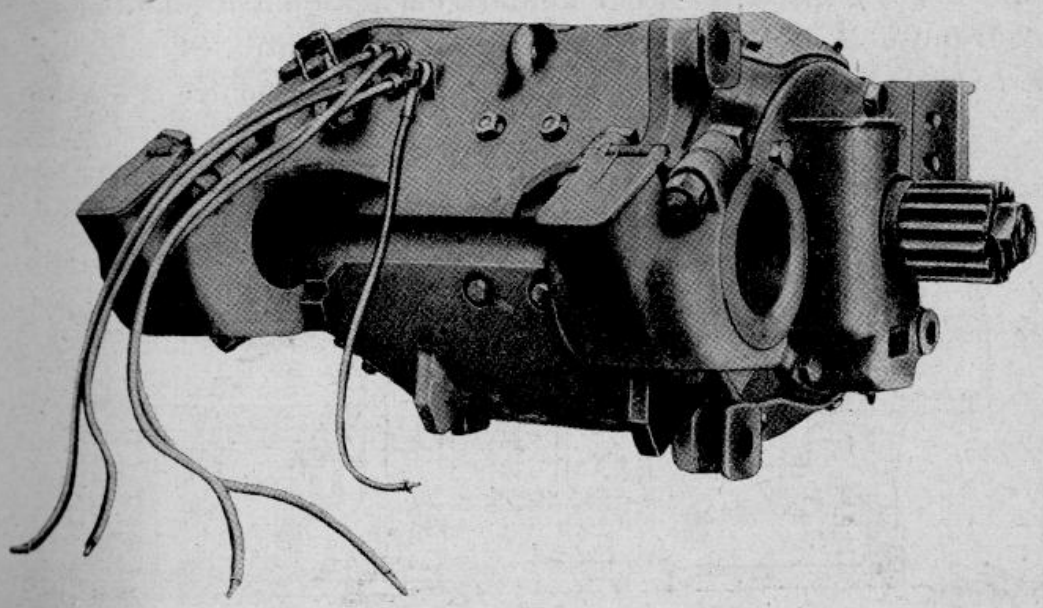


FIG. 154.

Moteur de traction Thomson-Houston, type TH-523 de 60 chevaux de la Compagnie générale des Omnibus de Paris.
Vue d'ensemble.

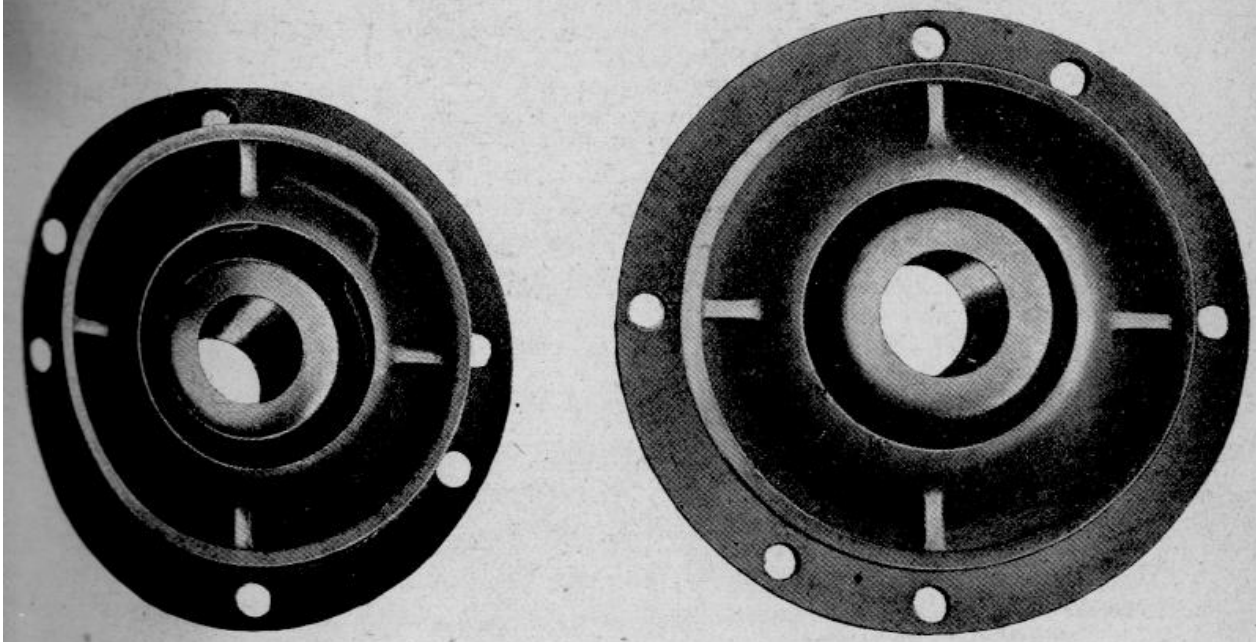


FIG. 155.

Moteurs de traction Thomson-Houston de la Compagnie générale des Omnibus de Paris.
Vues intérieures des flasques porte-paliers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b) Paliers d'induit. — Pour limiter l'encombrement longitudinal du moteur qui doit, le plus généralement, être logé entre les roues, on fait rentrer les paliers à l'intérieur de l'induit comme le montre la figure 156,

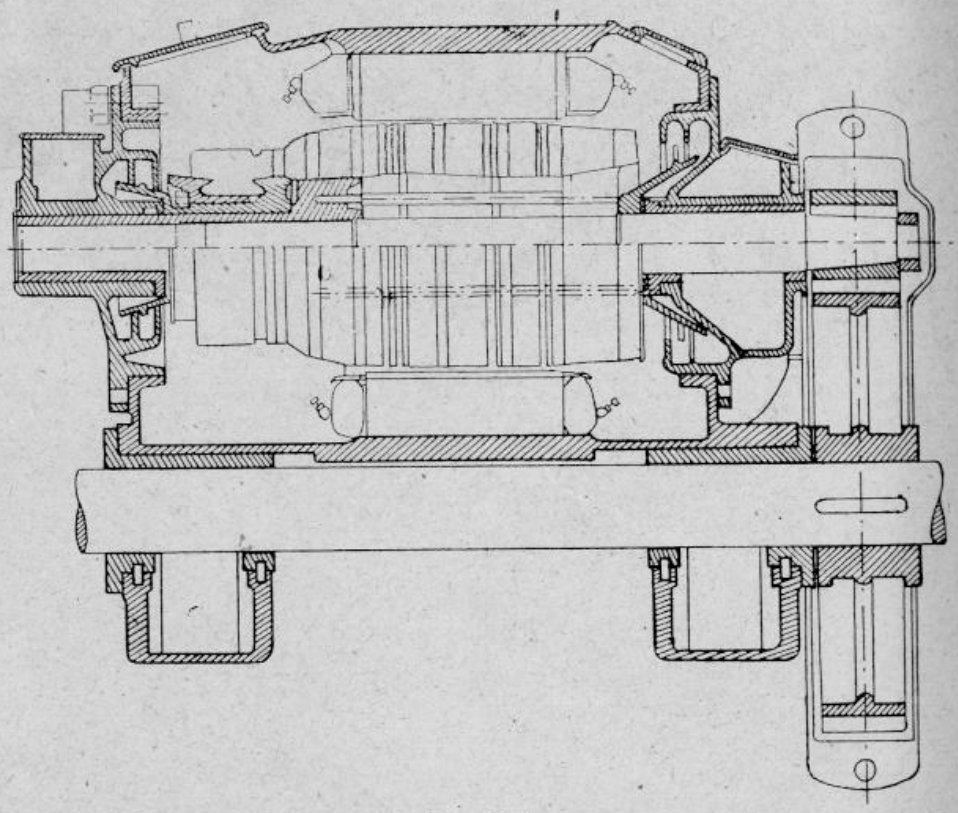


FIG. 156.

Moteur de traction Thomson-Houston, type GE-216, de la Compagnie générale des Omnibus. Coupe longitudinale et élévation.

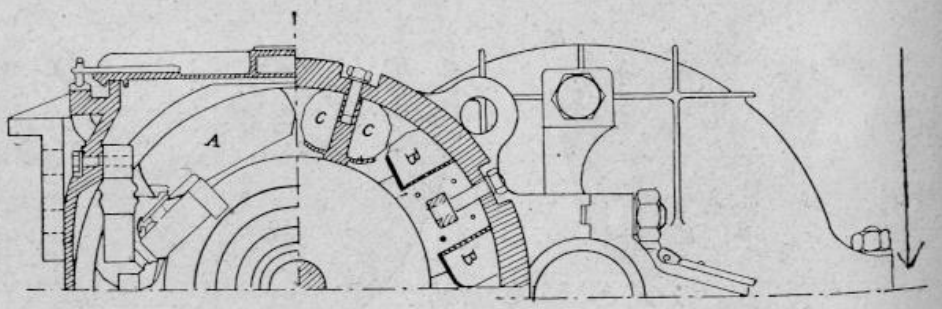


FIG. 157.

Moteur de traction Thomson-Houston, type GE-216, de la Compagnie générale des Omnibus. Vue partielle en élévation et coupe, montrant deux bobines principales A, B. et une bobine de pôle de commutation C en position.

qui donne la section longitudinale du moteur Thomson-Houston GE-216 précédent, dont nous avons également donné (fig. 157), la demi-élévation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et coupe transversales, et la figure 158 qui se rapporte à un moteur Dick-Kerr de 150 chevaux.

Les paliers doivent être largement dimensionnés. Ils sont munis de coussinets qui étaient autrefois en fonte recouverte de métal blanc ordinaire, mais ce métal fondant assez facilement en cas d'échauffement et s'usant trop vite, on les établit aujourd'hui en bronze au plomb, sans anti-friction, ou en bronze dur garni d'un anti-friction " babbitt " spécial formant une bonne surface frottante et assez mince pour que, en s'usant ou en cas de fusion par surchauffe, il n'y ait point de danger que l'armature frotte contre les pièces polaires. La garantie n'est toutefois pas absolue et on a eu des accidents (assez rares cependant) de ce chef.

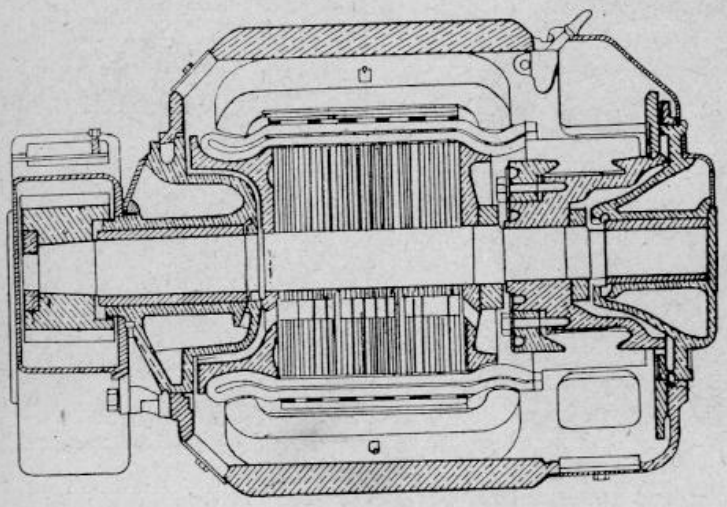


FIG. 158.
Moteur Dick-Kerr. Section longitudinale.

Le graissage adopté maintenant se fait par le bas, avec de l'huile (on employa d'abord de la graisse consistante). La cavité de graissage ou réservoir est remplie de déchets de laine amenant l'huile sur la surface à lubrifier de l'arbre par des ouvertures pratiquées dans les coussinets, du côté où la pression de l'arbre sur ceux-ci est la plus petite. L'huile est introduite par un canal aboutissant à la partie inférieure du réservoir. La figure 159 représente la coupe d'un des paliers du moteur Westinghouse W-307 et la figure 160 un palier d'induit du moteur Thomson-Houston GE-216.

On empêche l'huile d'entrer dans l'intérieur du moteur par des déflecteurs qui rejettent l'huile dans les rainures ménagées dans les chapeaux de paliers, d'où elle est conduite au dehors.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c) Paliers à billes. — Quelques Compagnies de tramways et de chemins de fer (Compagnie générale parisienne des tramways, Compagnie générale française de tramways, Birmingham Tramway Co, Philadelphia Rapid Transit Co, Compagnie du chemin de fer métropolitain de Paris, etc.), essayent depuis quelques années des moteurs dont les paliers d'induit sont munis de roulements à billes. Les billes son en acier cémenté

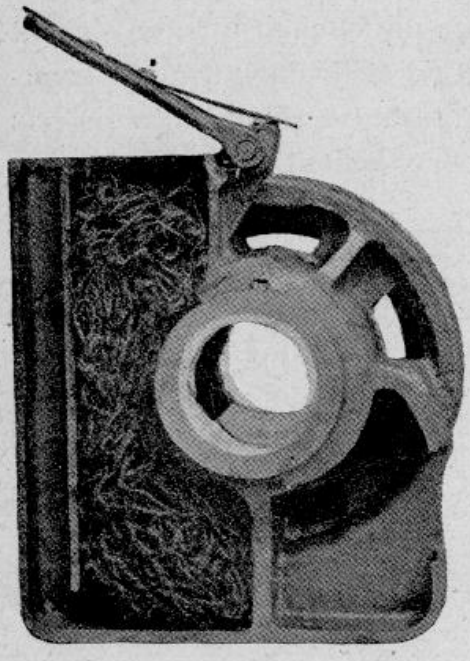


FIG. 159.
Coupe du palier du moteur Westinghouse W-307.

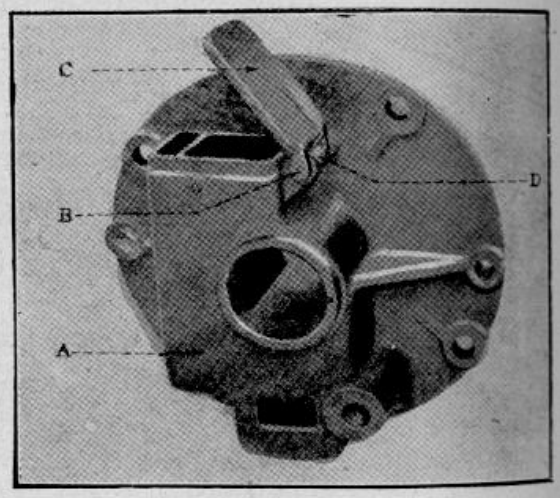


FIG. 160.
Moteur de traction Thomson-Houston GE-216. Graissage. Vue d'un palier d'induit.

et trempé et sont maintenues entre deux coussinets concentriques en forme de bagues. Les bagues intérieures sont calées directement sur l'arbre de l'induit et sont maintenues entre un épaulement de l'arbre et un écrou de serrage (fig. 161). Les bagues extérieures entrent à frottement très doux dans des paliers. L'un des roulements à billes sert de butée, la bague extérieure correspondante ne peut se déplacer que de 5/10e environ au total dans le sens de l'arbre. L'autre est libre dans son logement.

Les avantages invoqués en faveur des roulements à billes sont d'abord une diminution des pertes par frottement, par rapport aux paliers ordinaires à coussinets lisses, ce qui se traduit par une diminution de la consommation de courant; elle est, toutefois, assez peu importante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il semble surtout que les principaux avantages résident dans les faits suivants :

L'arbre restant toujours à une hauteur fixe, on n'a pas à craindre que l'induit ne vienne frotter sur les masses polaires, comme cela peut se produire dans un moteur ordinaire par suite de la fusion de l'anti-friction des coussinets. La consommation en lubrifiant est beaucoup moindre, étant donné que seule, la bille se trouvant à la partie inférieure est com-

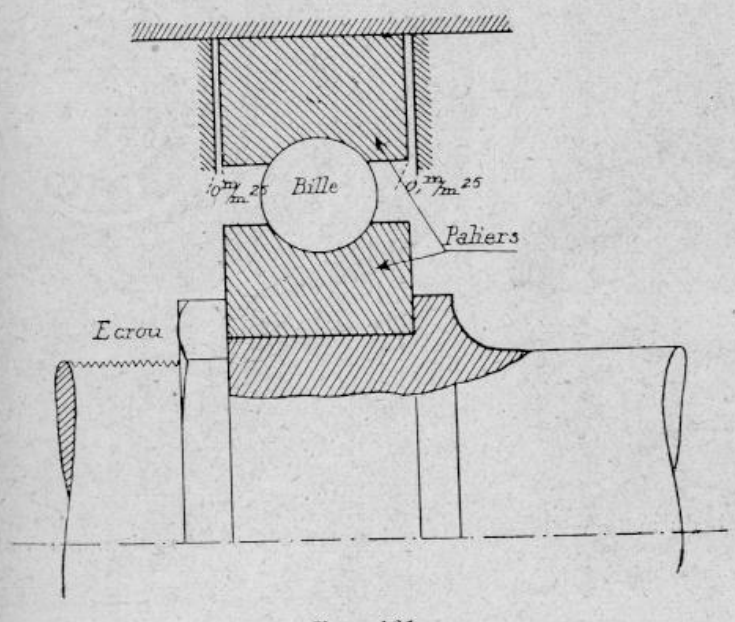


FIG. 161.

Paliers à billes.

plètement baignée dans l'huile. L'huile employée doit être neutre pour ne pas attaquer les roulements. Enfin, ces paliers ont un encombrement moindre que les paliers lisses ordinaires.

On peut combiner avec ces paliers des paliers à rouleaux pour les essieux (boîtes à graisse). C'est dans ce cas que l'économie dans la consommation de courant devient surtout appréciable.

Nous signalerons, en passant, l'application récente de ces roulements à billes et à rouleaux faits par la C. G. O. de Paris, avec quelques uns de ses nouveaux moteurs, type GE-216, construits par la Compagnie Thomson-Houston. La figure 162 représente l'induit d'un de ces moteurs, et la figure 163 montre l'aspect extérieur d'un moteur Brown Boveri à paliers à billes.

Il faut toutefois observer que les roulements à billes demandent un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soin particulier lors de leur mise en place ou de l'enlèvement de l'induit. D'autre part, les paliers doivent être particulièrement bien protégés

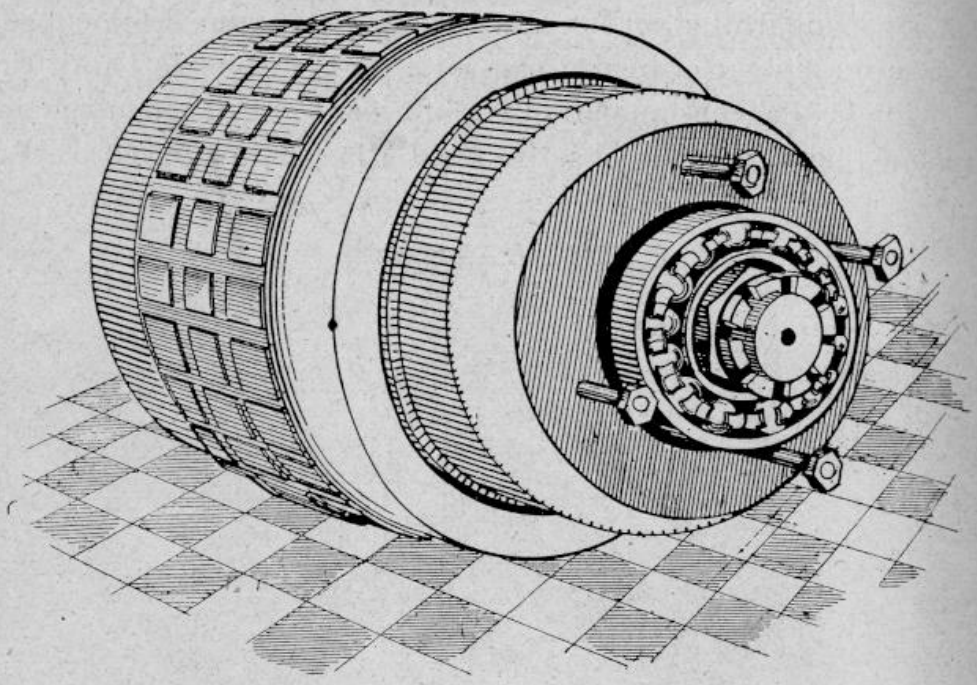


FIG. 162.

Induit du moteur Thomson-Houston GE-216 avec roulements à billes.

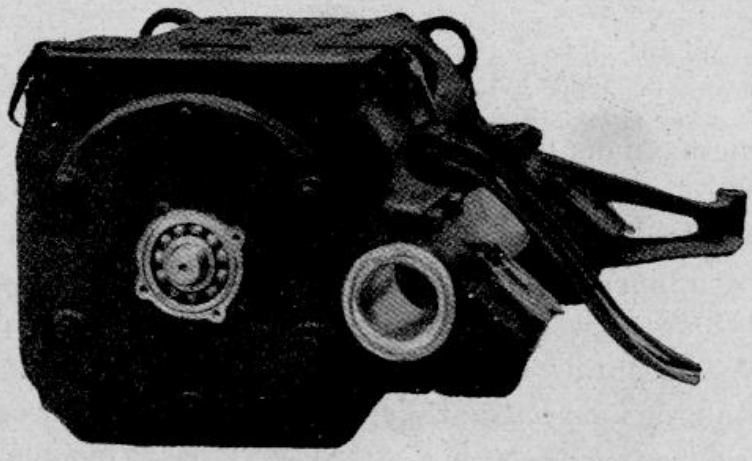


FIG. 163.

Moteur Brown-Boveri à paliers à billes.

contre l'introduction des poussières. Les corps étrangers sont en effet susceptibles, dans la plupart des cas, d'amener la détérioration rapide

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des paliers. C'est ce qui fait, qu'en définitive, les résultats pratiques de l'emploi des paliers à billes varient beaucoup ; ils sont bons dans certains

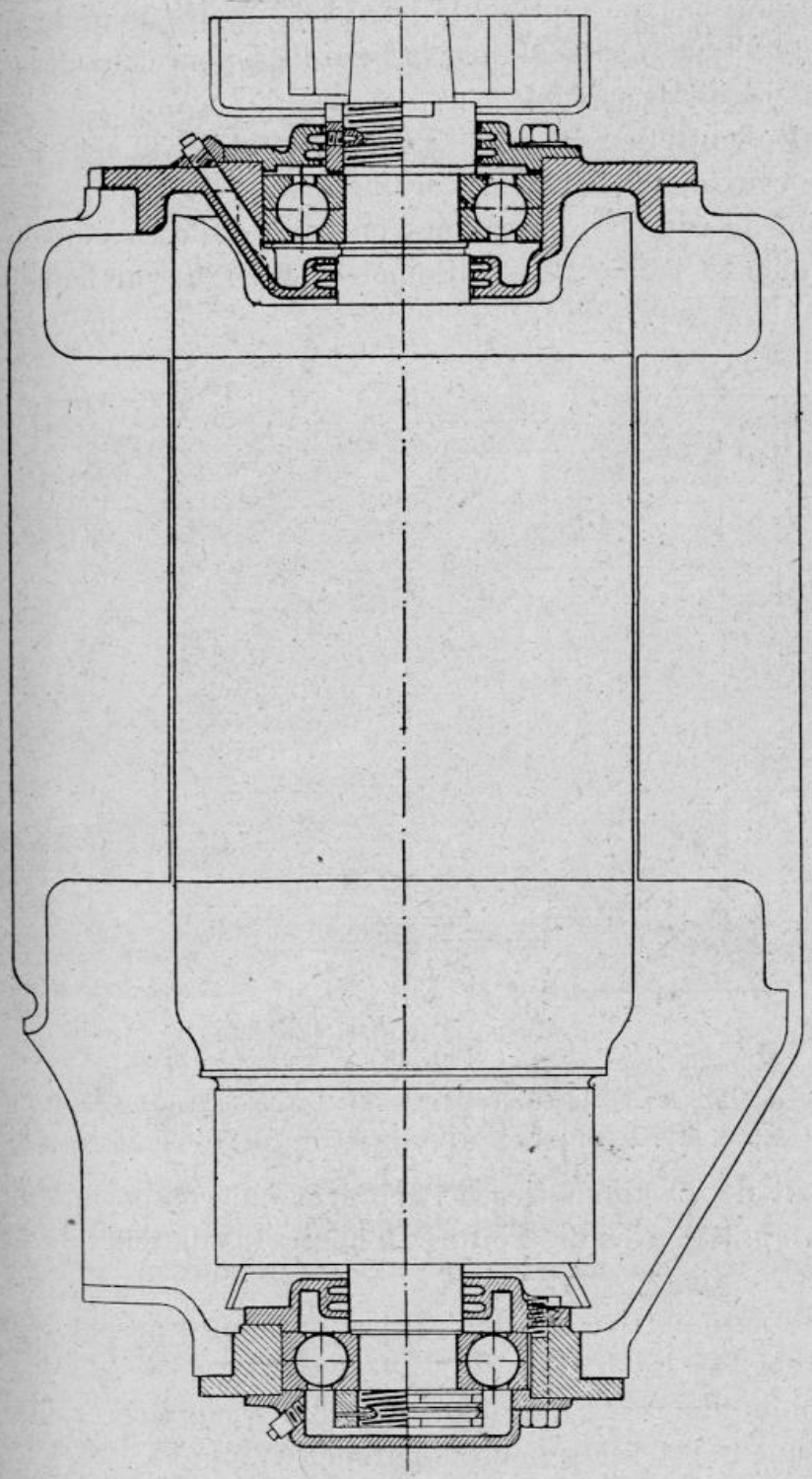


FIG. 164.

Paliers à billes pour arbre de moteur. — Philadelphia Rapid Transit Co.

cas et mauvais dans d'autres. Enfin, le prix de revient du moteur s'en trouve sensiblement accru.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La Compagnie américaine, le " Philadelphia Rapid Transit Co ", qui utilise depuis octobre 1910, sur une grande échelle, les roulements à billes qui sont du type représenté par la figure 164 pour les paliers des moteurs et du type représenté par la figure 165 pour ceux des essieux, est arrivée aux résultats suivants :

Les frais d'entretien des paliers à billes sont de 30 à 40 p. 100 moins élevés que ceux des paliers lisses ordinaires.

Au point de vue consommation d'énergie, des essais effectués sur un parcours aller et retour de 27 kilomètres environ, sur lequel la vitesse

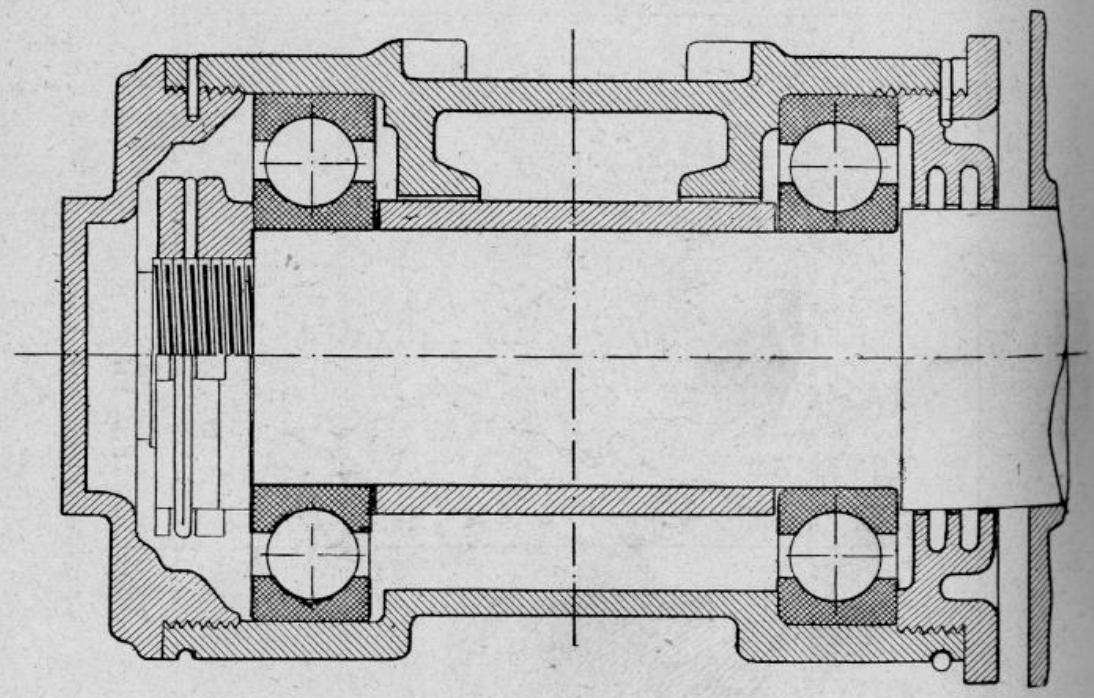


FIG. 165.

Paliers à billes pour fusées d'essieu. — Philadelphia Rapid Transit Co.

maxima était de 29 kilomètres à l'heure et qui comportait une rampe maxima de 6 p. 100, avec des voitures à bogies à 4 moteurs de 40 chevaux ont donné :

Pour une automotrice à paliers lisses ordinaires pesant 18.500 kilos, consommation 44,5 kw-h ;

Pour une automotrice à roulements à billes aux arbres des moteurs seuls et pesant 18.800 kilos, consommation : 34,5 kw-h.

Au chemin de fer électrique Montreux-Oberland bernois, des roulements à billes ont été expérimentés en 1910 sur des automotrices et sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des remorques, et leur emploi a été généralisé en 1912 pour les arbres des moteurs et les essieux. Les voitures sont à bogies et la voie à écartement de 1 mètre. Cette Compagnie a trouvé (1) que pour un wagon chargé pesant au total 26 tonnes, la résistance au roulement était seulement de 2 kg. 3 par tonne contre 5 kg. 3 avec les paliers lisses ordinaires, et qu'en outre, l'emploi des paliers à billes procurait une économie de graissage de 50 p. 100.

d) Armature ou induit ou rotor. — Après avoir réalisé des induits à enroulement Gramme, lisses, avec conducteurs maintenus en place par un

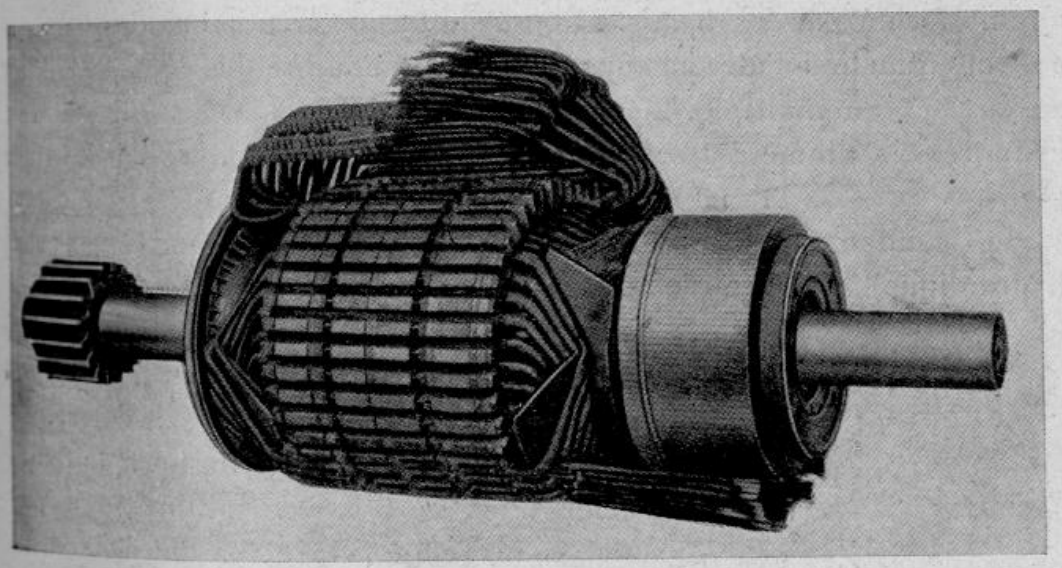


FIG. 166.

Induit en cours de bobinage.

frettage pour lequel on revendiquait simplicité, robustesse des connexions et facilité de défaire une section sans toucher aux autres, on en vint aux *induits à enroulement tambour* (Siemens), rendus nécessaires par l'emploi de plus de 2 pôles, de voltages de service plus grands et, par conséquent, de collecteurs plus subdivisés. Les tôles sont aussi plus solidement montées sur l'arbre qu'avec l'anneau Gramme. En outre, avec les induits dentés, les fils sont plus solidement fixés. La photographie (fig. 166), représente un induit en cours de bobinage.

(1) D'après le Génie civil du 20 Mars 1915.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les bobines de l'enroulement sont formées de plusieurs sections élémentaires isolées, bobinées à la machine sur forme. On glisse entre les fils du papier gomme-laqué ou analogue, puis le tout est pressé à la forme voulue dans des moules chauffés à la vapeur, puis refroidis à l'eau; on isole ensuite les sections à la toile huilée et on les enduit d'un vernis isolant, puis on les sèche à l'étuve.

Les sections sont interchangeables. Pour remplacer une section, il suffit d'enlever les sections voisines, un quart environ du nombre total.

Dans les moteurs modernes, tout au moins les plus puissants, on ne met qu'une section à une spire entre deux lames successives du collecteur; ceci améliore la commutation en diminuant la self-induction du circuit fermé par les balais. Il en résulte que le nombre des lames au collecteur au lieu d'être un sous-multiple du nombre des dents de l'induit, en devient un multiple. Les connexions sont disposées suivant deux cylindres de diamètres différents ou en développantes suivant deux plans.

Les conducteurs des sections sont formés de câbles pressés (à la presse hydraulique) à section rectangulaire ou de barres de cuivre.

La densité de courant dans l'induit varie de 4 à 5 ampères pour la puissance normale (horaire) et par mm² de section de cuivre.

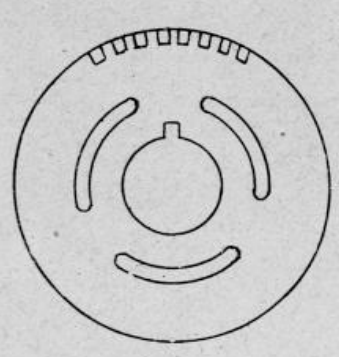


Fig. 167.

Les *tôles d'induit* sont formées de feuilles d'acier doux de 6/10e de millimètre d'épaisseur en moyenne, clavetées directement sur l'arbre ou sur un manchon entourant l'arbre, ce qui permet de démonter facilement l'induit sans déranger le bobinage.

Les tôles sont séparées par paquets au moyen de cloisons qui leur sont normales et traversées par des canaux de ventilation, comme le montre le croquis (fig. 167). Les tôles extrêmes des paquets ont une épaisseur plus forte pour donner de la rigidité à l'ensemble. Elles sont maintenues entre elles par des flasques.

Dans le cas de l'emploi du manchon précédent, un des flasques fait souvent corps avec lui.

Les tôles sont isolées entre elles par simple oxydation, par un vernis ou par du papier. On peut compter que 1/10e à 1/20e de l'épaisseur est occupé par l'isolant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les tôles sont dentées pour recevoir les sections (fig. 167-168). On a d'abord fait des encoches de petites dimensions dans lesquelles le bobinage était simplement retenu par des frettes en fil d'acier. On a eu des accidents dus au desserrage des frettes par les vibrations et les actions magnétiques. Actuellement, on a des encoches plus grandes fermées par des cales en bois (fig. 169), ou mieux en fibre dure, maintenues dans des rainures pratiquées dans les tôles.

Enfin, sur e tout, des frettes en fils d'acier (soudés entre eux ou non), retenues entre elles par des pièces soudées.

Chaque encoche de l'induit comprend, en général, plusieurs sections.



Fig. 168.

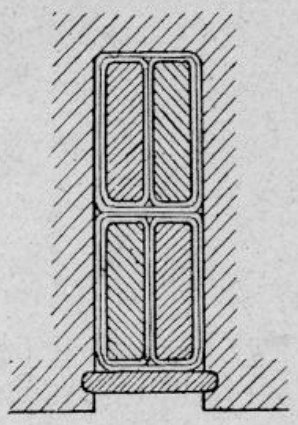


Fig. 169.

e) Pôles inducteurs. — Les *pôles principaux* sont généralement *feuilletés*, en vue d'éviter l'échauffement dans les cornes polaires par l'effet des courants de Foucault. On forme des paquets de tôles maintenues entre elles par des boulons. Les paquets s'ajustent sur une surface plane ou cylindrique à l'intérieur de la carcasse et normale au plan de feuilletage (fig. 170). Quelquefois les culasses des pôles feuilletés sont prises dans la carcasse fondue (fig. 171). On emploie

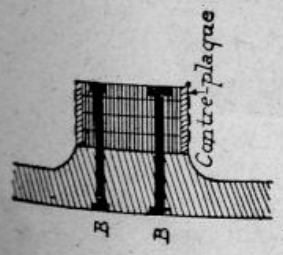


Fig. 170.

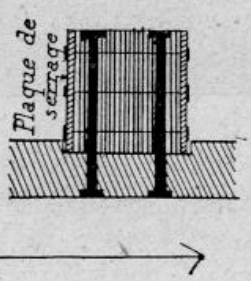


Fig. 171.

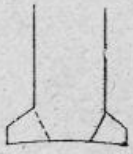


Fig. 172.

souvent des tôles découpées de telle sorte qu'alternativement, d'un côté ou de l'autre, une corne soit coupée (fig. 172). Cette disposition fait varier la réluctance du circuit magnétique qui passe dans les cornes polaires, en même temps qu'elle ménage une certaine ventilation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les moteurs à pôles de commutation, ces pôles sont le plus souvent en acier coulé magnétique ou en acier doux estampé qui donne des pièces venant mieux que les pièces moulées et nécessitant moins d'usinage. Ils sont boulonnés sur des portées finies, ménagées à l'intérieur de la carcasse.

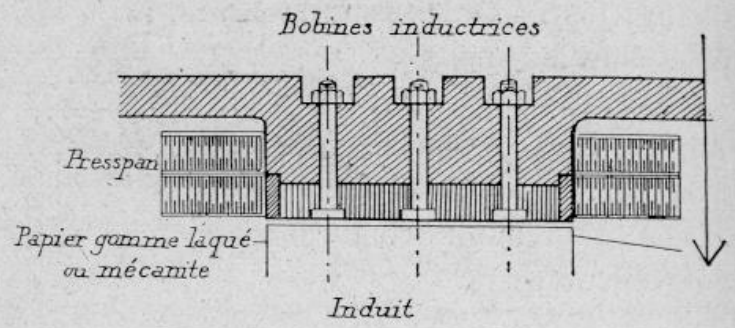


FIG. 173.

f) Enroulement des inducteurs. — Les bobines inductrices principales sont formées de fil de cuivre enroulé ou de ruban de cuivre rouge enroulé à plat (fig. 173). Les différentes spires étant isolées les unes des autres par du papier ou du coton avec du ruban amiante, les bobines sont en outre imprégnées à chaud et sous pression d'une composition isolante

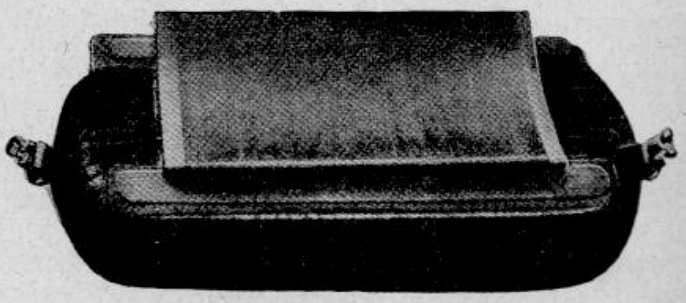


FIG. 174.

Moteur de traction. — Bobine inductrice principale.

pénétrante. Les bobines des pôles de commutation sont faites avec du ruban de cuivre isolé au coton et au vernis, ou avec du fil rond isolé de même.

Les bobines inductrices sont souvent montées sur une carcasse en laiton, ce qui a l'avantage de leur donner de la rigidité et d'en faciliter le démontage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les figures 174-175 montrent un pôle inducteur principal et un pôle de commutation, munis chacun de sa bobine. On voit sur les figures le mode de fixation, au moyen de clavettes, de chaque bobine sur son pôle.

g) Collecteur. — Le collecteur est une partie très délicate et sujette



FIG. 175.

Moteur de traction. — Bobine d'un pôle de commutation.

à une usure rapide. Il doit être largement dimensionné. Il est sujet à de nombreuses causes de détérioration : la poussière, le charbon, l'humidité. Des projections d'huile de graissage peuvent, en outre, déterminer des courts-circuits entre segments.

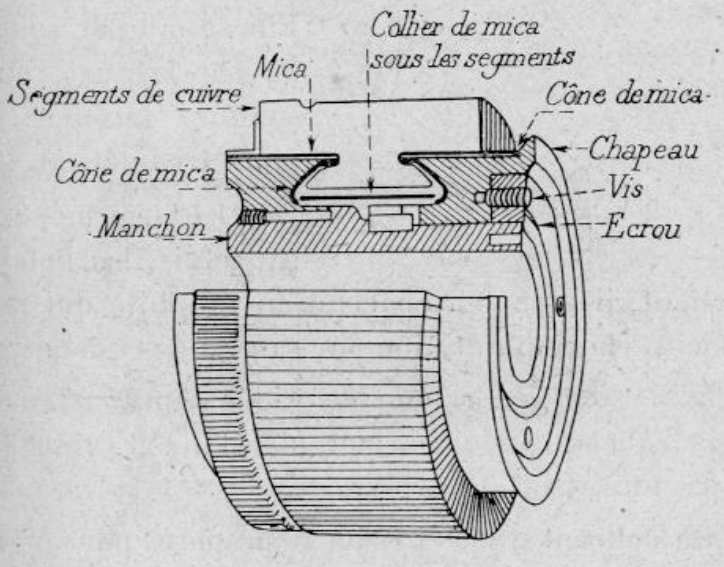


FIG. 176.

Collecteur.

Les lames découpées dans des barres de cuivre dur étiré, à section en forme de cône tronqué, sont assemblées et taillées en queue d'hironde, comme le montre la figure 176, entre les deux parties d'un manchon spécial claveté sur l'arbre. Les lames sont isolées entre elles par du mica,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de la masse par du mica sous forme de micanite en formes embouties (feuilles de mica collées et pressées ensemble).

Le mica entre segments doit être relativement tendre (mica blanchâtre du Canada, de prix assez élevé) ; sa dureté doit être inférieure à celle du cuivre afin qu'il s'use également avec ce métal. Cela est une difficulté et a conduit les constructeurs américains, sur la demande des Compagnies d'exploitation, à « gratter » le mica, quand il est fait emploi de mica dur, c'est-à-dire à enlever le mica entre segments sur une certaine profondeur (1 mm. 1 à 1 mm. 2) au moyen d'une petite scie rotative par exemple.

On tend de plus en plus à augmenter le nombre des lames du collecteur pour n'avoir qu'une spire entre chaque lame et améliorer, comme nous l'avons vu, la commutation.

Un autre point à signaler est la liaison des conducteurs de l'induit aux lames du collecteur. Elle se fait par soudure à l'étain ou par brasure, ou encore par soudure autogène. C'est là un point très délicat.

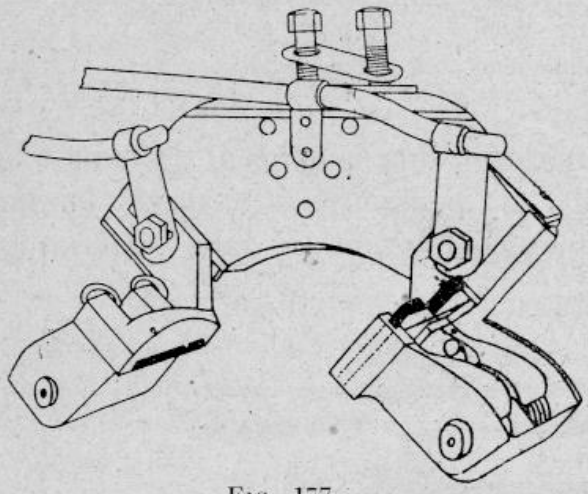


FIG. 177.
Porte-balais.

h) Balais et porte-balais. — Autrefois, les balais étaient en cuivre. Maintenant, ils sont en charbon au graphite qui ne raye pas le collecteur et facilite la commutation par sa grande résistance au contact.

Les porte-balais sont généralement formés d'un fourreau ou gaîne de cuivre fixe dans lequel glisse le charbon, maintenu et pressé sur la surface du collecteur par un ressort (fig. 177).

La densité du courant est d'environ 10 ampères par cm^2 de charbon. La pression du balai sur le collecteur est d'environ 400 à 500 grammes par cm^2. La partie fixe du porte-balai est souvent en bronze fondu et est fixée à des supports boulonnés à la carcasse inductrice, par l'intermédiaire de tiges isolées (généralement au mica). Les porte-balais peuvent glisser légèrement sur leurs supports afin de permettre leur ajustage.

Ainsi qu'il a été dit, les balais sont toujours calés dans le plan neutre.

Tous les câbles de connexion sont amenés au dehors à travers la car-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

casse qu'ils traversent en passant dans des bouchons annulaires en caoutchouc, ébonite ou analogue.

i) Isolants. — Les moteurs de traction sont constamment exposés aux alternatives de chaud et de froid, de sécheresse et d'humidité ; aussi faut-il prendre les plus grandes précautions pour assurer l'isolement des spires de l'enroulement entre elles et avec la masse.

Au début, on se contentait d'isoler les conducteurs de l'induit et de l'inducteur au coton. On abandonna ensuite ce mode d'isolement très insuffisant, pour employer le papier. On a alors entouré les conducteurs de plusieurs épaisseurs de papier préalablement gomme-laqué et on plongeait l'ensemble du conducteur ainsi constitué dans un bain de gomme-laque.

On a reconnu que ce procédé ne donnait pas encore un isolement suffisant. Maintenant, on recouvre les conducteurs de rubans superposés de toile huilée, puis, la section étant complètement garnie, on la badigeonne avec un vernis isolant, qui donne aux enroulements un aspect noirâtre.

Pour des moteurs fonctionnant à hauts voltages, on emploie préférablement des tissus à l'amiante ou du papier micaté.

j) Engrenages et carters. — Généralement, ainsi que nous le verrons plus loin en détail, la transmission du couple moteur à l'essieu est réalisée au moyen d'engrenages formant le plus souvent un seul train.

La disposition adoptée par la plupart des constructeurs, à partir de 1891, est due à Sprague et correspond au schéma ci-contre (fig. 178) :

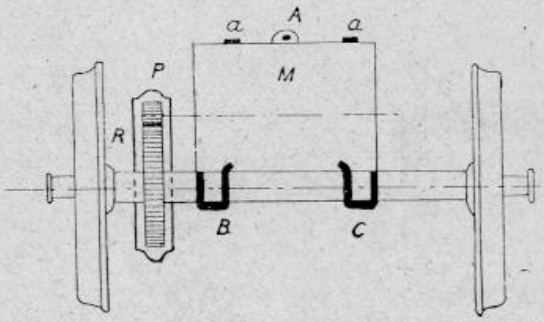


FIG. 178.

Le moteur M est suspendu élastiquement au truck par l'intermédiaire par exemple d'une barre de suspension fixée à la carcasse soit en un point A soit en deux points $a.a$ et s'appuie en B et C sur l'essieu par des paliers. L'arbre de l'induit traverse la carcasse inductrice et repose dans deux coussinets maintenus dans les paliers solidaires de la carcasse (flasques-paliers). Une de ses extrémités est légèrement conique et forme portée.

Sur cette portée est calé un pignon P. Elle est, en outre, terminée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

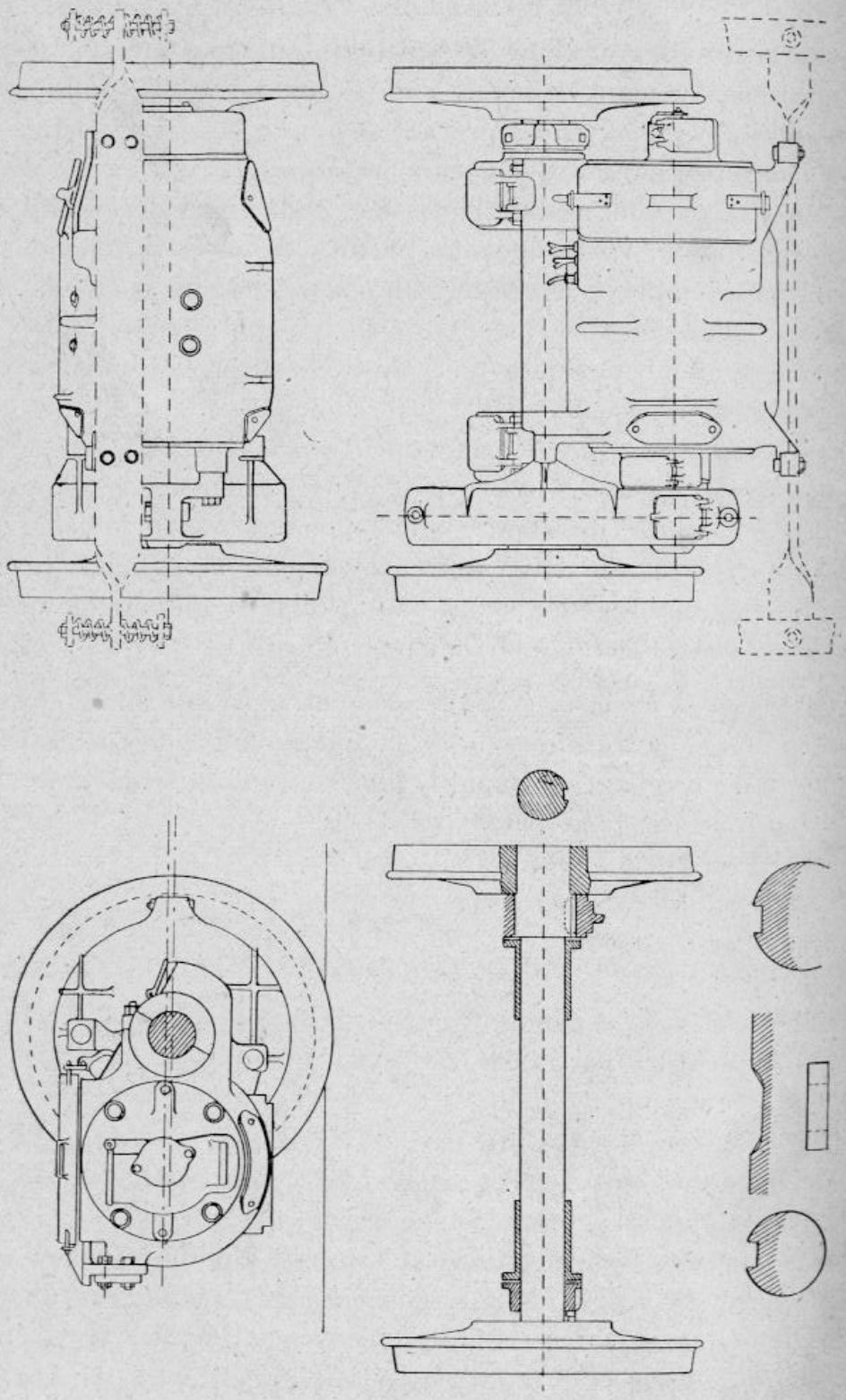


FIG. 179 à 182.
Montage sur essieu du moteur de traction Thomson-Houston GE-216 de 50 chevaux.
(Dessins d'encombrement à l'échelle approx. de 1/30e.)

par quelques filets de vis pour recevoir un écrou de fixation. Enfin le pignon engrène avec une roue dentée R calée sur l'essieu. Comme exemple de réalisation de ce montage, nous donnons, fig. 179 à 182, différentes vues du montage du moteur GE-216 de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris.

La question engrenages est des plus importantes en exploitation.

Le pignon est d'une seule pièce en *acier forgé* et comprend, en général, 14 à 22 dents. La roue dentée est en *acier coulé*, souvent trempé après le taillage des dents et est en deux pièces réunies par des boulons. La coupure est diamétrale. Une telle roue comprend en général de 60 à 80 dents.

Le rapport de réduction que nous avons appelé $\frac{1}{m}$ est alors généralement compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{5}$. Le nombre m, est en dehors de cas très particuliers, *un nombre incommensurable*. On peut dire que c'est la règle. Ceci afin d'éviter une usure inégale des dents qui se produirait si les nombres de dents du pignon et de la roue dentée n'étaient pas premiers entre eux, car, s'ils avaient un multiple commun, les mêmes dents viendraient périodiquement en contact. A titre d'exemple, voici quelques-unes des valeurs de « m » les plus communément employées :

$$\frac{73}{19}, \frac{72}{17}, \frac{71}{15}, \frac{70}{19}, \frac{69}{19}, \frac{69}{15}, \frac{67}{14}, \frac{65}{18}, \text{ etc.....}$$

Un même moteur peut d'ailleurs naturellement être employé avec des engrenages différents. Il faut toutefois observer que la distance entre axes de l'arbre de l'induit et de l'essieu est invariable, ce qui se traduit pratiquement, au point de vue engrenages, par cette condition que la somme des nombres de dents du pignon et de la roue d'engrenage reste le même. Ainsi, pour un moteur donné, on pourra employer par exemple les rapports d'engrenages :

$$\frac{73}{15}, \frac{71}{17}, \frac{69}{19}, \frac{67}{21}, \text{ etc.....}$$

Les engrenages sont généralement droits et la forme des dents est la développante de cercle qui leur donne une forte base. Les dents peuvent être moulées, mais elles sont de préférence taillées à la fraise, au moyen de machines automatiques spéciales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut compter, en moyenne, qu'un pignon vaut 15 à 20 francs et une roue dentée environ 150 francs. La durée moyenne pour une voiture faisant 130 kilomètres par jour, est de 9 mois environ pour le pignon de 3 ans pour la roue dentée.

L'acier coulé des roues dentées, pour les moteurs les plus usuels, soit jusqu'à 75 HP, a une charge de rupture R de 40 à 45 kilogs par mm², une limite élastique LE de 16 à 18 kilogs par mm², un allongement A de 18 à 20 p. 100. L'acier des pignons correspondants est à

$$R = 50 \text{ à } 55,\ LE = 32 \text{ à } 34,\ A = 20 \text{ p. } 100.$$

Pour les équipements plus puissants, il faut un meilleur acier (obtenu en augmentant la proportion de carbone), correspondant à environ

$$R = 50\ (A = 20 \text{ p. } 100)$$

pour la roue et

$$R = 65 \text{ à } 75\ (A = 22 \text{ p. } 100)$$

pour le pignon.

Enfin, pour les services très durs, on fait subir aux pignons un traitement spécial après taillage, avec trempe à l'huile. On obtient alors jusqu'à

$$R = 80,\ LE = 55 \text{ à } 60$$

et A = 30 à 35 p. 100, en même temps que la striction est très réduite. Pour ces services, on a essayé des aciers au chrome-vanadium, mais il semble que l'acier au carbone, convenablement choisi et traité, donne les meilleurs résultats; le prix du traitement est assez élevé. Avec ces pignons, les roues sont souvent constituées par une jante emmanchée à chaud sur le corps de la roue.

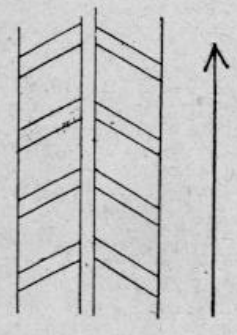


Fig. 183.
Engrenages à chevrons interrompus.

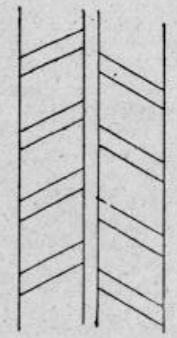


Fig. 184.
Engrenages à chevrons. Dentures décalées.

On emploie quelquefois des *engrenages hélicoïdaux* doubles, en acier fondu, qui donnent de plus grandes surfaces d'appui et réduisent les frottements. En remplaçant l'arc d'hélice suivant lequel est taillée la dent par une droite tangente à cet arc, on obtient des engrenages *à chevrons* très solides (fig. 183). On emploie encore des engrenages à chevrons interrompus et à dentures décalées pour détruire le synchronisme des vibrations dans les dents (fig. 184).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le cas général est l'engrenage cylindrique droit à développante. — Dans tous les cas, le train réducteur est enfermé dans un carter protecteur contenant un lubrifiant : graisse semi-fluide ou huile. Le carter est en fonte malléable ou en tôles rivées, ce qui réduit le poids, mais il y a danger à ce que les rivets ne prennent du jeu par suite des vibrations auxquelles ils sont soumis, aussi emploie-t-on préférablement des tôles soudées à la soudure autogène. On emploie aussi des carters en aluminium qui semblent être avantageux et dont l'usage paraît se généraliser.

Le carter est rattaché à la carcasse du moteur en plusieurs points, généralement trois, au moyen de boulons. Le carter doit enfin être muni de portes de visite découvrant les engrenages.

Quant aux pertes par frottements dans les engrenages et dans les coussinets (cas de la réduction simple), on peut admettre en moyenne qu'elle se monte à environ 5 p. 100 de la puissance développée. Ce chiffre est plutôt un maximum et correspond à la puissance normale du moteur.

90. **Remarques sur les moteurs à courant continu haute tension.** — Pour les lignes de tramways et analogues, la tension admise est 500-600 volts (maximum admis par les règlements : 600). Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, il y a nécessité à employer des tensions plus grandes dès qu'il s'agit de lignes un peu longues et à trafic un peu considérable, afin de réduire l'intensité du courant nécessaire, et pour ne pas multiplier les sous-stations.

La construction ordinaire des premiers moteurs de tramways ne permettait guère de dépasser de beaucoup le voltage maximum ci-dessus. L'application de pôles supplémentaires a permis, au point de vue de la commutation, l'emploi de voltages plus élevés en même temps que les perfectionnements résultant de l'expérience acquise, ont permis d'obtenir des isolements convenables avec de plus grandes distances de fuites, sans que l'encombrement ou le type général de construction ait dû être radicalement modifié.

En fait, on a pu utiliser certaines carcasses de moteurs, type tramway ordinaire, pour en faire des moteurs à pôles supplémentaires pour haute tension, soit 1.000 volts et plus.

La réalisation pratique d'une carcasse avec doubles pôles : pôles inducteurs et pôles de commutation est souvent difficile, vu le faible espace dont on dispose pour loger les bobines.

Un exemple-type d'un moteur à courant continu à haute tension est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

celui de 135 chevaux (régime horaire), sous *1.000 volts*, construit par la Compagnie Siemens-Schuckert, pour la ligne de *Cologne à Bonn*.

Les figures 185-188 donnent la section transversale de ce moteur et les figures 189 et 190 montrent le même moteur, seul, et monté sur son essieu.

Ce moteur est muni de pôles de commutation et l'intérieur de la carcasse est garni d'une substance isolante non inflammable. MM. Siemens-Schuckert ont également réalisé des moteurs de 160 chevaux pour 2.000 volts, de construction analogue à celle des moteurs de 1.000 volts. Dans le cas de 2.000 volts, 2 moteurs sont couplés en série d'une manière permanente et quoique chaque moteur fonctionne sous 1.000 volts à ses bornes, il est nécessaire de prévoir l'isolement à la terre du bobinage de chaque moteur pour 2.000 volts, car la terre sert de retour du courant.

On peut dire qu'actuellement les moteurs à courant continu, 1.000 et même 1.200 volts, sont d'un emploi courant en traction. La General Electric Co en particulier, a équipé pendant ces dernières années plusieurs lignes à 1.200 volts pour lesquelles les moteurs fonctionnent directement sous cette tension dans leur couplage en parallèle. Pour d'autres, les moteurs restent en permanence couplés par deux. Mais l'isolement des moteurs à la masse est toujours à prévoir pour 1.200 volts.

Cette même firme a également construit plusieurs lignes à 2.400 volts pour lesquelles les moteurs sont couplés par deux en série sous la tension totale, soit donc 1.200 volts par moteur (lignes du Butte-Anaconda-Pacific, du Canadian Northern, etc.).

Citons encore les moteurs des locomotives de 250 tonnes du Chicago-Milwaukee-St-Paul de la même firme et déjà mentionnées. Ces locomotives sont alimentées sous 3.000 volts et sont de deux types. Pour l'un, les moteurs sont du type tétrapolaire et couplés par deux en série et pour l'autre, ils sont du type bipolaire et couplés par trois en série, sous la même tension totale 3.000 volts. Dans le premier cas, chaque moteur est donc sous 1.500 volts, ce qui est le maximum actuellement appliqué en traction pour un moteur simple et pour une ligne en exploitation régulière; dans le second cas, chaque moteur est sous 1.000 volts.

La figure 191 (1) représente la section transversale du premier de ces moteurs dont la puissance uni-horaire est de 430 chevaux sous 1.500 volts.

Nous terminerons par un dernier exemple qui présente des disposi-

(1) Empruntée à la *General Electric Review*, de novembre 1916.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

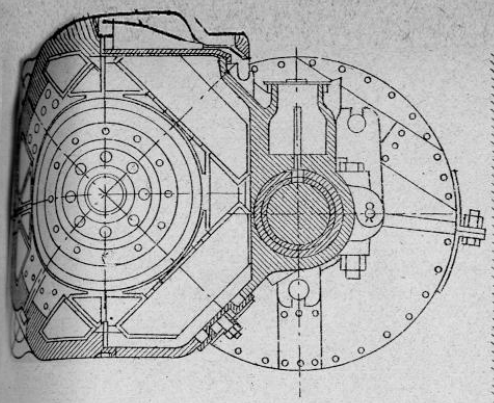


Fig. 185

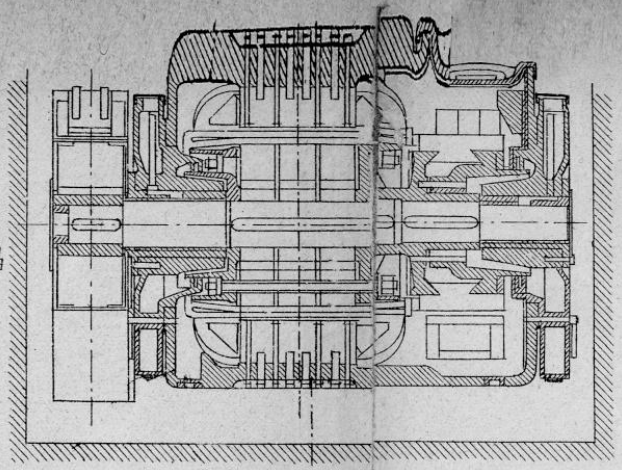


Fig. 186

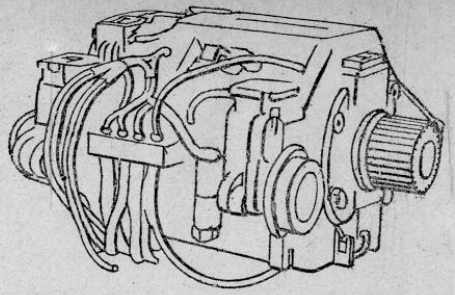


Fig. 189

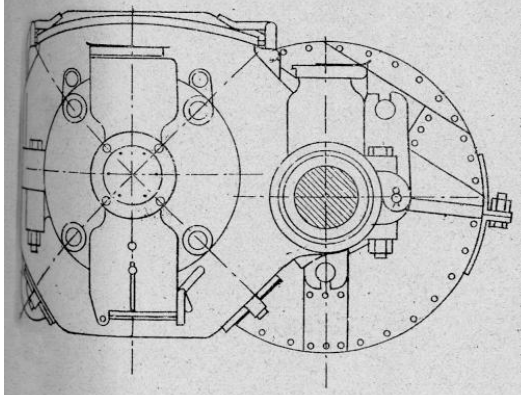


Fig. 187

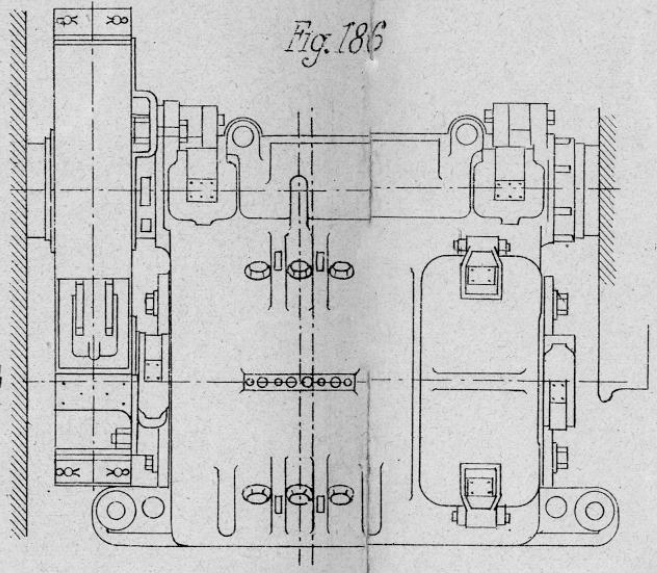


Fig. 188

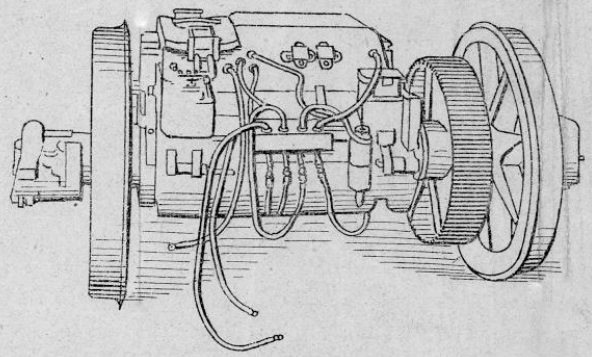


Fig. 190

Moteur de 135 Chevaux sous 1000 volts
de la Cie Siemens-Schuckert (Ligne de Cologne à Bonn).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 191.

Section transversale du moteur GE-253 de 430 chevaux sous 1.500 volts des locomotives General Electric du Chicago-Milwaukee-St-Paul.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions originales et qui se rapporte aux moteurs Westinghouse de la *ligne d'essai* sous 5.000 volts, d'une longueur de 19 kilomètres, de Jackson-Grass Lake et Wolf Lake, du réseau du Michigan. Cette tension est la plus élevée qui ait été jusqu'alors employée pour une ligne de traction à courant continu. L'exemple est d'autant plus remarquable qu'il fut fait emploi d'une voiture automotrice (poids : 40 tonnes), du type ordinaire à 2 bogies, d'un service interurbain où, par conséquent, l'emplacement disponible pour loger les moteurs est assez restreint, ce qui limite leur encombrement. L'automotrice en question est à 4 moteurs de 100 chevaux.

Chaque moteur est en réalité un moteur double constitué par une seule carcasse inductrice tétrapolaire et 2 induits munis chacun de son pignon; les deux pignons attaquent une même roue dentée suivant le schéma ci-contre (fig. 192 et photographie fig. 193).

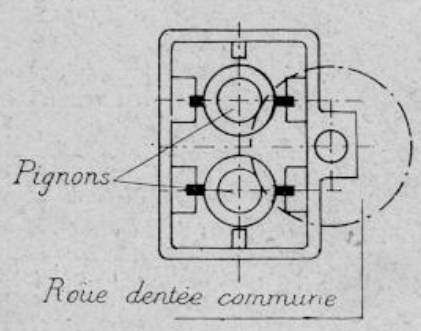


FIG. 192.
Schéma du moteur-bipolaire double.

Cet ensemble n'est en somme pas autre chose que la réunion de 2 moteurs bipolaires, ce qui est avantageux, car pour un même collecteur et un inverseur donné, l'emploi d'un moteur bipolaire permet, par rapport à un moteur tétrapolaire, de doubler la tension qui lui est appliquée.

Les deux induits de chaque moteur double sont en permanence en série et les quatre moteurs doubles de l'automotrice sont connectés par deux en série (donc quatre induits en série), sous la tension totale 5.000 volts, de sorte que chaque moteur double est sous 2.500 volts et chaque induit sous 1.250 volts.

Ajoutons que la régulation de la vitesse se fait par la méthode série-parallèle, appliquée aux deux groupes de deux moteurs doubles.

Nous donnerons plus loin, au chapitre relatif aux équipements à haute tension, le schéma des connexions de cet équipement particulier.

II. — **Moteurs à courants alternatifs.**

Les conditions générales à remplir étant les mêmes que celles développées ci-dessus, nous ne signalerons ici que les points particuliers propres aux moteurs à courants alternatifs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

91. **Moteurs monophasés.** — Leur carcasse inductrice doit être feuilletée dans toute sa partie utile. C'est là d'ailleurs, la seule particularité à signaler pour ce genre de moteurs au point de vue qui nous occupe. L'induit ne diffère pas de celui d'un moteur à courant continu.

En général, l'inducteur est bobiné à la façon d'un stator de moteur à courants polyphasés, et sa disposition mécanique ne diffère pas de celle connue pour ce genre de moteurs.

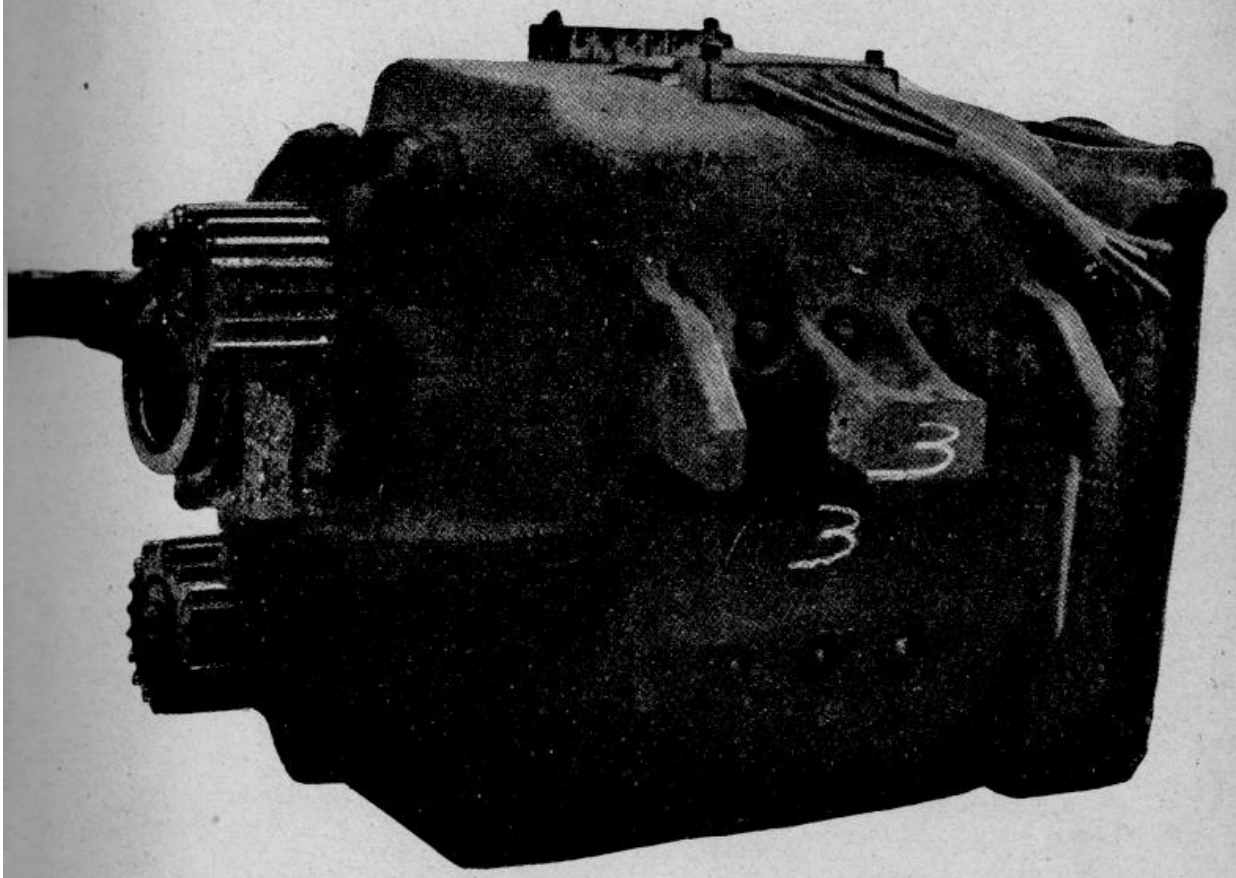


FIG. 193.

Moteur bipolaire double Westinghouse à courant continu.

Les photographies ci-jointes montrent bien le genre de construction des moteurs monophasés.

La figure 194 représente un stator de moteur Westinghouse de 100 chevaux. On y voit nettement les encoches prêtes à recevoir les bobines formant l'enroulement de commutation. La figure 195 montre le même stator avec les bobines en question en place. Enfin, la figure 196 représente l'induit du même moteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

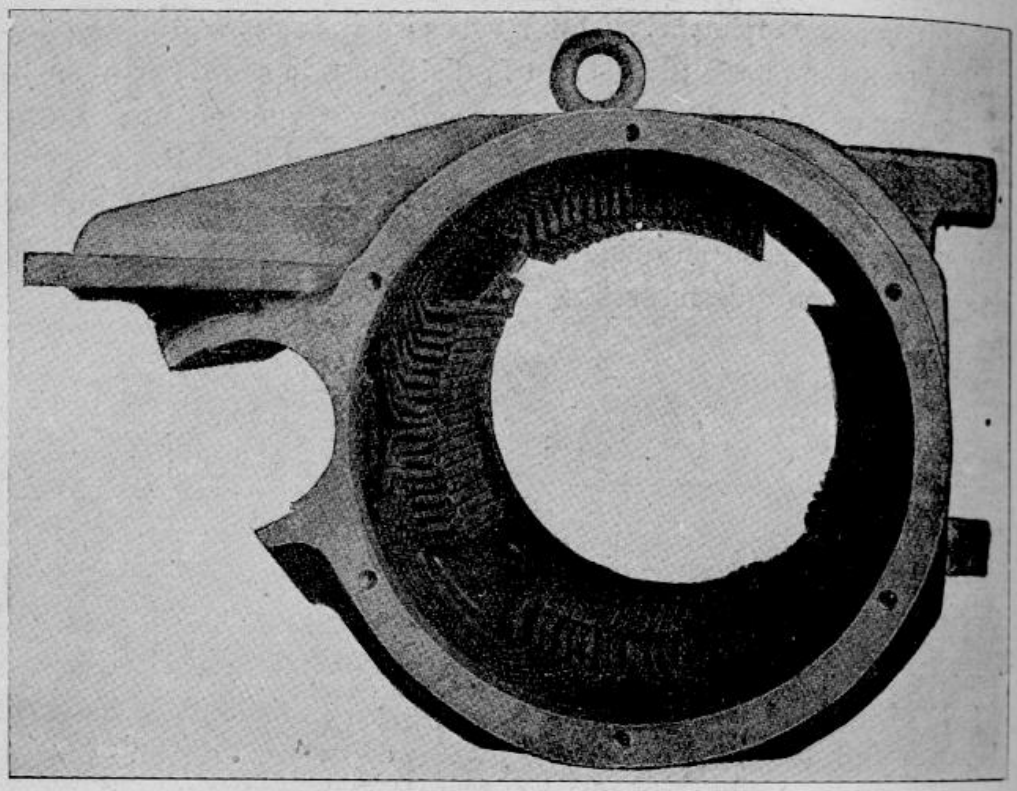


FIG. 194.
Stator d'un moteur série-monophasé Westinghouse, de 100 chevaux montrant les encoches destinées à recevoir les bobines formant pôles de commutation.

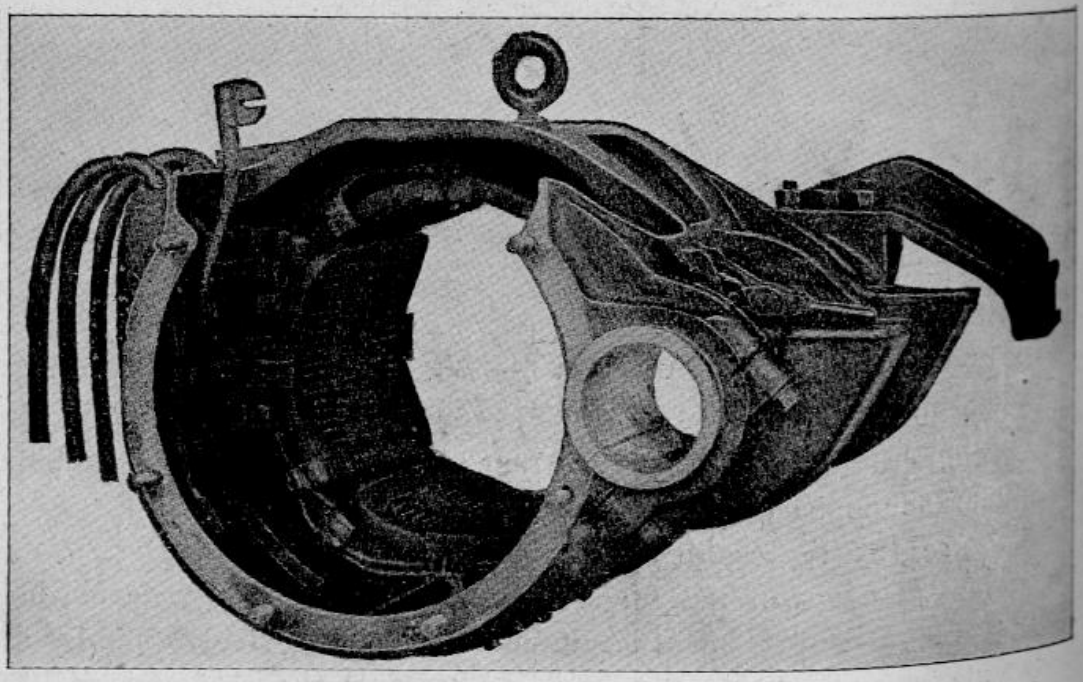


FIG. 195.
Stator du moteur de la figure 194 avec les bobines formant pôles de commutation en place.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

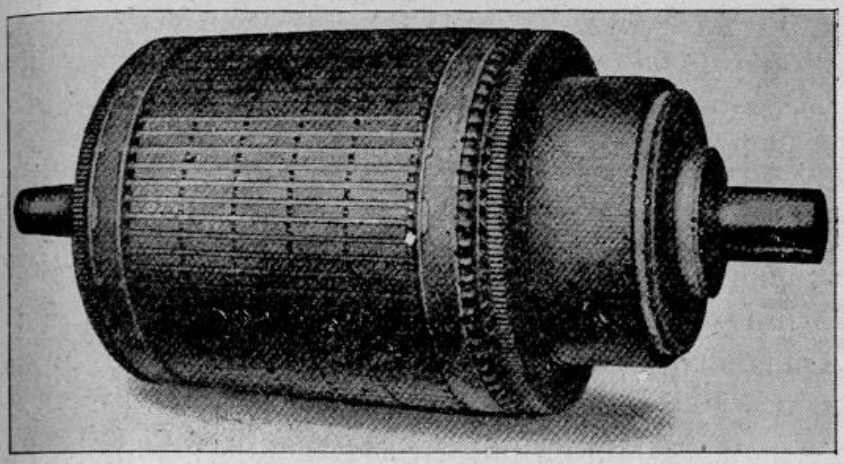
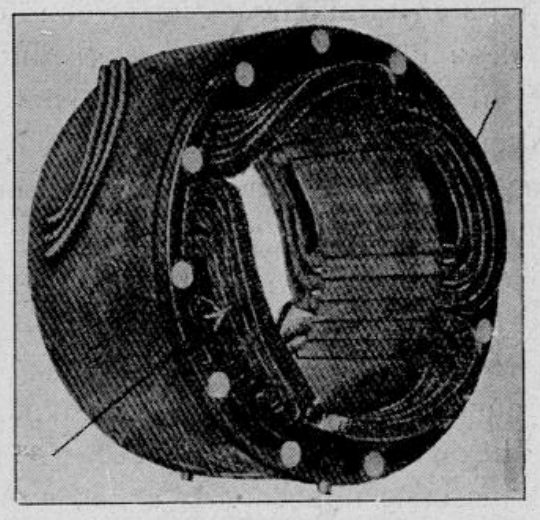


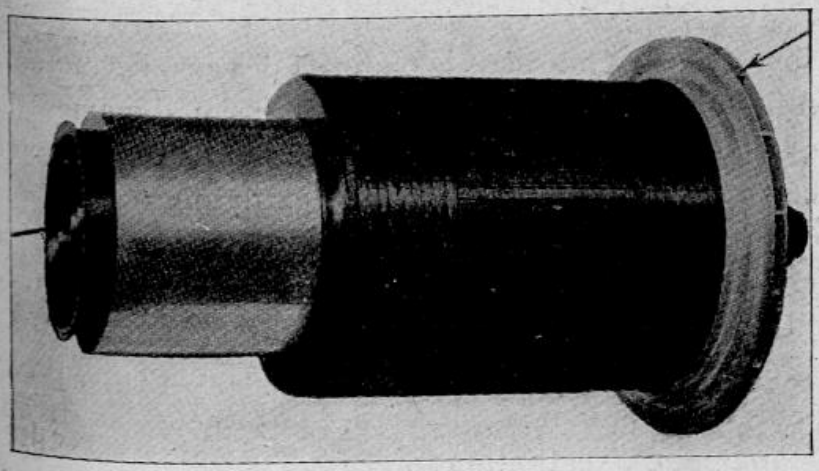
FIG. 196.
Induit du moteur des figures 194 et 195.



bobines de l'enroulement de magnétisation.

bobines de enroulement de commutation.

FIG. 197.
Stator d'un moteur monophasé répulsion-compensé Winter-Eichberg de 115 chevaux (A. E. G.)



sorties de l'air passant à travers l'armature pour la ventilation

FIG. 198.
Rotor du même moteur que le stator de la figure 197

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les figures 197 et 198 représentent respectivement le stator et le rotor d'un des moteurs de 115 chevaux du London-Brighton et South Coast Ry (A.E.G. Eichberg).

92. **Moteurs triphasés.** — Les stators sont bobinés avec carcasses feuilletées; quand les rotors sont bobinés, ce qui est le cas général, leurs extrémités libres sont réunies à des bagues reliées à des résistances (système Leblanc) qui pourront être liquides (Valteline), ou métalliques (Simplon).

Pour les moteurs dont on fait varier le nombre des pôles du stator et qui sont à rotors bobinés, on emploie des rotors à deux enroulements distincts (moteurs des premières locomotives du Simplon type 1906). Les enroulements sont faits en tambours et logés dans des encoches semi-fermées. Les rotors des moteurs des locomotives du Simplon type 1908 sont à cage d'écureuil et les conducteurs qui sont constitués par des tubes de cuivre sont en outre disposés pour être énergiquement ventilés. Les stators de ces moteurs comprennent deux bobinages distincts. L'aspect de ces derniers moteurs et de leur rotor est représenté par les figures 131 et 132 que nous avons données antérieurement.

Il faut remarquer que tous ces moteurs doivent avoir un entrefer très réduit pour éviter les fuites magnétiques et avoir un cos φ acceptable ainsi qu'un couple important au démarrage. Or, comme on l'a vu précédemment, cette condition se concilie assez mal avec les précautions que l'usure rapide des coussinets impose à la construction des moteurs de traction. Il faut veiller à réaliser ces deux conditions pour le mieux.

III. — Moteurs ventilés : courant continu ou alternatif.

93. — Nous avons vu que dans la majorité des cas, les moteurs de traction — continu ou alternatif, — doivent être hermétiquement clos.

Dans le but d'augmenter la puissance des moteurs pour un échauffement donné, on a souvent recours à la ventilation artificielle obtenue, soit en montant sur le rotor, contre l'armature du côté opposé au collecteur, de véritables aubes de ventilateur qui aspirent l'air au travers du moteur, soit en soufflant de l'air dans le moteur au moyen d'un ventilateur séparé. Cette dernière méthode est évidemment plus efficace, mais ne peut être appliquée qu'à des équipements assez importants. C'est la méthode par « ventilation forcée ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les deux cas, des ouvertures sont pratiquées dans la carcasse pour le passage de l'air, ces ouvertures étant garnies de grillages métalliques assez fins destinés à empêcher que les corps étrangers d'un certain volume ne puissent pénétrer dans le moteur.

De toute manière, que le moteur soit du type clos, c'est-à-dire sans ventilation artificielle, ou muni d'ouvertures pour le passage de l'air pour la ventilation artificielle, on s'arrange de manière à réserver une certaine ventilation dans la masse de l'induit, au moyen de canaux ménagés dans les tôles d'induit parallèlement à l'arbre, donnant ainsi une ventilation longitudinale ou entre les différents paquets de tôle séparés entre eux par des cloisons radiales et normales aux tôles, ainsi que nous l'avons vu, donnant une ventilation radiale. Le brassage de l'air, que ces dispositifs provoquent, tend à égaliser les températures entre les différentes parties du moteur.

Dans les moteurs américains récents, on tend toutefois à supprimer la ventilation radiale en n'employant plus de cloisons radiales. Dans ce cas, la masse de l'armature est constituée par un seul paquet compact de tôles. On a trouvé, en effet, que la fixation des cloisons aux tôles était assez sujette à caution [elle est le plus souvent réalisée par des sortes d'ergots que l'on rive sur les tôles (1)] et qu'en outre, et surtout, des poussières s'accumulaient dans les canaux radiaux, ce qui finalement les rendaient inopérants, et même nuisibles.

Ajoutons enfin que pour la ventilation avec ventilateur sur l'arbre du moteur, un cloisonnement approprié permet à l'air de circuler, soit en « série », autour des inducteurs d'abord, puis ensuite à travers l'induit, ou en « parallèle » dans le système inducteur et l'induit, c'est-à-dire simultanément dans ces deux organes. Cette dernière méthode est la plus efficace et est actuellement en faveur en Amérique.

Cette ventilation par ventilateur sur l'induit est maintenant très employée par les constructeurs américains, même pour les petits moteurs soit de 20 à 25 chevaux.

Dans le cas de la « ventilation forcée », intéressante surtout pour les gros moteurs, on installe sur le véhicule automoteur un ventilateur à

(1) Un meilleur moyen de fixation consiste dans l'emploi de la soudure autogène. On soude ainsi les cloisons aux tôles par deux ou trois points de soudure. Cette méthode, très employée actuellement en Amérique, donne d'excellents résultats.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

force centrifuge mû par un petit moteur électrique; une canalisation convenable amène l'air au moteur à refroidir. La pression de l'air est de quelques centimètres d'eau. Sur les locomotives monophasées Westinghouse du New-York-New-Haven et Hartford R.R. par exemple, les moteurs sont à ventilation forcée. L'air est aspiré au dehors de la locomotive à travers une ouverture latérale munie d'un grillage fin et est ensuite soufflé dans les moteurs.

Des expériences méthodiques de *ventilation forcée* ont été faites en 1910 avec les *moteurs Westinghouse* de 215 chevaux, dont sont équipées les automotrices du Pennsylvania R.R. en service sur ses lignes de Long-Island et les nouveaux tunnels du Manhattan-Island (New-York).

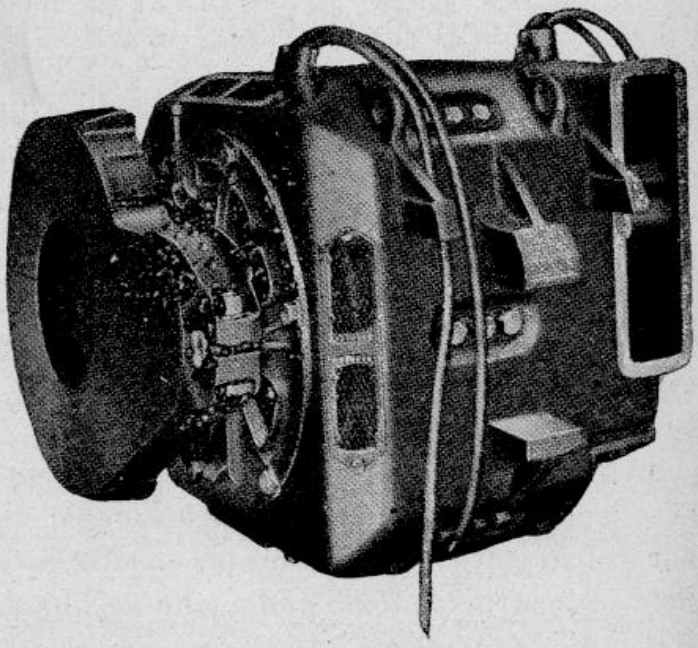


FIG. 199.

Moteur ventilé des locomotives du Milwaukee.

On a constaté qu'avec la ventilation forcée, ces moteurs, normalement de 215 chevaux, pouvaient assurer le service qui aurait autrement exigé des moteurs de 250 chevaux non ventilés. Le soufflage était obtenu au moyen de deux ventilateurs, chacun monté en bout-d'arbre d'un moteur de 1 1/2 cheval, tournant à 2.250 t/m. Chaque ventilateur soufflait dans un moteur une quantité d'air variant de 11 à 14 mètres cubes par minute, la pression était de quelques centimètres d'eau. Les véhicules étaient montés sur bogies trucks à deux essieux moteurs. L'ensemble, moteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des ventilateurs et ventilateurs, était monté sur le truck entre les moteurs au-dessous de la traverse porteuse du truck.

Les moteurs des locomotives modernes sont tous à ventilation forcée (Simplon, Giovi, Loetschberg, Midi, Milwaukee, etc.).

Nous donnons à titre d'exemple la vue (fig. 199) d'un des moteurs de la General Electric des locomotives de Milwaukee (type de 8 moteurs à engrenages), dont la figure 191 représente la section transversale. Cette photographie montre bien les orifices de ventilation dans la carcasse. La ventilation de ces moteurs est très énergique; elle exige environ 70 m^3 d'air. Dans ces conditions, la puissance continue de ces moteurs est très élevée, 375 chevaux par comparaison avec leur puissance uni-horaire qui est de 430 chevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XI

TRANSMISSION DE L'EFFORT MOTEUR A L'ESSIEU ET SUSPENSION DES MOTEURS.

SOMMAIRE. — I. **Moteurs à action directe.** — Moteurs non suspendus. — Moteurs à demi-suspendus. — Moteurs complètement suspendus : emploi d'un arbre creux concentrique à l'essieu (Raffard).

II. **Moteurs à action indirecte.**

Moteurs à engrenages rigides : engrenages à double réduction, engrenages à simple réduction. — Suspensions des moteurs à engrenages : suspension par le nez, suspension par barres latérales de la General Electric Co, suspension par joug de la General Electric Co, suspension par barres supérieures de la Westinghouse, suspension Westinghouse " Cradle suspension ", suspension Walker. — Etude des effets du couple de réaction sur la suspension des moteurs. — Moteurs à engrenages élastiques. — Moteurs à engrenages élastiques et arbre creux. — Transmissions par bielles et manivelles avec ou sans engrenages. — Locomotives à moteurs très surélevés. — Remarques générales sur les transmissions par bielles et manivelles. — Influence de la position du moteur sur la position du centre de gravité du véhicule, sur la stabilité de celui-ci et sur les efforts latéraux sur la voie. — Phénomènes d'oscillation des locomotives électriques. — Transmissions diverses : par vis sans fin, par engrenages coniques.

I. — Moteurs à action directe.

94. **Moteurs non suspendus.** — La solution la plus simple permettant de transmettre à l'essieu le mouvement de rotation du moteur consiste évidemment à caler l'induit du moteur sur cet essieu ; aussi cette disposition se retrouve-t-elle dès les premières applications, en particulier au City et South London Ry et au Central London.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les moteurs des premières locomotives du City et South London, mises en service en 1890, étaient du type bi-polaire à induit calé sur l'essieu, lequel supportait en outre, la plus grande partie du poids de la carcasse inductrice. Leur construction est indiquée sur la figure 200 ci-contre. Ces moteurs étaient d'une puissance de 50 chevaux. Ils ont été

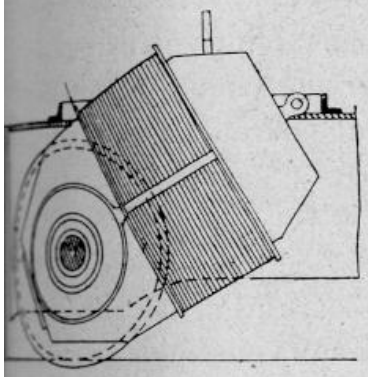


FIG. 200.

Moteur bipolaire Hopkinson du City et South London.

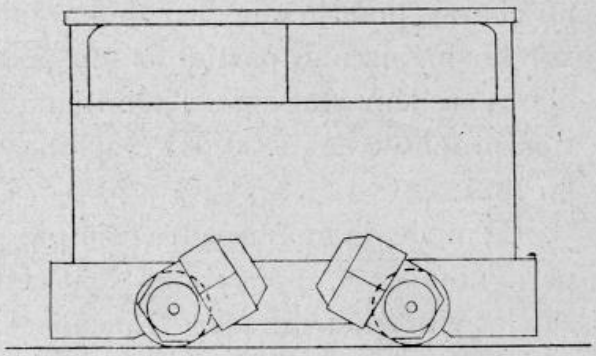


FIG. 201.

Locomotive du City et South London.

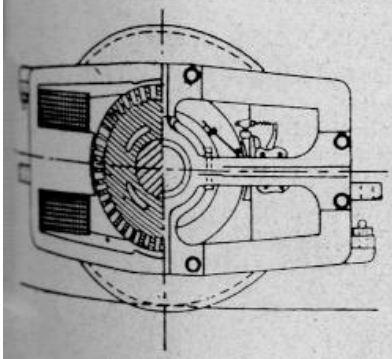


FIG. 202.

Moteur Crompton du « City and South London. »

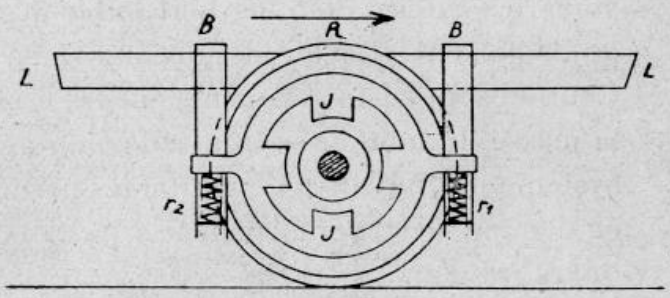


FIG. 203.

Schéma d'un moteur à attaque directe.

étudiés par Hopkinson et construits par Messrs. Mather et Pratt, de Manchester. La figure 201 donne l'aspect des locomotives, lesquelles étaient équipées avec deux de ces moteurs.

Plus tard, la Compagnie Crompton construisit pour la même ligne des locomotives plus puissantes dont les moteurs, basés sur le même principe, étaient du type représenté par la figure 202.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les premiers moteurs du Central London Ry étaient aussi du même genre.

Le mode de construction de ce type de moteurs à induit calé sur l'essieu et carcasse non suspendue, peut être représenté schématiquement par la figure 203. La carcasse inductrice J est portée par deux paliers faisant corps avec elle et embrassant l'essieu. Le centre de gravité de l'ensemble est ainsi au droit de l'essieu. Des ressorts r_2 r_2 relient la carcasse au châssis pour l'empêcher de basculer en même temps qu'ils reportent sur le châssis une partie de son poids. Ils servent encore à amortir les chocs au démarrage par l'admission brusque du courant. C'est la disposition proposée dès 1890 par Hopkinson, puis par la Société Westinghouse en 1891.

Ce mode de montage très simple n'a donné lieu toutefois qu'à un très petit nombre d'applications dont celles ci-dessus furent les principales, car les vibrations intenses transmises par l'essieu à l'ensemble du moteur, désagrégeaient rapidement à la fois l'induit et les inducteurs, dont les spires arrivaient bientôt à se mettre en contact les unes avec les autres par destruction de l'isolant qui les séparait, provoquant par suite des courts-circuits.

Remarquons qu'en effet, les petites dénivellations que présentent les voies les mieux établies font subir aux essieux, et par suite aux pièces qu'ils portent, et, par réaction, aux rails, des chocs souvent considérables. Ceux-ci sont surtout violents sur les essieux-moteurs et d'autant plus que la masse du moteur se trouve davantage reportée sur l'essieu, l'inertie du système produit alors de véritables percussions sur la voie. Ces effets sont également destructifs pour les parties vitales des véhicules et pour les ouvrages d'art.

C'est ainsi que les moteurs précédents du City et South London et du Central London ont été rapidement mis hors service et ont, en outre, produit une véritable destruction de la voie.

Remarquons que les efforts qui entrent en jeu, en particulier dans les chocs aux joints des rails sont des forces agissant instantanément, c'est-à-dire provenant de l'inertie des masses ou de la réaction d'appuis rigides. Le choc produit une accélération instantanée et il y a véritablement là des effets de percussion.

On a pu constater qu'aux joints des rails, au moment du passage des roues, il se produit souvent des déplacements verticaux des bouts de rails de l'ordre de 10 millimètres. Il se produit donc, sur un véhicule en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

marche, toute une série de vibrations qui engendrent des mouvements relatifs irréguliers des différentes pièces qui ne sont pas liées invariablement et dont l'effet est très important à étudier au point de vue du moteur.

On voit par les considérations qui précèdent quelle peut être l'influence, qui croît d'ailleurs avec la vitesse et avec la masse des moteurs, des imperfections inévitables de la voie et combien il est important de chercher à les atténuer autant que possible par des suspensions élastiques des organes délicats du moteur et par un entraînement souple servant de liaison entre le moteur et les roues qu'il entraîne.

95. **Moteurs à demi-suspendus.** — Sur les locomotives d'essai du P.-L.-M., en 1897 (locomotives à accumulateurs), M. Auvert avait réalisé une demi-suspension dans laquelle (fig. 204), l'induit était calé directement sur l'essieu. L'inducteur bipolaire était constitué par deux électro-aimants suspendus par leur centre de gravité. Les pôles étaient disposés comme l'indique la figure, les deux inducteurs étaient réunis par des flasques croisés. Sous l'influence des déplacements verticaux de l'essieu dans ses plaques de garde, l'induit qui a les mêmes déplacements fait jouer les deux inducteurs, mais l'entrefer reste constant.

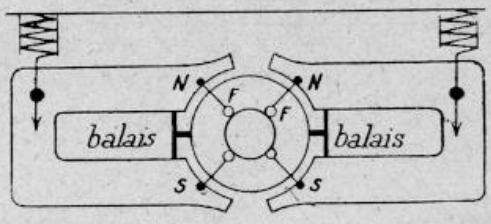


FIG. 204.

Les porte-balais suivent d'ailleurs le mouvement des pièces polaires, ils conservent donc la même position par rapport aux pôles, mais la variabilité de leur pression sur le collecteur peut amener des étincelles.

Tout cet ensemble inducteur est suspendu au châssis à l'aide de ressorts et l'induit seul constitue la partie non suspendue, d'où le nom de moteur à demi-suspendu. C'est un perfectionnement sur le système précédent, mais l'induit est encore soumis directement à de fortes vibrations, lesquelles se transmettent aux balais, d'où des étincelles qui détériorent le collecteur.

L'idée a été reprise sur les locomotives de 85 tonnes à courant continu, 600 volts, construites par la General Electric Co et l'American Locomotive Co, pour le New-York Central Railroad, dont les premières unités ont été mises en service en 1906.

Ces locomotives dites " gearless ", qui étaient à cette époque les plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puissantes en service, comprennent 4 moteurs de 450 chevaux. Elles sont à truck rigide à 4 essieux-moteurs et comportent en outre, à chaque extrémité, un essieu porteur (1) (fig. 205).

Par la suite, pour les locomotives type 1908, chaque essieu porteur a été remplacé par un bogie à 2 essieux conduisant au schéma de la figure 206.

Enfin, le dernier type construit (1913), figure 207, diffère du précédent en ce que les essieux des bogies extrêmes sont également moteurs, de sorte que cette dernière locomotive est à 8 moteurs de la même construc-

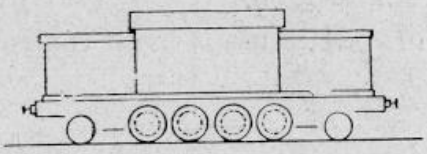


FIG. 205.
N. Y. C. Premier type.

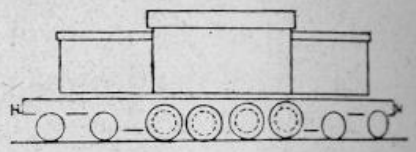


FIG. 206.
N. Y. C. Deuxième type.

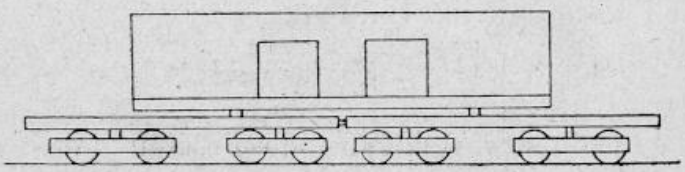


FIG. 207.
N. Y. C. Troisième type.

tion que les précédents, mais seulement de 300 chevaux, ce qui conduit à une puissance totale au régime uni-horaire de 2.400 chevaux, et a permis de réaliser des vitesses jusqu'à 120 kilomètres à l'heure. En outre, le truck central n'est plus rigide; il est articulé afin de permettre l'inscription en courbes de faibles rayons. Ces dernières locomotives pèsent environ 100 tonnes.

Les moteurs de ces différents types de locomotives sont bi-polaires et sont analogues comme disposition et construction. Ils sont représentés en demi-coupe et demi-élévation sur les figures 208 et 209.

(1) Les premières unités de ces locomotives ne comportaient pas d'essieux porteurs, mais elles ont été presqu'aussitôt modifiées dans ce sens.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'induit est calé directement sur l'essieu et les inducteurs sont suspendus faisant, pour ainsi dire, partie du truck. Les surfaces internes de

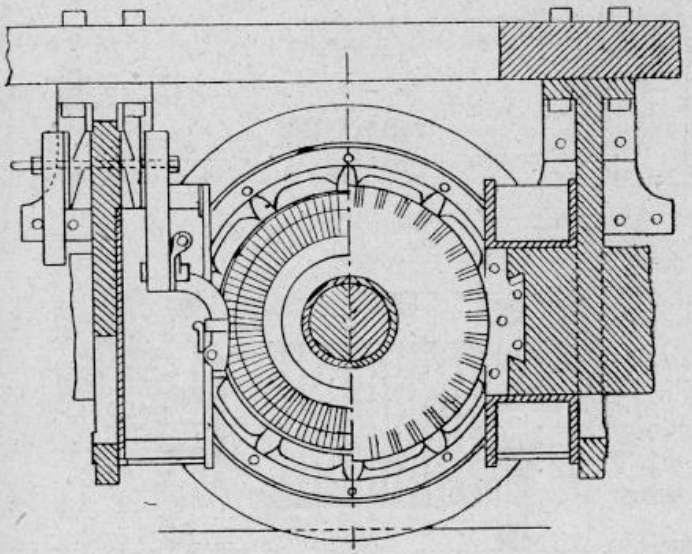


FIG. 208.

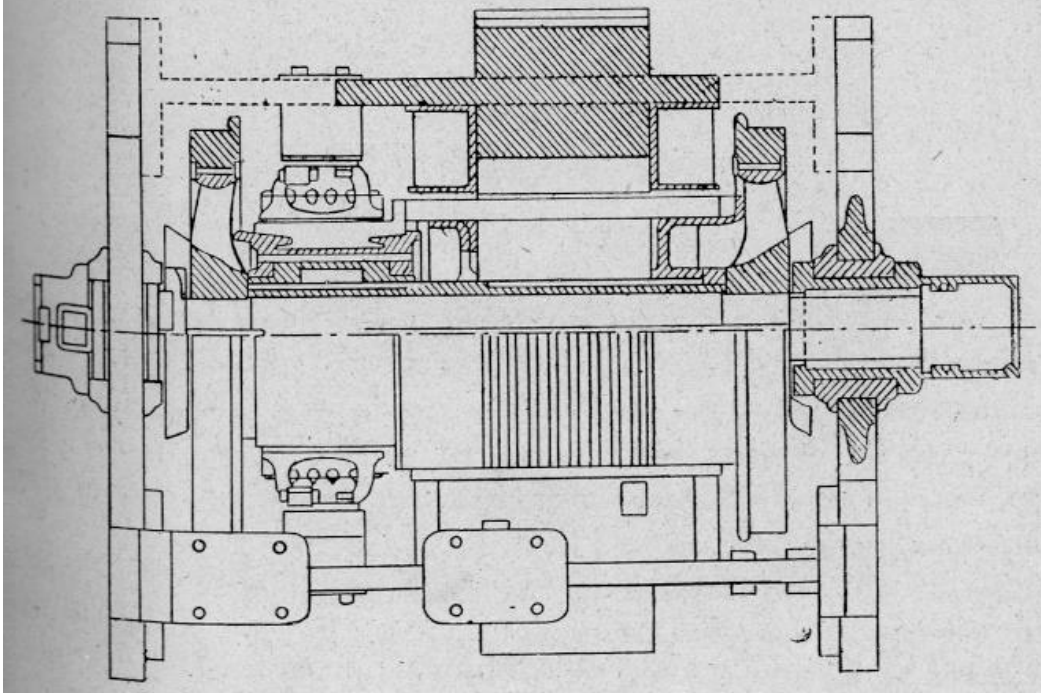


FIG. 209.

leurs pôles sont plates et verticales, de sorte que l'induit suivant les mouvements verticaux de l'essieu peut se déplacer entre elles sans que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'entrefer varie notablement. La construction de l'induit est particulièrement simple et robuste.

La figure 210 montre l'ensemble d'un essieu muni de son induit avec

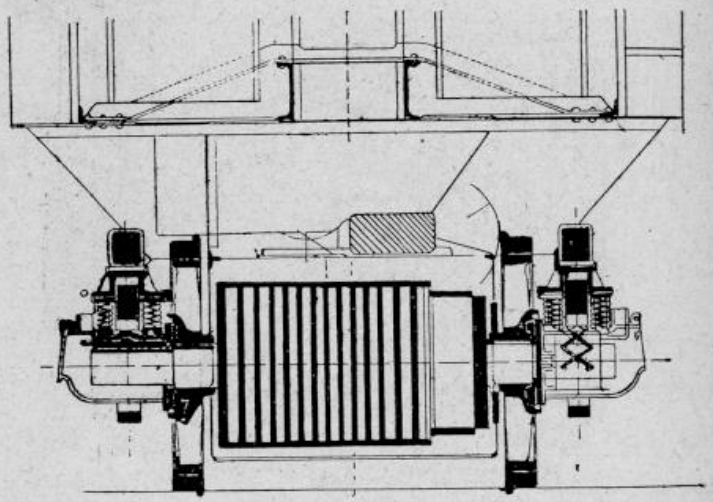


FIG. 210.

Locomotive du New-York Central. Essieu-moteur.

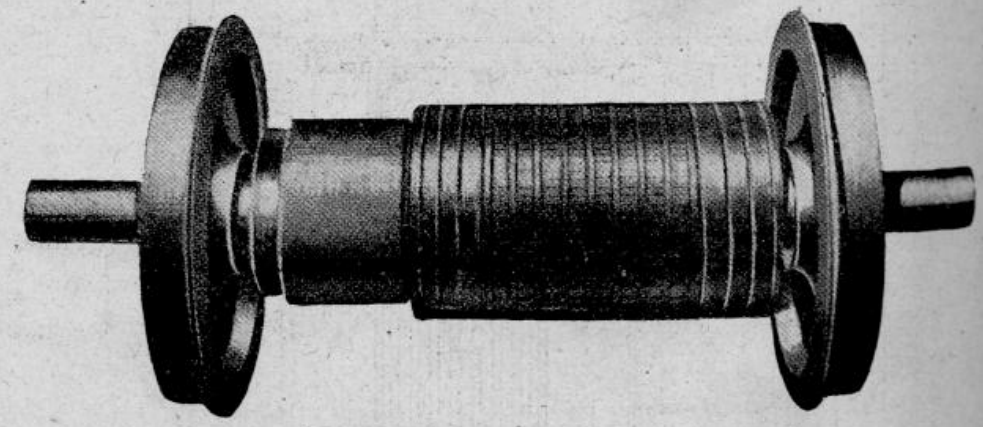


FIG. 211.

Locomotive du New-York Central. Essieu-moteur avec son induit.

coupe par les boîtes à graisse, et la figure 211 un essieu-moteur séparé et également muni de son induit.

Il est à remarquer que le truck, dont les membrures principales sont en acier coulé, ne constitue pas seulement la partie mécanique du bâti de la locomotive, mais aussi une partie du circuit magnétique des moteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ainsi que le montre le schéma de la figure 212. On voit aussi que les pôles inducteurs sont par deux, accolés aux entretoises du truck, lesquelles interviennent également dans la constitution du circuit magnétique.

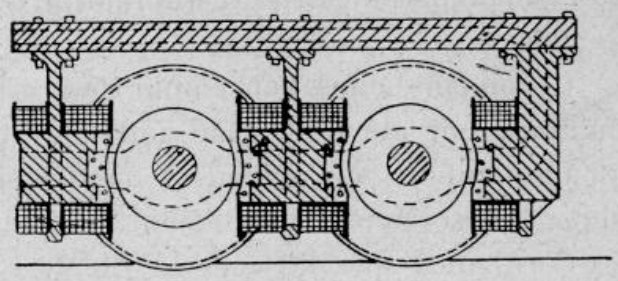


FIG. 212.

Moteur du N. Y C. circuit magnétique.

Ce mode de construction facilite beaucoup la visite et les réparations du moteur, car l'ensemble essieu-moteur avec ses roues et son induit peut être facilement enlevé en une seule opération qui consiste à le descendre dans une fosse de visite au-dessus de laquelle on amène la locomotive. La photographie (fig. 213), montre précisément comment s'opère un tel démontage.

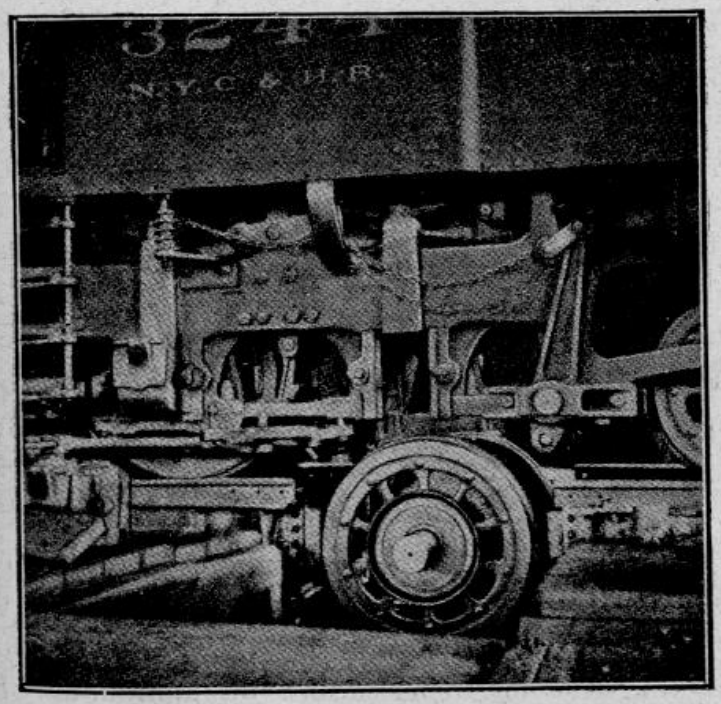


FIG. 213.

Locomotive du New-York Central. Démontage d'un essieu-moteur.

Cette construction présente toutefois un inconvénient assez sérieux et qui réside dans la difficulté de démontage de l'induit, qui exige l'enlève-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment d'une roue, opération assez délicate et qui ne peut se renouveler au delà d'une dizaine de fois sans préjudice pour l'essieu.

Au delà, on a généralement recours à l'emploi d'une bague placée à chaud pour compenser la diminution de diamètre de l'essieu à sa portée de calage.

Cependant, dans l'ensemble, les résultats obtenus avec ce mode de montage ont été tout à fait satisfaisants, tant au point de vue sécurité qu'au point de vue dépenses d'entretien, et l'expérience de plusieurs années de service l'a pleinement justifié.

C'est ainsi que la General Electric a fait une nouvelle et récente application remarquable de ce genre de construction, aux dernières locomotives type 1918 à 3.000 volts courant continu, des lignes du Chicago-Milwaukee St-Paul R.R. Ces locomotives, du type "Gearless", comportent, ainsi que nous l'avons déjà noté (§ 48 - 3°), l'emploi de 12 moteurs d'une puissance uni-horaire individuelle de 270 chevaux et groupés en série par trois, sous la tension totale 3.000 volts. Ces moteurs sont du type bi-polaire et analogues comme disposition et construction aux précédents. Les locomotives, dont un schéma d'ensemble est donné plus loin sur planche hors-texte spéciale, pèsent 240 tonnes et leur puissance totale uni-horaire est de 3.240 chevaux. Elles ne sont pas comme les locomotives du type 1915 qui les ont précédées et que nous verrons plus loin, constituées par deux unités accouplées; elles ne comprennent qu'un élément; toutefois, la caisse est divisée en trois parties, l'ensemble reposant sur quatre trucks; les deux trucks médiants sont à quatre essieux-moteurs et du genre de ceux des locomotives du New-York-Central, premier et deuxième type des figures 205 et 206, tandis que les trucks extrêmes sont à deux essieux-moteurs avec en plus un essieu porteur.

96. **Moteurs complètement suspendus : emploi d'un manchon concentrique à l'essieu (Raffard-Short).** — Dans son projet de locomotive à grande vitesse en 1883, M. Raffard proposait de caler l'induit du moteur avec son collecteur sur un arbre creux ou manchon concentrique à l'essieu et portant un plateau d'accouplement, relié aux roues par des liens souples (en cuir). La carcasse inductrice porte alors des paliers dans les coussinets desquels passe l'arbre creux sur lequel elle s'appuie. Elle est d'ailleurs, d'autre part, reliée invariablement au châssis suspendu du véhicule.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 214 (1) montre la disposition proposée.

Dans ce projet était prévu l'emploi de plusieurs moteurs avec roues de diamètres différents, ce qui devait permettre, selon les difficultés du parcours, de mettre en circuit celui des moteurs dont l'allure correspondrait au meilleur rendement. C'est cette disposition qui est représentée

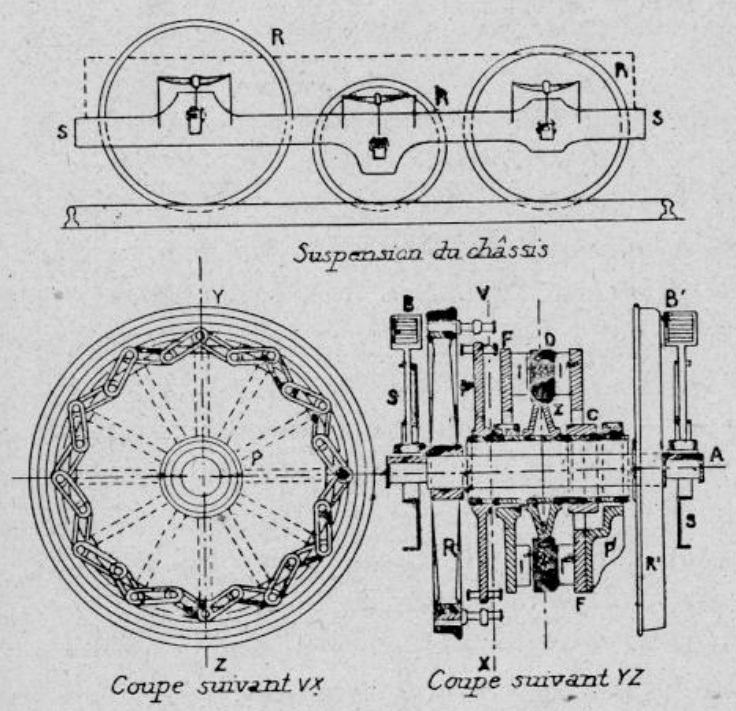


FIG. 214.

Locomotive électrique à grande vitesse. — Projet Raffard.

F, F, flasques d'une dynamo multipolaire, reliées invariablement au châssis S de la locomotive. Ces flasques sont solidaires des paliers p, p' dans lesquels tourne le tube T et des noyaux des électro-aimants inducteurs, dont quatre seulement, I, I', I'' et I''', sont visibles sur la figure.

Le tube T porte le plateau d'accouplement P et la lanterne Z, sur laquelle sont montés l'anneau induit D, ainsi que le collecteur C, auquel des frotteurs amènent le courant électrique fourni par des accumulateurs ou recueilli sur un conducteur aérien. Le retour s'opère par les rails.

Les roues motrices R, R' sont calées sur l'essieu A, situé à l'intérieur du tube T. Cet essieu porte le châssis S par l'intermédiaire des ressorts B, B'.

en élévation sur la figure. Enfin, dans ce projet, les moteurs étaient à induits du type Desroziers.

Le principe de cette méthode à arbre creux, très fécond, a donné lieu à un certain nombre d'applications importantes dont nous examinerons les principales.

(1) Empruntée au Traité déjà cité de MM. BLONDEL et DUBOIS, Tome I, page 8.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour mieux se rendre compte de ses conditions d'emploi, nous donnons (fig. 215), un schéma de montage-type pour un moteur de construction ordinaire, et dans lequel on retrouve tous les éléments du dispositif en question.

On voit ainsi qu'une condition essentielle de son emploi est que

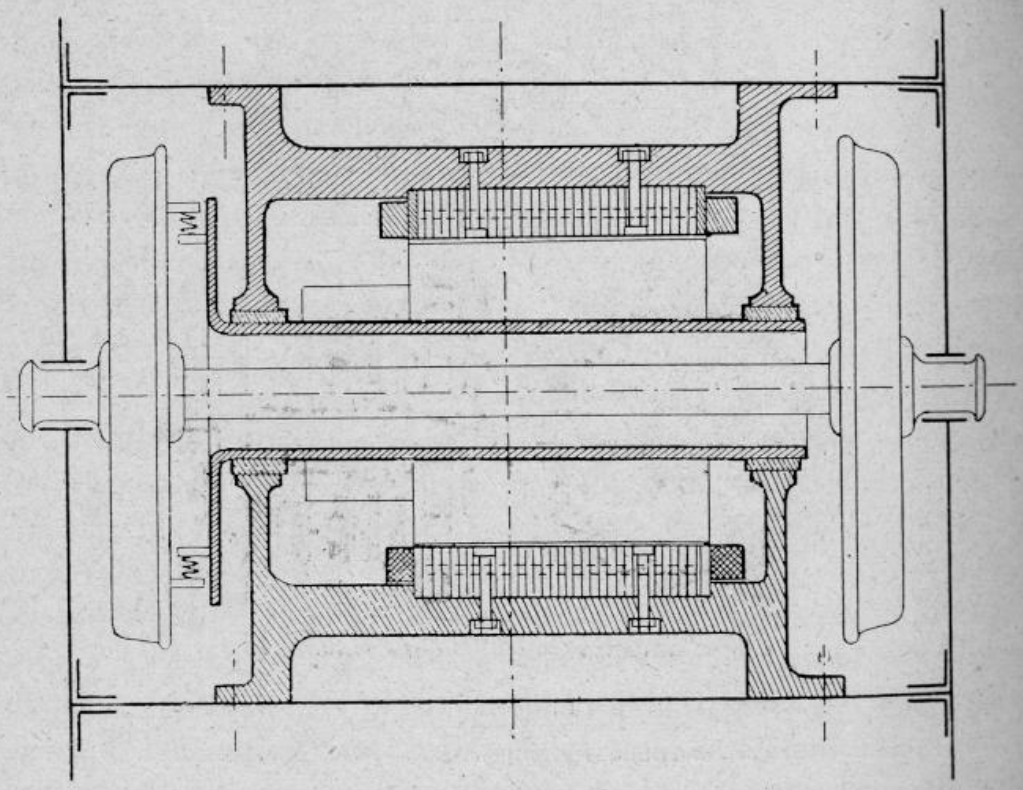


FIG. 215.

Schéma de principe du montage avec arbre creux Raffard.
Coupe horizontale par l'essieu.

l'arbre creux doit présenter, par rapport à l'essieu, un jeu annulaire suffisant afin de tenir compte des déplacements verticaux de l'essieu dans ses plaques de garde dus aux dénivellations de la voie. On voit aussi, par comparaison avec le système du New-York Central, que le jeu ménagé à cet effet n'est plus obtenu entre la carcasse et truck, mais entre le moteur et l'essieu.

De plus, les ressorts qui supportent le châssis doivent être réglés de manière que l'axe de chaque arbre creux coïncide avec la position moyenne de l'essieu correspondant. Dans ces conditions, l'essieu est libre de prendre, par rapport à l'arbre creux, dans les limites du jeu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

annulaire que celui-ci présente, toutes les positions possibles, voire même inclinées.

Dans cette disposition, la suspension élastique des différentes parties du moteur est complètement réalisée et il n'y a pas d'autres réactions que celles résultant du poids de l'induit.

Un inconvénient de ce genre de construction résulte du graissage assez délicat des coussinets entre lesquels tourne l'arbre creux, surtout pour les locomotives à grande vitesse. L'expérience a cependant prouvé qu'on pouvait y remédier efficacement.

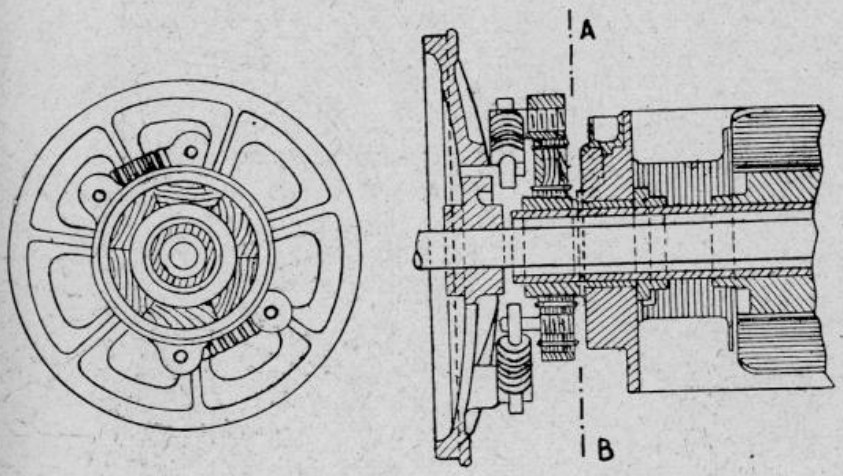


FIG. 216.

Moteur « gearless » Short avec manchon Raffard.

En ce qui concerne l'emploi de liens élastiques entre le plateau du manchon — c'est-à-dire entre le moteur — et la roue correspondante, l'effet en est très heureux ; il conduit à des démarrages très doux et progressifs. En effet, d'abord, au moment précis de l'introduction du courant dans le moteur, les liens élastiques commencent par se tendre, ce qui produit ce phénomène que le démarrage du moteur précède celui du véhicule. D'autre part, aussitôt le moteur démarré, il y a production d'une *f.c.e.m.* qui croît rapidement en limitant la valeur du courant absorbé, ce qui contribue encore à donner un démarrage très progressif.

M. Short appliqua le premier, en 1891, cette idée à des moteurs de tramway. L'entraînement était obtenu (fig. 216) au moyen d'un système de ressorts spiraux qui reliaient deux oreilles fixées invariablement à l'induit, à deux points de la roue motrice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'inducteur du moteur était lui-même complètement fixé au châssis suspendu du véhicule. Ce fut là, la réalisation du premier moteur à action directe complètement suspendu.

Plus tard, Short remplaça les ressorts par des tampons en caoutchouc A (fig. 217). On retrouve l'application de ce dispositif dans les premières locomotives construites en 1896, par la General Electric Co, pour un service en tunnel sous Baltimore pour le Baltimore and Ohio Railway. Ces locomotives étaient à 4 moteurs de 180 chevaux.

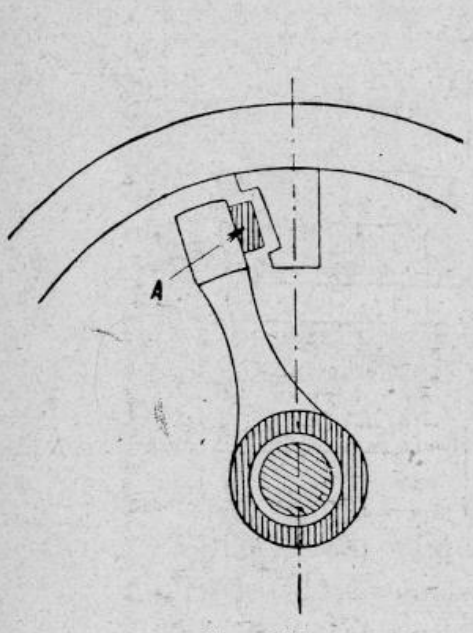


FIG. 217.

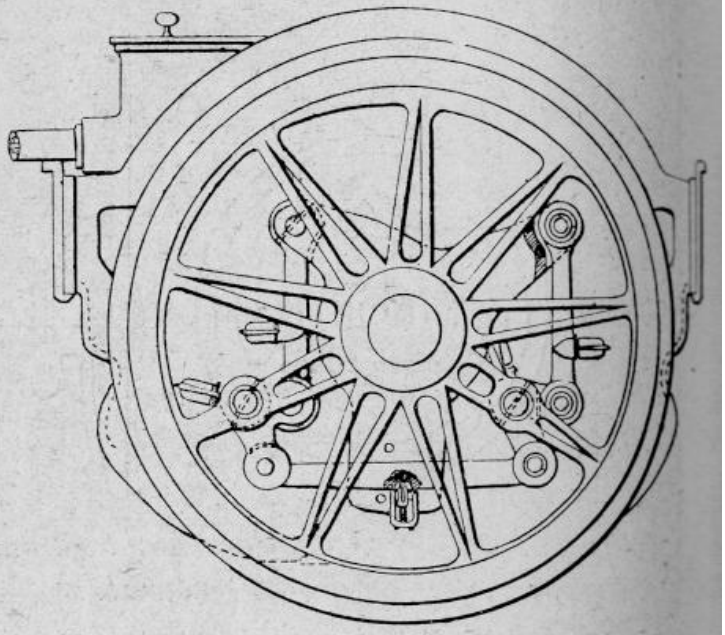


FIG. 218.

Dispositif d'entraînement des roues motrices.

Pour la première locomotive triphasée Ganz (1901) de la Valteline, et qui était à 4 moteurs de 150 chevaux, on a adopté le système à arbre creux, mais le mode d'entraînement des roues motrices est très différent de celui des exemples précédents; il est représenté sur la figure 218 (1) et comprend l'emploi d'un système de bielles. Ces bielles, sans être élastiques, offrent au moins une certaine souplesse. L'élasticité de l'accouplement réside dans le fait que les chocs provenant de la voie sont communiqués par les bielles à l'induit qui, à son tour, ayant ses paliers dans la carcasse des inducteurs, repose avec toute la caisse du véhicule sur des ressorts lamellés.

Le jeu entre l'essieu et l'arbre est d'environ 55 millimètres.

(1) Empruntée ainsi que la suivante à l'*Industrie électrique* du 10 mai 1903.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 218 *bis*.

Vue d'ensemble d'un bogie moteur d'automotrice à voyageurs (Vallelinc).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Des automotrices ont été construites pour la même ligne avec la même disposition des moteurs.

La figure 218 *bis* représente un bogie avec ses moteurs pour les automotrices précédentes.

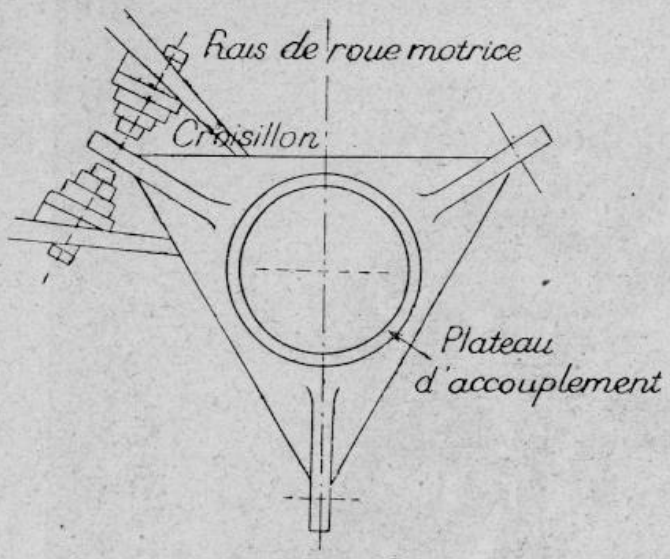


FIG. 219.

Schéma de l'entraînement élastique de la locomotive Heilmann.

Pour les locomotives de la Valteline qui ont suivi en 1903 et qui sont à deux moteurs, il n'a plus été fait emploi d'arbre creux; les moteurs entraînent les essieux par un système de bielles et de manivelles, ainsi que nous le verrons plus loin.

Dans la locomotive Heilmann, l'entraînement était obtenu (fig. 219) au moyen de croisillons serrés entre des tampons fixés aux rayons de la roue motrice par des ressorts antagonistes très puissants, conservant une course suffisante même quand ils sont bandés par le couple moteur, pour permettre les déplacements verticaux de l'essieu. Toutefois, les croisillons et les tampons s'usent rapidement, et de plus, il y a difficulté de graissage.



FIG. 220.

Sur les automotrices de la ligne de *Paris-Invalides à Versailles*, des chemins de fer de l'Ouest-Etat, on retrouve ce montage à arbre creux avec emploi de ressorts à boudin du genre Short. Ces ressorts d'entraînement sont, en réalité, constitués par deux ressorts distincts hélicoïdaux concentriques; ils relient les sommets d'un plateau triangulaire fixé au manchon à trois points de la roue motrice (fig. 220).

La photographie (fig. 220 *bis*) (1), montre un essieu monté muni de son moteur, d'une des automotrices en question.

(1) Emprunté au *Bulletin de la Société d'Encouragement* de mars 1911.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

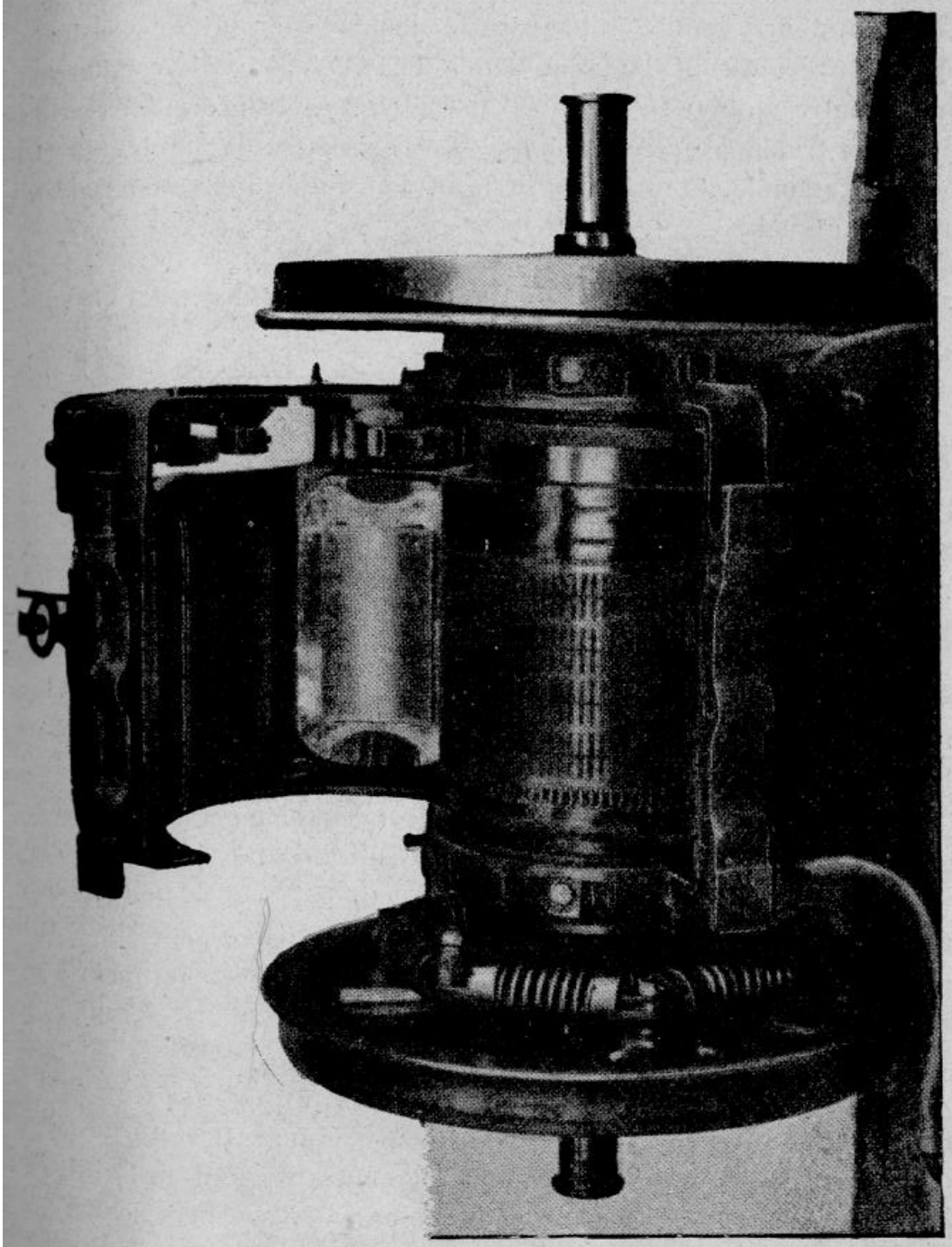


FIG. 220 *bis*.

Moteur sans engrenage avec suspension et accouplement élastique de l'induit, Automotrice Paris-Invalides-Versailles.

Le dispositif adopté facilite bien tous les mouvements relatifs de l'arbre creux portant l'induit par rapport à l'essieu, grâce à la souplesse des ressorts spiraux dans tous les sens.

Les moteurs employés avec cette disposition sont de construction Brown-Boveri et sont d'une puissance de 140 chevaux. Les automotrices sont à quatre moteurs répartis sur deux trucks. La figure 221 représente un de ces trucks avec ses moteurs. Les carcasses des moteurs sont de forme hexagonale et on voit sur la figure leur mode de fixation rigide en A au bâti du truck.

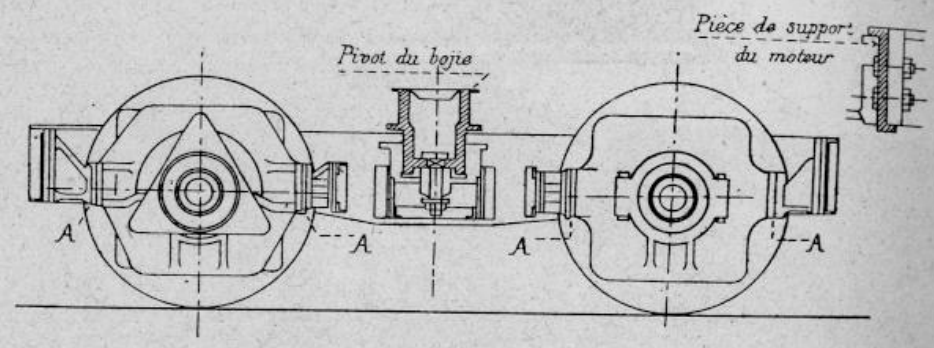


FIG. 221.

Un exemple remarquable de ce genre de construction est celui adopté par la compagnie Westinghouse pour ses locomotives monophasées de 1.000 chevaux du *New-York New-Haven et Hartford*.

Ces locomotives sont à quatre essieux formant deux bogies : chaque essieu est entraîné par un moteur de 250 chevaux. Les premières étaient à adhérence totale et pesaient environ 87 tonnes. Un second type construit par la suite comporte en plus des deux bogies moteurs précédents, deux essieux porteurs : un à chaque extrémité, et pèse environ 92 tonnes dont 73 de poids adhérent. Les schémas de ces locomotives sont donnés plus loin en planche hors-texte.

Chaque induit de moteur est claveté sur un arbre creux en deux parties entourant l'essieu, et qui porte à chaque extrémité un plateau d'accouplement muni de sept mannetons d'entraînement (fig. 222 et 223), lesquels s'engagent dans des alvéoles munies de ressorts hélicoïdaux à tours excentrés (fig. 224), qui transmettent à la roue le couple du moteur en donnant à l'induit, par rapport à l'essieu, l'élasticité nécessaire à la liaison et à la suspension de l'induit par rapport à l'essieu.

L'extrémité de chaque manneton présente, en outre, une cavité dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

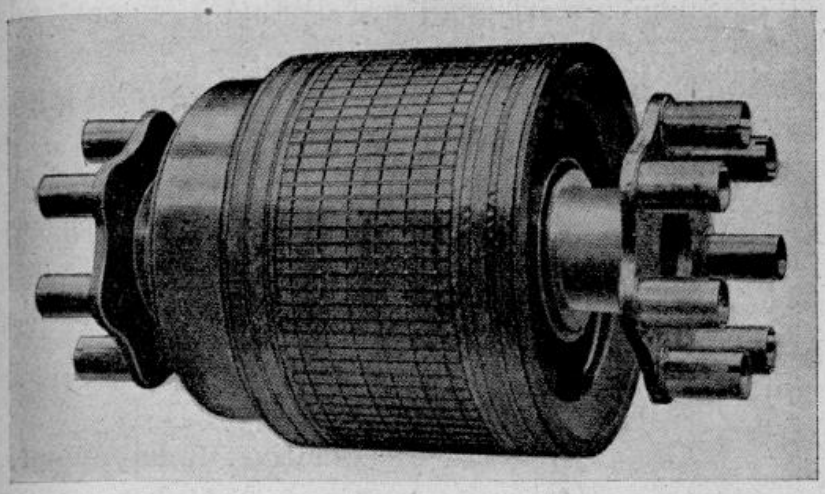


FIG. 222.

Rotor du moteur Westinghouse des locomotives du New-York, New-Haven et Hartford R. R.

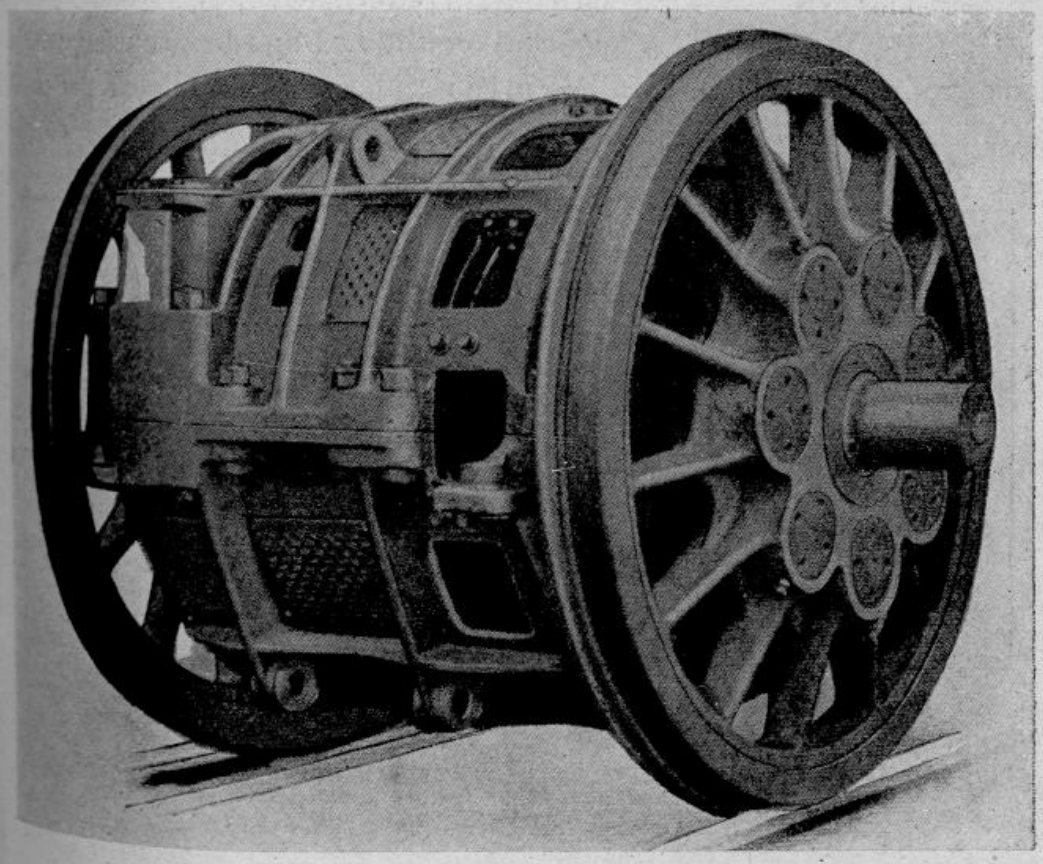


FIG. 223.

Moteur Westinghouse complet monté sur essieu des locomotives du New-York, New-Haven et Hartford R. R.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

laquelle est placé un ressort auxiliaire destiné à supporter la poussée latérale.

L'essieu peut se déplacer verticalement d'environ 30 millimètres de part et d'autre de sa position centrale dans l'intérieur de l'arbre creux : celui-ci tourne dans deux paliers solidaires de la carcasse inductrice, laquelle est fixée par l'intermédiaire de ressorts, à un cadre en acier, supporté par les boîtes à graisse et indépendant du truck (fig. 225).

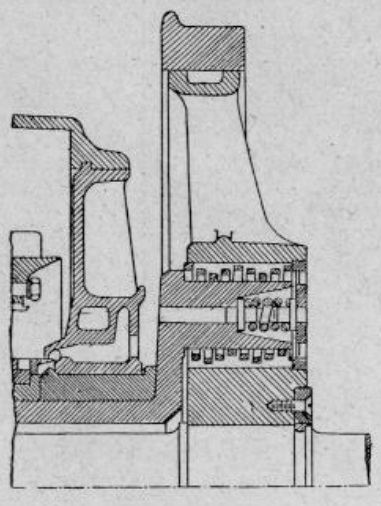


FIG. 224.

Ces locomotives fonctionnent, soit sous courant monophasé 11.000 volts 25 périodes, soit sous courant continu 650 volts. Les moteurs sont groupés deux par deux en série : un tel groupe est alimenté sous 450 volts en courant alternatif et sous 650 volts en courant continu. Dans le premier cas, les deux groupes restent en parallèle avec régulation de la vitesse par prises variables au transformateur ; dans le second cas, ils peuvent être couplés

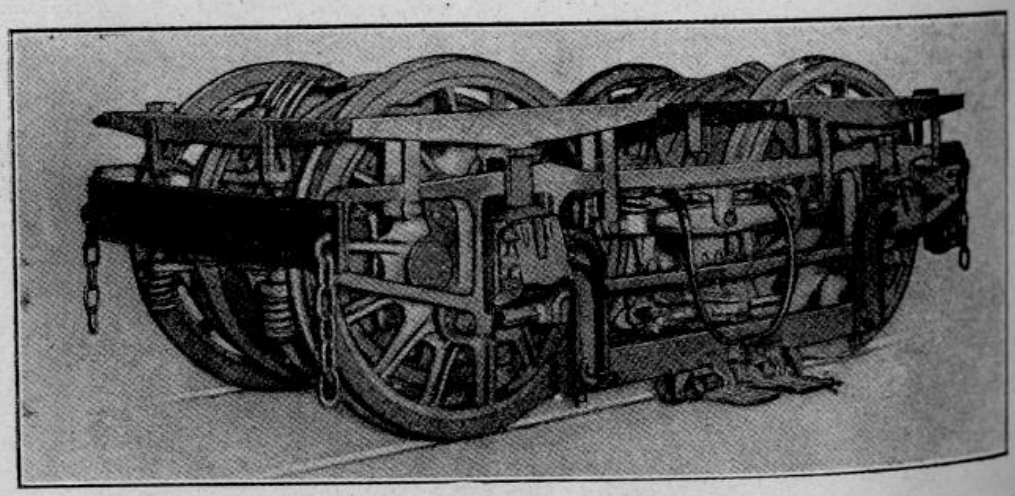


FIG. 225.

Un des deux bogies-truck avec deux moteurs monophasés de 250 chevaux commandant les roues sans engrenages.
Locomotives du New-York, New-Haven et Hartford R. R.

en série ou en parallèle, suivant la méthode du contrôle série parallèle ordinaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, les moteurs sont ventilés par l'action d'un ventilateur spécial. Nous verrons plus loin d'autres applications du système de l'arbre creux Raffard où son emploi est combiné avec celui d'engrenages.

II. — **Moteurs à action indirecte.**

97. **Moteurs à engrenages rigides.** — On peut dire que c'est le cas général. C'est, en particulier, le cas des tramways et métropolitains.

Dans ce mode de liaison, il est une condition fondamentale à observer, les arbres portant les divers engrenages doivent conserver rigoureusement leurs positions relatives et, par suite, un parallélisme absolu, ce qui peut, par exemple, être obtenu en faisant porter les différents coussinets dans lesquels tournent les divers axes, par un même bâti rigide, qui sera souvent la carcasse inductrice convenablement disposée.

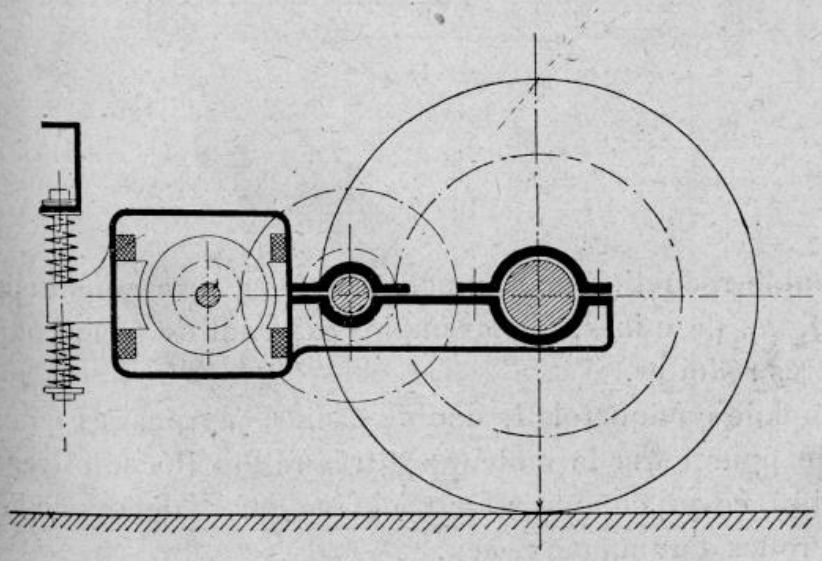


FIG. 226.

a) *Engrenages à double réduction.* — Les premiers moteurs à engrenages, étant donnée la vitesse de leur induit, comportaient l'emploi de plusieurs réductions; on a eu deux et trois trains d'engrenages réducteurs de vitesse. La figure 226 montre une double réduction.

La *double réduction* fut appliquée en Amérique sur toutes les lignes construites par Sprague, la Bentley and Knight Co, Van de Poele, etc... jusque vers 1891.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les figures 227 et 228 montrent les réductions Sprague et Westinghouse. La vitesse dans ces moteurs variait de 1.500 à 1.900 tours par minute. Les engrenages à grande vitesse (1) et (2) s'usaient rapidement et, en outre, produisaient un bruit inadmissible.

On a cherché à réduire cette usure des engrenages et le bruit qui en résultait par l'emploi de matériaux spéciaux : bronze d'aluminium, bois, cuir vert, mais sans grand succès. L'acier est encore ce qui convient le mieux.

Après avoir été à découvert, les engrenages furent enfermés dans des enveloppes protectrices ou carters, renfermant un lubrifiant. Enfin, on arriva à des moteurs à vitesse lente et par suite au simple train de réduction.

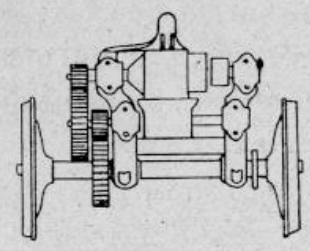


FIG. 227.
Double réduction de Sprague.

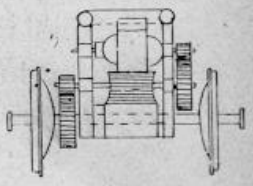


FIG. 228.
Double réduction de la Compagnie Westinghouse.

La double réduction ne se rencontre plus que rarement : locomotives de montagne, de mines, par exemple, exigeant de forts couples et des vitesses très réduites.

On emploie quelquefois le double train d'engrenages quand l'espace disponible pour loger le moteur est très réduit (locomotives de mine à voie étroite), ce qui conduit à mettre le moteur en dehors de l'écartement des deux roues d'un même essieu.

b) Engrenages à simple réduction. — C'est le cas de beaucoup le plus général et nous avons donné précédemment le dessin de montage d'un des moteurs de la Compagnie Générale des Omnibus (fig. 179 à 182). Ce dessin peut être considéré comme celui se rapportant au montage type.

98. **Suspension des moteurs à engrenages.** (1) — Le principe de la

(1) La plupart des figures de ce paragraphe sont extraites de l'ouvrage déjà cité de BLONDEL et DUBOIS, Tome I, Chapitre IV.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

suspension adoptée est, ainsi que nous l'avons déjà vu, dû à Sprague (§ 89-*j*.), et consiste à faire reposer le moteur, d'une part, directement sur l'essieu par deux paliers venus de fonte avec la carcasse et à le relier d'autre part au châssis de la voiture ou du truck par des ressorts appropriés.

Divers modes de réalisation sont possibles.

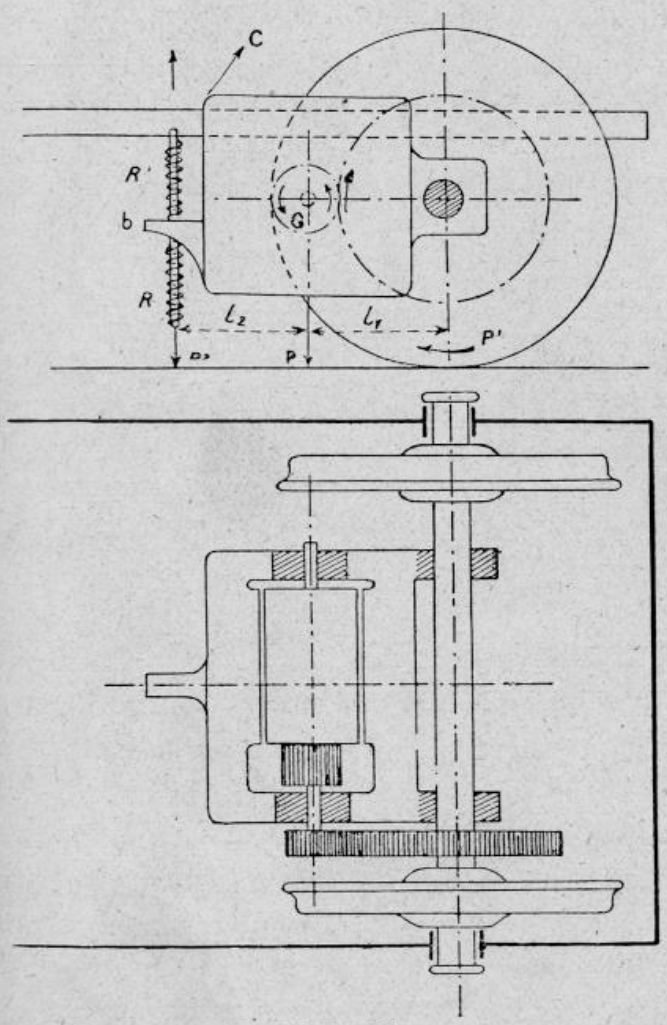


FIG. 229.

a) ***Suspension par le nez***, du nom américain " Nose-suspension ". C'est le dispositif le plus généralement réalisé.

Du côté opposé à l'essieu, la carcasse porte une sorte d'appendice *b* (nose = nez), qui repose (fig. 229) par l'intermédiaire d'un ressort R, sur une traverse du châssis. Un ressort antagoniste R′ est généralement ajouté pour limiter les déplacements verticaux. Quelquefois, d'ailleurs,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quand le moteur est installé sur un bogie-truck, ces deux ressorts RR' n'existent pas; la suspension élastique du moteur étant, dans ce cas, réalisée par le fait qu'il existe des ressorts comme partie constituante du bogie-truck proprement dit. Le nez du moteur repose alors sur une traverse du truck (transom) en même temps qu'il s'engage dans un étrier fixé sur la dite traverse et disposé en vue d'empêcher les mouvements verticaux de ce côté du moteur. Cette construction est par exemple celle réalisée sur les *locomotives du Paris-Orléans*, dont la figure et la photographie ci-jointes (fig. 230 et 231) montrent le truck construit par

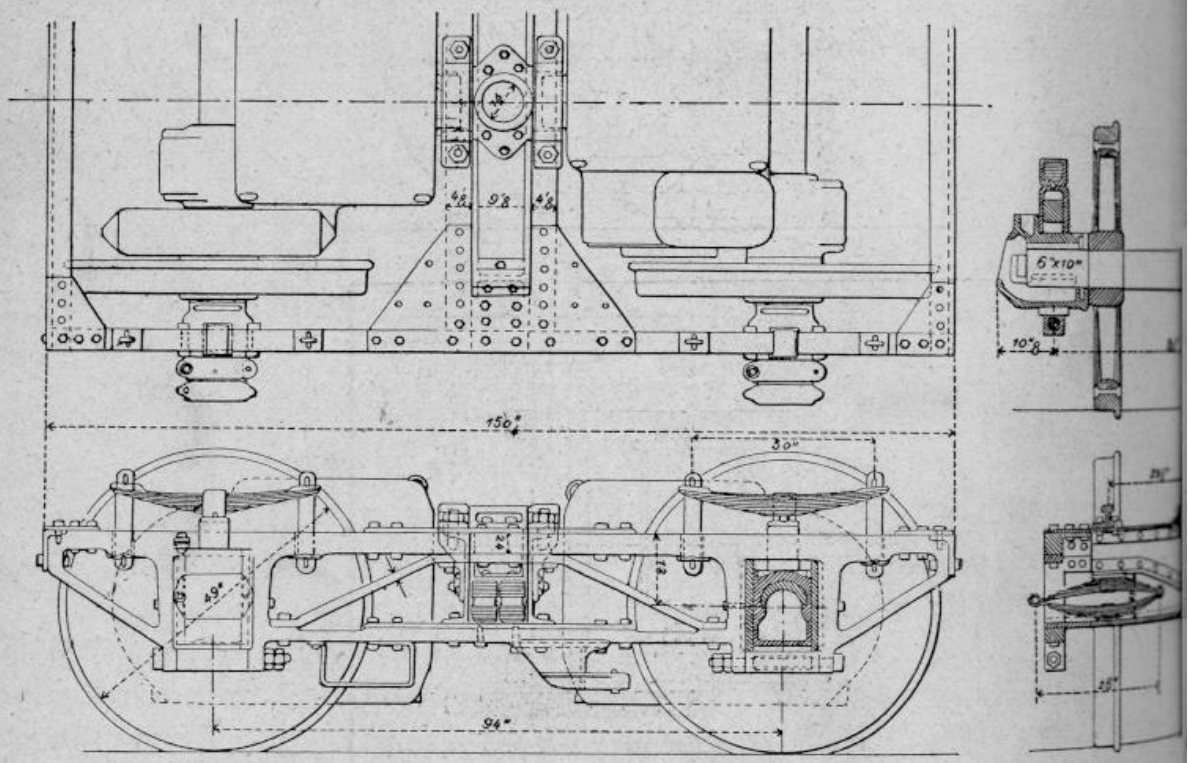


FIG. 230.

l'American Locomotive Co. On y voit nettement les traverses-supports et les étriers correspondants.

Remarquons que les ressorts RR' vus plus haut, amortissent bien les secousses résultant de l'application brusque du courant dans le moteur lors des démarrages; le premier effort est employé à tendre les ressorts avant que la voiture ne se mette en marche. C'est un résultat comparable à celui signalé à propos des moteurs à action directe avec ressorts d'entraînement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

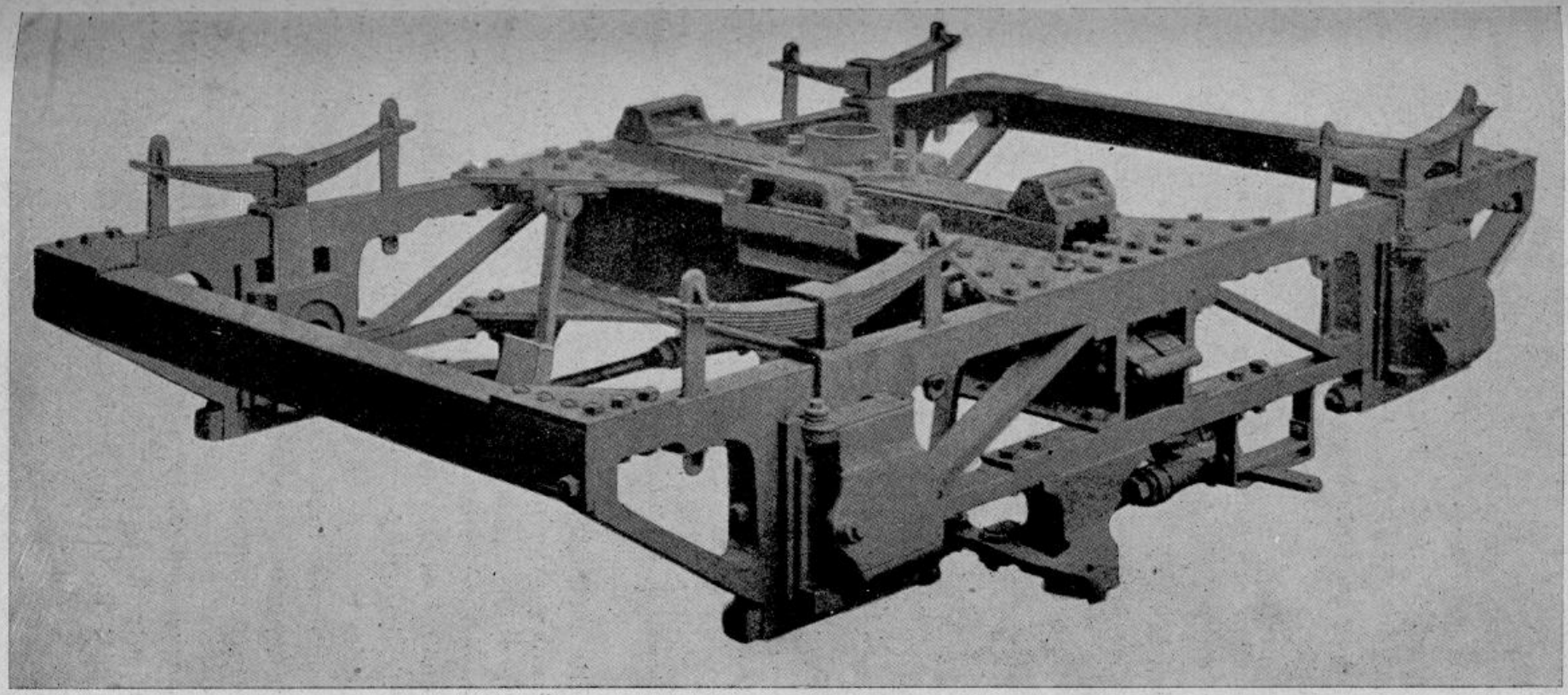


Fig 231.

Bogie-truck des locomotives du Paris-Orléans.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ce système de suspension par le nez, on voit facilement que le *moteur repose partiellement sur la partie suspendue du véhicule et partiellement et directement sur l'essieu, organe non suspendu.* On peut admettre que 50 à 60 p. 100 du poids du moteur est directement porté par l'essieu-moteur. On voit ainsi que cet essieu est soumis à des chocs très importants.

b) Suspension par barres latérales de la General Electric Co. — En raison de ce qui précède, on a cherché à soulager l'essieu en suspendant le moteur par son *centre de gravité*.

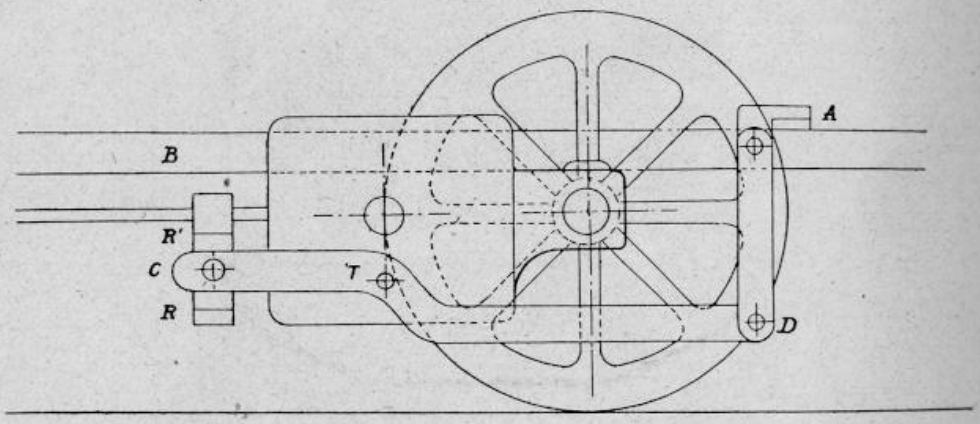


FIG. 232.

Suspension par barres latérales.
A D C barre articulée. B longeron. T tourillon. R R' tampons de caoutchouc.

Dans cette méthode, on emploie (fig. 232) deux barres latérales CD fixées au truck et venant supporter le poids du moteur par l'intermédiaire de tourillons venus de fonte avec celui-ci et placés exactement dans le plan vertical du centre de gravité. Ces barres en fer méplat sont soutenues du côté de l'essieu par une tige doublement articulée reliée au truck et de l'autre côté par une entretoise en forme d' ∪ sur laquelle elle s'appuie par des tampons en caoutchouc. On voit qu'ici l'essieu ne porte rien. Il ne semble pas toutefois que le succès de ce procédé soit complet, parce que les engrenages s'usent d'une manière moins égale que dans le cas de la suspension par le nez.

c) Suspension par joug de la General Electric Co. — Cette méthode est une variante de la précédente dans laquelle on cherche encore à reporter le poids du moteur sur le truck (fig. 233).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans cette méthode, un ou deux nez venus de fonte avec la carcasse s'appuient (supposons deux nez C. D.) sur une base recourbée H C D H à laquelle ils sont en outre boulonnés en C et D. Cette barre prenant appui sur les longerons du châssis par l'intermédiaire de ressorts à boudin, les points d'attache H H étant *dans le plan vertical passant par le centre de gravité du moteur*. On voit que le joug doit être absolument solidaire du moteur et qu'il travaille à la flexion, ce qui paraît bien peu favorable.

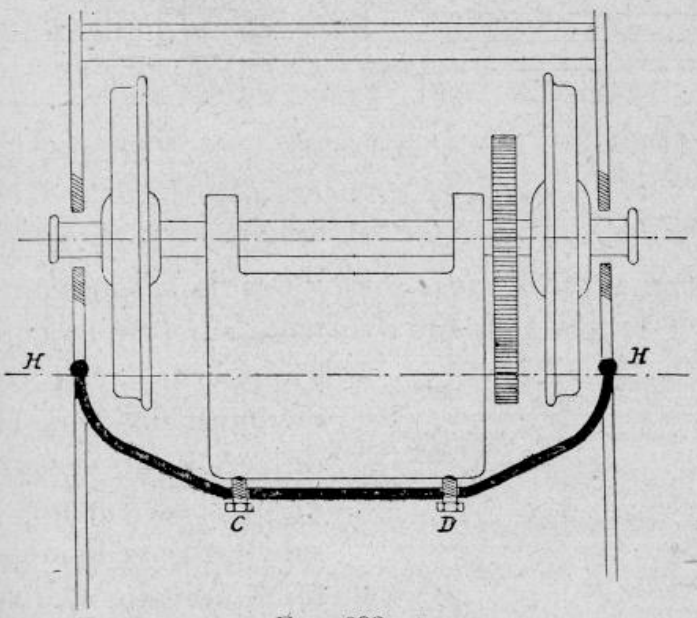


FIG. 233.

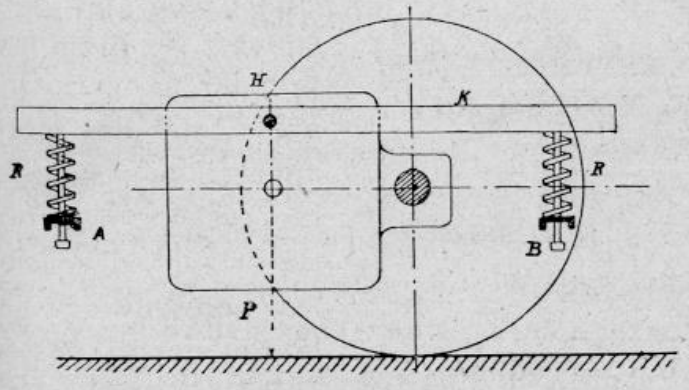


FIG. 234.

d) Suspension par barres supérieures de la Westinghouse. — Son but est encore de placer le point de suspension du moteur sur le truck, au droit du centre de gravité.

Ici, le point d'attache H (fig. 234) est situé à la partie supérieure de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

carcasse et les deux barres K qui supportent le moteur s'appuient sur deux puissants ressorts à boudin R qui reposent sur deux traverses A B reliées directement au truck.

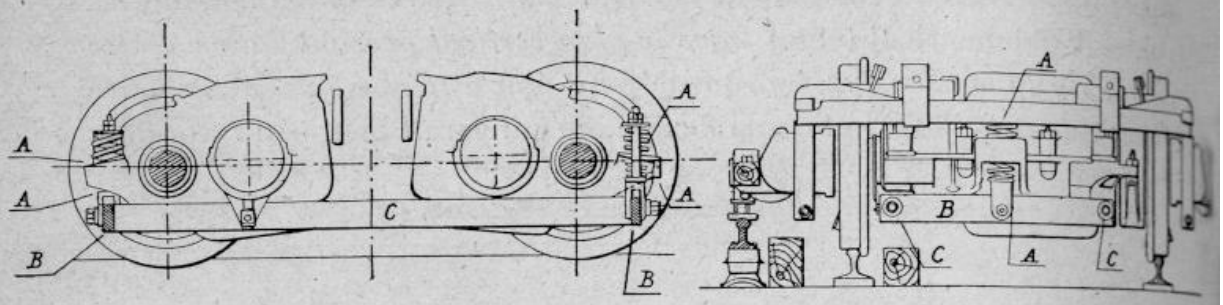


FIG. 235.

Suspension Cradle-Westinghouse.

e) Suspension Westinghouse dite "Cradle suspension" (fig. 235). — Chaque moteur repose toujours d'un côté sur l'essieu correspondant. Il s'appuie de l'autre côté, par l'intermédiaire de deux ressorts à boudin A A, un au-dessus du nez, l'autre au-dessous, sur une barre tranversale B, fixée elle-même à des barres longitudinales C, fixées à leur tour à une autre barre transversale B supportant le second moteur, comme la première supporte le premier moteur. On voit qu'ici le poids total des moteurs et de leur appareil de suspension est porté par les essieux. On prétend que les ressorts de suspension neutralisent les chocs qui se produisent pendant le roulement (passage aux joints, aiguillages, etc.).

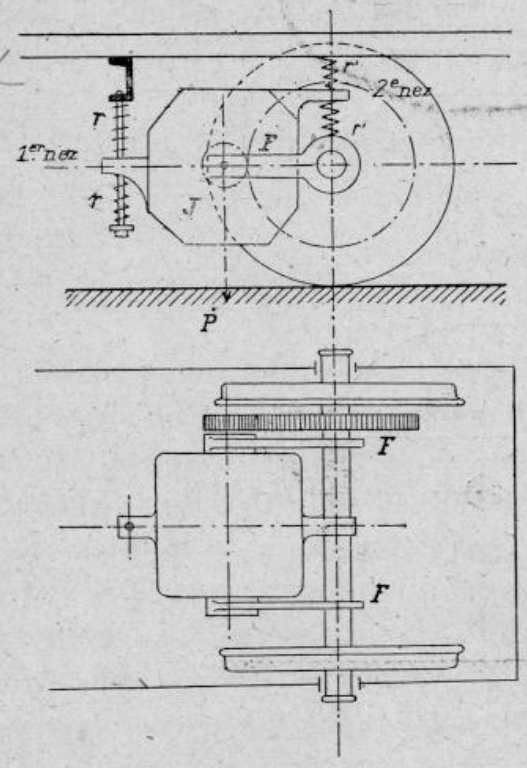


FIG. 236.

f) Suspension Walker. — Cette suspension est à double nez et le moteur au lieu de reposer sur l'essieu par deux paliers faisant partie de la carcasse, lui est relié par un système articulé comme suit : (fig. 236).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les paliers de l'arbre du moteur et ceux de l'essieu font partie de deux flasques F F indépendants de la carcasse inductrice, et maintiennent l'écartement des deux axes de l'arbre du moteur et de l'essieu. En outre, le flasque côté engrenages porte le carter. La partie du moteur tournée vers l'essieu est suspendue par le deuxième nez qui s'appuie sur l'essieu, par l'intermédiaire de ressorts. De cette façon, tout le moteur est suspendu élastiquement et la masse de la partie solidarisée à l'essieu est ainsi réduite au minimum.

99. **Etude des effets du couple de réaction sur la suspension des moteurs.** (1) — Nous nous proposons d'examiner les efforts auxquels sont soumis les points de suspension des moteurs dans quelques-uns des principaux modes de suspension étudiés :

a) Considérons le cas le plus ordinaire, celui de la *suspension par le nez* de la figure 229.

Les efforts en question ne proviennent pas seulement du poids du moteur, mais encore du couple qu'il développe en marche. Par suite des réactions électro-magnétiques qui s'exercent entre l'induit et les inducteurs, la carcasse servant d'enveloppe au moteur est soumise à un couple C égal et opposé au couple moteur développé sur le pignon des engrenages et tend, dans le cas d'une transmission par simple réduction, à tourner autour de l'essieu dans le même sens que la roue (ce serait l'inverse avec une transmission à double réduction).

Ce couple C est équivalent à deux forces égales et opposées appliquées aux points de suspension. En appelant l_1 et l_2 les distances horizontales du centre de gravité G aux deux points de suspension, nous aurons, p_1 et p_2 étant les efforts sur les deux appuis, P le poids du moteur et en supposant que la voiture se déplace vers la droite :

$$p_1 (l_1 + l_2) = \mathrm{P}l_2 + \mathrm{C}$$

en prenant les moments par rapport à l'appui de gauche et

$$p_2 (l_1 + l_2) = \mathrm{P}l_1 - \mathrm{C}$$

en prenant les moments par rapport à l'essieu.

(1) D'après BLONDEL et DUBOIS, ouvrage déjà cité, tome I, page 131.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On déduit :

$$p_1 = \mathrm{P}\,\frac{l_2}{l_1 + l_2} + \frac{\mathrm{C}}{l_1 + l_2}$$

$$p_2 = \mathrm{P}\,\frac{l_1}{l_1 + l_2} - \frac{\mathrm{C}}{l_1 + l_2}$$

ce qui montre que $p_1 > p_2$ et l'effort supplémentaire résultant de la différence $p_1 - p_2$ se reporte sur l'essieu qui est ainsi surchargé.

Le second terme $\frac{\mathrm{C}}{l_1 + l_2}$ n'est pas négligeable aux fortes charges ni surtout aux démarrages.

Considérons, par exemple, le moteur G. E. 800 de la General Electric Co dont il existe un grand nombre d'exemplaires sur les réseaux de tramways en France.

L'effort normal produit par ce moteur à la jante d'une roue de 0 m. 840 de diamètre est F = 360 kilog.

On a en outre pour ce moteur :

$$l_1 = l_2 = 0^{\mathrm{m}},34 \qquad l_1 + l_2 = 0^{\mathrm{m}},68$$

$$\mathrm{P} = 660\ \mathrm{kg}. \qquad m = 4,78$$

on a par suite pour valeur théorique du couple C :

$$\mathrm{C} = \mathrm{F}.\,\frac{d}{2}\,.\,\frac{1}{m} = 360 \times \frac{0,840}{2} \times \frac{1}{4.78} = 31,50\ \mathrm{kgms}.$$

on déduit :

$$p_1 = 330 + \frac{31,5}{0,68} = 330 + 46 = 376\ \mathrm{kgs}.$$

$$p_2 = 330 - \frac{31,5}{0,68} = 330 - 46 = 284\ \mathrm{kgs}.$$

On voit que l'inégalité des efforts aux appuis dus au couple C est notable (92 kgs) et qu'elle surcharge l'essieu, ce qui augmente le martelage de la voie, mais diminue la tension des ressorts.

b) Dans le cas de la suspension *au droit du centre de gravité* par barres latérales (fig. 232), ou par joug (fig. 233), l'effort supplémentaire sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'essieu devient $\frac{C}{l_1}$ puisque $l_2 = 0$, ce qui donne pour le même moteur que ci-dessus, mais avec ce mode de suspension :

$$\frac{C}{l_1} = \frac{31{,}50}{0{,}34} = 92 \text{ kgs}$$

au lieu de 46.

Au moment du démarrage, le couple peut être aisément double ou triple du couple normal; s'il dépassait la valeur correspondante au moment du poids du moteur par rapport à l'essieu, le moteur pourrait se soulever autour de celui-ci comme point d'appui.

Cette éventualité n'est toutefois pas à craindre; car par exemple dans le moteur considéré, si le couple de démarrage est le triple du couple normal, l'effort de soulèvement ramené au centre de gravité ne dépasse pas

$$\frac{3 \times 31^{k},50}{0{,}34} = 280 \text{ kgs en chiffres ronds,}$$

tandis que le poids propre du moteur est de 660 kgs (nous ne tenons pas compte du poids des engrenages et de leur boîte qui atteint 150 kg. environ).

Il est bien évident que si la voiture se déplaçait en sens inverse, toutes les réactions précédentes changeraient de signe : ce serait l'essieu qui serait soulagé et le ressort qui serait surchargé. Il y a lieu de tenir compte de cette remarque sur les voitures à deux moteurs.

c) Considérons enfin le cas d'un *moteur à action directe et induit calé directement sur l'essieu* (fig. 203).

Le poids de la carcasse est reporté sur le truck par des ressorts r_2 r_2 placés à ses extrémités (Hopkinson 1890 et Westinghouse 1891).

On observera encore ici que les conditions d'équilibre du moteur dépendent non seulement de son poids, mais du couple qu'il développe en marche.

Le couple développé sur l'induit tend à faire basculer la carcasse en sens inverse du mouvement et charge ainsi le ressort d'arrière r_2 plus que le ressort d'avant r_2. Si on appelle l la distance d'application de chacun des ressorts à l'axe de l'essieu, P le poids du moteur et C le couple nor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mal qu'il développe, les efforts auxquels doivent pouvoir résister les ressorts sont :

$$\frac{P}{2} - \frac{C}{l} \text{ pour le ressort d'avant } r_2$$

et

$$\frac{P}{2} + \frac{C}{l} \text{ pour le ressort d'arrière } r_2.$$

Comme en réalité, le couple C n'est pas constant, le moteur s'inclinera plus ou moins, suivant la charge.

D'ailleurs, les couples ayant ici une valeur beaucoup plus grande à puissance égale que pour les moteurs à réduction, la réaction est plus importante.

Soit, par exemple, un moteur de 25 chevaux à 150 t/m et pesant 1.200 kg. Le couple correspondant en kgs est :

$$\frac{25 \times 75}{2\pi \times \frac{150}{60}} = 120 \text{ environ.}$$

Si les deux points de suspension sont distants de 1 mètre, les poids que supportent les ressorts seront respectivement :

$$600 - 120 = 480 \text{ kgs.}$$

et

$$600 + 120 = 720 \text{ kgs.}$$

L'inégalité n'est donc pas négligeable et elle l'est bien moins encore au démarrage où le couple est toujours deux ou trois fois plus fort.

Le mode de suspension considéré est défectueux à cet égard. Il l'est plus encore par la masse considérable des organes solidaires de l'essieu dont l'inertie suffit à produire de fortes percussions sur la voie, ainsi que nous l'avons vu au début de ce chapitre.

D'un autre côté, il faut remarquer que les ressorts de suspension du moteur, agissant sur l'essieu *en sens inverse* de ceux du truck, réduisent d'autant l'action utile de ceux-ci qu'on devra renforcer en conséquence.

Nous avons vu l'amélioration apportée dans la suspension de ce genre de moteurs, par l'emploi de l'arbre creux de Raffard, concentrique à l'essieu où le jeu élastique nécessaire, 25 millimètres au moins, est obtenu, non plus entre la carcasse et le truck, mais entre le moteur et l'essieu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

100. **Moteurs à engrenages élastiques.** — L'augmentation de la puissance et de la vitesse des automotrices et locomotives électriques a rendu nécessaires différentes modifications dans le système de transmission du couple moteur de l'essieu. La construction ordinairement employée pour les tramways ne suffisait plus aux nouvelles exigences parce que la violence des à-coups auxquels sont soumis les moteurs et la superstructure de la voie, augmente rapidement avec la puissance en jeu et la vitesse en dehors de la période de démarrage où ces à-coups devenaient excessifs, et pendant laquelle il importait au premier chef de réduire leur importance.

On a ainsi été conduit en particulier, à combiner des engrenages élastiques (nous verrons plus loin une autre solution par emploi de bielles et manivelles combinées ou non avec des engrenages élastiques). En ce qui concerne le démarrage, nous avons vu (§ 96), à propos de l'arbre creux Raffard-Short, l'influence heureuse de l'adoption des liens élastiques dans la transmission de l'effort moteur. Cet avantage se retrouve en entier ici.

La réalisation d'un engrenage élastique est théoriquement assez simple et de nombreux dispositifs sont possibles. Elle offre cependant en pratique des difficultés assez sérieuses, surtout au point de vue du graissage des surfaces glissant l'une sur l'autre.

Les premiers véhicules auxquels on ait appliqué des engrenages élastiques paraissent être les locomotives à crémaillère, du système *Abt.*, qui est constituée, ainsi que nous le verrons en détail à l'étude du matériel à crémaillère, par deux lames parallèles dentées, dans chacune desquelles engrène une couronne dentée. Ces deux couronnes sont montées sur un moyeu commun auquel elles sont reliées par des ressorts comme le montre la figure 237.

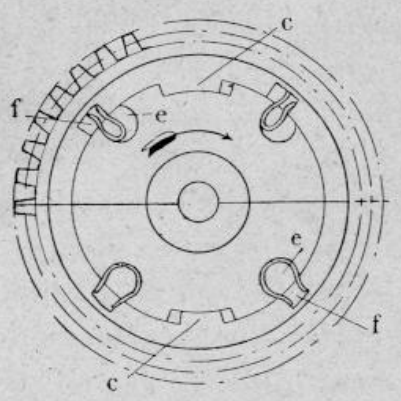


FIG. 237.
Engrenage élastique Abt.

A cet effet, le moyeu porte des ouvertures *e* dans lesquelles sont disposés les ressorts qui sont du type à lames dont les extrémités pénètrent dans des ouvertures correspondantes *f* de la jante de la roue dentée. Ils permettent ainsi un certain déplacement du moyeu par rapport à la jante. Si les ressorts se brisaient, les tocs *c* entraîneraient le moyeu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cet engrenage élastique a donné, à tous les points de vue, des résultats satisfaisants.

Sa disposition de principe a été appliquée en particulier au chemin de fer de la Mure et a fait plus récemment l'objet d'une application importante sous une forme un peu différente aux locomotives du Loetschberg, et dont la figure 238 représente une vue d'ensemble. Cet engrenage a été réalisé par la Société Suisse de Construction de Locomotives et de Machines de Winterthur (engrenage élastique Kjelsberg).

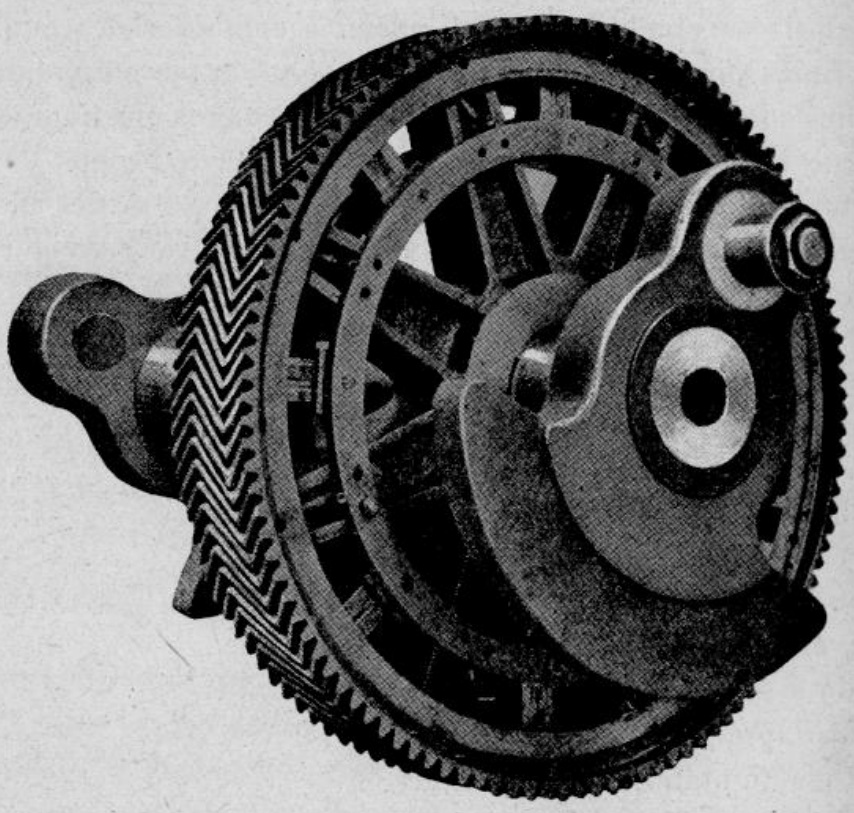


FIG. 238.

Engrenage élastique des locomotives du Loetschberg.

Dans cette disposition, le croisillon calé sur l'arbre d'un faux essieu porte, pris dans une série de mors intercalés entre ses bras, des lames de ressorts à peu près radiales et groupées par paquets de six. Ces lames s'engagent, d'autre part, par leur extrémité libre, dans des entailles au-dessous de la jante de l'engrenage. Ces lames sont au nombre de 96. Elles permettent bien, comme dans le cas précédent, un certain jeu élastique tangentiel de la couronne dentée par rapport au centre. Ainsi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que nous le verrons plus loin, cet engrenage est en outre combiné avec l'emploi de bielles et manivelles.

Les figures ci-après représentent diverses réalisations pratiques d'engrenages élastiques dont plusieurs établies par la société Brown-Boveri.

La construction représentée par la figure 239 se distingue de celle de Abt par la forme des ressorts. On a substitué aux ressorts à lames des ressorts à boudin. Pour répartir la charge également entre les différents ressorts, on a prévu des pièces de guidage *c* et *d* qui s'adaptent les unes dans les autres et dont les têtes s'appliquent contre les parois de l'ouverture ménagée dans la jante et le moyeu. Si la jante *b* se déplace par rapport au moyeu *n*, les surfaces *k* et *h* qui sont diagonalement opposées entrent en contact avec les parois des évidements. Cette construction se prête bien aux visites.

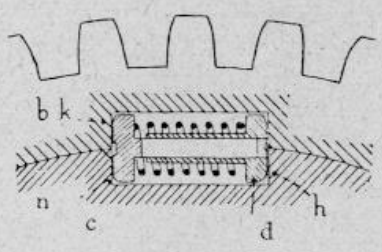


FIG. 239.

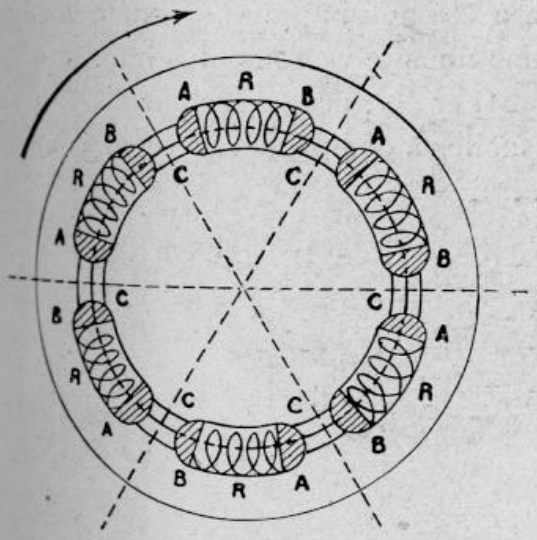


FIG. 240.

Transmission élastique appliquée sur la locomotive Westinghouse de la Compagnie du Midi.

Le principe de l'emploi des ressorts à boudin perpendiculaires aux rayons a été notamment appliqué aux locomotives à engrenages du Chicago-Milwaukee et St-Paul, que nous examinerons plus loin avec quelques détails et à la locomotive d'essai Westinghouse, du Midi, dont la figure 240 représente schématiquement la disposition. Les ressorts R, logés dans la roue dentée, ont une certaine bande initiale qui applique fortement les tasseaux A et B sur leurs sièges. Sur l'arbre du moteur est claveté un plateau portant dix dents qui viennent se loger sans jeu dans les intervalles C et qui sont, à l'arrêt, en contact simultané avec le tasseau A d'un ressort et le tasseau B du ressort voisin. Si le moteur est mis en marche dans le sens de la flèche, tous les tasseaux B forment point fixe et les tas-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seaux A sont sollicités dans le sens de cette flèche et compriment les ressorts R. Le système est en outre réversible comme tous les précédents. Ainsi que nous le verrons plus loin, cet engrenage est en outre combiné avec l'emploi de bielles et manivelles.

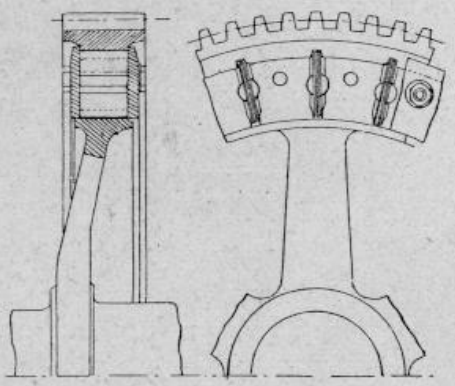


FIG. 241.

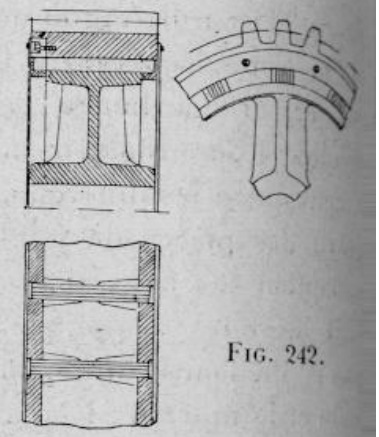


FIG. 242.

Ce même genre de construction a été aussi appliqué concurremment avec l'emploi d'un arbre creux comme nous le verrons plus loin.

Dans la construction des figures 241 et 242, proposées par M. Aichele, un grand nombre de petits ressorts faciles à comprimer, servent à donner à la transmission l'élasticité nécessaire.

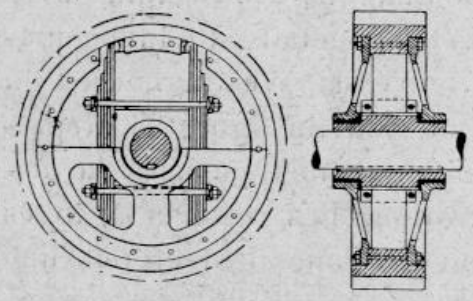


FIG. 243.

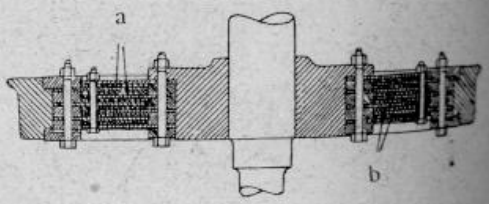


FIG. 244.

Dans la construction de la figure 243, au contraire, on obtient cet effet par deux ressorts à lames robustes.

Dans le dispositif de la figure 244, l'intermédiaire élastique est placé dans le croisillon et comprend des plaques de caoutchouc *b* intercalées entre des plaques d'acier *a*, fixées les unes au moyeu, les autres à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jante. Cette disposition donne à l'ensemble des liens élastiques une grande souplesse, et ce, dans toute direction par rapport au moyeu. Elle

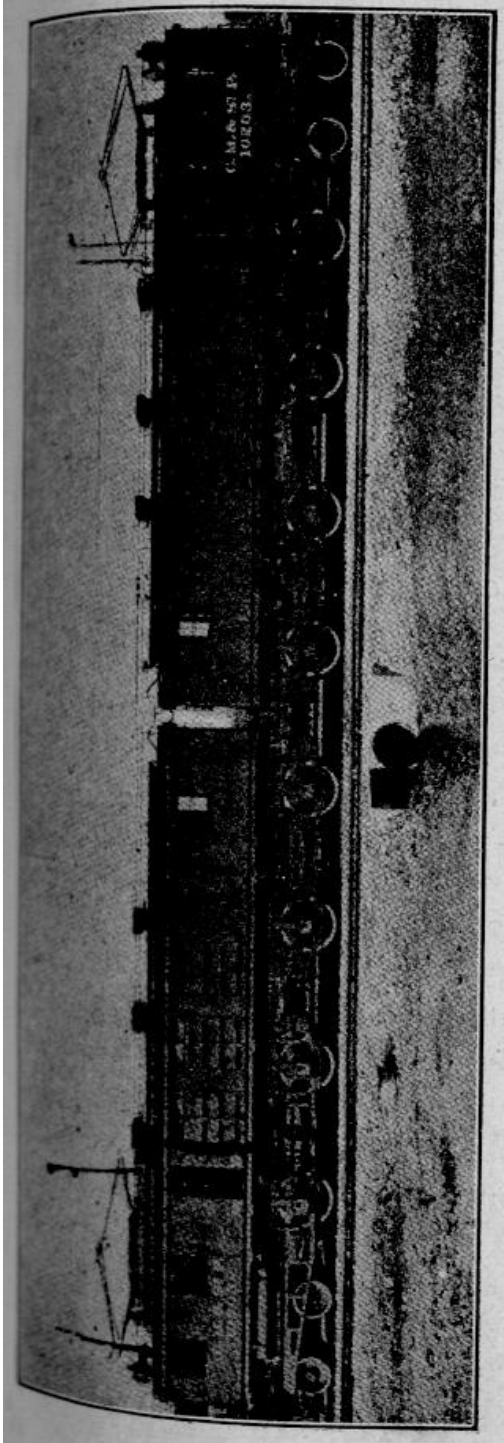


Fig. 245. — Locomotive du Chicago, Milwaukee et St-Paul.

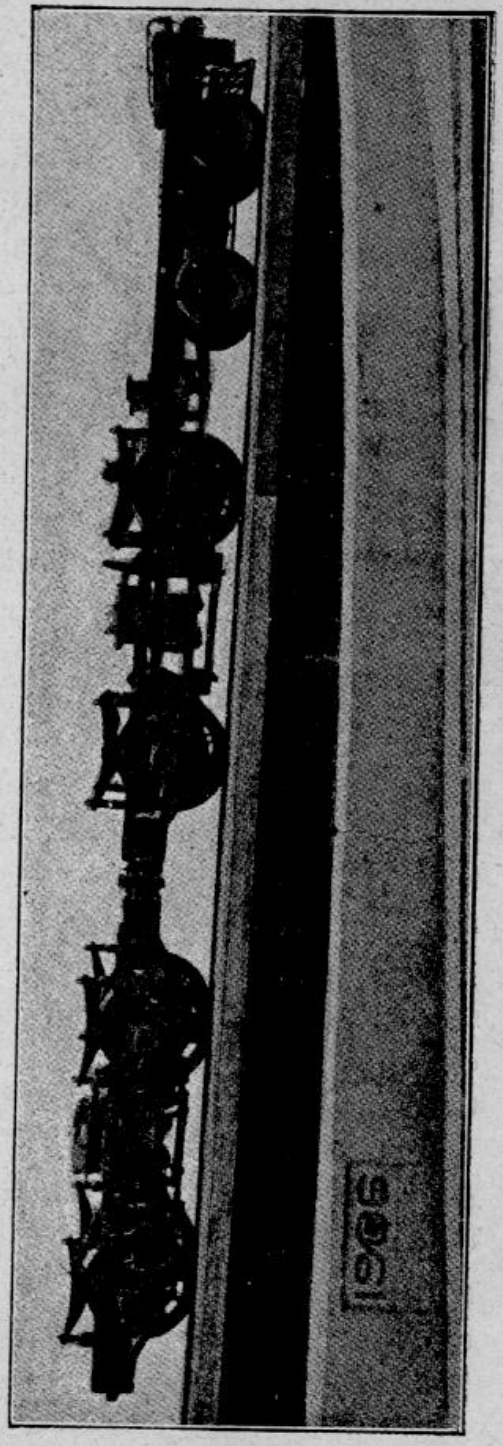


Fig. 246. — Truck d'une demi-locomotive.

est toutefois assez onéreuse. Elle est cependant à recommander dans le cas où il est nécessaire de ménager autant que possible le véhicule et la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

superstructure de la voie. Elle amortit, en effet, bien les secousses dues aux joints de rails et aux inégalités de la voie. Toutefois, le caoutchouc ne supportant que des contraintes assez faibles, cette construction ne peut être employée que si les efforts à transmettre ne sont pas trop grands.

Au point de vue amortissement des secousses dues à la voie, le dispositif que nous verrons ci-après et qui est une combinaison d'un engrenage élastique et d'un arbre creux donne une solution meilleure et plus complète dans ce sens qu'elle assure, en outre, la suspension élastique des moteurs. Elle n'est pas, d'autre part, limitée aux faibles puissances.

Locomotives de 260 tonnes du Chicago-Milwaukee-St-Paul de la General Electric Co. — Nous avons déjà mentionné le deuxième type (1918) ou " Gearless " de ces locomotives de la General Electric en service sur cette ligne, (courant continu 3.000 volts), lesquels sont à 12 moteurs bipolaires de 270 chevaux, concentriques à l'essieu et dérivés du type du New-York Central.

Les locomotives du premier type (1915) sont à engrenages et entraînement élastique. D'une construction très différente, elles comprennent deux unités accouplées; chaque unité est à quatre moteurs répartis sur deux trucks, de sorte que la locomotive complète comprend quatre trucks à deux essieux-moteurs, avec en outre, à chaque extrémité, un bogie porteur. Elle est ainsi du type 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4. Les figures 245 et 246 (1) montrent l'ensemble d'une locomotive complète et les deux sortes de trucks employés sur chaque demi-locomotive.

Les moteurs sont connectés par groupes de deux en série, sous la tension totale 3.000 volts et leur puissance uni-horaire individuelle à la jante est de 430 chevaux, ce qui fait ressortir la puissance totale de la locomotive à 3.440 chevaux.

Chaque moteur transmet son couple à l'essieu correspondant au moyen de deux trains d'engrenages jumelés à denture droite, un train de chaque côté du moteur. Cette disposition a été adoptée en raison de l'importance du couple à transmettre. Chaque roue dentée est en deux parties, reliées par des ressorts hélicoïdaux, ainsi que le montre les figures 247 et 248.

(1) Empruntée, ainsi que les quatre suivantes, à la *General Electric Review*, de novembre 1916.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

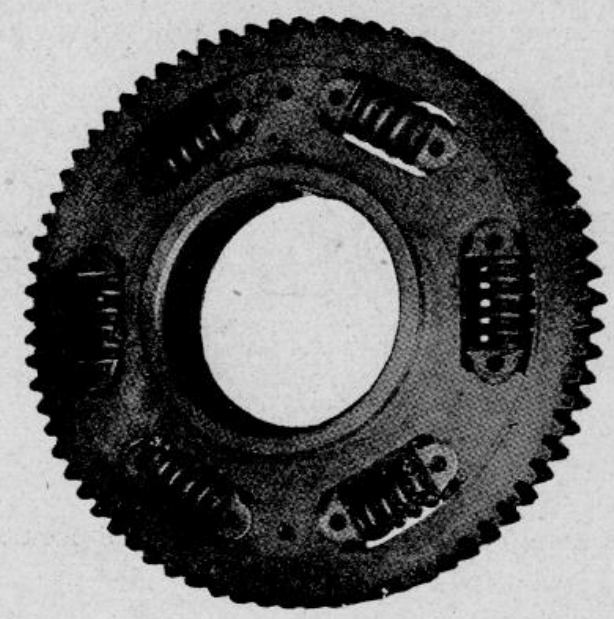


FIG. 247.

Roue dentée élastique.

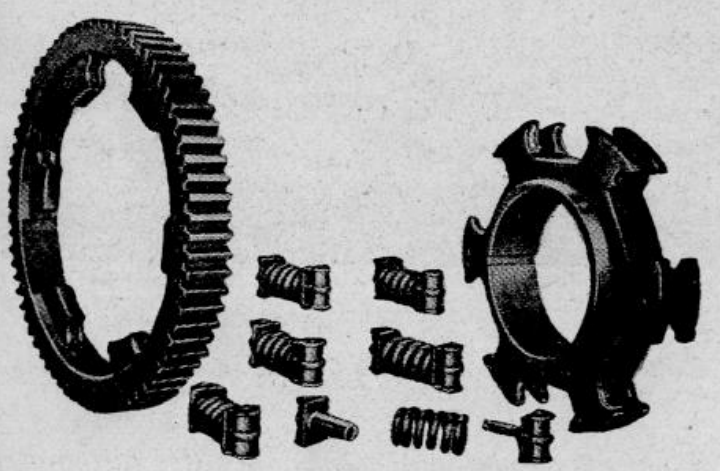


FIG. 248.

Détails de la roue dentée élastique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 249 montre en outre la disposition en demi-coupe et demi-élévation d'un des trucks dont la photographie (fig. 250) représente la vue en plan sur laquelle on voit, en particulier, les deux trains d'engrenages par moteur.

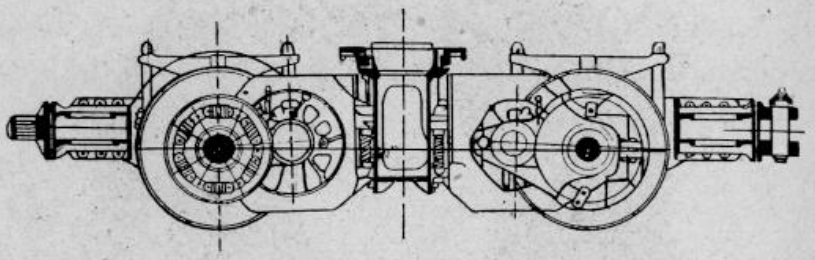


FIG. 249.

Vue d'un des quatre bogies-moteurs.

101. **Moteurs à engrenages élastiques et arbre creux.** — Cette combinaison réunit les avantages des deux dispositifs.

Plusieurs applications ont été réalisées :

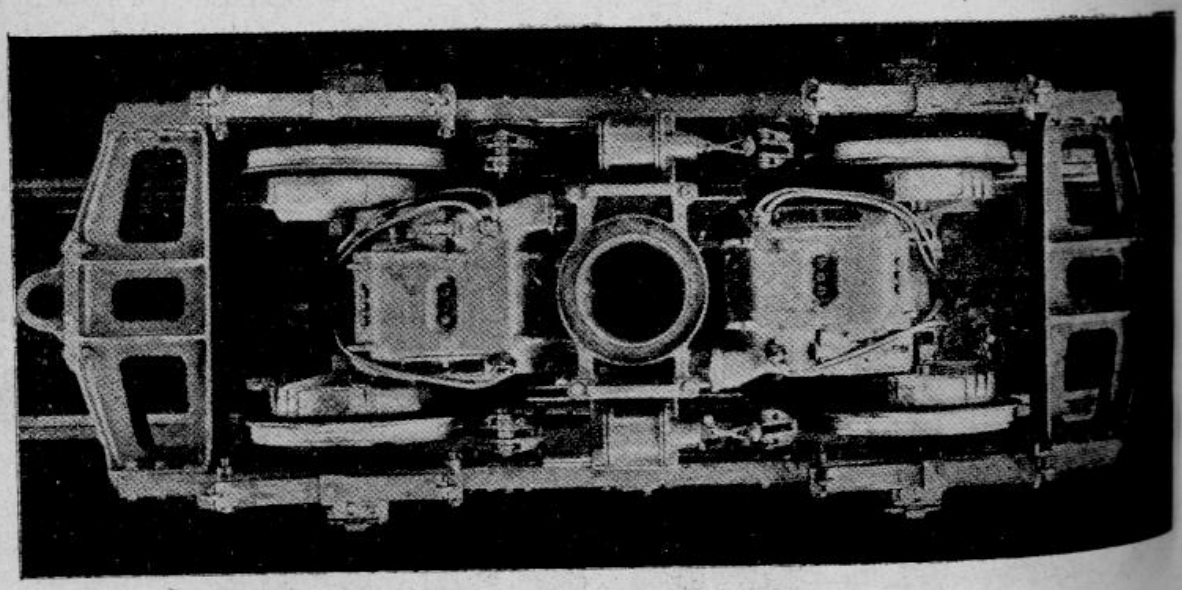


FIG. 250.

Vue en plan d'un truck avec ses deux moteurs à engrenages jumelés.

Moteur Thomson-Houston à engrenages des automotrices de la ligne de Paris-Invalides à Versailles. — Le mode d'entraînement élastique adopté ici rappelle celui des moteurs de la même ligne (de construction Brown-Boveri) à induit concentrique à l'essieu, mais il y a en plus emploi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'engrenages (fig. 251), la roue d'entrée étant calée sur un arbre creux Raffard. Ces moteurs sont d'une puissance de 140 chevaux.

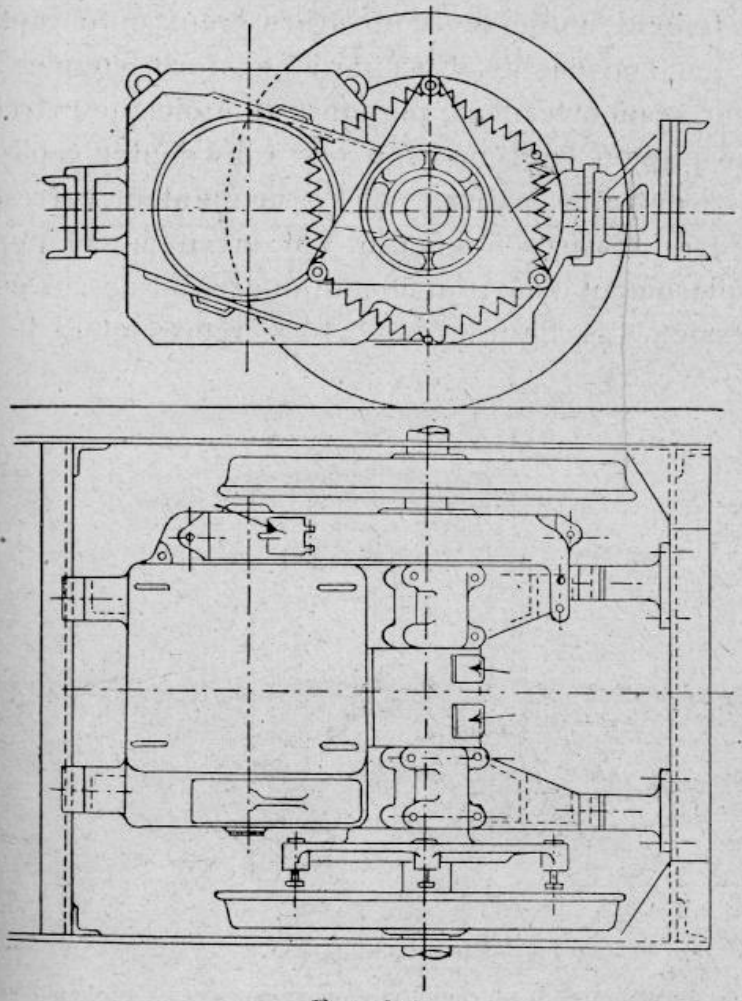


FIG. 251.

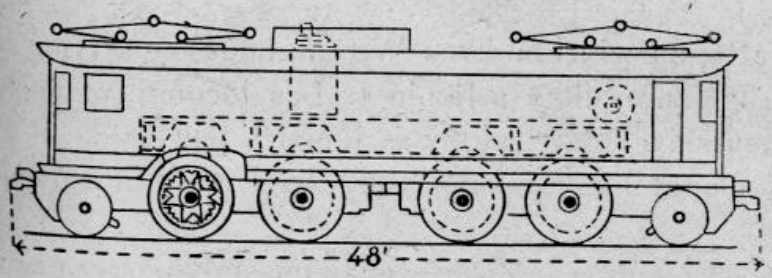


FIG. 252.

Locomotives et Hartford. — *Westinghouse à voyageurs du New-York, New-Haven* Ces locomotives, type 1910 (2 — 4 + 4 — 2), dont le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

schéma d'ensemble est donné figure 252, sont équipés avec quatre moteurs Westinghouse de 300 chevaux. Elles pèsent environ 100 tonnes, dont 78 adhérentes. Chaque moteur est monté rigidement sur le bâti du truck et directement au-dessus d'un arbre creux entourant l'essieu, en réservant un jeu convenable. En égard aux forts couples développés, chaque moteur comporte deux pignons, un à chaque extrémité de son arbre. Chaque pignon engrène avec une roue dentée calée sur le manchon et celui-ci entraîne les roues de l'essieu-moteur correspondant par l'intermédiaire de ressorts à boudin. Cet arrangement permet à l'ensemble un déplacement d'environ 38 millimètres au-dessus ou au-dessous de l'axe de l'essieu. Les figures 253-254-255 représentent le montage de ces moteurs.

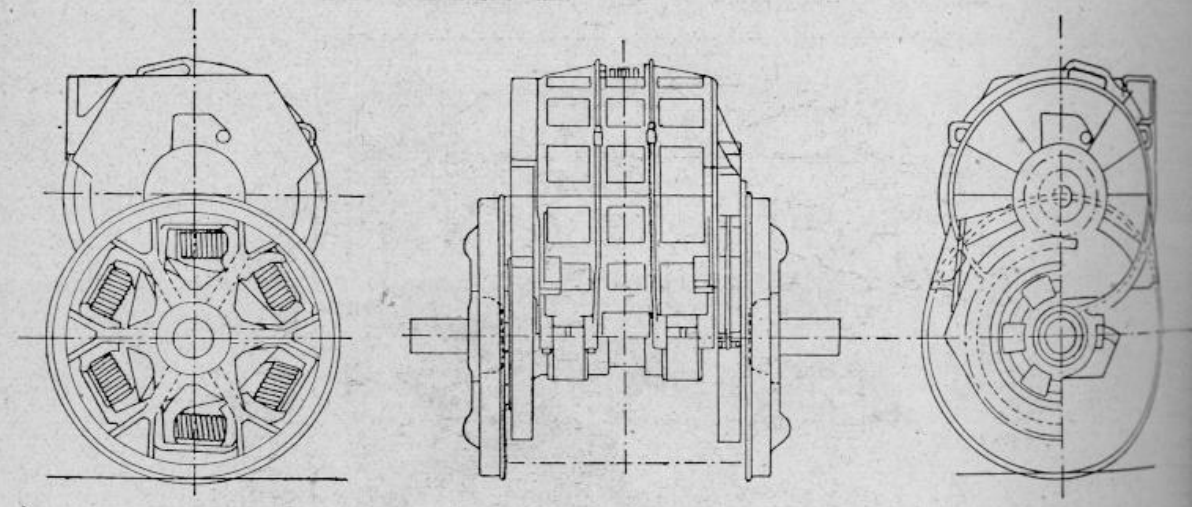


FIG. 253-254-255.

Essieux-moteurs des locomotives à voyageurs et à marchandises.
(New-York, New-Haven et Hartford, RR.)

Un autre type de locomotives Westinghouse en service sur la même ligne, est du genre dit « articulé ». Les locomotives sont à quatre essieux-moteurs avec deux moteurs jumelés par essieu. Il y est encore fait emploi d'engrenages et d'arbres creux concentriques aux essieux moteurs.

La figure 256 montre la disposition d'ensemble assez originale de ces locomotives qui comprennent deux trucks, formant un ensemble articulé à deux essieux-moteurs chaque et un essieu porteur d'extrémité à roues directrices ou « bissel ». Elles sont ainsi du type $2-4+4-2$, comme les précédentes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'effort de traction est transmis d'un truck à l'autre par une barre ajustée de manière à laisser un jeu maxima d'un demi-pouce (12,7 $^{m}/_{m}$) entre les traverses extrêmes, en regard l'une de l'autre, des trucks, après extension complète de ceux-ci. Entre elles sont des tampons à ressorts.

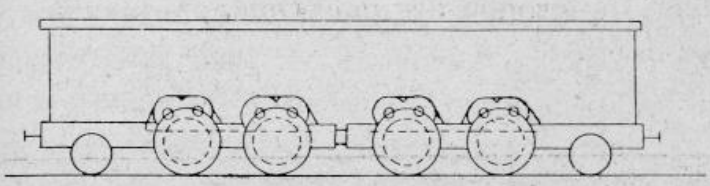


FIG. 256.

N.-Y. N.-H. H. (Voyageurs).

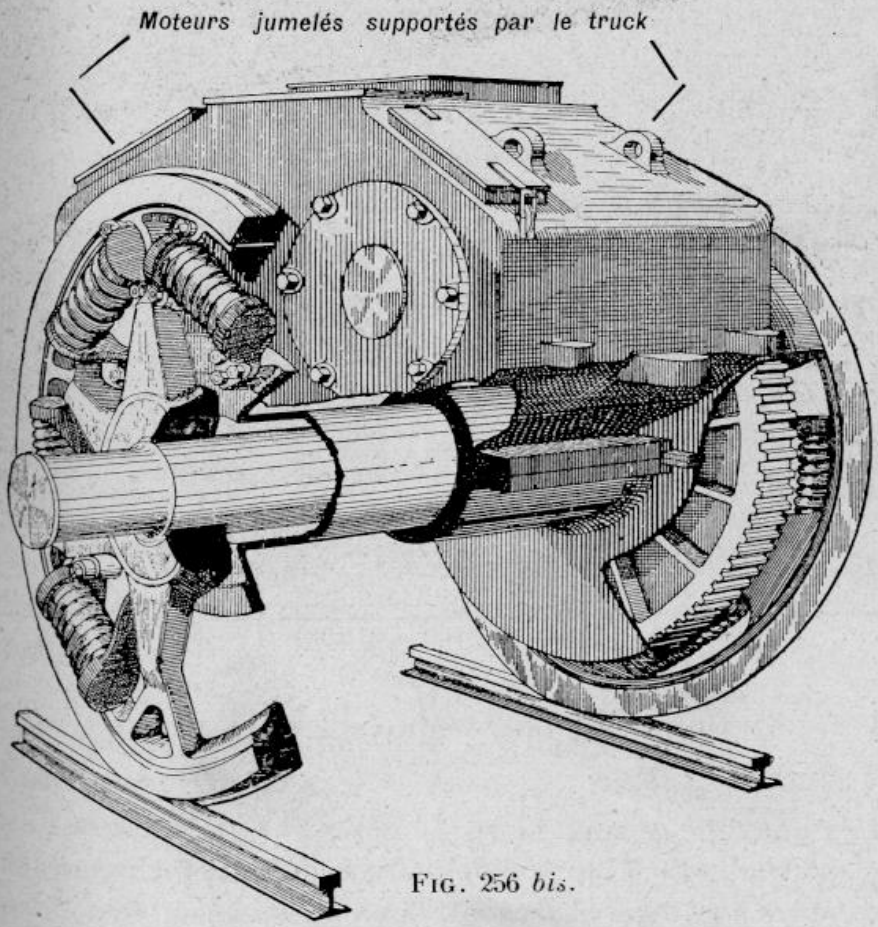


FIG. 256 *bis*.

Essieu monté à moteurs jumelés des locomotives du N-Y. N-H. et H.

Le poids de ces locomotives est d'environ 110 tonnes, dont 82 de poids adhérent.

Les moteurs qui sont d'une puissance unihoraire de 210 chevaux,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où une puissance totale pour la locomotive d'environ 1700 chevaux, sont groupés par paires.

La figure 256 *bis* montre le détail de construction d'un essieu monté.

Les photographies (fig. 257-258-259) (1) montrent l'aspect des deux trucks accouplés, du groupe des deux moteurs jumelés, d'un essieu, et enfin, un essieu monté.

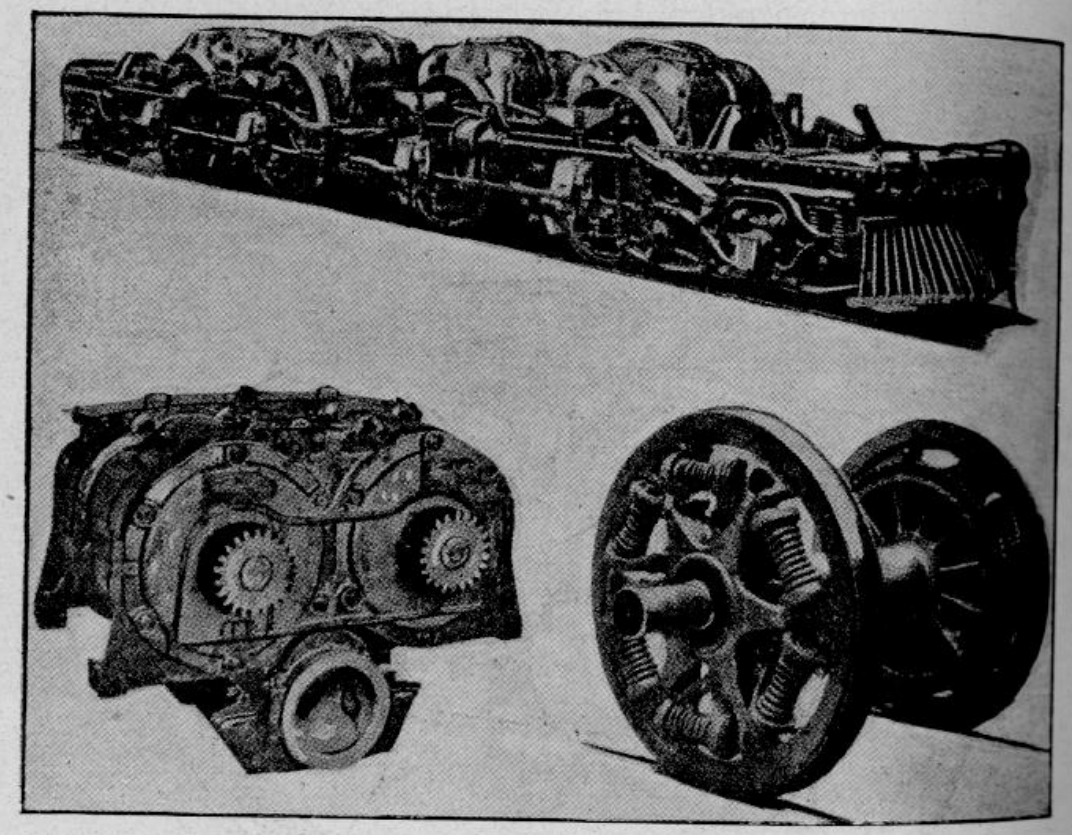


FIG. 257-258-259.

Locomotive du New-York, New-Haven Hartford, 1360 chevaux.
Truck, moteur, essieu.

Les deux moteurs d'une même paire attaquent un même essieu, l'un à droite, l'autre à gauche et ils sont boulonnés ensemble pour constituer un tout. Les deux moteurs d'une paire sont fixés rigidement au châssis du truck au-dessus de l'essieu-moteur correspondant suivant la disposition

(1) Empruntées au *Bulletin* d'Avril 1913 de la Société internationale des Électriciens (Conférence de M. Parodi).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indiquée sur la figure 260 et sur les photographies précédentes. Chaque paire de moteurs est munie de deux paliers qui portent un arbre creux entourant concentriquement l'essieu. Sur une extrémité de cet arbre est calée une roue dentée avec laquelle engrènent les deux pignons clavetés sur les arbres des induits des moteurs. La liaison mécanique entre les arbres creux et les roues motrices est assurée par des ressorts en hélice qui sont montés entre les rais de ces roues et les bras que porte chaque extrémité de l'arbre creux. Un jeu radial de 38 millimètres est prévu entre la surface intérieure de l'arbre creux et l'essieu-moteur, afin que les roues motrices soient libres de suivre les dénivellations et autres irrégularités de la voie.

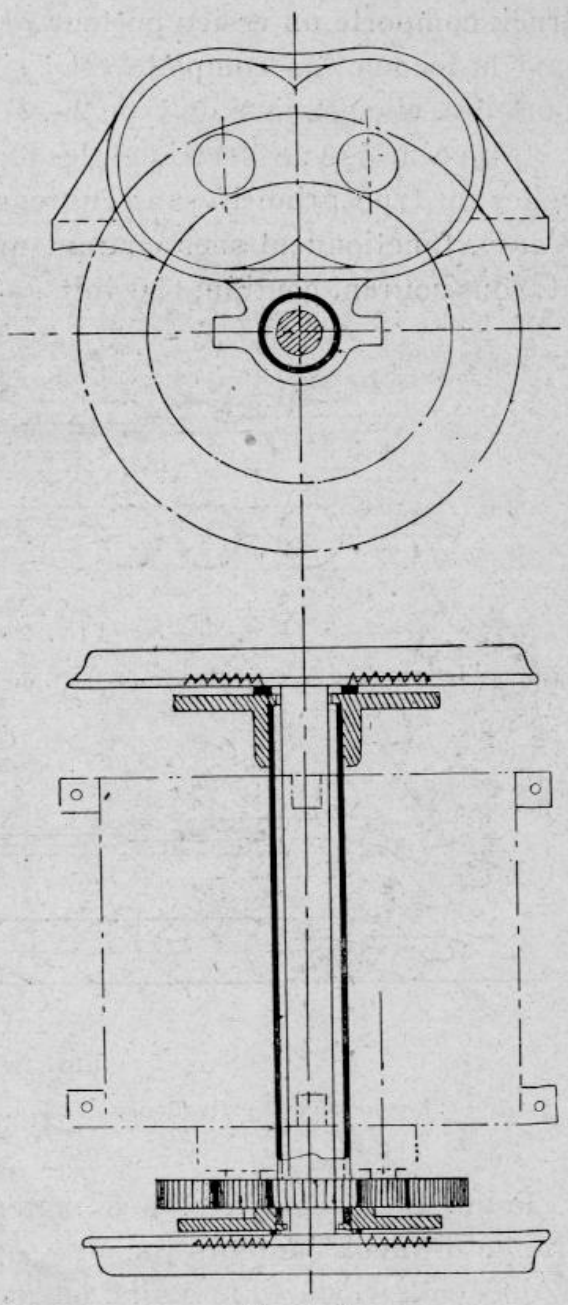


FIG. 260.

Locomotive du N-Y. N-H. et H.
Essieu-moteur.

Un troisième type de locomotive, plus récent, également de la Société Westinghouse, et dérivé des précédentes, a été mis en construction en 1918. Les nouvelles locomotives, dont l'aspect est représenté sur la figure 260 *bis*, pèsent 160 tonnes, qui est le poids maximum admis sur les lignes du *New-York, New-Haven*. Leur poids adhérent est d'environ 110 tonnes. Elles diffèrent du type ci-dessus, en ce que chacun des deux trucks comprend trois essieux-moteurs au lieu de deux, chaque essieu étant encore actionné par un groupe de deux moteurs jumelés de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même construction et de la même puissance que ceux des précédentes locomotives. Le nombre des moteurs est ainsi douze, ce qui fait ressortir la puissance de la locomotive à 2550 chevaux environ. En outre, chaque truck comporte un essieu porteur « bissel » à chaque extrémité, de sorte que la locomotion complète est à six essieux-moteurs et quatre essieux porteurs, elle est ainsi du type $2-6-2+2-6-2$.

Au point de vue électrique, les locomotives de ces trois types, comme celles du type primitif, sans engrenages (gearless) du *New-York, New-Haven*, fonctionnent sous courant monophasé, 11.000 volts, 25 périodes et, sous courant continu, 650 volts.

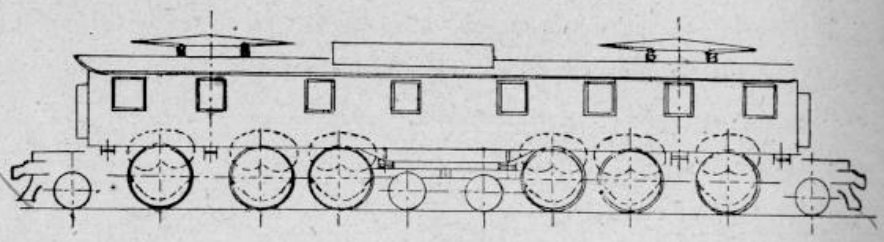


FIG. 260 *bis*.

Locomotive Westinghouse de 160 t. du New-York, New-Haven et Hartford.

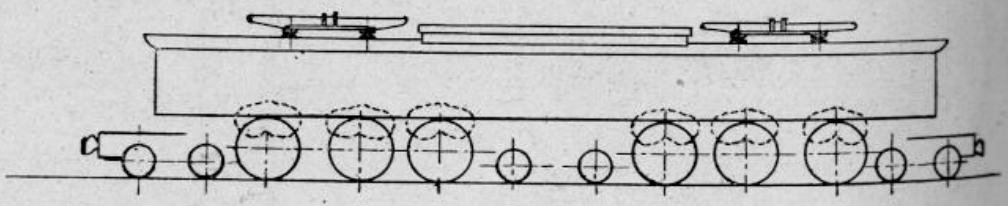


FIG. 260 *ter*.

Locomotive Westinghouse de 240 t. du Chicago-Milwaukee-St-Paul.

Pour les locomotives, à 8 moteurs, les deux moteurs de chaque groupe de deux moteurs jumelés sont en permanence en série, et pour les locomotives de 12 moteurs, les moteurs sont par groupes de trois en série. Pour la marche en courant alternatif, les différents groupes de moteurs, quatre dans l'un et l'autre cas, sont associés en parallèle et pour la marche en courant continu, ils peuvent être connectés par deux en série ou tous les quatre en parallèle, suivant la méthode du contrôle série-parallèle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Locomotives Westinghouse du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul. — Le mode de construction des locomotives ci-dessus a encore été adopté par la Société Westinghouse pour ses locomotives, type 1918, du *Chicago-Milwaukee-Saint-Paul*, à courant continu, 3000 volts, la seule différence comme aspect avec les précédentes, étant que les essieux porteurs extrêmes (bissels) sont remplacés par des bogies à deux essieux, suivant le schéma de la figure 260 *ter*. Ces locomotives pèsent 240 tonnes et leurs 12 moteurs sont d'une puissance horaire individuelle de 300 chevaux. Ils sont groupés ainsi que nous l'avons déjà vu (§ 49-4°), par 4 en série pour la pleine marche.

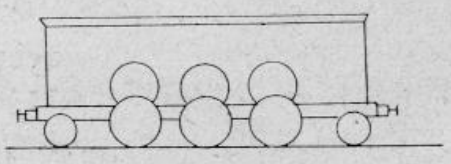


FIG. 261.

Chemin de fer du Midi (Jeumont).

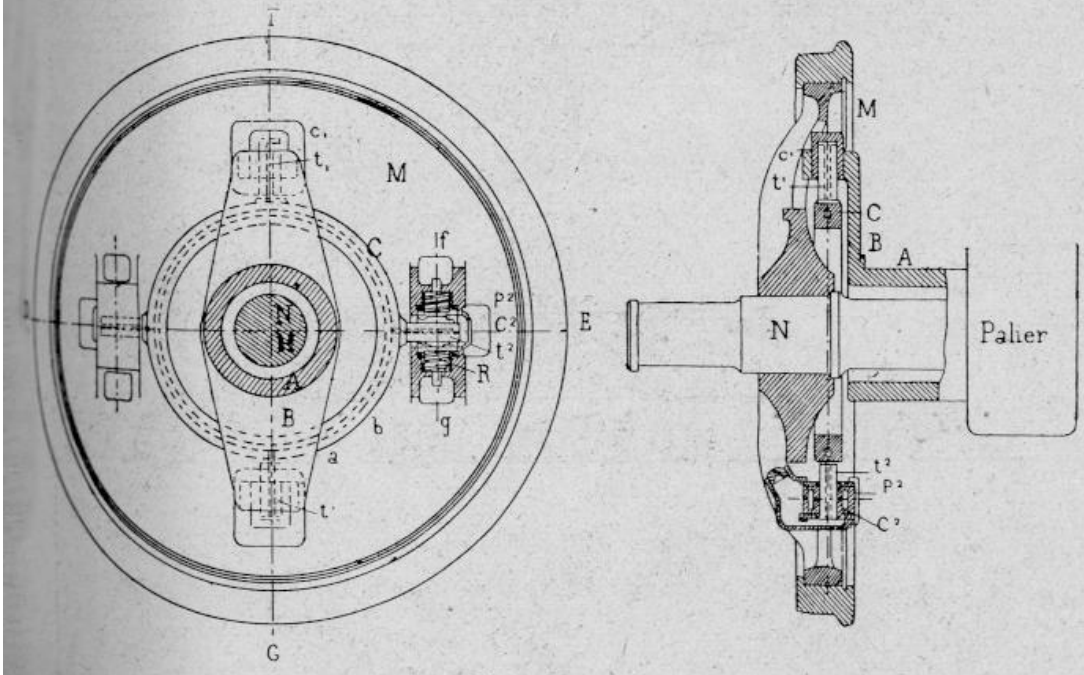


FIG. 262.

Dispositif d'attaque des roues par les moteurs.

Locomotive monophasée d'essai du Midi des Ateliers de Constructions électriques du Nord et de l'Est. — Dans ces locomotives qui sont à trois moteurs de 500 chevaux et trois essieux-moteurs (fig. 261) entre deux essieux porteurs (type 2 — 6 — 2), chaque moteur est placé au-dessus de l'essieu qu'il commande, disposition analogue à celle des locomotives

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du N-Y, N-H et H de la figure 252. La liaison élastique entre l'arbre creux et la roue motrice est réalisée au moyen d'une transmission à la cardan, dont la figure 262 et la photographie (fig. 263) montrent le détail.

102. **Transmissions par bielles et manivelles avec ou sans engrenages.** — Ce système d'accouplement imaginé aux États-Unis, par Stephen D. Field, avait pour but de combiner les avantages de l'accouplement direct et de l'attaque de deux essieux par un seul moteur. Celui-ci était fixé directement au truck et son arbre, parallèle aux essieux, portait à ses deux extrémités un disque relié par des bielles aux roues du truck.

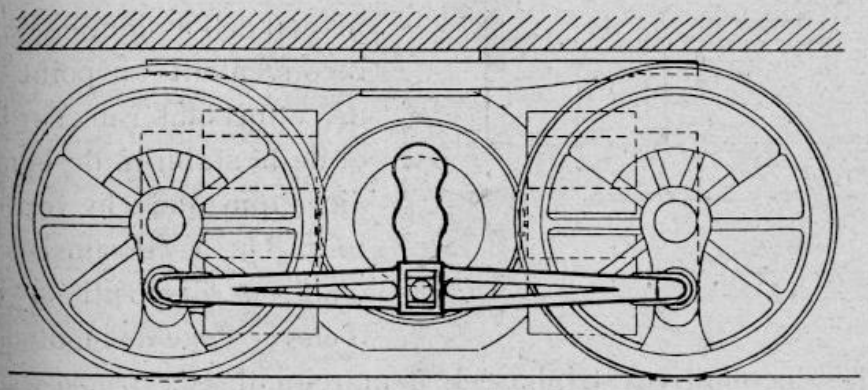


FIG. 264.

Transmission par bielles et manivelles. Type Field 1888.

Cette transmission présente une grande simplicité et un bon rendement; l'emploi des bielles permettant en outre de fixer le moteur au truck, réalisait sa suspension élastique et supprimait tout martelage de la voie.

Elle fut appliquée d'abord par Field en 1888, à une locomotive essayée sur le chemin de fer élevé de New-York, puis ensuite, en 1891, par Field et Eickemeyer, à des voitures de tramways.

La figure 264 représente la disposition adoptée, puis abandonnée pendant plusieurs années, et ensuite reprise par un certain nombre de constructeurs sous la forme représentée par la figure 265.

Les manivelles calées respectivement sur l'arbre du moteur et sur l'essieu sont, comme dans le cas précédent, de même rayon et sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaque axe, les manivelles sont calées à 90°, afin d'éviter l'effet des points morts. Ce système permet une bonne suspension, facile à réaliser, du moteur; mais il faut équilibrer les bielles à cause des effets d'inertie. Cet équilibrage est d'ailleurs facile, tous les points étant animés d'un mouvement de rotation, ce qui, en passant, n'a pas lieu dans la locomotive à vapeur où il y a des pièces animées d'un mouvement alternatif.

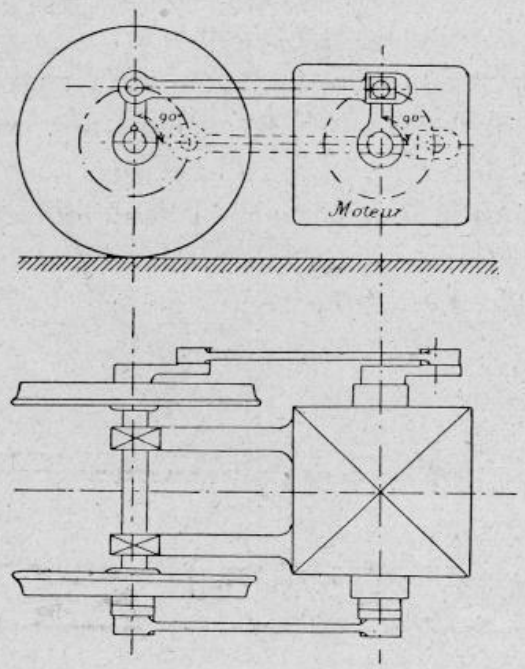


Fig. 265.

Dans la disposition ci-dessus, le moteur électrique est au niveau de l'essieu, ce qui est un inconvénient au point de vue des efforts latéraux sur les voies et de la stabilité de la machine, ainsi que nous le verrons plus loin. On a été ainsi conduit à d'autres dispositions en vue d'élever l'axe des moteurs.

Dans les locomotives triphasées à marchandises, *Brown-Boveri*, de la ligne *Burgdorf-Thoune*, deux moteurs triphasés calés sur le même

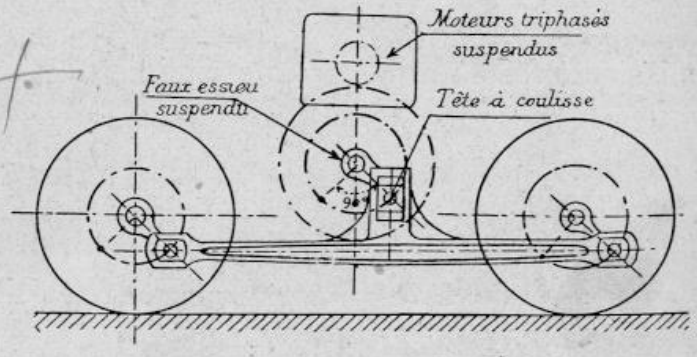


Fig. 266.

Burgdorf à Thoune.

axe actionnent, par l'intermédiaire d'engrenages, un faux essieu qui porte deux manivelles calées à 90° (fig. 266). Ces deux manivelles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

actionnent elles-mêmes les deux essieux-moteurs par l'intermédiaire de simples bielles et de manivelles.

Ce mode de transmission par bielles et manivelles comportant l'emploi de bielles et de manivelles seulement, ou l'emploi combiné d'engrenages de bielles et de manivelles, se retrouve sur la majorité des plus récentes et plus puissantes locomotives modernes : Valteline, Simplon, Giovi, Norfolk, Pennsylvania, Midi, Wiesenthal, État Suédois, Loetschberg, Pennsylvania-Terminus, etc...

Nous allons examiner avec quelques détails quelques transmissions types ; nous donnons ci-après les schémas d'ensemble de la plupart des principales locomotives modernes (fig. 267 à 297).

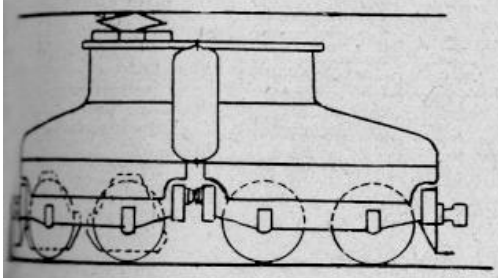


FIG. 267.
Locomotive du tunnel de Baltimore (1896), 85 t 720 chx. Courant continu.

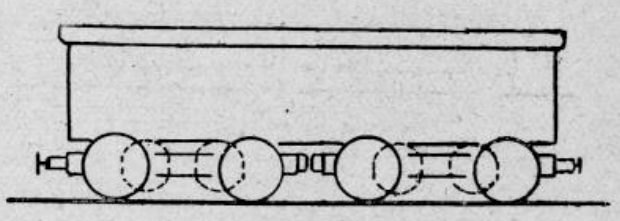


FIG. 268.
Tunnel de la Cascade.
105 t 1900 chx. Courant triphasé.

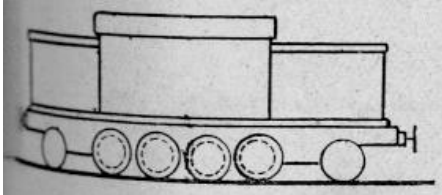


FIG. 269.
N. Y. C. Premier type (1906).
[illegible] 2200 chx. Courant continu.

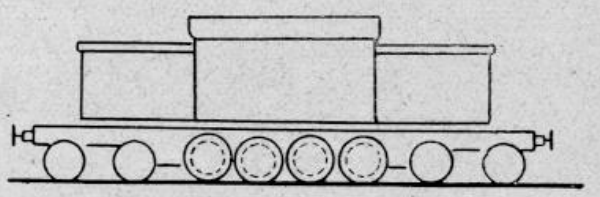


FIG. 270.
N. Y. C. Deuxième type (1908).
104 t 2200 chx. Courant continu.

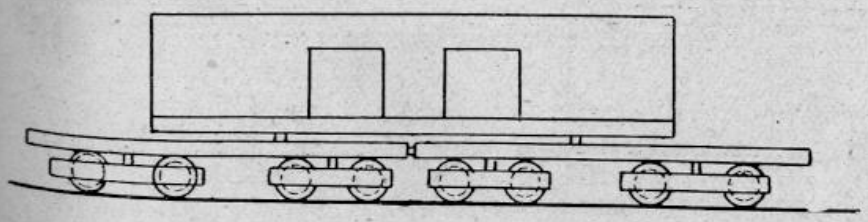


FIG. 271.
N. Y. C. Troisième type (1912). — 103 t 2400 chx. Courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

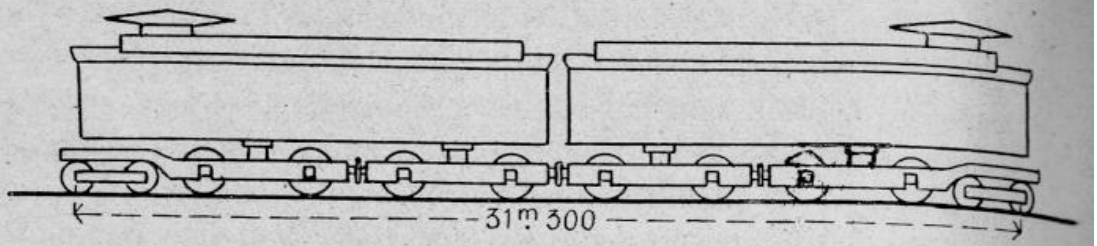


FIG. 272.

Chicago-Milwaukee-St-Paul-Ry. 1er type.
200 t 3140 chx. Courant continu 3000 volts.

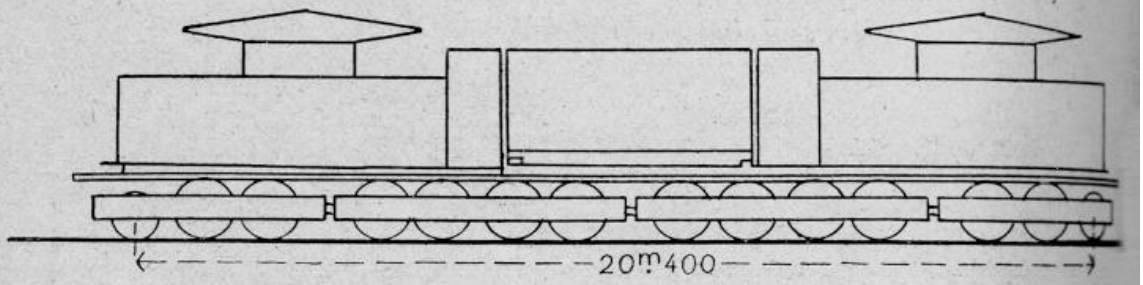


FIG. 273.

Chicago-Milwaukee-St-Paul. 2e type.
240 t 3240 chx. Courant continu 3000 volts.



FIG. 273 *bis*.

Chicago-Milwaukee-St-Paul (Westinghouse).
240 t 3600 chx. Courant continu 3000 volts.

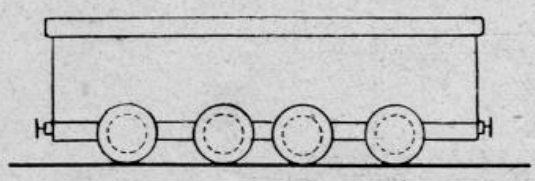


FIG. 274.

N. Y, N H. et H. Premier type
87 t 1000 chx. Monophasé-continu.

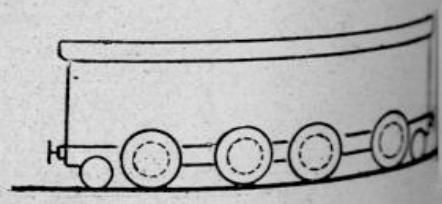


FIG. 275.

N. Y., N. H. et H. Deuxième type
102 t 1000 chx. Monophasé-continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

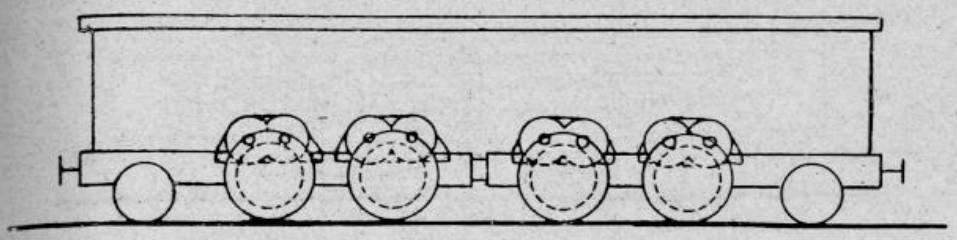


FIG. 276.

N.-Y., N.-H. et H. 110t 1700 chx. Monophasé-continu

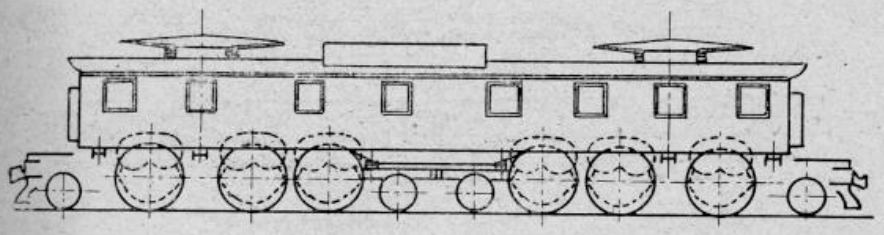


FIG. 276 *bis*.

N.-Y , N.-H. et H. 160t 2550 chx. Monophasé-continu.

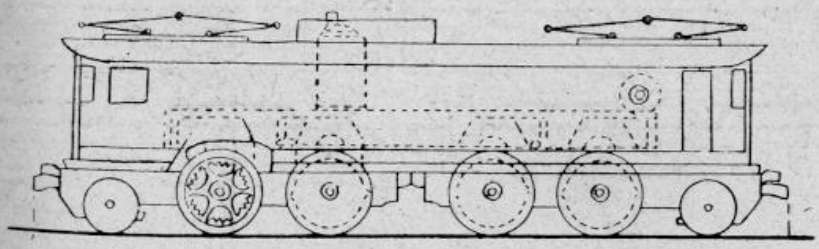


FIG. 277.

N.-Y , N.-H. et H. 100t 1200 chx Monophasé-continu.

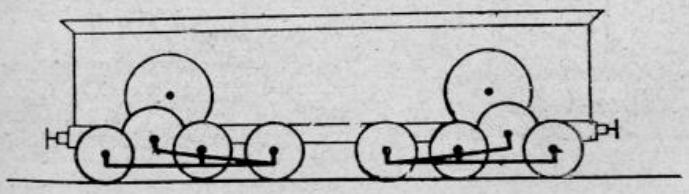


FIG. 278.

N.-Y. N.-H. et H. 120t 1500 chx Monophasé-continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

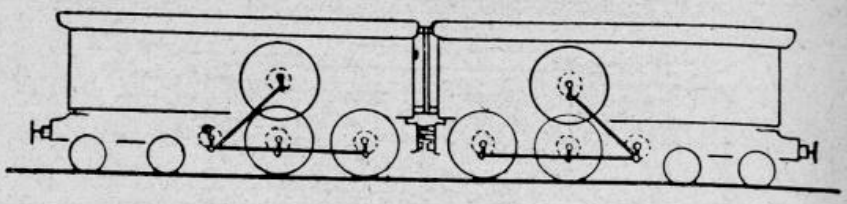


FIG. 279.

Pennsylvania Rd : Terminus. 150 t 2000 chx. Courant continu.

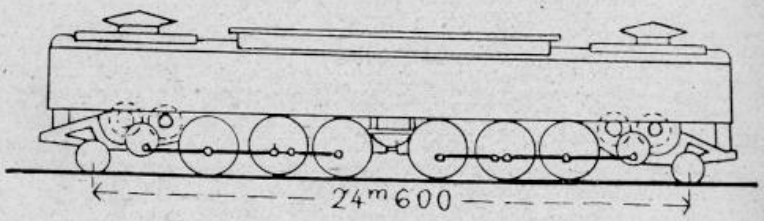


FIG. 280.

Pennsylvania. 220 t 4800 chx. Mono-triphasé.

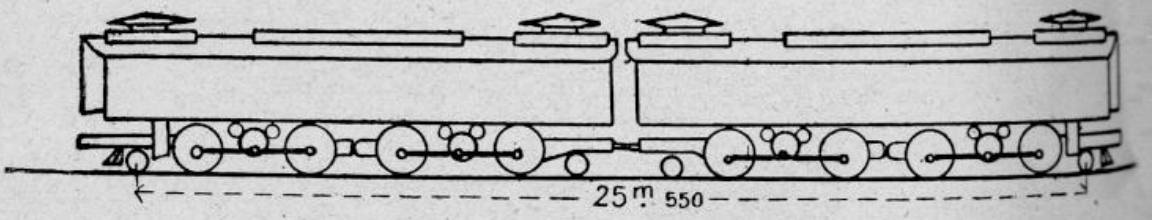


FIG. 281.

Norfolk et Western Ry. 240 t 3600 chx. Mono-triphasé.

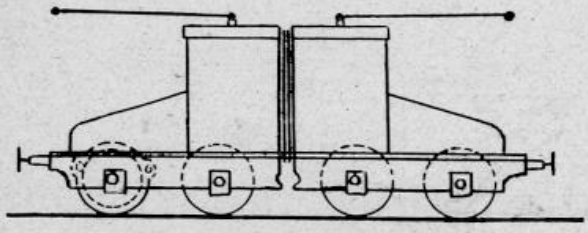


FIG. 282.

Locomotive triphasée à marchandises Ganz.
Valteline (1901) 46 t 600 chx.

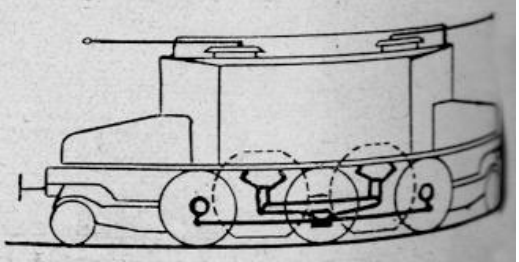


FIG. 283.

Valteline Ganz (1903). 64 t 900 chx.
Simplon Brown-Boveri (1906). 62 t 1150 chx.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

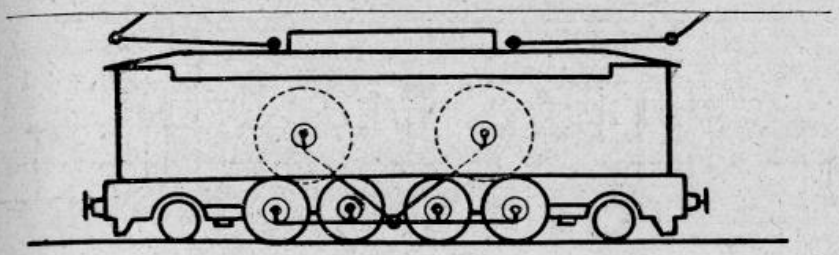


FIG. 283 *bis*.

Simp on Brown-Bover (1915). 86 t 2800 chx.

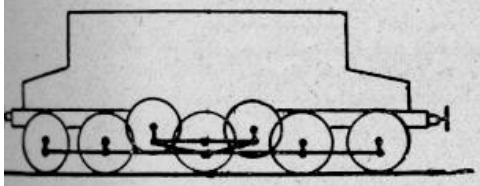


FIG. 284.

Giovi.
60 t 2000 chx. Westinghouse.

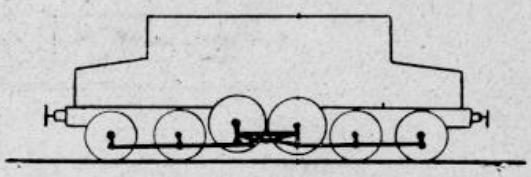


FIG. 285.

Tunnel du Simplon.
68 t 1700 chx. Brown-Boveri (1908).

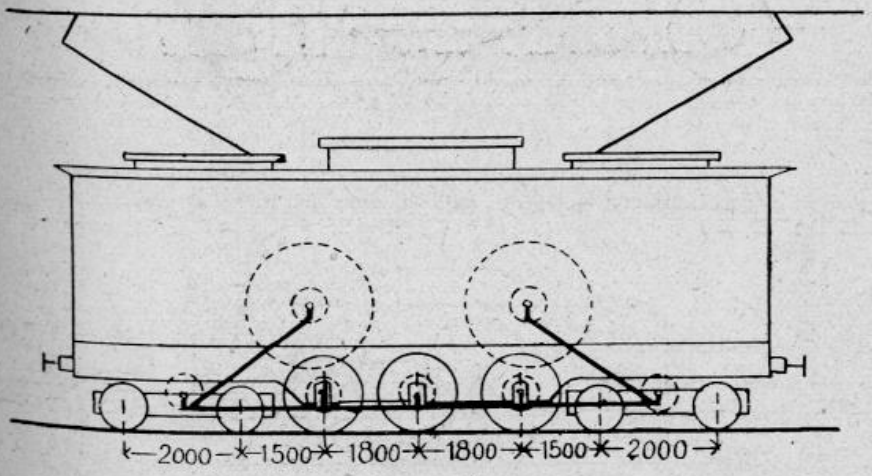


FIG. 286.

Locomotive Brown Boveri des chemins de fer de l'État italien. 92 t 2800 chx.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

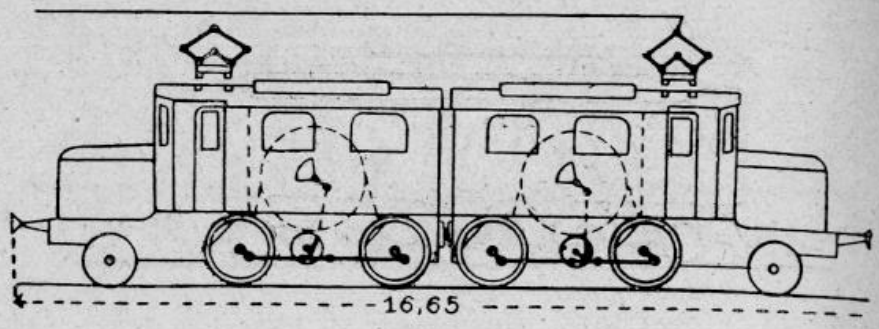


FIG. 287.

Loetschberg (Alpes Bernoises). 93 t 1600 chx. Type expérimental A. E G

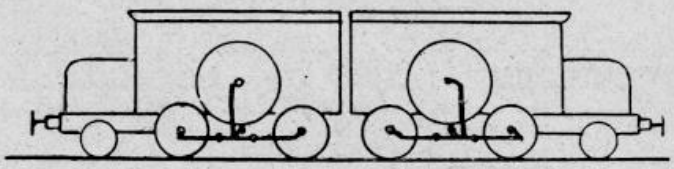


FIG. 288.

Loetschberg. 90 t 2000 chx. type expérimental Oerlikon.

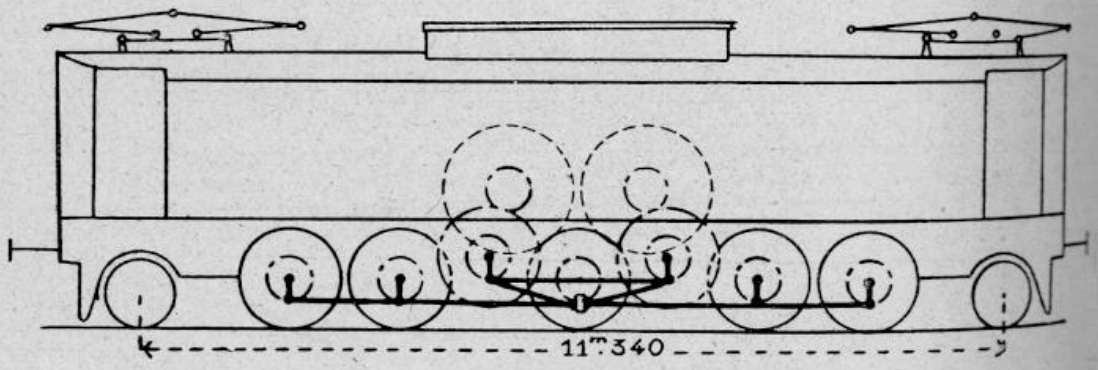


FIG. 289.

Loetschberg-Oerlikon, type en service. 107 t 2500 chx.

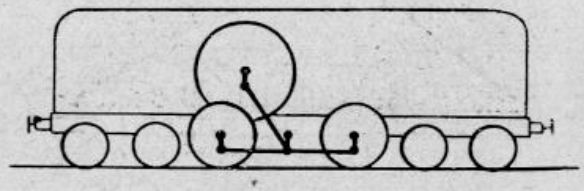


FIG. 290.

Etat suédois (voyageurs). 90 t 800 chx.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

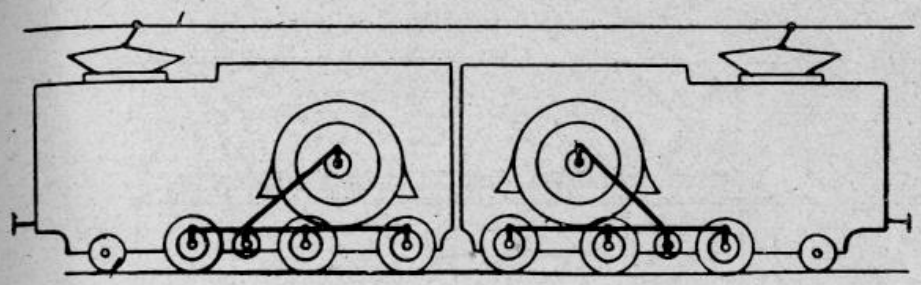


FIG. 291.

Etat suédois (marchandises). 136 t 1600 chx.

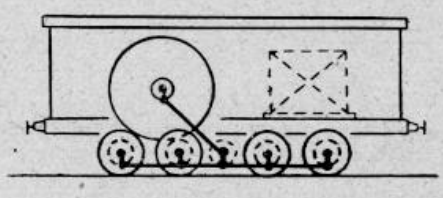


FIG. 292.

Etat prussien (marchandises).
Dessau-Bitterfeld A. E. G. 56 t 800 chx.

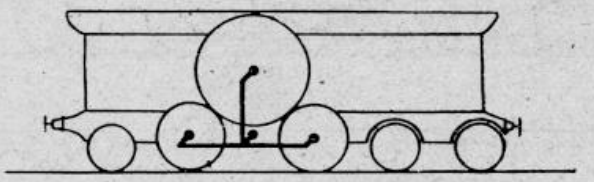


FIG. 293.

Etat prussien (voyageurs).
Dessau-Bitterfeld A. E. G. 60 t 1000 chx.

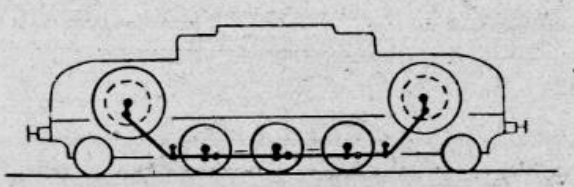


FIG. 294.

Etat badois (Wiesenthal).
Siemens-Schuckert. 70 t 950 chx.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

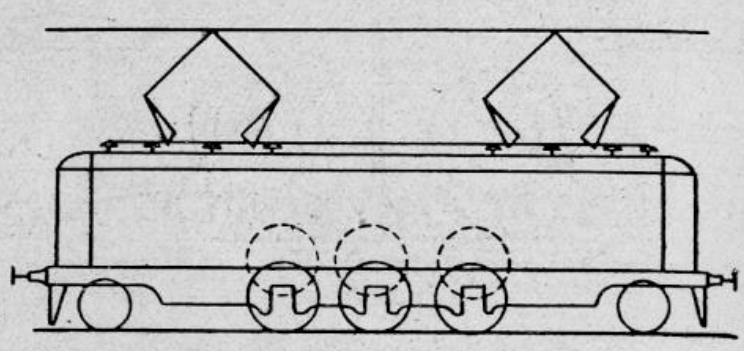


FIG. 295.

Locomotive 3401 (Ateliers du Nord et de l'Est-Jeumont). Midi 86 t 1500 chx.

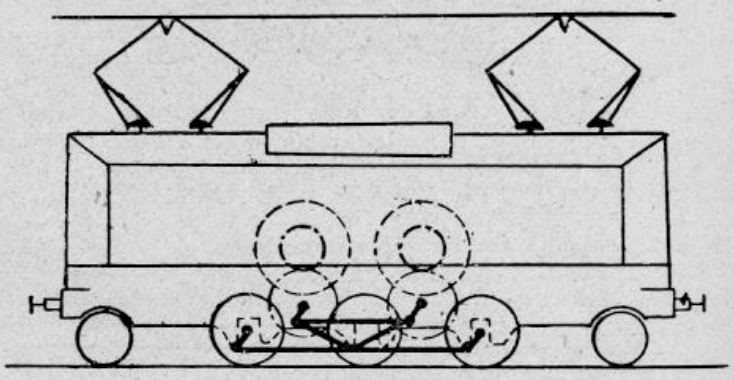


FIG. 296.

Locomotive 3201 (Westinghouse). Midi. 82 t 1400 chx.

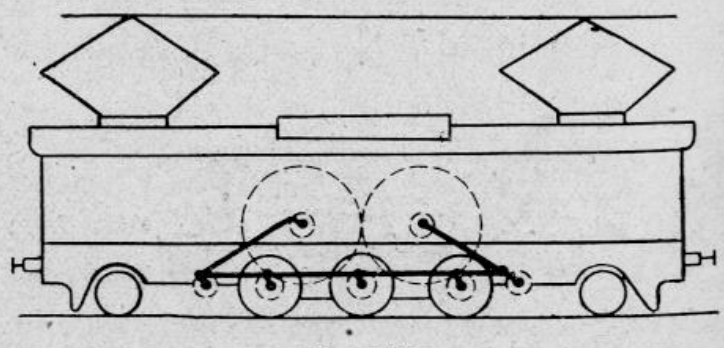


FIG. 297.

Locomotive 3001 (Thomson-Houston). Midi. 89 t 1500 chx

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Locomotives triphasées Valteline, Simplon, Giovi. — Pour les locomotives triphasées Ganz de la Valteline, qui sont du type 1-C-1 à trois essieux-moteurs compris entre deux essieux porteurs, le système de

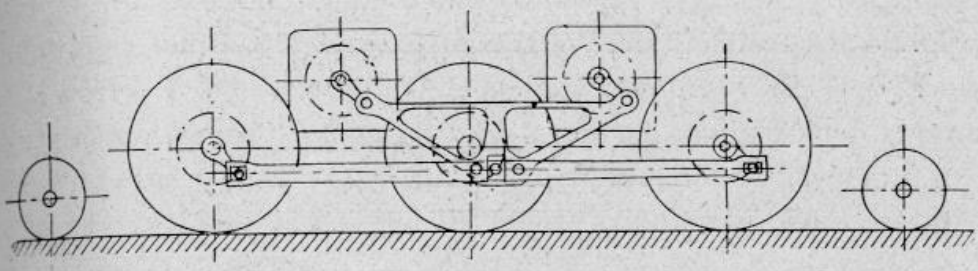


FIG. 298.

Valteline.

transmission comprend une bielle triangulaire, reliant les manivelles calées sur les arbres des moteurs au tourillon d'entraînement de l'essieu central et une bielle droite d'accouplement reliant les trois essieux-moteurs.

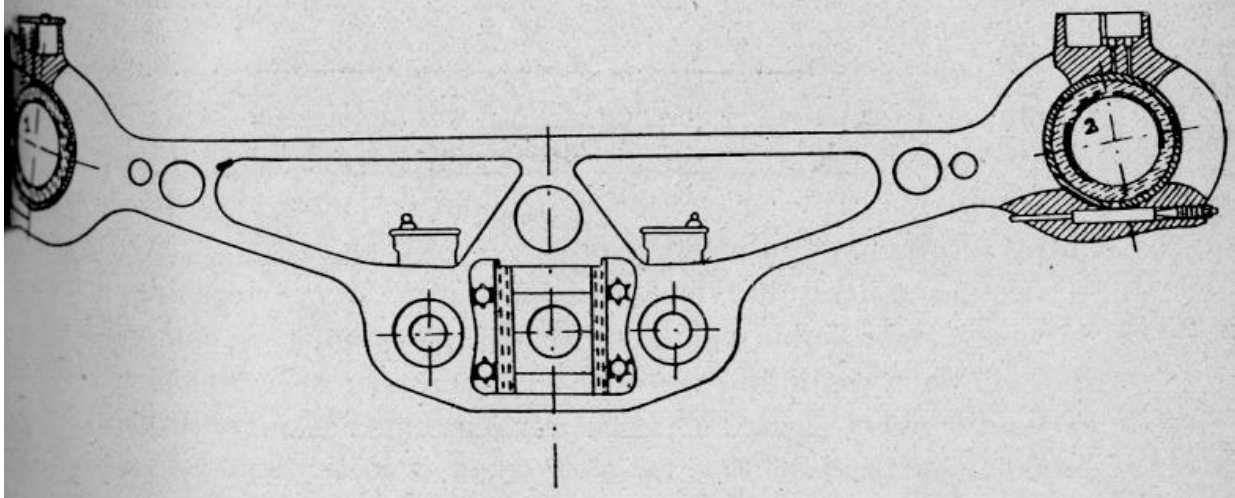


FIG. 299.

Bielle triangulaire. Locomotive Valteline et Giovi.

La figure 298 donne le schéma de cette transmission et la figure 299 (1) donne le détail de la bielle triangulaire. Remarquons à ce propos que le tourillon d'entraînement de l'essieu-moteur central doit

(1) Empruntée à la *Revue générale de l'Électricité* du 28 avril 1917.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

disposer d'un certain jeu vertical dans le palier correspondant de la bielle triangulaire, qui fait ainsi l'office de véritables glissières d'où le le nom de *mode de transmission par glissières verticales,* donné à ce système.

On voit sur la figure comment le jeu en question est obtenu.

Ce mode de transmission se retrouve sur les locomotives triphasées Brown-Boveri du *Simplon :* modèle 1906, du type 1-C-1 à trois essieux-moteurs et deux essieux porteurs, dont l'aspect est sensiblement le même que les précécentes, et modèle 1908 du type o-D-o, à adhérence totale avec quatre essieux-moteurs. Il se retrouve également sur les locomotives triphasées Westinghouse du type Giovi de l'État italien (lignes du Giovi 1910 et 1915, du Mont-Cenis 1913 et de Savone 1914), qui sont du type o-D-o, à cinq essieux-moteurs et adhérence totale.

Il y a lieu de noter que, comme conséquence du mode de transmission rigide reliant tous les essieux-moteurs et du grand empattement des deux derniers types de locomotives ci-dessus, il a fallu prendre des dispositions spéciales en vue de faciliter leur passage en courbe. A cet effet, pour les locomotives du Simplon 1908, les essieux extrêmes, un avant et un arrière, et pour celles du Giovi, les deux essieux extrêmes, deux avant et deux arrière, ont un jeu latéral d'environ 20 m.m. En outre, pour ces dernières, les roues de l'essieu central n'ont pas de boudin. Cette disposition permet à ces locomotives de franchir facilement des courbes de 300 mètres de rayon, et même de 150 mètres dans les aiguillages. Elle se retrouve avec des variantes appropriées sur les autres locomotives du même genre.

Ces locomotives du type Giovi sont tout à fait remarquables au point de vue de leur faible poids : 60 tonnes par rapport à leur puissance : 2000 chevaux, ce qui fait ressortir leur puissance spécifique à une valeur particulièrement élevée : 33,3 chevaux par tonne, ce qui est la plus grande actuellement réalisée.

Locomotives mono-triphasées Westinghouse du Norfolk et Western et du Pennsylvania. — Les locomotives du Norfolk et Western du type 2-8-8-2, sont constituées par deux unités identiques accouplées (Voir planche hors-texte), chaque unité comporte deux trucks principaux reliés par une cheville d'articulation, type Mallet, et un essieu porteur radial d'extrémité. Chaque truck est à deux essieux-moteurs et les roues d'un truck sont accouplées latéralement au moyen d'une bielle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'accouplement actionnée par la manivelle d'un faux essieu placé entre chaque paire de roues. Chaque faux essieu à manivelle est lui-même entraîné par deux moteurs au moyen d'engrenages. La figure 300 (1) montre comment est réalisée cette transmission.

On voit ainsi qu'il y a deux moteurs et un faux essieu par paire de roues, de sorte que la locomotive complète est à 8 moteurs et 8 essieux-moteurs.

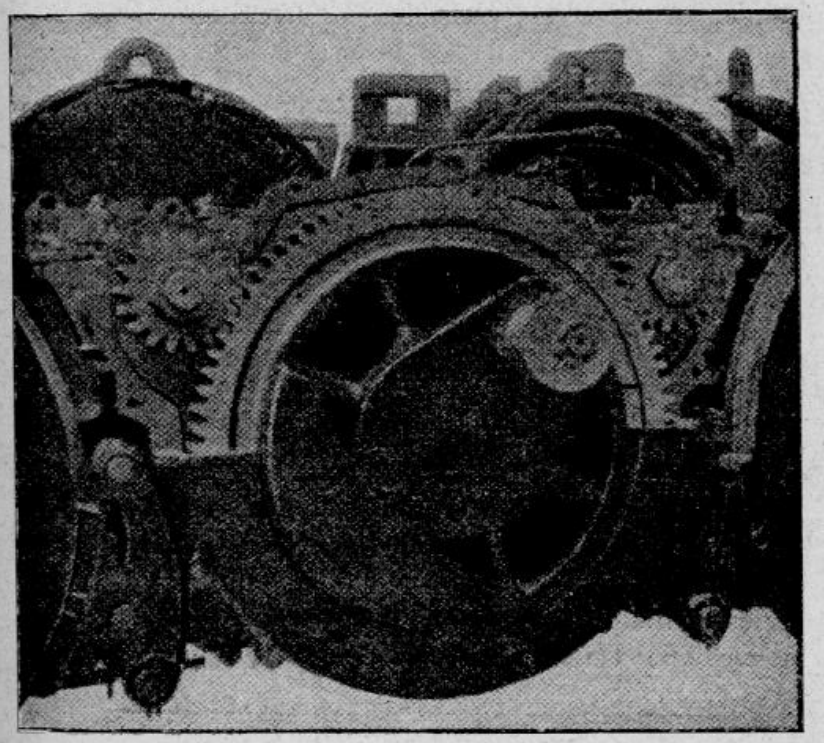


FIG. 300.

Moteurs engrenages et faux essieu de la locomotive du Norfolk and Western Railway.

Dans les locomotives du Pennsylvania qui sont du type 2-6-6-2 (Voir planche hors-texte), et qui comprennent également deux unités accouplées, chacune à trois essieux-moteurs et un essieu porteur, on retrouve un faux essieu attaqué par deux moteurs au moyen d'engrenages, mais ici il y a en plus, interposition de puissants ressorts pour réaliser une transmission élastique au faux essieu. En outre, chaque faux essieu est placé vers l'extrémité du truck correspondant et sa manivelle transmet

(1) Empruntée à la *Revue générale de l'Électricité* du 14 juillet 1917.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

son mouvement par bielles droites d'accouplement aux roues motrices des trois essieux-moteurs du dit truck.

Locomotive d'essai monophasée Westinghouse du Midi. — Dans cette locomotive du type 2-6-2 à trois essieux-moteurs et deux essieux porteurs (voir planche hors-texte), on retrouve le principe de la bielle triangulaire ou système des glissières verticales de la Valteline, mais il est en outre fait emploi d'engrenages et de faux essieux entre la bielle triangulaire et les moteurs, ainsi que le montre la figure 301.

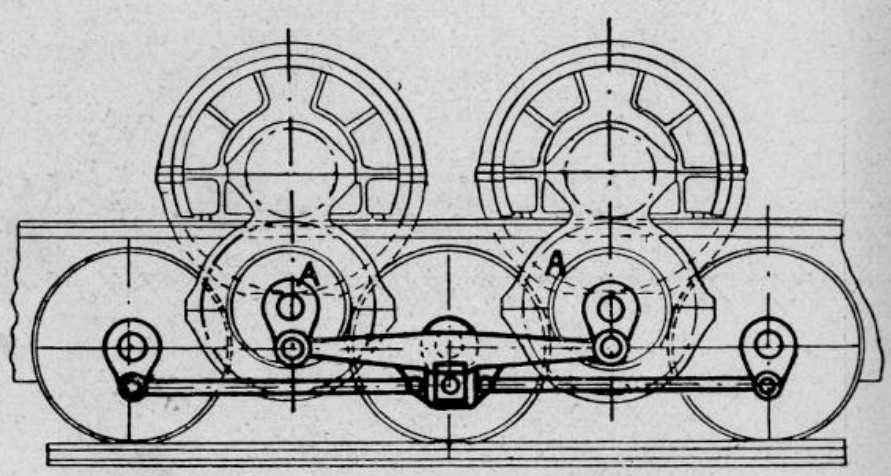


FIG. 301.

Locomotive d'essai Westinghouse du Midi.

Chacun des deux moteurs dont est équipée la locomotive, attaque par l'intermédiaire d'engrenages élastiques jumelés A (dont nous avons vu plus haut la constitution (fig. 240), un faux essieu dont les deux manivelles sont calées à 90°. Les deux faux essieux sont reliés par une bielle triangulaire qui transmet leur mouvement comme précédemment à l'essieu moteur central, lequel est relié aux deux autres par des bielles droites d'accouplement.

103. **Locomotives à moteurs très surélevés.** — Dans certaines locomotives comme celles monophasées du Midi (Thomson-Houston), de l'État badois (ligne de la Wiesenthal), de l'État suédois et celle à courant continu à grande vitesse du Pennsylvania-Terminus, on a surélevé d'une façon très marquée les moteurs en employant comme intermédiaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre les moteurs et les faux essieux, un système de bielles obliques. Les faux essieux sont montés rigidement sur le bâti au niveau des essieux auxquels ils transmettent leur mouvement par des bielles d'accouplement.

Le schéma ci-dessous (figure 302) se rapporte à la locomotive monophasée du Midi, Thomson-Houston, du type 2-6-2.

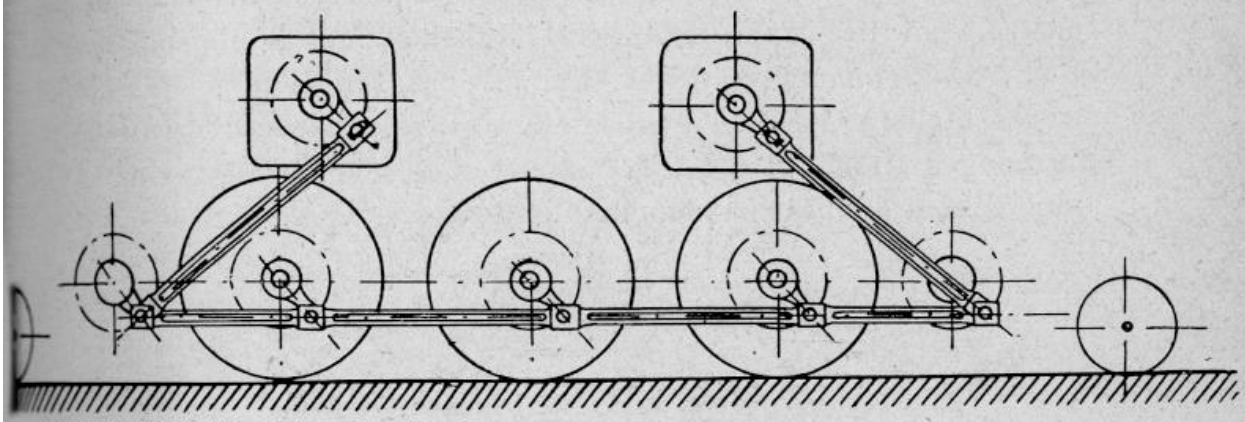


FIG. 302.

Locomotive d'essai Thomson-Houston du Midi.

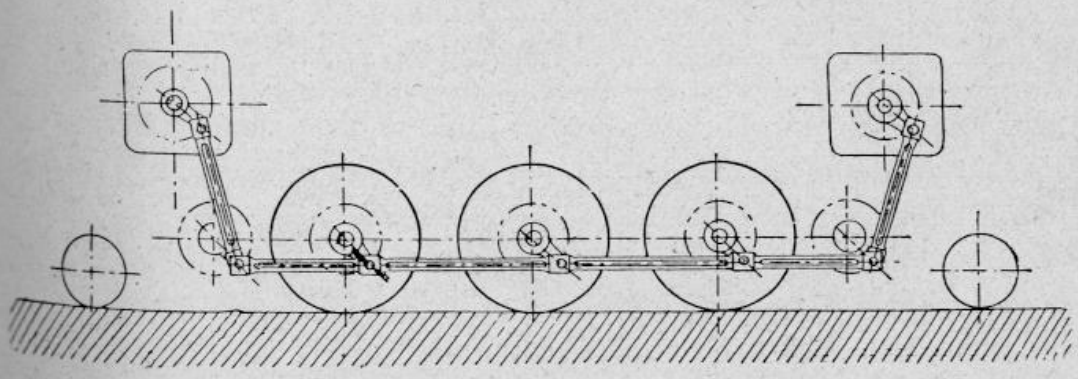


FIG. 303.

Locomotive Siemens-Schuckert de la Wiesenthal.

Dans les locomotives monophasées Siemens-Schuckert 2-6-2 de la Wiesenthal (État badois), les moteurs, au lieu d'être en dedans de l'empattement des roues motrices, sont en porte à faux, suivant le schéma ci-dessus (fig. 303).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les locomotives courant continu Westinghouse du Pennsylvania-Terminus, présentent une transmission analogue par bielles obliques, mais sont toutefois composées de deux unités accouplées suivant le schéma de la figure 304. Elles sont du type 4-4-4-4.

Locomotives monophasées du Loetschberg. — On retrouve encore sur ces locomotives, l'application des principes précédents avec l'emploi de faux essieux. Toutefois, il convient de remarquer que les deux machines construites à titre expérimental (1911-1912), étaient : celle construite par l'A. E. G. uniquement à bielles et manivelles, tandis que celle construite par les ateliers Oerlikon était à engrenages, bielles et manivelles, les engrenages attaquant les faux essieux. Les schémas de ces deux locomotives sont donnés sur planche hors texte.

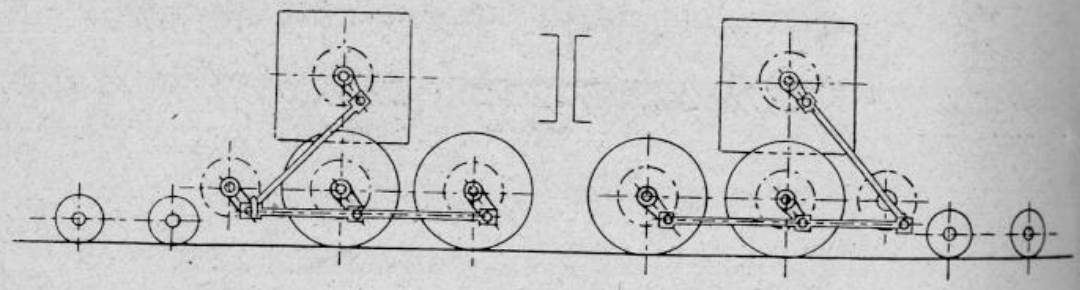


FIG. 304.

Locomotive Westinghouse courant continu du Pennsylvania-Terminus.

Le type définitif (1913) adopté, et qui est encore de construction Oerlikon, comporte le précédent, l'emploi d'engrenages, mais en diffère assez notablement cependant. Il est comme lui, à deux moteurs, mais du type 1-E-1 à 5 essieux moteurs, et 2 essieux porteurs, au lieu de 6 essieux moteurs avec adhérence totale.

Les cinq essieux-moteurs sont commandés par un système de bielles triangulaires et droites du genre de celles de la Valteline, mais la bielle triangulaire au lieu d'être actionnée directement par les moteurs, l'est par un système d'engrenages et de faux essieux. Comme dans les exemples précédents, les faux essieux sont montés rigidement sur le bâti et les moteurs reposent directement sur le châssis qui est suspendu élastiquement, ce qui présente une disposition avantageuse. Les engrenages sont à double chevron.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'ensemble de la transmission est représentée sur le schéma ci-dessous (fig. 305).

Cette disposition n'a toutefois pas donné satisfaction. Les bielles triangulaires sont des pièces qui entraînent des masses très lourdes auxquelles on imprime des mouvements alternatifs, et dans lesquelles se développent par suite des efforts considérables dus principalement à l'inertie des masses en jeu. Il en résulte une usure rapide des paliers qui ne tardent pas à prendre du jeu et des vibrations nuisibles à l'ensemble de la machine. C'est afin de remédier à cet inconvénient qu'on a, par la suite, adopté l'engrenage élastique que nous avons déjà décrit (fig. 238), engrenage dérivé du type Abt.

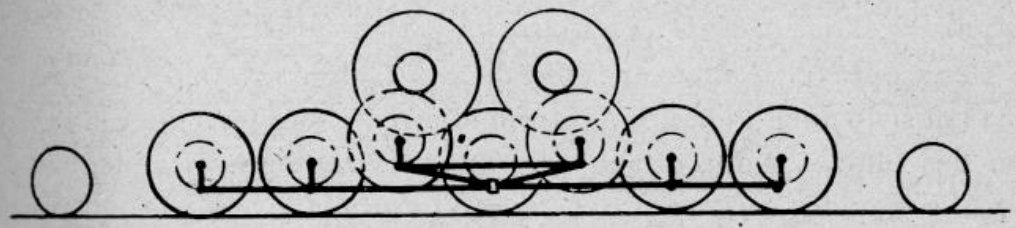


FIG. 305.

Loetschberg (Oerlikon).

Nous terminerons en indiquant les dispositions particulières prises en vue de faciliter le passage en courbe de ces locomotives. Chacun des deux essieux porteurs est accouplé en bogie à l'essieu moteur voisin, suivant le système Krauss-Winterthur, et il a un très grand jeu latéral ($40\ ^{m}/_{m}$). En outre, les pivots des bogies peuvent se déplacer de 78 millimètres de chaque côté de l'axe principal. L'essieu central comporte un jeu latéral de 25 millimètres. Enfin, les deux essieux moteurs intérieurs ne comportent pas de jeu latéral, mais coulissent verticalement dans des plaques de garde.

Ces dispositions permettent l'inscription de la locomotive dans des courbes de très faibles rayons, tel que 115 mètres comme dans les aiguillages.

104. Remarques générales sur les transmissions par bielles et manivelles. — L'augmentation de la puissance individuelle des moteurs a conduit naturellement, devant l'impossibilité où l'on était de les loger

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre les roues, à les installer au-dessus des trucks et finalement à s'inspirer des dispositions présentées par les locomotives à vapeur.

Les roues motrices furent alors accouplées entre elles et commandées par des moteurs de grande puissance, d'un poids considérable et à centre de gravité élevé, la transmission de l'effort moteur se faisant par l'intermédiaire de bielles et manivelles avec faux essieux. On est ainsi arrivé aux dispositions que l'on vient de voir.

Cependant, on n'a pas tardé à s'apercevoir que la commande par bielles produisait dans les locomotives électriques des effets assez inattendus que l'on n'avait jamais observés sur les locomotives à vapeur. Il se produisait des oscillations et des vibrations qui prenaient parfois des proportions inquiétantes, par l'effet de la grande masse des rotors, du changement périodique du sens de l'effort dans les bielles, du jeu dans les paliers et des défauts de gabarit.

Pour enrayer le mauvais effet de ces facteurs, le moyen le plus efficace consiste dans l'emploi d'intermédiaires élastiques pour la transmission des efforts. Mais, quand de puissants moteurs attaquent directement l'essieu des roues motrices sans l'intermédiaire d'engrenages, il est difficile d'obtenir une transmission élastique. Il existe bien des projets de bielles et de manivelles élastiques, mais tous ont un défaut théorique fondamental : ils permettent un déplacement relatif des bielles l'une par rapport à l'autre. Or, tout intermédiaire élastique intercalé dans un système de bielles et manivelles doit, en raison de la variation sinusoïdale des pressions dans les bielles, provoquer des oscillations, dont la fréquence pour les vitesses de marche ordinaires coïncide très probablement avec la fréquence de résonance. Pour pouvoir tourner la difficulté, il faudrait pouvoir se servir de ressorts très compressibles.

En fait, la pratique a montré que la plupart des locomotives de cette construction à bielles et manivelles ont donné lieu, à un degré plus ou moins prononcé et variable, à la production de vibrations plus ou moins intenses, préjudiciables à tous les organes et qui se traduisent en particulier par une usure anormale des articulations et par des ruptures fréquentes de bielles, manivelles et tourillons.

Ces vibrations sont d'ailleurs surtout intenses à certaines vitesses, tandis qu'à d'autres, elles peuvent n'être que très faibles et même à peine perceptibles.

On est ainsi arrivé à combiner avec le système à bielles et manivelles l'emploi d'engrenages et finalement d'engrenages élastiques, comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nous l'avons vu pour les locomotives du Loetschberg où les trois modes de construction ont été réalisés.

D'autre part, pour les locomotives monophasées, une autre cause de vibrations se manifeste par suite de la nature pulsatoire du couple. Si donc, dans de telles locomotives, il est fait, par exemple, emploi d'engrenages avec faux essieux, le couple utile au pignon devenant périodiquement négatif, les dents ont tendance à se décoller périodiquement pour reprendre ensuite contact avec choc. Il résulte de cela que les vibrations dont il s'agit doivent être attribuées au moins en grande partie à un phénomène de résonance entre le couple et l'élasticité du faux-essieu et plus généralement entre le couple et l'élasticité des organes de transmission.

En interposant des ressorts dans la transmission, ainsi qu'il a été fait au Loetschberg, on peut amortir ces vibrations en choisissant les ressorts convenablement en tenant compte de l'inertie des pièces soumises à leur action, et de manière à assurer un contact constant entre les dents des engrenages et à éviter toute résonance entre les oscillations propres des organes que ces engrenages commandent et le couple alternatif auquel ces organes sont soumis.

A ce propos, il faut remarquer encore que pour une même vitesse de locomotive, les moteurs avec système de transmission par emploi de faux-essieux doivent tourner plus vite que ceux sans faux-essieu ; il en résulte que l'énergie cinétique $\frac{1}{2} K\omega^2$ de leur rotor, et, plus généralement, l'énergie cinétique de l'ensemble des pièces ayant un mouvement de rotation, est plus grande dans le premier cas que dans le second. Le système à faux-essieu est, par suite, plus favorable à la production de vibrations. C'est ainsi que sur les locomotives des types Valteline, Simplon ou Giovi où les moteurs sont plus petits, mais tournent surtout moins vite (locomotives sans faux-essieu), il n'y a pas de vibrations. Il est vrai qu'en outre ces locomotives sont à moteurs triphasés qui sont à couple constant.

C'est l'ensemble de telles considérations, en particulier, qui ont contribué en Amérique à délaisser les systèmes à bielles et manivelles pour adopter, soit le système à engrenages élastiques seuls pour les locomotives du Milwaukee à huit moteurs de la General Electric, soit le système « Gearless » General Electric, par attaque directe, genre New-York Central pour les locomotives du Milwaukee à douze moteurs de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

General Electric, soit la méthode de l'arbre creux Westinghouse du New-York, New-Haven, combiné toutefois avec l'emploi d'engrenages élastiques et moteurs simples ou moteurs jumelés pour les trois autres types de locomotives du New-York, New-Haven, pour les locomotives du Milwaukee à 12 moteurs de la Westinghouse, et pour la locomotive d'essai du Midi des A. C. E. N. E. Toutefois, il résulte de cette construction un abaissement notable du centre de gravité de la machine, dont nous allons examiner l'effet.

En Europe, le système à bielles paraît toujours être en faveur. Ainsi les locomotives en construction du Saint-Gothard en comportent l'emploi.

105. Influence de la position du moteur sur la position du centre de gravité du véhicule, sur la stabilité de celui-ci et sur les efforts latéraux sur les voies. — Tel qu'il est monté dans la plupart des cas, le moteur de traction tend plutôt à abaisser le centre de gravité du système par rapport à ce qui se passe avec la locomotive à vapeur, puisque son centre de gravité propre est le plus généralement à peu près à la hauteur des essieux. Au contraire, dans la locomotive à vapeur, la chaudière fait monter beaucoup plus haut le centre de gravité propre de l'appareil moteur.

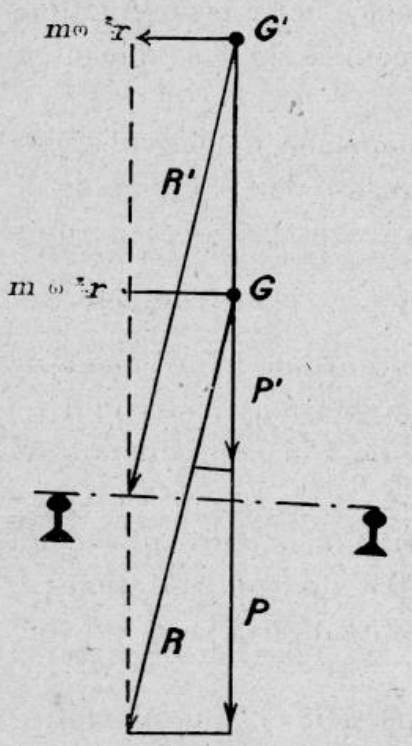


FIG. 306.

Le moteur électrique apporte ainsi un élément nouveau à la stabilité des véhicules automoteurs.

Beaucoup d'ingénieurs considèrent que l'élévation du centre de gravité de la partie suspendue de la locomotive à vapeur, bien loin d'être un élément désavantageux, facilite au contraire, dans une grande mesure, l'inscription dans les courbes, en augmentant la charge verticale sur le rail extérieur, dont la tendance au ripage se trouve par ce fait notablement diminuée.

Soient en effet, deux machines de même poids dont les centres de gravité sont G et G' (fig. 306), la résultante des effets de la pesanteur et de la force centrifuge passe plus près du rail extérieur pour la machine dont le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

centre de gravité est le plus élevé; le rail extérieur est donc, dans ce cas, plus chargé, d'où moindre tendance au ripage.

On peut alors se demander si, pour des machines à grande vitesse, il ne conviendrait pas de faire ce que les mécaniciens font en haussant de plus en plus l'axe de leur chaudière et si les moteurs électriques ne seraient pas mieux placés au point de vue de la stabilité des véhicules à une certaine hauteur au-dessus du plan des essieux. Il ne faut cependant pas perdre de vue, dans cette comparaison entre les deux sortes de machines, que le mouvement de lacet n'existe pas pour la locomotive électrique comme pour celle à vapeur. Seule la question du ripage dans les courbes, milite en faveur de l'élévation du centre de gravité.

Ce fait de l'abaissement du centre de gravité avec le montage le plus habituel des moteurs de traction, a été, d'après certains ingénieurs, la cause ou tout au moins une des causes principales des ripages qui se sont produits lors des essais à grande vitesse de Zossen (200 kilom./h), ripages qui ont conduit à renforcer dans une notable mesure la superstructure de la voie en ajoutant deux contre-rails continus. Il pourrait être aussi la cause de l'accident qui s'est produit en 1907, sur une ligne du New-York Central, par suite du déraillement en courbe d'une des locomotives du type de celles déjà citées (fig. 205) avec moteurs concentriques à l'essieu. Ce déraillement s'est produit avec ripage du rail extérieur, après cisaillage d'un certain nombre de crampons qui fixaient le rail aux traverses.

Pour compléter cet exposé, nous mentionnerons les essais faits par la Compagnie du Pennsylvania Railroad, en vue de déterminer les efforts latéraux auxquels sont soumis les rails, au moment du passage de locomotives lourdes de divers types et à diverses vitesses. A cet effet, les rails de roulement étaient montés dans des coussinets spéciaux pouvant se déplacer perpendiculairement à l'axe de la voie en venant appuyer ou frapper, suivant le cas, par l'intermédiaire d'une bille en acier dur, sur une butée fixe portant un témoin en acier doux. Si un choc latéral se produit sur le rail, la bille s'enfonce dans le plan d'épreuve et les dimensions de l'empreinte permettent de déterminer la valeur du choc. C'est en somme une application de la méthode de Brinnel sur des plans d'épreuve de dureté connue.

Avec les machines à vapeur qui ont leur centre de gravité très haut et dont les essieux sont répartis d'une façon dissymétrique, les chocs sont faibles et distribués d'une façon irrégulière le long de la voie, la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

valeur la plus forte correspond à peu près à une charge statique de 2400 kilogrammes.

Avec les locomotives électriques à centre de gravité bas, il n'en est plus de même, et l'on constate que non seulement les chocs sont beaucoup plus violents, mais qu'ils se produisent suivant un rythme déterminé, indiquant qu'on se trouve en présence d'un phénomène de résonance.

Avec une machine d'essai à attaque directe (sans engrenage), les chocs maxima correspondaient à une charge statique de 12.000 kilogrammes et avec des machines à engrenages, les chocs étaient encore dangereux et de l'ordre de 6 à 7.000 kilogrammes.

Ce sont ces résultats qui ont conduit la Compagnie du Pennsylvania à construire les locomotives dont nous avons précédemment parlé, type Pennsylvania-Terminus, à centre de gravité très élevé et se rapprochant le plus possible comme mode de commande des locomotives à vapeur du type "American". Avec ces locomotives, la tendance aux mouvements périodiques se manifeste encore, mais la valeur du choc maximum ne dépasse qu'exceptionnellement 5.000 kilogrammes.

En somme, nous voyons par toute cette étude que l'on se trouve en présence de quatre systèmes principaux de transmission du couple moteur: couplage direct, engrenages élastiques seuls, arbre creux (avec ou sans engrenages élastiques), enfin bielles et manivelles (avec ou sans engrenages élastiques), systèmes d'ailleurs radicalement différents. L'expérience acquise sur les grande lignes avec des locomotives puissantes et à grande vitesse n'est pas encore suffisante pour qu'on puisse faire un choix *a priori* et définitif. Toutefois, celle acquise en Amérique avec les trois premiers (New-York Central, Milwaukee, New-York. New-Haven) semble maintenant en avoir consacré l'emploi et les deux premiers surtout paraissent particulièrement satisfaisants en ce qui concerne les frais d'entretien.

106. **Phénomènes d'oscillation des locomotives électriques** (1). — Nous terminerons cet examen des différents modes de transmission de l'effort moteur dans les locomotives en reproduisant les conclusions auxquelles

(1) Voir pour plus de détails, la *Revue générale de l'Électricité* du 14 décembre 1918 « Oscillations des locomotives électriques », par M. LEBOUCHER.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est arrivé M. Leboucher, ingénieur de la marine, ingénieur principal à la Compagnie des Chemins de fer du Midi, comme résultat d'une étude comparative des différents types de locomotives présentés à cette Compagnie par divers constructeurs (1).

Ces conclusions sont les suivantes :

Les locomotives électriques peuvent prendre, du fait du mécanisme :

1° Un mouvement d'oscillation autour d'un axe parallèle à l'axe longitudinal (roulis) ;

2° Un mouvement d'oscillation autour d'un axe parallèle à l'axe transversal (galop ou tangage) ;

3° Un mouvement d'oscillation de translation verticale ;

4° Un mouvement d'oscillation autour d'un axe vertical (lacet) ;

5° Un mouvement de flexion longitudinale et de déformation verticale interne du châssis (mouvement de soufflet).

Les locomotives à bielles doivent avoir tous ces mouvements au fur et à mesure que la vitesse augmente et on doit les observer les uns après les autres, généralement dans l'ordre, 1, 2, 3, 4, 5.

Les locomotives à bielles et glissières verticales ne sont sensibles qu'au lacet et au galop, mais ce dernier mouvement peut prendre une valeur considérable si la transmission se fait directement des moteurs surélevés à l'essieu (ce qui toutefois n'est pas le cas de la locomotive Westinghouse qui comprend des faux-essieux).

Enfin, les locomotives à engrenages n'éprouvent aucun de ces mouvements d'oscillation. Elles se comportent comme un véhicule ordinaire.

L'emploi des engrenages sans bielle aucune a pour avantage de supprimer les mouvements d'oscillations des locomotives. Il supprime les avaries des bielles et simplifie le graissage. Il semble donc que ce soit la solution de l'avenir pour les trains rapides. Pour les trains lents, on peut concevoir le montage de l'induit sur l'essieu en ménageant dans les entrefers des inducteurs un jeu suffisant. Le rendement électrique des moteurs est moins bon, par contre le rendement mécanique est meilleur.

(1) Six machines ont été présentées à la Compagnie du Midi, respectivement par la Compagnie Thomson-Houston, la Société Westinghouse, les Ateliers de Constructions électriques du Nord et de l'Est, Brown-Boveri, Schneider et l'A. E. G. Les trois présentées par les trois premières maisons, ont seules été acceptées et nous rappelons qu'elles sont respectivement du type à bielles, du type à bielles et glissières verticales et du type à arbre creux et engrenages.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

107. Transmissions diverses. — Nous rappellerons seulement pour mémoire la tentative d'emploi de la chaîne Galle, de la courroie et du cable d'acier sans fin, faites dès l'origine de la traction électrique et qui permettaient l'emploi de moteurs suspendus élastiquement, l'organe transmetteur présentant toute l'élasticité voulue.

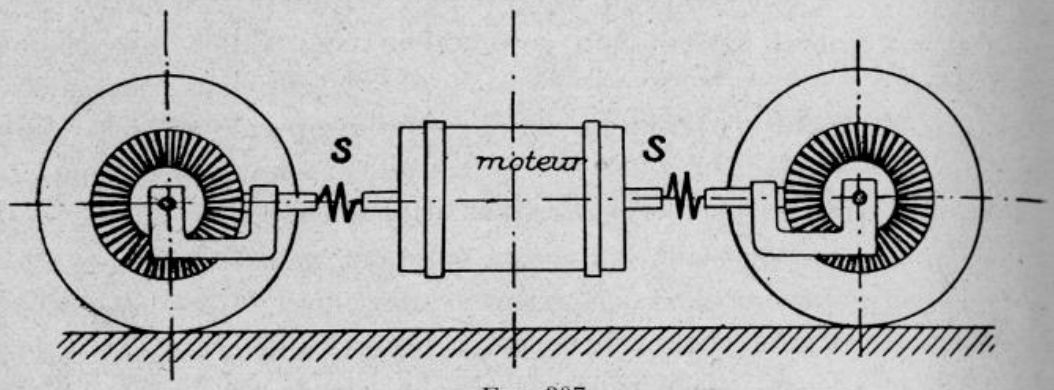


FIG. 307.

Sperry.

Nous ne ferons que mentionner (1) aussi, le mode de transmission par vis sans fin, qui paraît complètement abandonnée, après avoir fait l'objet de quelques applications aux tramways de Marseille, par les ateliers Oerlikon et aux tramways de Gênes, par MM. Siemens et Halske.



FIG. 308.

Accouplement élastique de Sperry. Schéma de l'intérieur.

Nous n'examinerons avec quelques détails que la transmission par engrenages coniques, en raison de l'application qui en a été faite en 1901, au chemin de fer du Fayet à Chamonix de la Compagnie du P.-L.-M.

108. Transmission par engrenages coniques. — Ce mode de transmisssion a été appliqué à diverses reprises en Amérique, soit avec double réduction dans le système Bentley, Knight et Rae (1886-1888), soit ensuite avec simple réduction dans le système Sperry.

(1) Nous renvoyons le lecteur pour les détails concernant ce mode de transmission à l'ouvrage déjà cité de MM. BLONDEL et DUBOIS, tome I.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le but essentiel de Sperry était d'actionner les deux essieux par un seul moteur. La disposition adoptée est celle de la figure 307. Le moteur

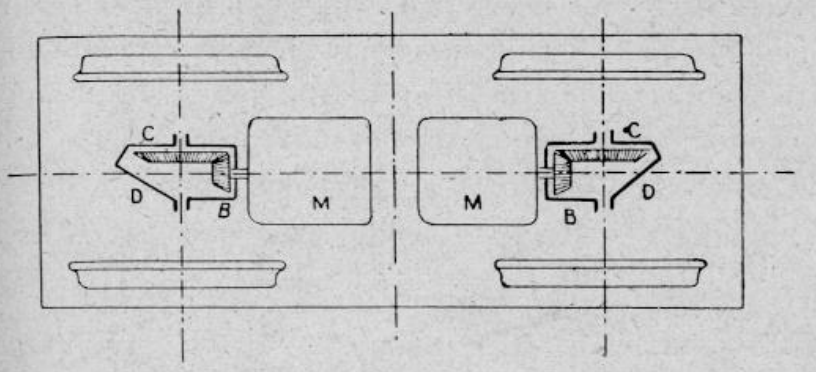


FIG. 309.

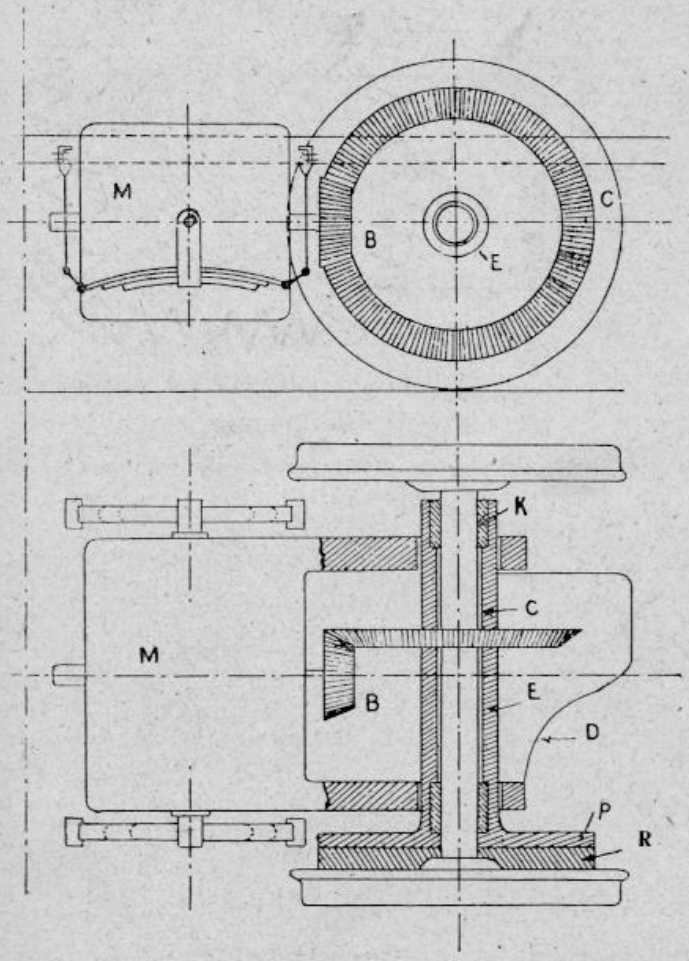


FIG. 310.

Schémas du montage des moteurs des automotrices du Fayet à Chamonix.

est complètement suspendu, étant fixé au truck, tandis que les pignons sont munis de petits arbres maintenus parfaitement alignés par des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

paliers solidaires des essieux. L'axe du moteur dans sa position normale coïncide avec les axes des précédents. Mais il peut subir de petits déplacements verticaux. Pour permettre ceux-ci, il suffit de réunir les arbres par des accouplements élastiques formés, par exemple, de deux plateaux en forme de disques reliés par des ressorts. Sur le croquis précédent, on a figuré une disposition équivalente au moyen de ressorts spiraux S.

La figure 308 montre le principe de l'accouplement Sperry avec axes excentrés. L'appareil comprend deux roues dentées agissant l'une sur l'autre par l'intermédiaire de boules en caoutchouc. Sa marche est très douce et régulière.

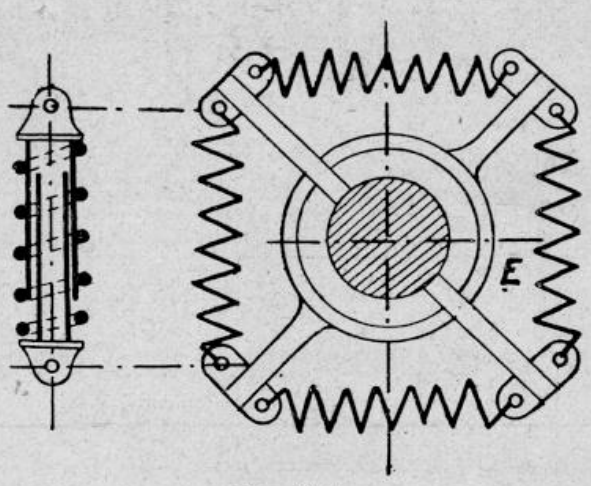


FIG. 311.

Entraînement élastique (Fayet, Chamonix).

Engrenages coniques des automotrices du Fayet à Chamonix. — Cette ligne présente un parcours très accidenté avec des rampes de 8 et même 9 p. 100, sur lesquelles il s'agissait de pouvoir démarrer et remorquer des trains de sept voitures pesant au total environ 150 tonnes. L'établissement des moteurs présentait d'assez grandes difficultés. En premier lieu, ils devaient être d'une puissance considérable (ils sont susceptibles de développer une puissance de 65 chevaux pendant *deux heures consécutives* sous 550 volts avec un échauffement d'au plus 60°) et en second lieu, ils devaient pouvoir être logés dans des trucks pour voie de 1 mètre. C'est dans ces conditions que la Société Alioth a été conduite à adopter la transmission par engrenages coniques. La réduction donnée est de un quart.

La disposition réalisée est représentée sur les figures 309 et 310.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

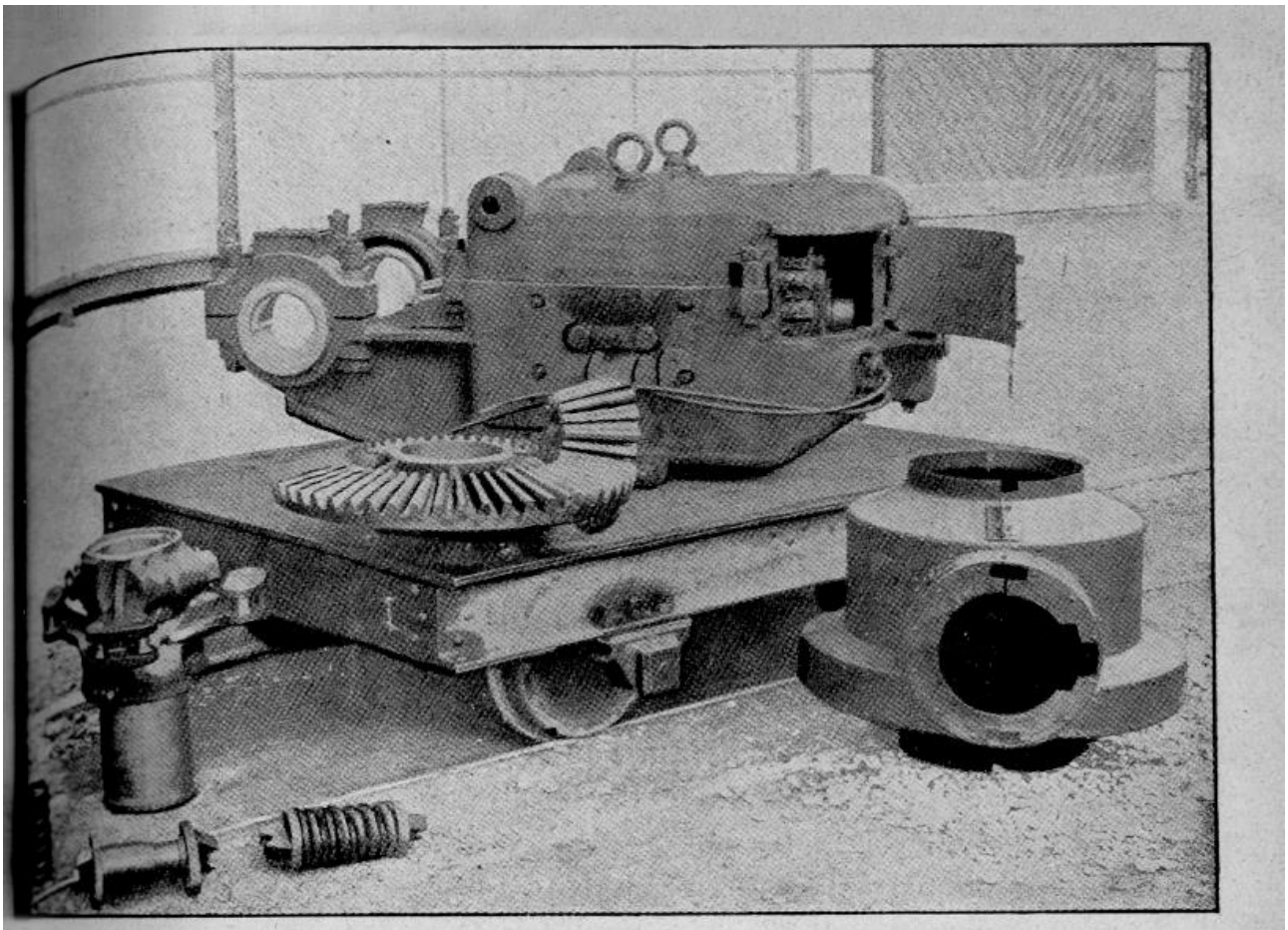


FIG. 312.

Moteur démonté — pignon et roue conique — manchon élastique — carter.

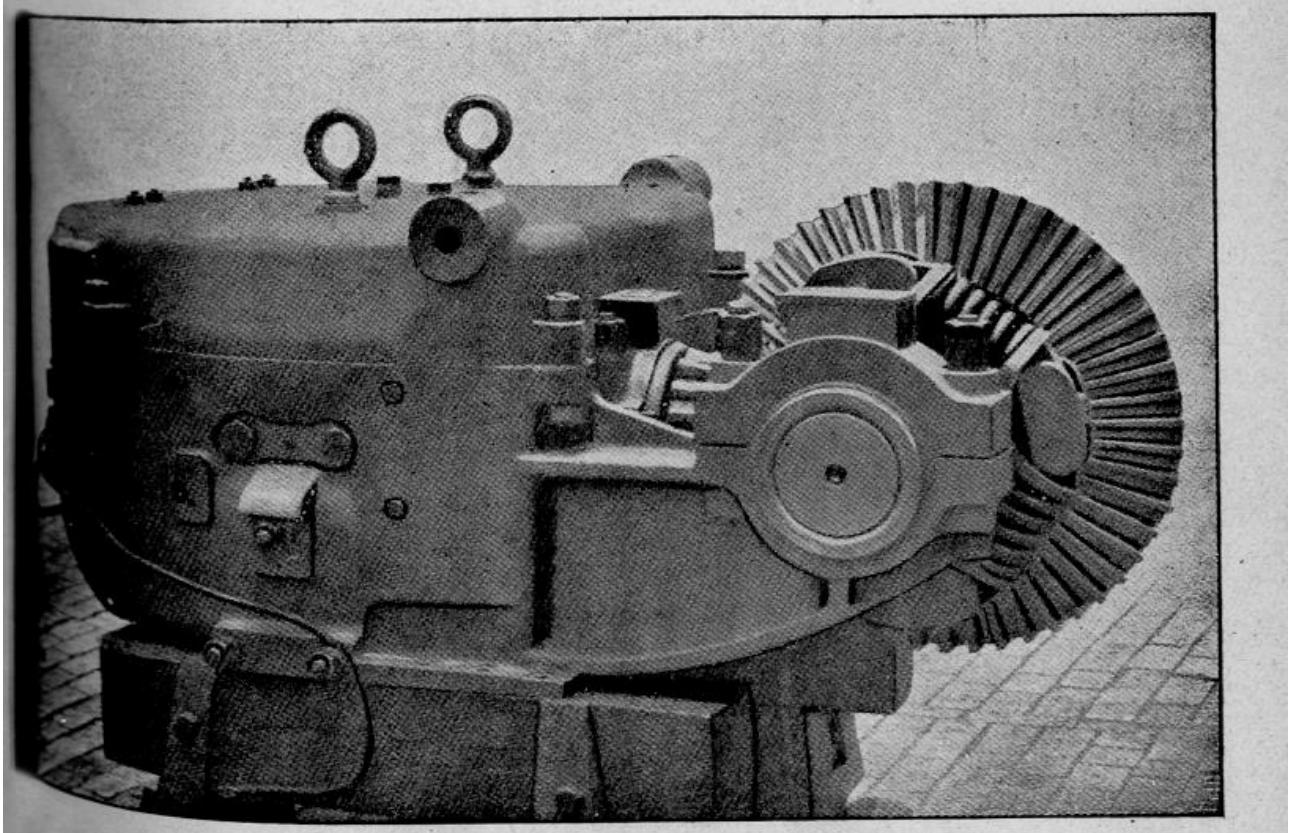


FIG. 313.

Vue d'ensemble du moteur, Type G T M 55 -
Moteur Alioth des automotrices du Fayet à Chamonix.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les moteurs M — deux par truck — placés perpendiculairement aux essieux, transmettent leur mouvement par l'intermédiaire de pignons B et de roues coniques C, lesquelles entraînent les essieux au moyen de liens élastiques.

Les engrenages B et C sont enfermés dans un carter D contenant un lubrifiant.

La roue dentée C est calée sur un manchon E concentrique à l'essieu, mais il n'existe pas de jeu entre le manchon et l'essieu, le manchon reposant sur l'essieu par des coussinets K. L'entraînement se fait par deux sortes de plateaux P avec entraînement élastique R des roues. A cet effet, chacun des deux plateaux porte deux bras en croix, dont les extrémités sont reliées par des ressorts d'entraînement (fig. 311). On voit que les ressorts ne travaillent qu'à la compression.

Quant à la suspension des moteurs, les figures précédentes montrent comment elle est réalisée.

Les photographies (fig. 312 et 313) représentent un moteur séparé avec ses engrenages.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



CHAPITRE XII

FREINAGE DES VOITURES ÉLECTRIQUES

SOMMAIRE. — Considérations générales. — Modes d'action des freins.

I. Absorption de l'énergie par frottement.

A. Étude théorique du freinage.

Parcours minima pour l'arrêt d'une automotrice seule, d'une voiture motrice attelée d'une remorque. — Pression totale sur les sabots pour un bon freinage dans les conditions ordinaires. — Sablières.

B. Différents systèmes de freins utilisant les effets de frottement.

Freins exclusivement mécaniques.

Freins à air comprimé. — Production de l'air comprimé. — Equipement de freins à air comprimé par groupe moteur-compresseur électrique : freins à air comprimé direct, systèmes automatiques. — Pressions ordinaires pour le fonctionnement des freins. — Régulateurs électro-pneumatiques. — Détermination de la puissance d'un compresseur. — Consommation d'air pour le freinage.

Freins électro-magnétiques. — Frein à plateau sur essieu de la General Electric. — Freins modernes à patins sur rails. — Excitation des freins. — Freins à patins sur rails pour voitures de remorque. — Application des freins électro-magnétiques à patins sur rails. — Calcul de la distance parcourue jusqu'à l'arrêt par une voiture. — Avantages des freins électro-magnétiques.

II. Freinage électrique par les moteurs.

A. Courant continu.

Freinage par inversion de marche. — Freinage électrique par fonctionnement des moteurs en générateurs débitant sur résistances. — Contrôleurs à freinage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrique. — Théorie du freinage électrique par fonctionnement des moteurs en générateurs. — Résistances de freinage. — Caractéristiques du fonctionnement d'une voiture en freinage électrique sur une pente donnée. — Calcul des résistances de freinage, la vitesse devant rester dans des limites données. — Freinage par mise des moteurs en court-circuit franc. — Freinage par récupération. — Fonctionnement en récupération des locomotives du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul.

B. Courant alternatif monophasé.

Freinage par inversion de marche. — Freinage par fonctionnement des moteurs en générateurs : sur résistances, par mise des moteurs en court-circuit, par récupération. — Nouveau procédé de freinage par récupération (Oerlikon).

C. Courants alternatifs triphasés.

Freinage par inversion de marche. — Freinage par fonctionnement des moteurs en générateurs asynchrones. — Diagramme du fonctionnement en récupération. — Caractéristiques du fonctionnement en freinage électrique sur une pente donnée. — Rendement de la récupération aux moteurs. — Applications du fonctionnement en récupération. — Freinage par fonctionnement en générateur synchrone sur résistances.

D. Remarques générales sur le freinage électrique.

Nature du freinage par récupération. — Rendement de la récupération en fonction de la pente. — Avantages du freinage électrique par récupération ou sur résistances.

109. Considérations générales. — Le freinage consiste à absorber la force vive d'un véhicule de façon à faire passer celui-ci de sa vitesse actuelle à une vitesse inférieure pouvant être nulle. Il est donc aussi employé pour prévenir l'emballement des véhicules dû à l'effet de la pesanteur dans le cas de descentes sur une pente rapide.

Aux débuts de la traction électrique, on se contentait, pour le freinage des voitures, du frein à sabot manœuvrable à la main, tel qu'il était déjà en usage sur beaucoup de voitures à traction animale. C'est encore celui qui est le plus souvent adopté, avec quelques perfectionnements de détail, pour le service des voitures à trucks rigides dont le poids ne dépasse pas une dizaine de tonnes, lorsqu'elles circulent sur des lignes peu accidentées. Il est toutefois complété avantageusement par le freinage *électrique d'urgence, obtenu par la mise en court-circuit des moteurs*, et qui n'exige avec les contrôleurs prévus à cet effet qu'une manœuvre très simple.

Le développement pris par les tramways électriques a conduit dans beaucoup de cas à l'adoption de voitures plus vastes, capables de rece-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voir un plus grand nombre de voyageurs, et le poids de chacun des véhicules s'est ainsi trouvé considérablement accru. En même temps, on a cherché à diminuer autant que possible la durée de chaque parcours, non seulement en augmentant la vitesse, mais aussi en réduisant le temps nécessaire pour obtenir l'arrêt de la voiture. Il devenait alors indispensable de disposer d'un moyen de freinage à la fois puissant et facile à mettre en action. Et comme le frein à main n'était plus considéré que comme un frein de secours, le nouveau mode de freinage devait permettre non seulement les arrêts rapides, mais aussi les ralentissements sans à-coups, c'est-à-dire qu'il devait être modérable, permettant d'exercer à volonté des efforts gradués.

Une excellente solution de ce problème est offerte par le *freinage électrique continu et réglable sur résistances*, que nous étudierons plus loin et qui est obtenu d'une façon sûre et commode par l'emploi de contrôleurs appropriés. Il convient particulièrement bien aux voitures légères ou de poids moyen parcourant des lignes accidentées. On y adjoint quelquefois des *freins électro-magnétiques* qui permettent d'obtenir un freinage puissant agissant directement sur les rails dans le cas des freins modernes. Cette solution présente sur toutes les autres l'avantage de réduire au minimum les risques de patinage sur les fortes déclivités.

Mais pour les voitures lourdes et les trains composés de plus de deux voitures, il est préférable de disposer d'un mode de freinage tout à fait indépendant de l'équipement moteur. Les *freins à air comprimé* sont ceux qui conviennent le mieux, et les constructeurs ont été ainsi amenés à construire des appareils de compression d'air spécialement étudiés en vue de leur application à la traction électrique, appareils que nous examinerons plus loin.

L'air comprimé est d'un emploi très sûr et très pratique, aussi l'emploie-t-on de plus en plus, aussi bien pour les tramways que pour les chemins de fer; le mode de freinage peut d'ailleurs être avantageusement combiné sur des lignes accidentées avec le freinage électrique et le freinage électro-magnétique.

Notons, comme mémoire, les freins à vide d'un emploi de plus en plus rare en traction électrique.

110. **Modes d'action des freins.** — D'après ce qui précède, on voit qu'il y a deux manières d'absorber la force vive d'un véhicule en vue de réaliser un freinage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A. *En transformant en chaleur l'énergie à absorber en utilisant les effets de frottement* au moyen de sabots ou de pièces frottantes quelconques (bandes, etc.....) que l'on serre au moyen d'un mécanisme approprié entièrement mécanique ou par utilisation de l'air comprimé comme source d'énergie ou encore par l'emploi d'électro-aimants.

B. *En faisant fonctionner les moteurs en générateurs et envoyant le courant ainsi produit dans des résistances ou dans la ligne.* — Ce fonctionnement est réglé par le contrôleur qui porte à cet effet des touches spéciales.

I. Absorption de l'énergie par frottement.

A. Etude théorique du freinage.

111. **Parcours minima pour l'arrêt d'une voiture automotrice.** — Supposons que, pendant l'action des freins, il n'y ait *aucun patinage* des roues sur les rails. L'effet du frottement des sabots, patins, cordes, etc... est alors toujours équivalent à un effort de frottement retardateur F appliqué sur le rail. S'il s'agit, par exemple, d'un frein à sabots agissant sur un tambour de diamètre d calé sur l'essieu avec une pression totale p par essieu, f_1 étant le cœfficient de frottement des sabots sur le tambour, l'effort F reporté à la jante des roues de diamètre D pour l'ensemble des deux essieux est tel que :

$$FD = 2df_1p. \qquad (1)$$

Soient :

P le poids total de la voiture;

P′ son poids d'inertie tenant compte de l'effet des masses animées d'un mouvement de rotation (essieux, roues, armatures, engrenages).

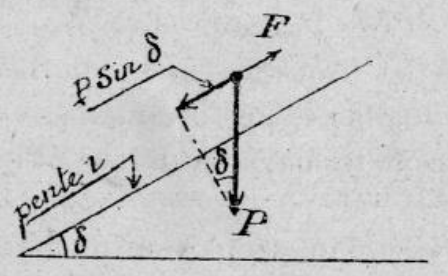


Fig. 314.

δ, l'angle d'inclinaison (fig. 314) du profil en long sur une pente i où se fait le freinage ;

x l'espace parcouru jusqu'à un instant t compté depuis la mise en action des freins;

v la vitesse de la voiture en mètres par seconde à cet instant;

v_0 la vitesse initiale en m./sec. au moment du commencement du freinage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous supposons que, suivant l'usage, tous les essieux sont freinés à la fois pour utiliser l'adhérence totale. Tout se passe donc comme s'il n'y avait qu'un seul essieu supportant le poids total de la voiture.

L'équation des quantités de mouvement appliquée à la masse de la voiture donne l'équation :

$$\frac{P'}{g}\,dv = (P \sin \delta - F)dt.$$

Nous admettons que F soit constant et égal à la valeur moyenne des valeurs qu'il prend pendant le freinage.

En intégrant l'équation précédente, on obtient :

$$\frac{P'}{g}(v - v_0) = (P \sin \delta - F)t,$$

d'où :

$$v - v_0 = g\,\frac{P}{P'}\left(\sin \delta - \frac{F}{P}\right)t,$$

et approximativement en remplaçant sin δ par $tg\delta = i$ (l'angle δ est suffisamment petit pour justifier cette approximation) :

$$v - v_0 = g\frac{P}{P'}\left(i - \frac{F}{P}\right)t.$$

L'espace x parcouru depuis la mise en action des freins est :

$$x = \int_0^t v\,dt,$$

c'est-à-dire en éliminant "t" entre ces deux équations :

$$x = \frac{1}{g\frac{P}{P'}\left(i - \frac{F}{P}\right)} \cdot \int_{v_0}^{v} v.dv = \frac{P'}{P} \cdot \frac{{v_0}^2 - v^2}{2g\left(\frac{F}{P} - i\right)}$$

L'arrêt se produit donc au bout d'un parcours X tel que $v = 0$, c'est-à-dire :

(2)
$$X = \frac{P'}{P} \cdot \frac{{v_0}^2}{2g\left(\frac{F}{P} - i\right)}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soit par exemple, une voiture de 10 tonnes avec $\frac{P'}{P} = 1{,}10$. On demande sur quelle distance elle s'arrêtera avec un effort de freinage correspondant à un coefficient de frottement $\frac{F}{P} = 0{,}14$ des roues sur les rails, sur une pente de 5 p. 100 ($i = 0{,}05$), la vitesse v_0 au moment de l'application des freins étant de 20 km/h.

On a :

$$X = 1{,}10 \frac{\left(\frac{20}{3{,}6}\right)^2}{2 \times 9{,}81\,(0{,}14 - 0{,}05)} = 19^{m},20 \text{ environ.}$$

La formule (2) montre que l'arrêt sera, ce qui est bien évident, d'autant plus rapide que P et v_0 seront plus petits et que l'effort F sera plus grand. Mais cet effort F est limité par des conditions indépendantes de la puissance dont dispose le mécanicien, comme nous allons le voir.

En effet, s'il s'agit d'un frein à patin donnant sur le rail un coefficient de frottement f on a nécessairement, P_1 étant la pression totale verticale exercée sur le rail (P_1 est égal ou non à P) :

$$F = P_1 f.$$

S'il s'agit de freins à sabots ou à corde, il y a un nouveau phénomène qui intervient : celui de l'*adhérence* sur la voie et le maximum qu'on puisse réaliser pour F, c'est-à-dire pour obtenir la distance d'arrêt minima, est l'*effort adhérent* Pa, produit du poids P supporté par les roues motrices ou *poids adhérent* (1) par le coefficient d'adhérence de la voie " a ". Si on exerce un effort de freinage plus grand, les roues se bloquent et alors l'effort retardateur F exercé sur le rail devient indépendant de l'effort exercé sur les sabots : il devient égal au produit Pf, f désignant le coefficient de *frottement de glissement* des roues sur les rails dans les conditions de vitesse de la voiture. Or, ce coefficient est toujours plus petit que le coefficient d'adhérence " a ", et d'autant plus petit que la vitesse est plus grande.

(1) Nous supposons ici que tous les essieux sont moteurs, auquel cas le poids adhérent est égal au poids total ; si tous les essieux n'étaient pas moteurs, il en serait seulement une fraction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il résulte de ceci, ce fait très important et essentiel :

Une voiture s'arrête beaucoup plus lentement si on bloque les roues (effort retardateur Pf) que si on exerce un effort immédiatement inférieur ou au plus égal, à la limite, à l'effort adhérent (effort retardateur Pa et l'on a : $f < a$) ; autrement dit : les freins devront être serrés de façon que les roues continuent à tourner, tout en réalisant à leur jante un effort presque égal à l'adhérence du véhicule.

Les circonstances qui se produisent pendant un freinage sont ainsi les suivantes :

Tant que l'effort de freinage — effort total exercé sur les sabots — est plus petit que l'effort adhérent Pa, les roues tournent et l'effort retardateur tangentiel au niveau des rails F, est

$$F = Pf' < Pa \qquad (f' < a),$$

f' étant le coefficient *de frottement de roulement* des roues sur les rails.

Sa valeur maxima limite est $F = Pa$ pour $f' = a$ coefficient d'adhérence de la voie, c'est-à-dire que l'effort maximum que le véhicule peut exercer tangentiellement aux rails sans qu'il y ait glissement des roues est Pa.

Si l'effort de freinage devient plus grand que Pa, les roues sont bloquées et le véhicule glisse sur les rails. Dans ces conditions, l'effort retardateur F devient :

$$F = Pf < Pa \qquad (f < a),$$

f étant *le coefficient de glissement* des roues sur les rails, lequel est toujours plus petit que " a " et alors l'effort réel retardateur F devient indépendant de l'effort de freinage exercé sur les sabots et reste plus petit que l'effort adhérent Pa.

Les coefficients de frottement f ci-dessus et f_1 de la formule (1) augmentent quand la vitesse diminue et diminuent quand la durée d'application augmente, et leurs variations sont assez considérables comme le montre le tableau suivant (1), établi d'après des expériences de MM. Galton et Westinghouse.

(1) Emprunté à BLONDEL et DUBOIS, ouvrage déjà cité, tome II, p. 731.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Coefficients de frottement pour des roues à bandages d'acier.

	VITESSES en Km/h.	COEFFICIENTS pendant les trois premières secondes	COEFFICIENTS au bout de 12 à 15 secondes
Sabots en fonte sur les roues (coefficient f_1)	80	0,10	0,056
	64	0,134	0,08
	32	0,205	0,128
	16	0,209	
	8	0,36	
Roues sur les rails en acier (coefficient f).....	80	0,04	
	61	0,057	0,044
	40	0,08	
	24	0,087	
	16	0,11	

Dans les conditions ordinaires et pour les faibles vitesses, on peut admettre pour f_1 la valeur 0,12 et pour f : 0,08 à 0,10.

De ce qui précède, il résulte qu'en définitive, les parcours *minima* nécessaires pour l'arrêt et correspondant aux valeurs *maxima* de F sont :

1° Avec les *roues bloquées :*

$$X_1 = \frac{P'}{P} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{1}{f - i}, \tag{3}$$

f étant le coefficient de glissement des roues sur les rails, avec

$$f = 0{,}04 \text{ à } 0{,}12.$$

2° Avec les roues *tournant* dans les conditions-limites de l'adhérence :

$$X_2 = \frac{P'}{P} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{1}{a - i}, \tag{4}$$

a étant le coefficient d'adhérence de la voie avec, en moyenne, $a = 0{,}14$ dans les conditions ordinaires.

3° Lorsque les roues tournent partiellement, les valeurs sont intermédiaires.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

De l'exposé qui précède, on conclut en outre que le freinage doit être *progressif* et *modérable*. Il faut pouvoir serrer d'abord très fortement les freins, puis les desserrer peu à peu, surtout à la fin, pour obtenir un bon freinage.

Cette condition est d'ailleurs difficile à obtenir des wattmen, dans le cas des freins à main sur lesquels ils ont toujours tendance à exercer le plus grand effort qu'ils peuvent. Elle est facilement réalisée avec les freins à air comprimé. Mais la solution la plus complète est donnée par le freinage électrique par les moteurs parce que le réglage se produit de lui-même et que le patinage est évité, ou tout au moins si celui-ci a lieu, il ne peut être que partiel, car s'il y avait patinage complet, l'effort résistant appliqué à la jante tomberait à ce moment à zéro. Les freins électromagnétiques à patins sur rail donnent aussi évidemment une solution complète du problème.

Quant à la grandeur de l'effort de freinage qu'il est possible d'obtenir, en prenant la précaution de desserrer les freins progressivement après leur application, comme on vient de le voir, on peut facilement réaliser un effort retardateur de 1 m./sec./sec., correspondant à un effort d'environ 100 kg. par tonne. En pratique, cependant, ce chiffre est rarement atteint en freinage normal où l'on ne dépasse guère 50 à 60 kg. par tonne.

En cas de nécessité, on peut toutefois pousser l'effort plus loin, jusqu'à la limite d'adhérence, fonction de l'état de la voie, soit 150 à 250 kg. dans le cas de chemins de fer à rails secs et propres.

En France, en ce qui concerne les tramways, le règlement prescrit un effort retardateur minimum qui résulte de la règle suivante : les freins devront être assez puissants pour qu'une voiture traînant des remorques, lancée à une vitesse de 20 km./h., sans tenir compte des freins des remorques, puisse être arrêtée en 20 mètres, sur une pente de 20 mm. par mètre. (Règle dite des trois 20, décret du 6 août 1881.) Ce résultat demande un effort d'environ 120 kg. par tonne de voiture automobile, effort voisin de celui que permet de réaliser l'adhérence, soit au maximum 140 ou 150 kgs avec emploi de sable. Ces conditions ne sont d'ailleurs pas suffisantes pour les fortes pentes, où il y a lieu d'imposer des mesures plus rigoureuses.

112. **Parcours minima pour l'arrêt d'une automotrice attelée d'une remorque.** — Supposons l'automotrice précédente attelée d'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

remorque de poids P_1 et de poids d'inertie P'_1, cette remorque étant supposée non freinée.

Appliquons à la masse du train ainsi formé l'équation des quantités de mouvement comme précédemment. On aura :

$$\frac{P' + P_1'}{g} \cdot dv = \Big[(P \sin \delta - F) + (P_1 \sin \delta - P_1 r)\Big] \cdot dt,$$

car, r étant le coefficient global de résistance au roulement en palier et rapporté au kilogramme de poids de la remorque (par exemple $r = 0{,}01$, c'est-à-dire 10 kgs par tonne), l'effort retardateur s'exerçant sur la remorque est évidemment $P_1 r$ et il est à retrancher de la composante $P_1 \sin \delta$ suivant la direction du mouvement, comme F l'est de la composante P sin δ pour l'automotrice.

En conduisant le calcul comme précédemment, on arrive facilement à la formule suivante qui donne la distance cherchée en posant d'une manière générale $f = \frac{F}{P}$, et remplaçant sin δ par i :

$$(5) \qquad X = \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{P' + P_1'}{P\,(f - i) - P_1(i - r)} \text{ en mètres.}$$

113. **Autre méthode de calcul.** — Si l'on a simplement en vue l'établissement du résultat exprimé par l'une des formules (3) ou (4), dans le cas d'une automotrice seule, et (5) dans le cas d'une automotrice attelée d'une remorque, on peut employer la méthode de calcul rapide suivante qu'il est utile de connaître :

En appelant d'une manière générale f le coefficient variable de frottement des roues sur les rails (la valeur maxima de f étant " a "), on a, les poids P et P' étant exprimés en Kgs :

Effort retardateur dû au freinage :

$$Pf \text{ Kgs};$$

Effort accélérateur dû à la gravité sur la pente i (i étant évalué en p. 100, soit $i = 0{,}05$ pour une pente de 5 p. 100) :

$$Pi \text{ Kgs};$$

D'où, effort retardateur réel utilisé :

$$P(f - i) \text{ Kgs}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autre part, la puissance vive du véhicule étant au début du freinage :

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{P'}{g} \cdot v_0^2 \text{ Kgms},$$

il s'ensuit que la distance parcourue jusqu'à l'arrêt est évidemment :

$$X = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{P'}{g} \cdot v_0^2}{P(f-i)} = \frac{P'}{P} \cdot \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{1}{f-i} \text{ en mètres.}$$

Ce qui est bien la formule (3) déjà trouvée.

Si maintenant l'automotrice est attelée d'une remorque non freinée de poids P_1 et P_1', il faut évidemment retrancher de l'effort retardateur $P(f-i)$ du cas précédent dû au freinage, l'effort accélérateur exercé sur la dite remorque par l'effet de la pente i, lequel effort est évidemment :

$$P_1(i-r) \text{ Kgs}$$

et est positif ou négatif, suivant que i est plus grand ou plus petit que r, de sorte que l'effort retardateur réel utilisé est ici :

$$P(f-i) - P_1(i-r) \text{ Kgs}.$$

D'autre part, la puissance vive du train étant :

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{P' + P_1'}{g} \cdot v_0^2 \text{ Kgms},$$

la distance parcourue jusqu'à l'arrêt est :

$$X = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{P' + P_1'}{g} \cdot v_0^2}{P(f-i) - P_1(i-r)}.$$

C'est-à-dire, finalement :

$$X = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{P' + P_1'}{P(f-i) - P_1(i-r)} \text{ mètres.}$$

114. **Pression totale sur les sabots pour un bon freinage dans les conditions ordinaires.** — Pour que le freinage produise l'effet maximum,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il faut que l'effort F puisse atteindre réellement la valeur Pa. Cette condition étant supposée réalisée, l'équation (1) s'écrit :

$$Pa.D = 2df_1p.$$

Faisons $f_1 = 0{,}12$ (sabots fonte contre jantes acier), $a = 0{,}14$ et $d = D$. On voit que la pression aux sabots doit être, pour les deux essieux :

$$2p = P.\frac{0{,}14}{0{,}12}\,kg.$$

Mais, en général, on ne compte pas sur une adhérence a aussi élevée, et on se contente de la supposer égale au coefficient de frottement des sabots sur les jantes des roues, soit 0,12. D'où ce résultat : $2p = P$, c'est-à-dire :

La pression totale des sabots sur toutes les roues du véhicule doit être égale au poids même de la voiture.

115. **Sablières.** — L'étude qui précède montre qu'il est avantageux, au point de vue du freinage (aussi bien d'ailleurs qu'à celui du démarrage), d'augmenter l'adhérence des roues sur les rails. Aussi les voitures automotrices sont-elles généralement munies de *sablières* que le wattman actionne quand les roues glissent ou patinent. Par le moyen de ces sablières, on projette du sable sur la voie, en avant des roues, à *proximité* du point de contact des jantes sur les rails.

B. Différents systèmes de freins utilisant les effets de frottement.

Ces freins peuvent être classés comme suit :

1) Freins exclusivement mécaniques;
2) Freins à air comprimé;
3) Freins électro-magnétiques.

1° *Freins exclusivement mécaniques.*

116. — Ces freins sont à commande manuelle, au moyen d'un système de leviers et de bielles de renvoi, dont l'ensemble constitue la *timonerie de frein*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a) *Freins à sabots* (fig. 315). — Que l'on emploie ou non un procédé de freinage mécanique, les voitures motrices sont toujours munies d'un frein à main qui actionne des sabots frottant sur les bandages des roues.

Sur les voitures de tramway légères, la timonerie du frein à main est commandée par une chaîne qui s'enroule sur une poulie solidaire d'un arbre à manivelle, placé sous la main du wattman.

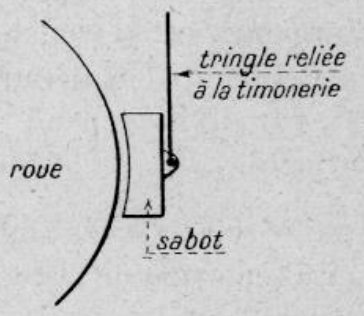


FIG. 315.

Une roue à rochet empêche le retour en arrière de la poignée. Celle-ci est souvent à cliquet, de manière à permettre au wattman de la placer dans la position où il peut le plus commodément exercer son effort.

Dans les voitures lourdes, la timonerie du frein à main est commandée par un volant à vis. La tige de commande est reliée à la timonerie par une coulisse, de manière à ne pas entraver l'action du frein mécanique.

b) *Freins à patins* (fig. 316). — Lorsque la ligne présente des déclivités considérables, on munit quelquefois les voitures d'un frein de sécurité consistant en un patin à surface généralement rugueuse qu'un système de leviers, ou mieux de ressorts, vient appliquer sur le rail, ou

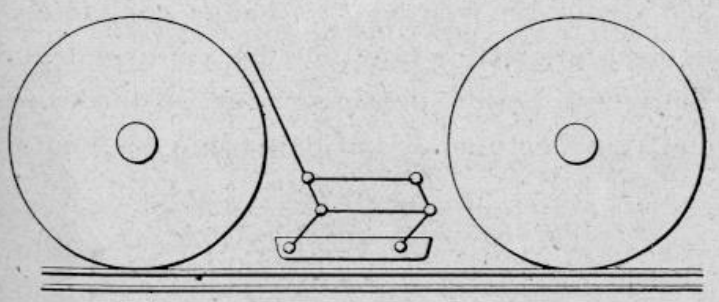


FIG. 316.

de préférence sur une longrine fixée le long du rail (1) ou installée dans l'axe de la voie. Le patin peut même ne pas constituer seulement une surface de frottement, mais être formé de véritables griffes ou tenailles qui viennent embrasser et mordre la longrine latéralement.

(1) Une application de ce principe a été réalisée en particulier sur les tramways de la côte Sainte-Marie, au Havre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le cas d'appui et frottements simples du patin sur la longrine, il faut prendre des précautions afin que le véhicule ne soit pas soulevé si l'appui est obtenu par une commande rigide.

Ce frein, surtout celui à griffes, qui ne doit être employé qu'en cas d'urgence, est déclanché à la main par le wattman.

Celui à griffes donne évidemment le maximum de sécurité pour l'arrêt, car il ne dépend pas seulement de forces de frottements entre surfaces.

c) *Freins à coins* (fig. 317). — Un coin est intercalé entre la roue et le rail en avant de la roue dans le sens de la marche. Ce système de frein est très brutal.

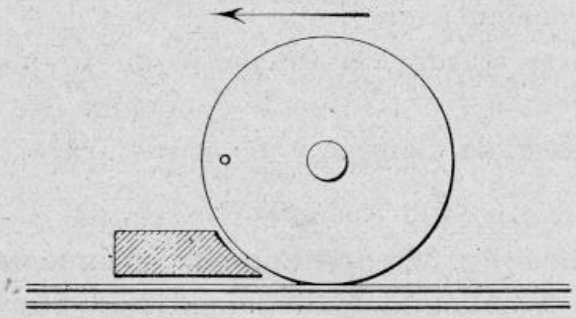


FIG. 317.

d) *Freins à plateaux de friction et à bande sur tambour.* — La manœuvre à main n'est admissible que pour les voitures légères et à faible vitesse. On a augmenté l'effort par le serrage de cordes sur un tambour calé sur l'essieu (frein Lemoine de la Compagnie des Omnibus de Paris).

2° *Freins à air comprimé.*

117. **Divers procédés.** — Ainsi que nous l'avons déjà dit, cette méthode est d'un emploi plus sûr et de plus en plus général.

Divers procédés peuvent être utilisés pour la mise en action des freins par l'air comprimé, suivant que l'on a recours au freinage « *direct* », surtout applicable aux automotrices circulant isolément, au « *freinage automatique* » employé généralement pour les trains formés de plusieurs voitures, ou à un « *système mixte* » auquel il est souvent avantageux de recourir lorsque les remorques ne sont pas mises en service d'une manière permanente.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'expérience a fait voir que pour les services relativement rapides et à arrêts rapprochés, l'emploi du frein à air comprimé procure une économie de 10 à 15 p. 100 dans les dépenses d'énergie électrique, par le seul fait que le conducteur, assuré de pouvoir arrêter instantanément son véhicule, n'est plus amené à marcher avec les sabots déjà appliqués sur les roues.

118. **Production de l'air comprimé.** — L'air comprimé nécessaire au freinage des voitures électriques peut être produit de trois manières différentes :

1° Dans des postes fixes de compression ;

2° Au moyen de compresseurs actionnés par l'essieu ;

3° Au moyen de compresseurs à moteurs électriques montés sur la voiture et alimentés par la ligne.

Examinons ces différents modes :

1° Lorsque l'on emploie des *postes de compression fixes*, la capacité des réservoirs de voiture doit être assez grande pour que la pression ne tombe pas à une valeur trop faible dans l'intervalle séparant deux postes consécutifs. Quant au poste lui-même, il comprend un compresseur mû par moteur électrique, un réservoir de grande capacité et une bouche de chargement que l'on raccorde, par un tuyau flexible, aux prises d'air des voitures. Cette disposition n'est toutefois plus que rarement employée.

2° Le compresseur *actionné par l'essieu* n'est plus, lui, aussi que très rarement employé. Il n'est d'ailleurs applicable qu'aux voitures de tramway dont la vitesse ne dépasse pas 20 à 25 kilomètres à l'heure. Pour des trains et des voitures lourdes et des vitesses supérieures à celles-ci, il devient insuffisant.

Dans ce système, le piston est commandé par un excentrique calé sur l'essieu et enfermé dans un carter rempli d'huile.

Le cylindre est porté par une suspension qui lui permet de suivre les déplacements de l'essieu par rapport au truck.

Pour une voiture de tramway de 18 tonnes, pouvant marcher à 30 kilomètres à l'heure, les dimensions du cylindre de compresseur sont :

Diamètre.....	120 millimètres.
Course.....	178 —

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° Le compresseur *à commande électrique* est le système actuel, d'un emploi général.

L'expérience n'a pas sanctionné l'emploi de compresseurs à action directe, qui conduit à une section trop grande pour les pistons, et ne permet pas un refroidissement suffisant des cylindres.

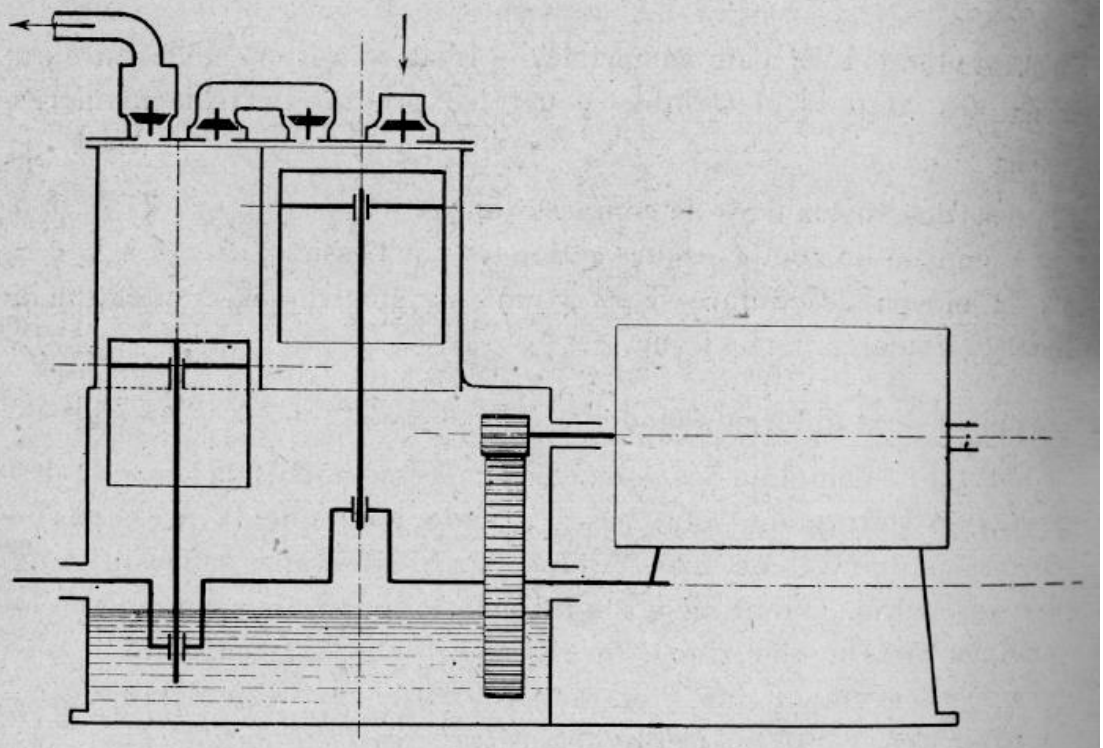


FIG. 318.

On emploie donc des compresseurs dans lesquels l'arbre de la pompe de compression est actionné par l'intermédiaire d'un train d'engrenages.

La pompe est généralement à deux corps, agissant soit en parallèle (Christensen), soit en compression étagée (Standard). La roue dentée et les bielles plongent dans un bain d'huile qui assure la lubrification de toutes les parties du compresseur.

La figure 318 représente la disposition schématique du compresseur Standard.

Le moteur est à excitation-série.

La puissance des moteurs de compresseurs d'air pour traction varie de 2 à 10 chevaux et on peut, en moyenne, compter sur une production par cheval et par minute de 120 litres, ramenés à la pression atmosphé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

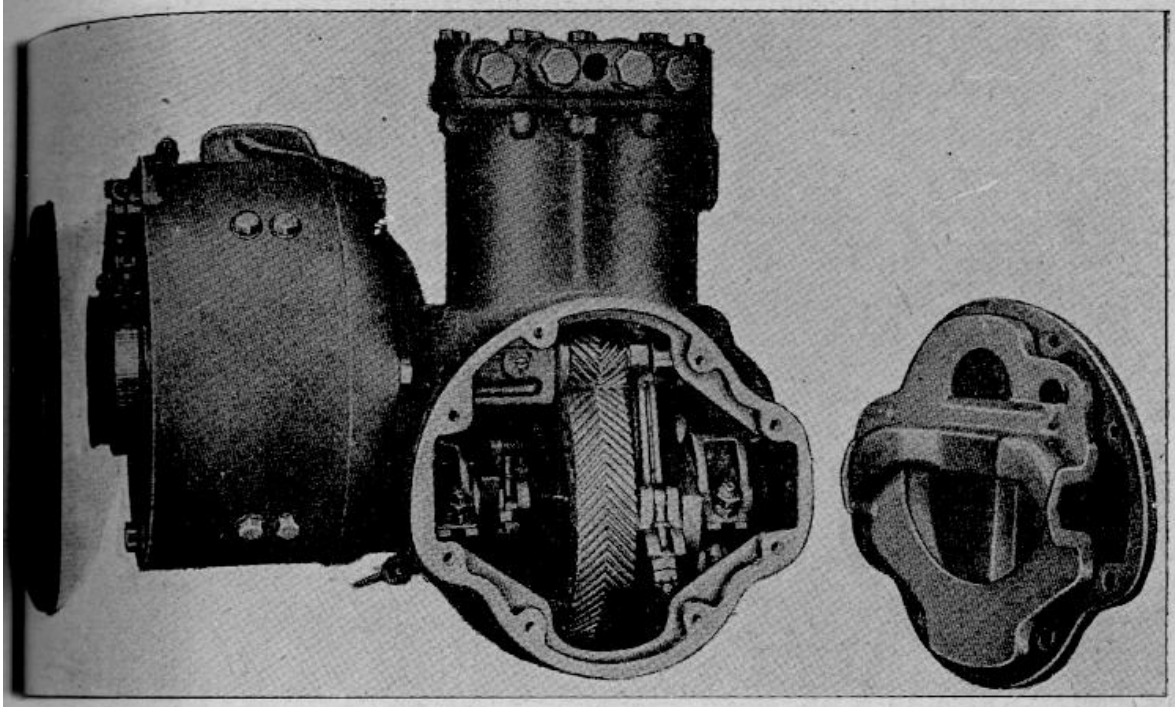


FIG. 319.

Groupe compresseur type CP-27 démonté.

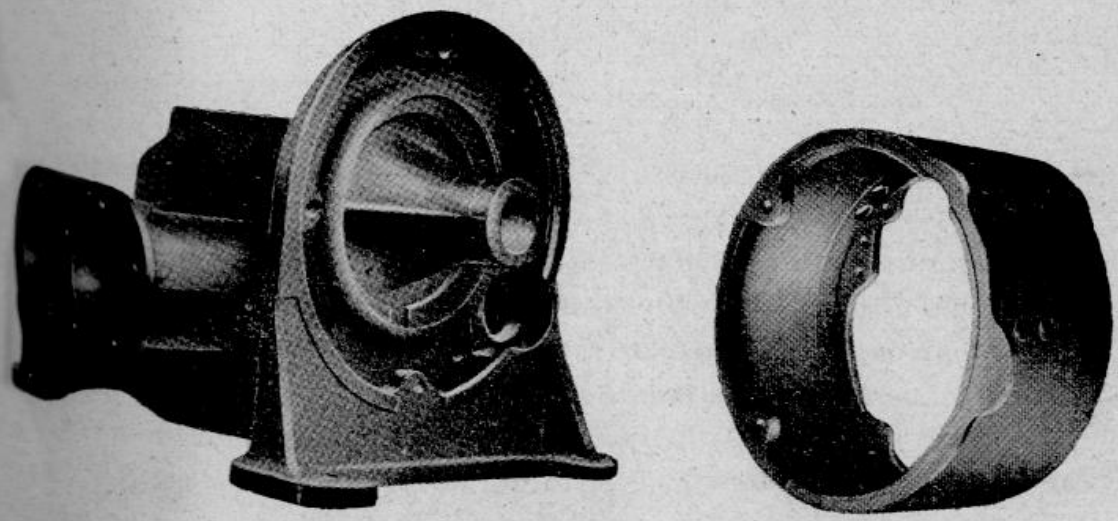


FIG. 320.

Carcasse du compresseur. Couronne inductrice du moteur.

Groupe compresseur type CP-27

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rique d'air comprimé à 4 kilogrammes et de 90 litres d'air à 6 kilogrammes.

L'ensemble, moteur et compresseur, forme généralement, au point de vue mécanique, un groupe compact, souvent à carcasse complètement fermée.

Ces groupes ont naturellement une marche intermittente et ils sont en général étudiés en vue d'un fonctionnement tel que la durée de marche soit égale à la durée d'arrêt, le cycle étant d'une heure.

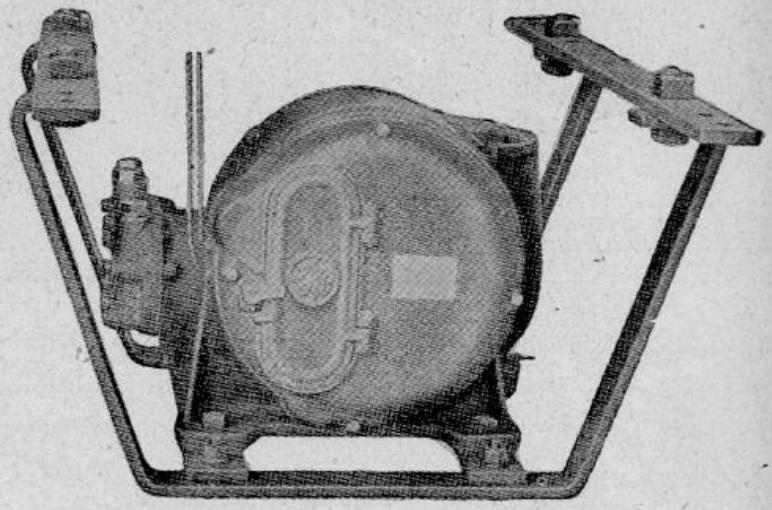


FIG. 321.

Groupe compresseur pour service de traction. Châssis pour montage sous la voiture.

Les figures 319 et 320 représentent un groupe moteur-compresseur partiellement démonté, on y voit le collecteur du moteur et la commande par engrenages à chevrons de l'arbre à cames. La figure 321 montre le même groupe monté sur un berceau destiné à être fixé sous un châssis de voiture. Le groupe moteur-compresseur ci-dessus est à compression étagée du type CP-27 (General Electric, Thomson-Houston).

Le tableau ci-après donne les caractéristiques des compresseurs les plus usités de ce genre, qui sont établis pour donner une pression maxima normale de 7 kilogrammes par centimètre carré.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Données principales des groupes compresseurs électriques usuels.

TYPE DE COMPRESSEUR	CP - 27	CP - 28	CP - 30
Volume engendré en une minute par le piston, *en dcm³*	425	708	990
Valeur de la tension correspondant aux chiffres indiqués, *en volts*	600	600	600
Vitesse du compresseur, *en t/m*	200	203	182
Vitesse du moteur, *en t/m*	1094	1110	1027
Intensité de courant, *en ampères*	4,8	7,1	10
Diamètre du cylindre, *en m/m*	105	121	140
Course, *en m/m*	124	152	178
Longueur totale, *en m/m*, environ	739	857	920
Largeur — — —	635	736	844
Hauteur — — —	454	530	610
Poids, *en kg.* environ	280	400	540
Puissance absorbée, *en kws*, environ.	2,5	4,2	6

119. **Equipement de freins à air comprimé par groupe moteur-compresseur électrique.** — Nous envisagerons seulement dans ce qui suit le mode de production de l'air comprimé par compresseur à commande par moteur électrique, qui constitue actuellement la méthode la plus générale.

Dans ces conditions, tout équipement normal de frein à air comprimé se compose ordinairement des éléments principaux suivants :

Un compresseur fournissant l'air pour le freinage.

Un moteur électrique actionnant ce compresseur.

Un réservoir principal muni d'un régulateur automatique mettant le moteur électrique en circuit lorsque la pression dans le réservoir tombe à une valeur déterminée ou coupant le circuit automatiquement lorsque la pression voulue est rétablie.

Un robinet de manœuvre avec un manomètre.

Les cylindres de freins avec le mécanisme de transmission entre les pistons et les sabots ; ces pistons sont munis d'une tige à coulisse permettant de freiner à la main sans déplacer les pistons.

Les canalisations : *principale* allant du réservoir au robinet de commande, et *générale*, partant du robinet et se prolongeant d'un bout à l'autre du convoi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le système peut être appliqué de plusieurs façons, selon qu'il s'agit :

1° D'un service assuré par automotrices isolées ;

2° D'un service par trains de deux ou trois véhicules, une automotrice et une ou deux remorques ;

3° D'un service par train composé de plusieurs automotrices et de plusieurs remorques ;

4° D'un service par trains remorqués par une locomotive.

Les systèmes actuellement employés ne diffèrent entre eux que par des dispositions de détail (systèmes Westinghouse, General Electric, Thomson-Houston, Christensen, Lipkowski, etc...) et répondent comme dispositions générales à la description ci-après.

1° *Freins à air comprimé direct.* — Le freinage à air comprimé direct s'emploie pour la première catégorie de service.

Les appareils sont montés de la façon indiquée sur la figure 322 (1).

Le freinage est obtenu en envoyant l'air comprimé du réservoir dans les cylindres au moyen du robinet du mécanicien qui permet de procéder à cette opération soit lentement, pour le freinage normal, soit brusquement, pour le freinage rapide, en cas d'urgence.

Pour les services où il arrive que l'on adjoigne à l'automotrice une ou deux remorques, il est bon d'employer un système de freinage à air comprimé direct modifié de façon que le freinage soit produit automatiquement s'il se produit une rupture d'attelage.

Le résultat requis est obtenu avec la disposition représentée fig. 323.

Une conduite auxiliaire est établie sur les véhicules, qui sont tous munis d'une soupape de sûreté, et cette soupape, formée d'un piston équilibré par la pression dans la conduite de sûreté et dans les réservoirs principaux, cesse de l'être quand la conduite de sûreté est interrompue ; elle met alors les réservoirs en relation avec les cylindres de frein.

Une autre variante est représentée par la figure 324.

Le robinet de commande ou du mécanicien consiste en un robinet duplex à quatre voies ; il permet de freiner normalement l'automotrice dans les conditions ordinaires, et de produire le freinage automatique

(1) Cette figure et les cinq suivantes sont empruntées à *l'Électricien* du 23 novembre 1912, ainsi que le texte correspondant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rapide sur tous les véhicules en cas d'urgence, en mettant la conduite de

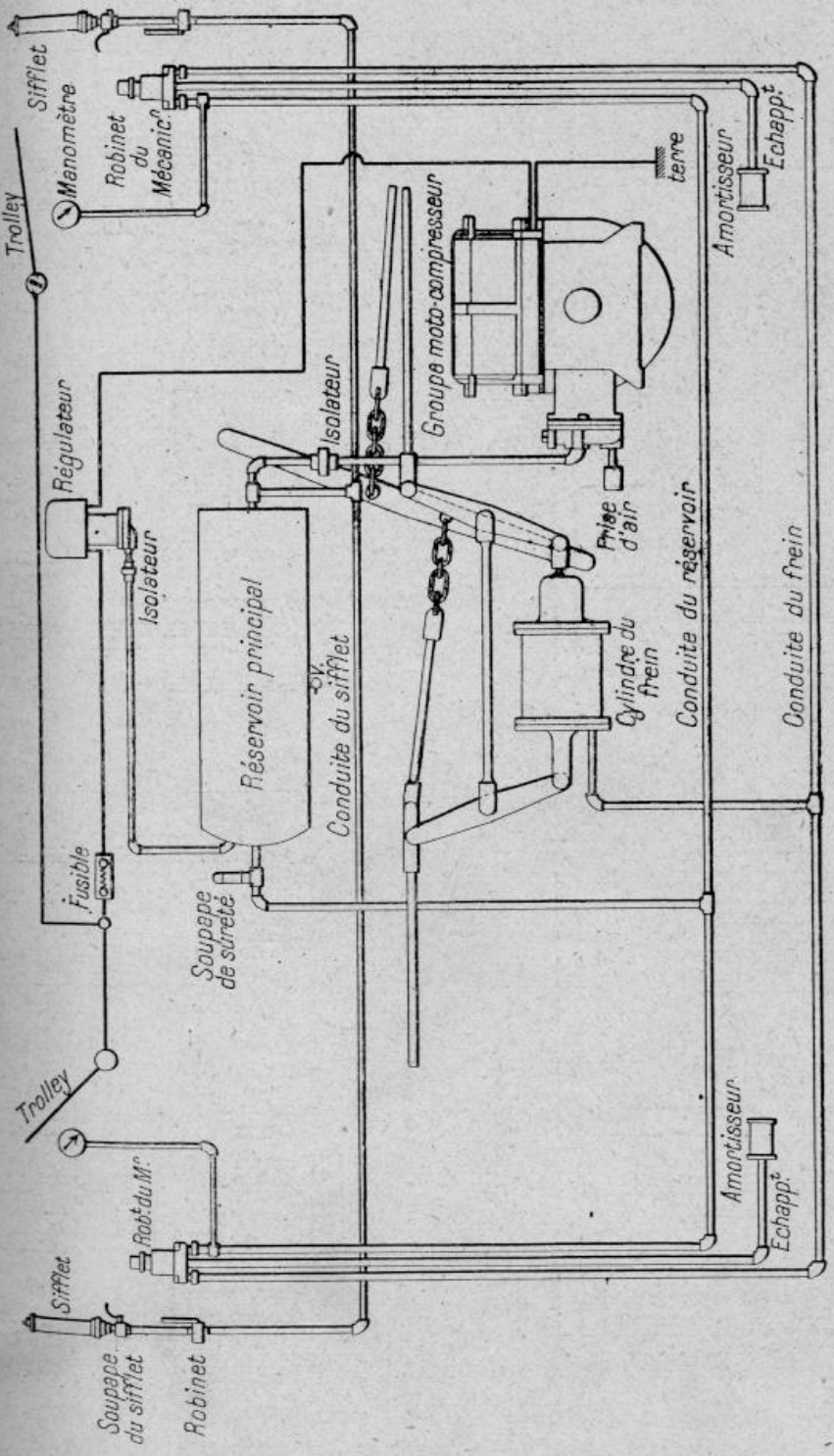


FIG. 322.

sûreté en communication avec l'atmosphère extérieure, pour mettre en action la soupape de sûreté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le freinage rapide ne doit être employé qu'en cas de nécessité, parce qu'il peut occasionner des retards dans la remise en marche.

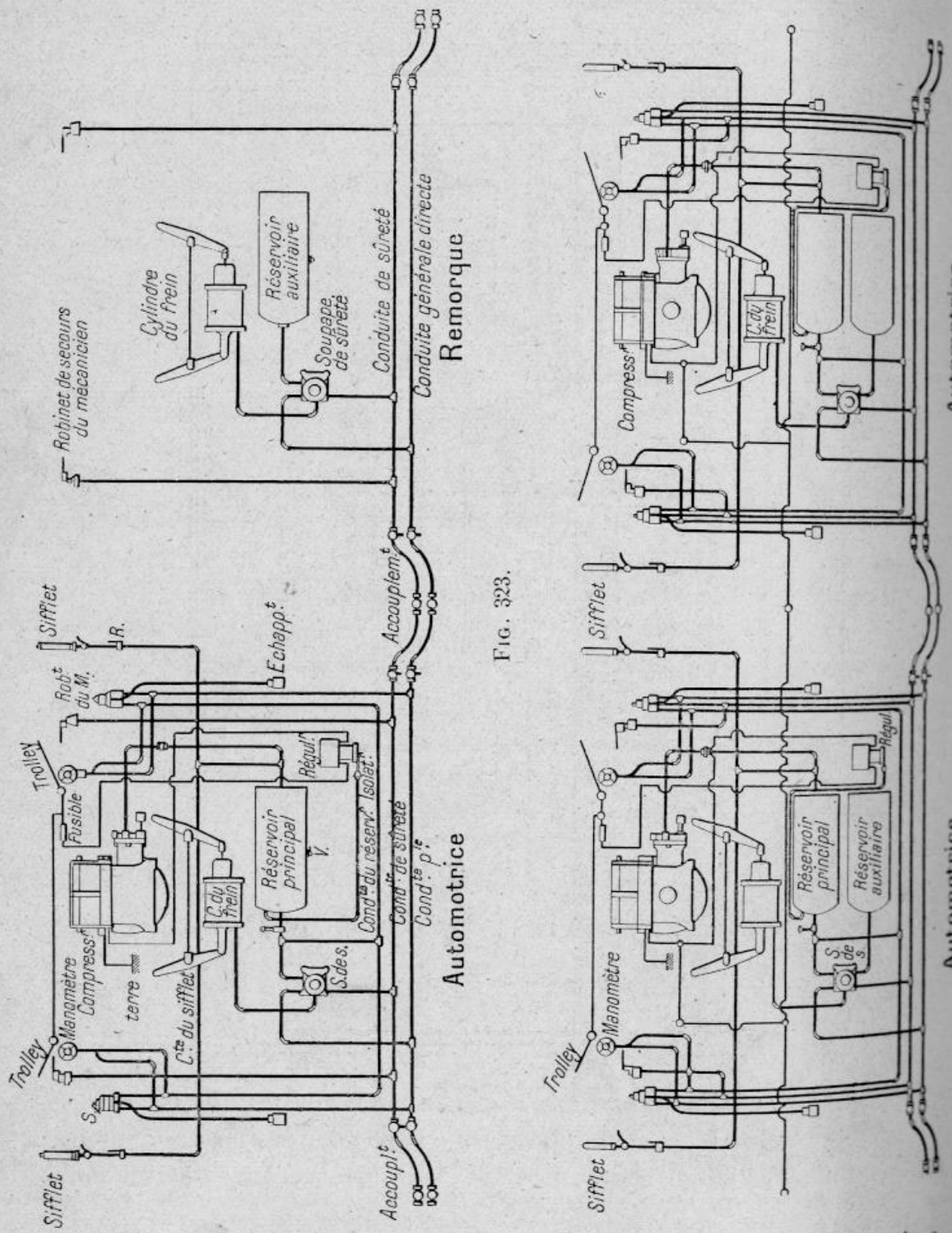


FIG. 323.

2° *Système automatique.* — Pour la seconde catégorie d'applications, on emploie généralement le montage que montre la figure 325.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le robinet du mécanicien est une soupape automatique à quatre

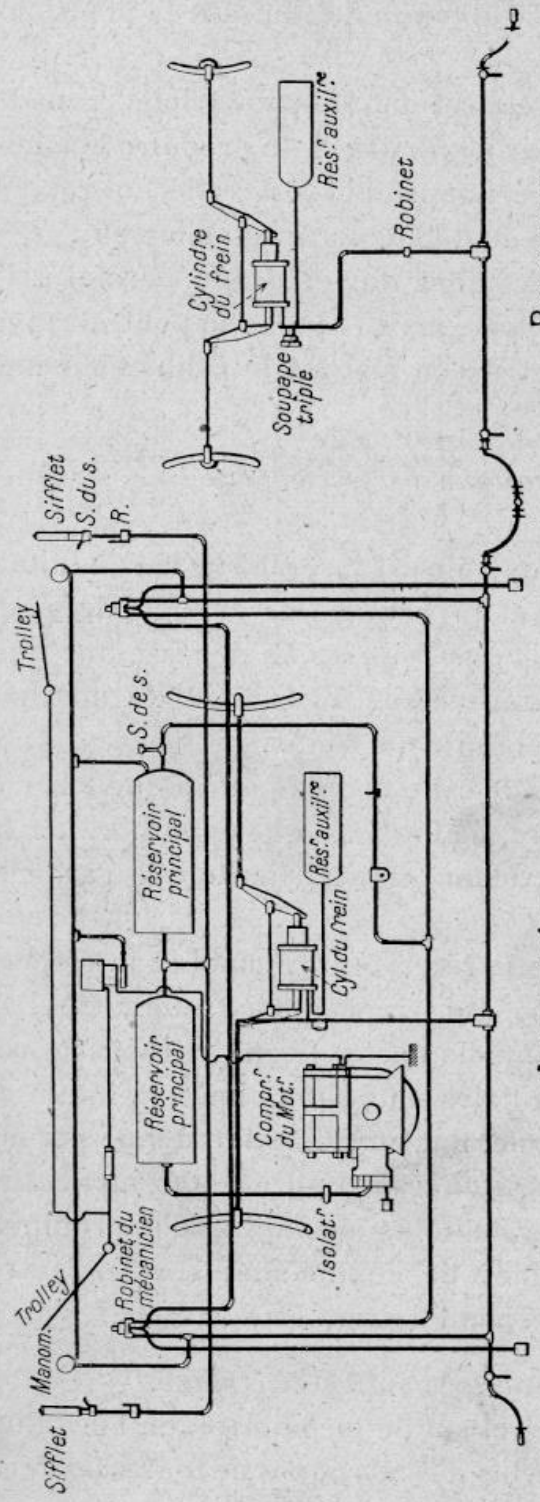


FIG. 325.

voies qui, lorsqu'elle est placée dans la position de dégagement des freins, établit une communication entre une conduite alimentaire et la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conduite du frein. La pression dans la conduite alimentaire est constante et le freinage est obtenu en réduisant la pression dans la conduite de frein.

La soupape de sûreté est une soupape triple, permettant de recharger rapidement le réservoir auxiliaire et de produire ainsi des freinages successifs rapprochés ; l'échappement est relié au robinet de manœuvre et il est ainsi possible de débloquer graduellement.

Le premier déplacement de déblocage permet à l'air des cylindres de freinage de s'échapper, mais la pression peut être maintenue dans les cylindres de l'automotrice en plaçant le robinet du mécanicien dans la position voulue.

3° *Système automatique perfectionné.* — Ce système est représenté, figure 326.

Une soupape de contrôle est insérée sur la conduite de service, entre le réservoir principal et la soupape de commande, pour isoler le réservoir principal une fois que la pression dépasse une limite déterminée et maintenir la pression au-dessus du robinet du mécanicien constante et égale à celle de la conduite du frein.

La soupape de sûreté est disposée pour assurer le chargement rapide du réservoir auxiliaire, de manière que le nombre de freinages pouvant être réalisés successivement ne soit limité que par la capacité du compresseur.

La conduite entre le réservoir principal et le réservoir auxiliaire est munie d'une soupape qui empêche le retour de l'air comprimé de celui-ci vers celui-là, mais une soupape réductrice assure le maintien dans le réservoir auxiliaire d'une pression minimum déterminée.

Sur chaque véhicule, une conduite de retenue permet au conducteur de maintenir sous pression les cylindres de freins; cette opération ne se fait que sur la voiture de tête, au moyen d'un robinet d'échappement placé à côté du robinet de commande; sur les autres automotrices, les robinets d'échappement doivent être ouverts.

4° *Équipement pour locomotive électrique.* — Le freinage se fait au moyen du système direct sur la locomotive, et l'installation fournit l'air comprimé pour les freins automatiques de toutes les remorques (fig. 327).

La partie caractéristique est le robinet de commande qui, dans la position où il réduit la pression dans la conduite générale, relie au contraire au réservoir principal les cylindres de frein de la locomotive.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il suffit de fermer le robinet de la conduite pour pouvoir employer l'équipement de la locomotive pour le freinage direct pur et simple.

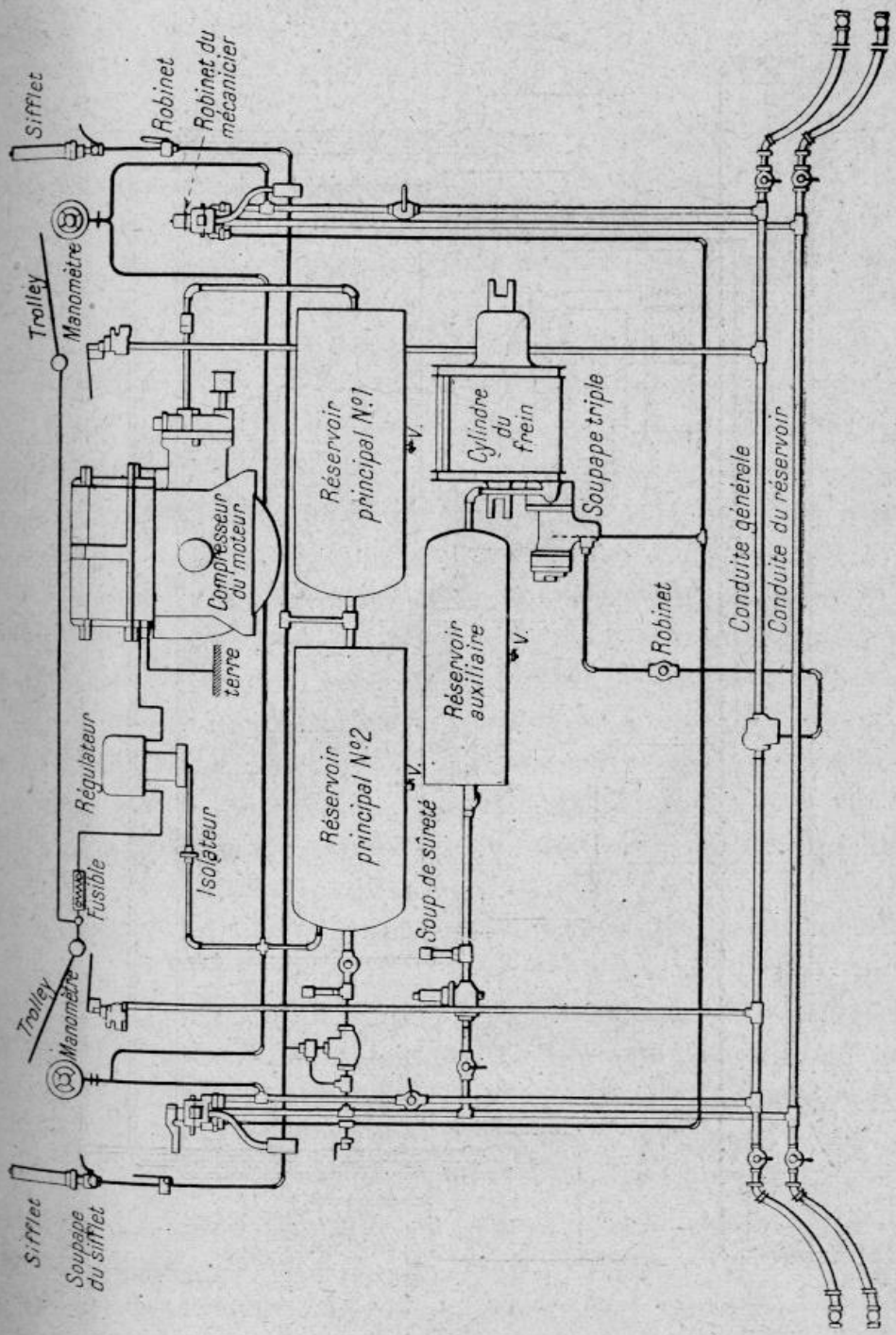


FIG. 326.

On peut maintenir les freins de la locomotive serrés, tout en débloquant ceux des voitures remorquées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

120. **Pressions ordinaires pour le fonctionnement des freins.** — Pour avoir un démarrage assez rapide, on maintient dans la position de

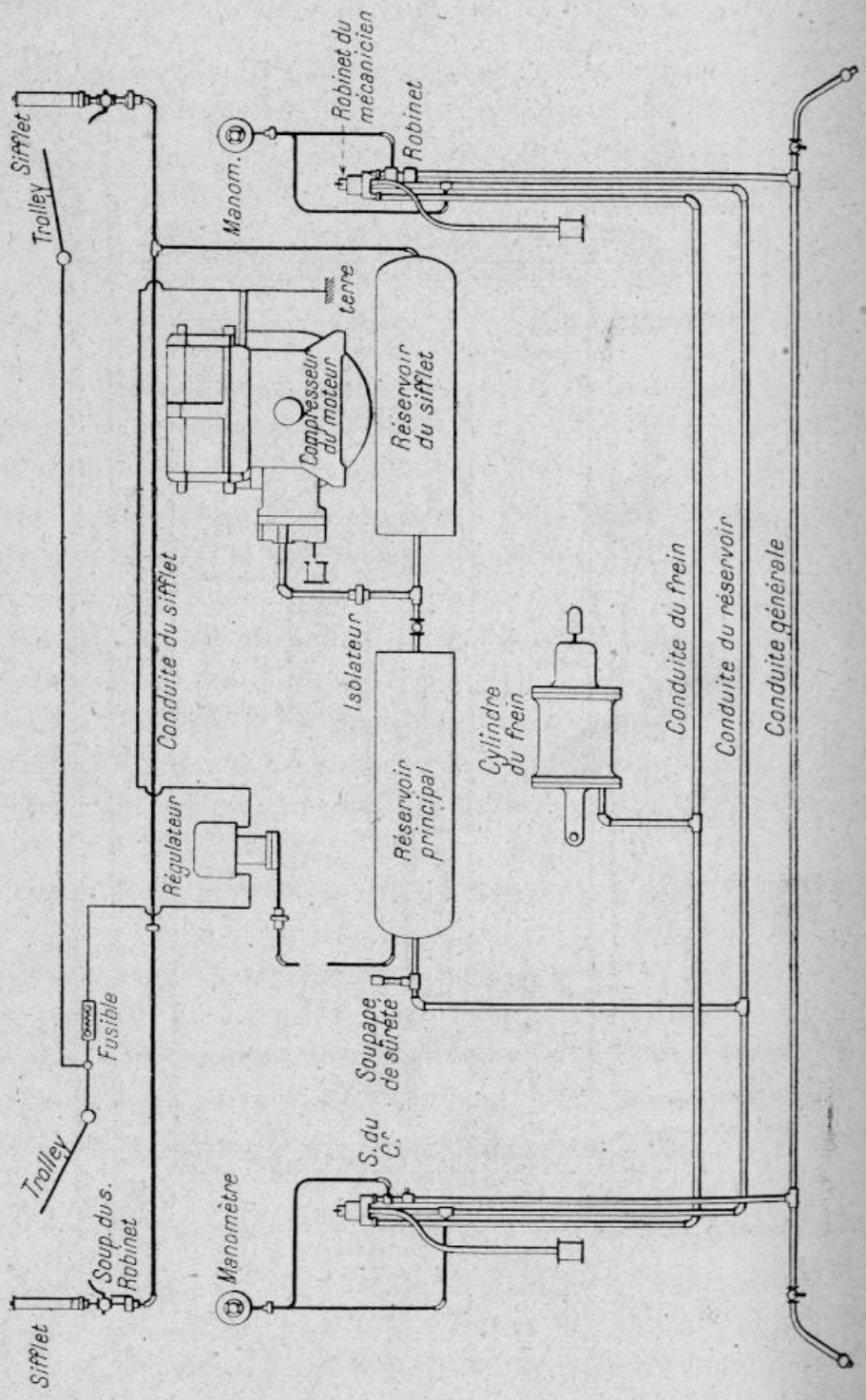


FIG. 327.

marche une différence de pression de 2 kilogrammes par centimètre carré entre le réservoir principal et la conduite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La pression normale adoptée pour le fonctionnement des freins étant environ 4 kg./cm², on voit que, dans le cas du freinage à air direct, l'air du réservoir principal doit être, en moyenne, à une pression un peu supérieure à cette valeur, tandis que, dans le cas du frein automatique, la pression au réservoir principal doit être d'au moins 6 kilogrammes par centimètre carré.

121. **Régulateurs électro-pneumatiques.** — Lorsqu'on emploie un compresseur d'essieu, il est nécessaire de mettre le cylindre du compresseur en communication avec l'atmosphère lorsque la pression dans le réservoir principal atteint la valeur limite de 5 kgs dans le cas du freinage direct, de 7 kgs dans le cas du frein automatique, et de relier de nouveau le compresseur au réservoir lorsque la pression s'abaisse à une valeur minimum de $3^{kgs},5$ ou 5 kgs. Cette opération doit s'effectuer automatiquement au moyen d'une valve actionnée, par exemple, par un dispositif manométrique.

Dans le cas où l'on emploie un compresseur électrique, le compresseur doit être mis en marche automatiquement dès que la pression atteint sa limite inférieure et arrêté lorsque la pression atteint sa limite supérieure. Cette opération est effectuée par un *régulateur électro-pneumatique*. Un tel régulateur agit sur le circuit du moteur par l'entremise d'un organe électrique faisant fonction d'interrupteur-disjoncteur; quant à l'action déterminante, c'est la pression qui s'exerce sur l'appareil au moyen d'un organe de principe évidemment manométrique.

Nous donnerons la description de deux types de régulateurs, de principe et de construction très différents.

La figure 328 représente le schéma du régulateur électro-pneumatique Christensen.

Un relai R, pourvu d'un souffleur magnétique S, sert d'interrupteur au circuit du moteur du compresseur. Un manomètre M a son aiguille reliée aux circuits de deux relais R_1 et R_2. Cette aiguille peut se déplacer entre deux contacts 1 et 2, dont la position correspond aux pressions minima et maxima.

Supposons d'abord l'aiguille en contact avec 1. Le courant venant de la ligne T, traverse deux relais, R_1 et R_2, et gagne la terre G par 1 et l'aiguille du manomètre. Les deux relais fonctionnent et ferment le circuit du relai R qui entre à son tour en action et met le compresseur en mouvement. La pression s'élevant, l'aiguille quitte le contact 1, mais

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les relais continuent à recevoir du courant à travers les contacts du

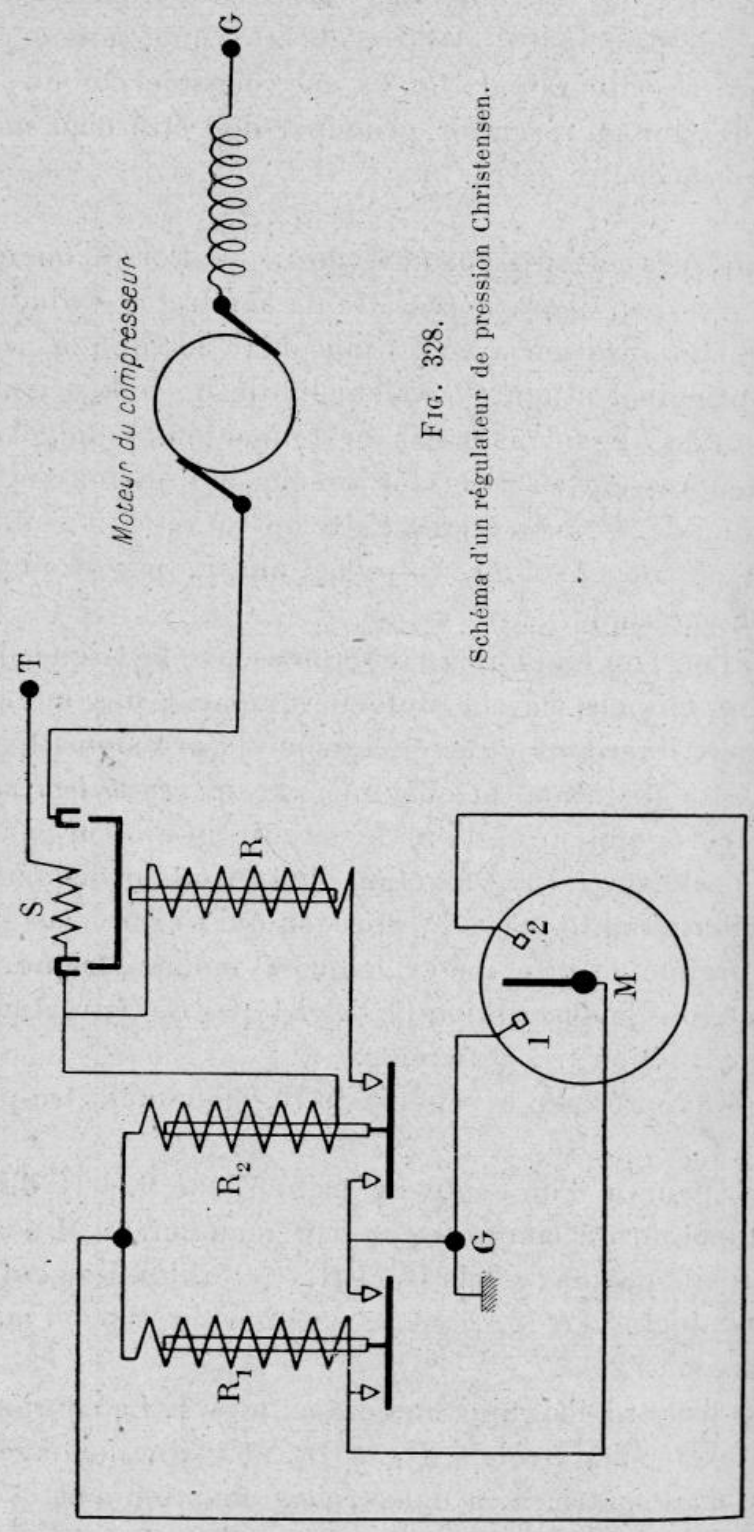


FIG. 328.
Schéma d'un régulateur de pression Christensen.

relai R_1, qui sont en prise. Lorsque l'aiguille arrive en 2, le relai R_1 se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trouve mis en court-circuit et tombe, coupant ainsi la communication à la terre du relai R_2, qui tombe à son tour et coupe la communication à la terre du relai R. Ce dernier tombe également, coupant le circuit du compresseur qui s'arrête.

Le second type de régulateurs est le régulateur Thomson-Houston, employé sur un grand nombre de réseaux en France (entre autres : Compagnie Générale des Omnibus de Paris, Compagnie Parisienne de Tramways, tramways de Bordeaux, Nice, etc.). Son réglage est, en général, tel que la différence entre les deux pressions déterminant son fonctionnement soit de 700 grammes par centimètre carré.

Les figures 329 et 330 représentent en coupe ce régulateur.

La pression de l'air agit ici contre un diaphragme A en caoutchouc pur qui actionne un jeu de leviers de manœuvre commandant l'ouverture ou la fermeture de l'interrupteur-disjoncteur MN. La tête du cylindre est reliée au réservoir d'air par une conduite V. Cette tête, boulonnée à la carcasse, applique le diaphragme contre une rondelle d'appui servant en même temps de butée au plateau B, lequel est maintenu par le ressort C, qu'on peut régler au moyen de la vis de pression R. La tige D, fixée au plateau B, commande par son extrémité inférieure un des leviers de manœuvre. Enfin, O est une bobine de soufflage pour éteindre l'arc jaillissant entre les mâchoires MN, au moment de l'ouverture du circuit.

Lorsque la pression d'air au réservoir devient trop forte, le diaphragme A se soulève et force la tige D à manœuvrer le levier E autour de son axe F. Le pivot H est ainsi porté au-dessus de la ligne de tension des ressorts J, reliant le levier intermédiaire G avec le levier R. A partir de cet instant, l'action propre de ces ressorts tend à porter leur ligne d'axe de l'autre côté du pivot P, et la rupture brusque du contact se produit au moment précis où ce pivot est dépassé.

Si la pression au réservoir diminue jusqu'à une certaine valeur, la tige D soulève l'extrémité relevée du levier E par un talon que porte le levier G. Ce mouvement porte la ligne de tension des ressorts au-dessus du pivot P et ramène le doigt de contact vers le haut, fermant brusquement le circuit.

L'avantage de ce double système de leviers est d'éviter, en amenant des mouvements brusques des mâchoires MN, la combustion des contacts en maintenant entre eux une pression constante jusqu'à ce que la rupture se produise.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

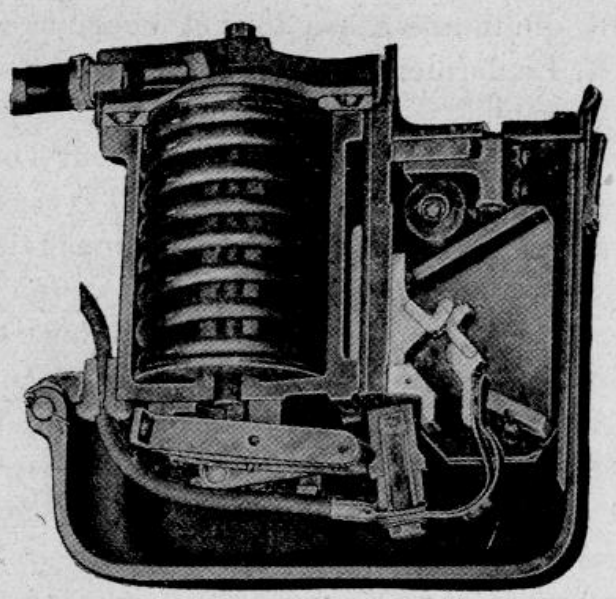


FIG. 329.

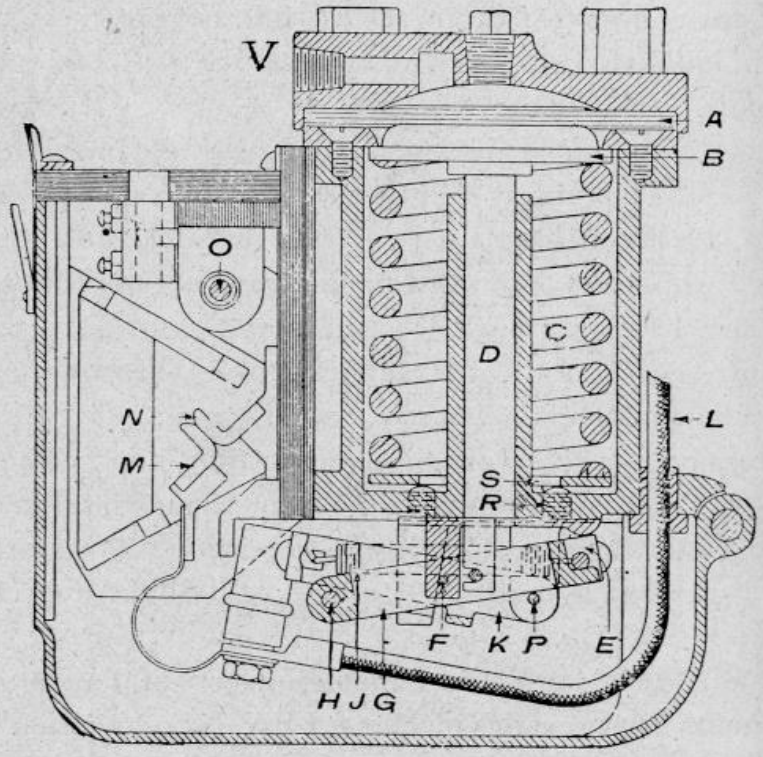


FIG. 330.

Coupes d'un régulateur de pression Thomson-Houston.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

122. **Détermination de la puissance d'un compresseur.** — Il est nécessaire de choisir assez largement les dimensions des compresseurs d'air. Nous allons indiquer par un exemple, comment on peut évaluer le débit à prévoir pour un compresseur.

Supposons qu'il s'agisse d'un train de 10 voitures ayant chacune deux cylindres de frein à un piston de 203 millimètres de diamètre et de 100 millimètres de course. La durée d'un voyage est de 60 minutes et le nombre d'arrêts, pendant un voyage, de 12. On emploie le frein automatique.

Pour bloquer une voiture, il faut introduire, dans le cylindre de frein, un volume d'air comprimé, à 4 kilogrammes, de :

$$\frac{\pi \times \overline{2,03}^2}{4} \times 2 = 6,5 \text{ d.c.m.}^3.$$

Si donc on admet que l'on bloque complètement le train à chaque arrêt, il faudra chaque fois dépenser :

$$6,5 \times 10 = 65 \text{ d.c.m.}^3$$

d'air à 4 kilogrammes, soit par voyage :

$$65 \times 12 = 780 \text{ d.c.m.}^3$$

et en moyenne, par minute :

$$\frac{780}{60} = 13 \text{ d.c.m.}^3,$$

qui, ramenés à la pression atmosphérique, donnent environ :

$$5 \times 13 = 65 \text{ d.c.m.}^3.$$

Il faut, en outre, tenir compte des fuites qui sont assez importantes en raison du grand nombre de joints des conduites et qu'on peut évaluer suffisamment largement, en admettant, par exemple, que tous les réservoirs se vident en une heure.

Le volume de chaque réservoir auxiliaire est de 40 d.c.m.^{3}. Nous supposerons que le volume du réservoir principal est de 800 d.c.m.^{3}.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les fuites consommeront donc en une heure :

$$10 \times 40 + 800 = 1.200 \text{ d.c.m.}^3$$

d'air à 6 kilogrammes.

Soit, par minute :

$$\frac{1200}{60} = 20 \text{ d.c.m.}^3,$$

qui, ramenés à la pression atmosphérique, donnent un débit de :

$$7 \times 20 = 140 \text{ d.c.m.}^3.$$

Le débit total devra donc être :

$$65 + 140 = 205 \text{ d.c.m.}^3 \text{ par minute.}$$

Si on admet, pour le compresseur, un rendement en volume de 70 p. 100, on devra aspirer :

$$\frac{205}{0,7} = 290 \text{ litres par minute.}$$

Mais il faut admettre que le compresseur marchera au plus pendant la moitié du temps, de façon à laisser une marge suffisante en cas de modification accidentelle au service. On devra donc compter sur un débit deux fois plus grand, soit :

$$290 \times 2 = 580 \text{ litres par minute,}$$

correspondant à une puissance de :

$$\frac{580}{90} = 6,44 \text{ chevaux, soit 7 chevaux}$$

environ pour le moteur du compresseur, en admettant une production de 90 litres d'air à 6 kilogrammes par cheval et par minute ainsi qu'il a déjà été dit (§ 118).

123. **Consommation d'air pour le freinage. Données expérimentales.** — Il est difficile de donner une consommation moyenne de ces compresseurs, car la dépense d'air varie beaucoup suivant :

1° Le ralentissement que l'on veut obtenir ;
2° La distance sur laquelle on veut opérer le freinage ;
3° Le profil de la ligne ;
4° L'état du rail.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autre part, les fuites sont importantes et la dépense doit être comptée largement.

Des expériences nombreuses faites sur la Ceinture de Paris, il résulte que l'on dépense par freinage normal 111 à 164 litres d'air à 4 ou 5 kilogrammes de pression pour un train de 10 à 15 voitures, soit environ 11 litres par voiture. Il sera prudent de compter sur 15 à 20 litres par véhicules de 10 tonnes.

En résumé, on peut compter sur 2 litres à la pression de 4 kilogrammes, soit 8 à 10 litres aspirés à la pression atmosphérique par tonne de train et par freinage.

Le travail nécessaire pour comprimer 1 kilogramme d'air à la pression de 6 kilogrammes est d'environ 25.000 à 30.000 kilogrammes suivant les types de compresseurs.

Or, 1 litre pèse $1^{g},293$; donc, pour comprimer à 6 kilogrammes un litre d'air pris à la pression atmosphérique, on dépensera :

$$\frac{30.000}{1.000} \times 1,293 = 40 \text{ kilogrammètres.}$$

En tenant compte du rendement du moteur électrique (0,75) et des engrenages (0,90), il faudra donc fournir aux bornes du moteur :

$$\frac{40}{0,75 \times 0,90} = 60 \text{ kilogrammètres environ,}$$

soit :

$$60 \times \frac{9,81}{3.600} = 0,165 \text{ wattheure environ.}$$

3. *Freins électromagnétiques.*

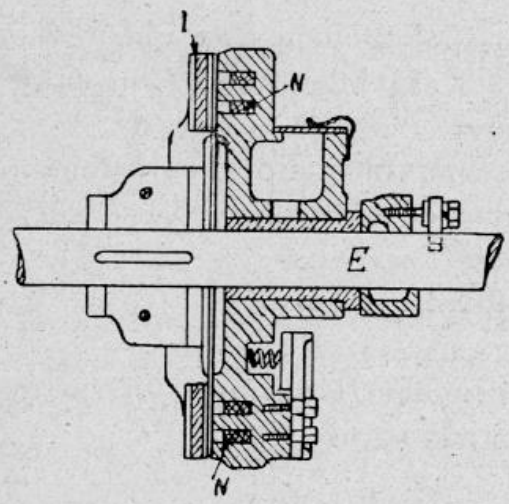
124. **Principe.** — Ces freins reposent sur le même principe que les embrayages magnétiques : ils consistent en l'emploi d'électro-aimants qui, lorsqu'on y fait passer un courant, produisent le frottement de pièces appropriées, soit contre un disque ou tambour calé sur l'essieu, soit contre les rails.

Le courant d'excitation des électros est fourni, soit par une batterie, soit par la ligne, soit plus généralement, et de beaucoup, par les moteurs fonctionnant en générateurs comme dans le freinage électrique que nous étudierons plus loin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Employés dès 1889, ils ont été notablement perfectionnés depuis. Ils donnent maintenant lieu à de nombreuses applications.

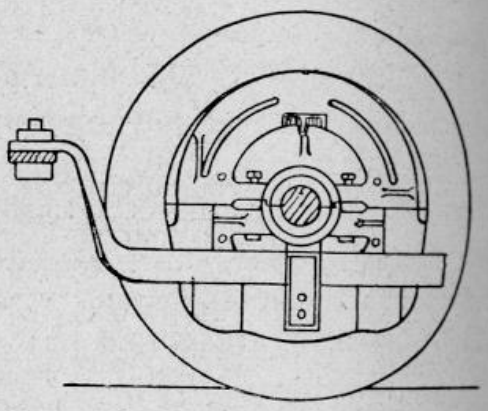
125. **Frein à plateau sur essieu de la General Electric Co.** — L'un des premiers freins électromagnétiques et qui a été très employé est celui de la G. E. Co, qui comprend un électro, dont les enroulements sont logés dans un plateau circulaire (fig. 331) à rainure construit en deux parties. L'armature est formée par un plateau calé sur l'essieu. Pour empêcher



Coupe axiale

I. Disque. — E. Essieu.
N. Rainures de l'enroulement.

Fig. 331.



Suspension d'un frein isolé et attaché avec le truck.

Fig. 332.

Frein électromagnétique de la Général Electric Co. — Détails.

l'inducteur de tourner, on l'attache au truck (fig. 332) ou à la carcasse du moteur, ou bien, comme ces freins sont généralement montés par paires, on relie deux inducteurs à l'aide d'une barre longitudinale (fig. 333). Le freinage est ainsi obtenu par l'adhérence magnétique entre les deux plateaux ; il en résulte un effort de frottement très énergique.

Le courant d'excitation de l'électro est fourni par les moteurs fonctionnant en générateurs et son réglage se fait au moyen d'une résistance appropriée. Au moment du freinage on ferme les moteurs en parallèle sur le circuit des freins suivant le schéma (fig. 334) en prenant la précaution d'inverser le courant dans les inducteurs pour rendre les moteurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

auto-excitateurs, sinon il n'y aurait pas d'amorçage à cause du magnétisme rémanent. Dans le cas où le courant dépasse dans l'appareil une certaine limite, le solénoïde A repousse la palette du disjoncteur qui met

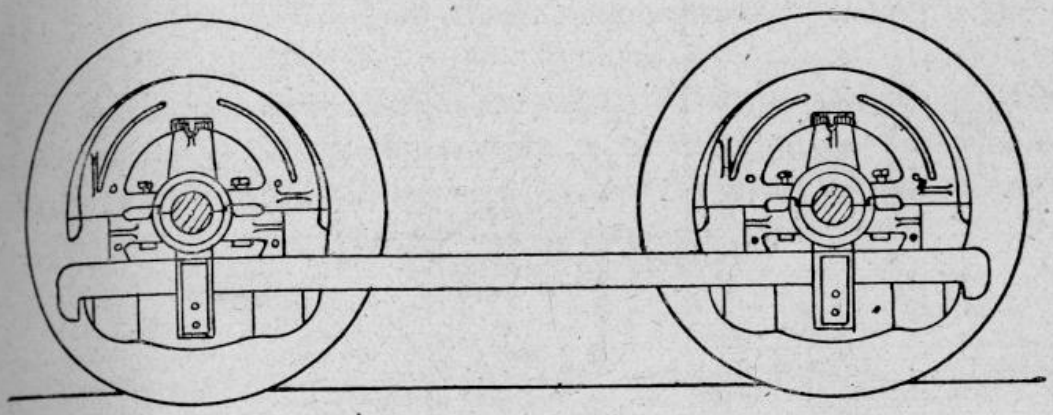


FIG. 333.

Suspension par paires des freins électromagnétiques de la Général Electric Co.

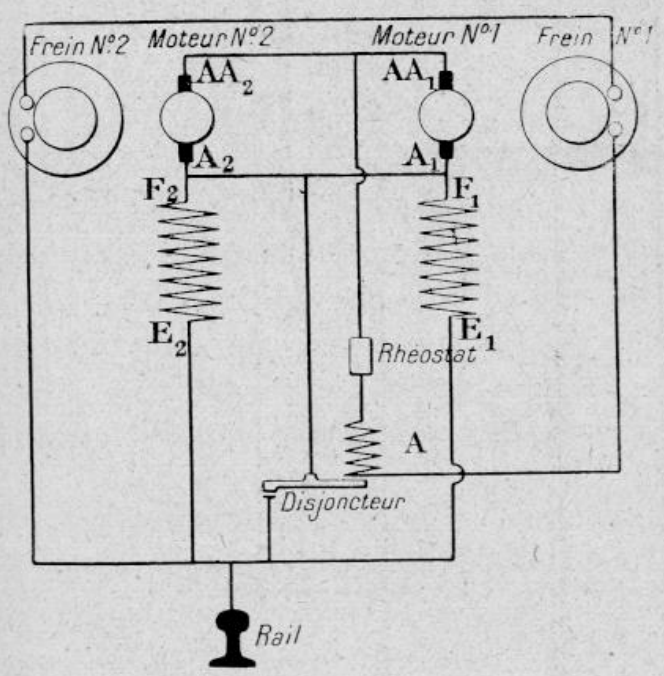


FIG. 334.

Schéma du montage des freins électromagnétiques de la Général Electric Co.

les inducteurs en court-circuit et désamorce les moteurs. Cette limite du courant doit être celle qui produit le patinage des roues, elle est généralement comprise entre 30 et 35 ampères pour une voiture de tramway ordinaire, soit 15 à 18 ampères par moteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le fonctionnement de ce frein est toutefois assez délicat. Pour

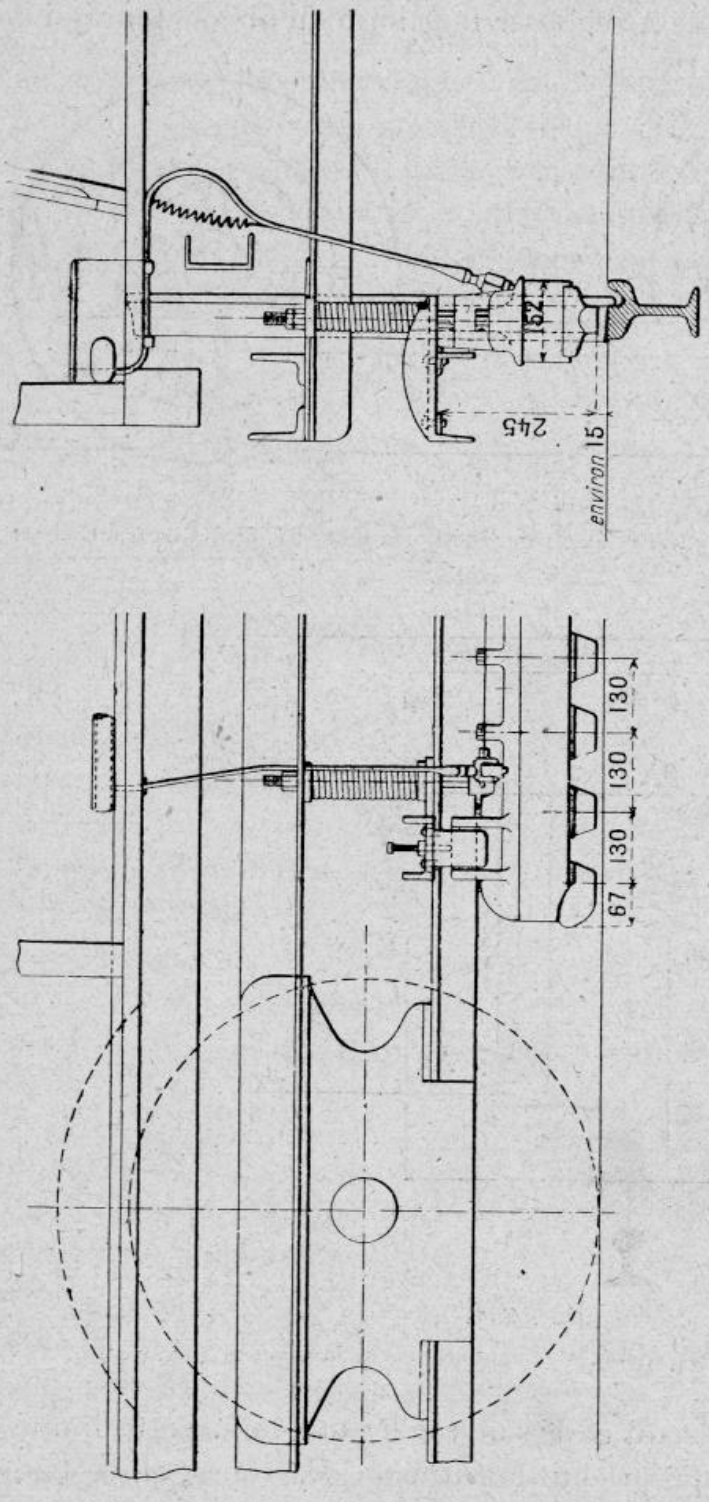


Fig. 335.
Frein électro-magnétique à patins Thomson-Houston.

décoller les plateaux, lors de la remise en marche du véhicule, on y faisait au début de leur emploi, passer un courant de sens inverse pris

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en dérivation sur un shunt commandé par la première touche du contrôleur ou par une touche spéciale, mais ce dispositif est assez compliqué et en outre peu sûr. On l'a abandonné par la suite.

Ce frein est d'ailleurs maintenant remplacé par l'un des suivants.

126. **Freins modernes à patins sur rails.** — Ce type de frein se développe beaucoup et fait maintenant l'objet de nombreuses applications par les Sociétés Thomson-Houston, Westinghouse, Oerlikon, Brown-Boveri, etc.

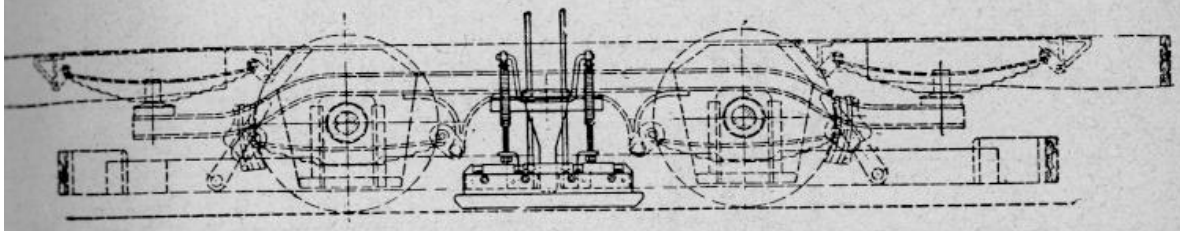


FIG. 336.

Ces freins sont des freins multiples en ce sens qu'ils comprennent plusieurs électros dans une même carcasse. Les pôles sont en outre alternés, de façon à ce que le circuit magnétique d'un pôle à l'autre se ferme par les rails. Deux patins sont le plus généralement employés ; ils sont logés dans l'empattement des roues, et montés sur le châssis de la voiture, un de chaque côté, appuyant sur le rail correspondant. Exceptionnellement, on emploie deux freins de chaque côté.

Le frein Thomson-Houston comprend généralement de six à douze pôles alternés.

La figure 335 montre la disposition et la construction d'un tel frein.

La figure 336 représente le frein Westinghouse, monté sur un châssis. Ce frein est généralement à deux électros de polarités inverses. Si l'empattement des roues est assez grand, on peut y loger de chaque côté deux de ces patins pour obtenir une puissance de freinage plus grande, ainsi qu'il est indiqué sur la figure 337.

Le frein Oerlikon présente une disposition analogue au précédent.

Tous ces freins, quelle qu'en soit l'origine, sont établis en différents types pour développer un effort vertical d'appui sur le rail, variant de 1000 à 4000 kilogrammes, suivant la puissance des électros et leur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nombre, soit par exemple deux freins développant chacun une force verticale sur le rail de 2000 kilogrammes. La force de freinage effective dans le sens de la marche du véhicule dépend naturellement du coefficient de frottement, d'ailleurs très variable, entre le patin et le rail, lequel dépend essentiellement, en particulier, de l'état de la voie et de la vitesse du véhicule, au moment de la mise en action des dits freins. La valeur de ce coefficient peut atteindre 0,30 à 0,35 sur des rails secs et à l'arrêt du train pour descendre à 0,1 et même à 0,08 sur des rails humides et à des vitesses de 10 à 15 kilomètres.

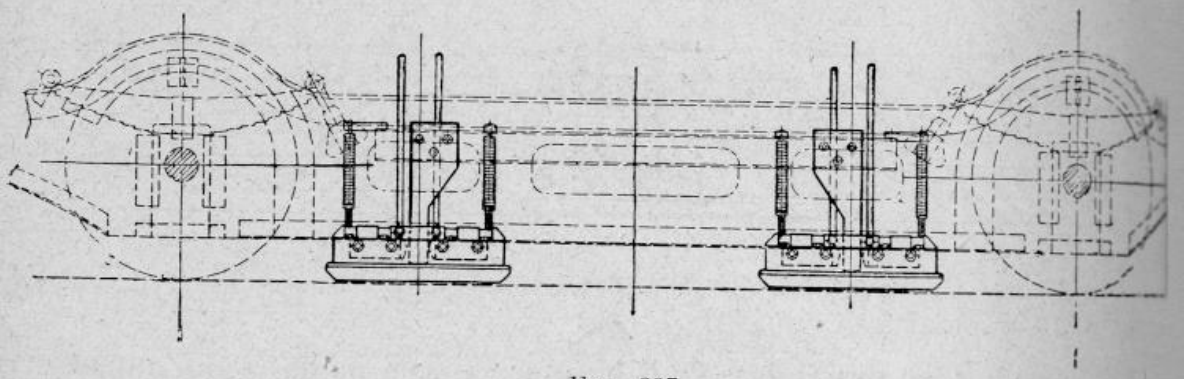


FIG. 337.

Vue schématique du frein Westinghouse à 4 électro-aimants.

En admettant un coefficient moyen de 0,15, valeur sur laquelle on peut en général compter, on obtient un effort total de freinage utilisable de :

$$2 \times 2000 \times 0{,}15 = 600 \text{ kilogrammes},$$

qui s'ajoute évidemment à l'effort total de freinage développé par l'action des sabots sur les roues et éventuellement par l'action du freinage électrique.

127. **Excitation des freins.** — Les bobines des freins précédents peuvent être excitées de différentes façons, suivant les exigences du service.

a) ***Par une excitation simple***, au moyen du courant de freinage produit par les moteurs fonctionnant en génératrices.

L'importance du freinage réalisé, c'est-à-dire la vitesse obtenue,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut alors être réglée par la variation d'une résistance appropriée insérée dans le circuit des électro-aimants. Ce réglage dépend également du nombre de plots prévus au contrôleur (1).

Le schéma correspondant à ce cas est donné sur la figure 338.

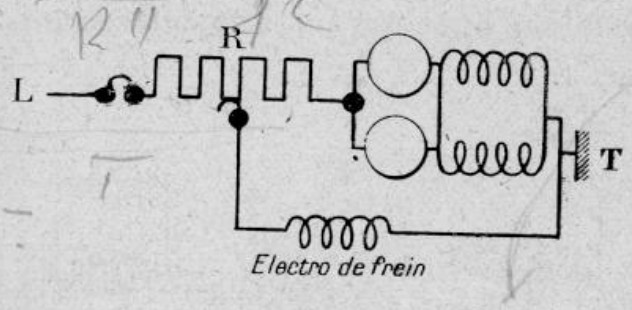


FIG. 338.

Schéma d'excitation des freins électromagnétiques

b) *Par une excitation double :* ligne aérienne (ou 3e rail, suivant le cas) et courant de freinage des moteurs.

Ce mode d'excitation sera généralement prévu pour les chemins de fer secondaires, le mode précédent étant plus ordinairement réservé aux tramways.

Chaque électro est alors, le plus souvent, muni d'un double enroulement (enroulement compound), chacun étant suffisant pour déterminer la saturation de l'aimant. L'un des enroulements — enroulement série — est placé dans le circuit des moteurs fonctionnant en générateurs, l'autre enroulement — enroulement shunt — est alimenté directement par la ligne.

Les bobines série sont utilisées pour le service normal : elles permettent d'opérer tout freinage en régime permanent ou de secours désiré et de maintenir constante la vitesse sur une pente donnée.

Les bobines shunt ne sont employées que dans un cas d'urgence et ce, soit à la dernière touche de freinage du contrôleur, soit à l'aide d'un interrupteur d'alarme disposé à portée sur la plateforme du wattman.

Enfin, dans le cas d'un freinage rapide, les électros peuvent être

(1) Nous étudierons plus loin en détail, § 131 et suivants, l'action du freinage électrique par les moteurs et donnerons à cette occasion divers schémas de contrôleurs réalisant ce mode de freinage, ainsi que le freinage électromagnétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

excités à la fois par les moteurs et par la ligne. On peut ainsi obtenir un freinage énergique, lors même que les roues sont bloquées par le frein à main par exemple, la voiture glissant sur les rails à la façon d'un traîneau.

Dans le procédé Oerlikon, les conditions d'emploi de la double excitation sont différentes et il n'est fait emploi que d'un seul enroulement, l'action du courant de ligne venant compléter celle du courant des moteurs.

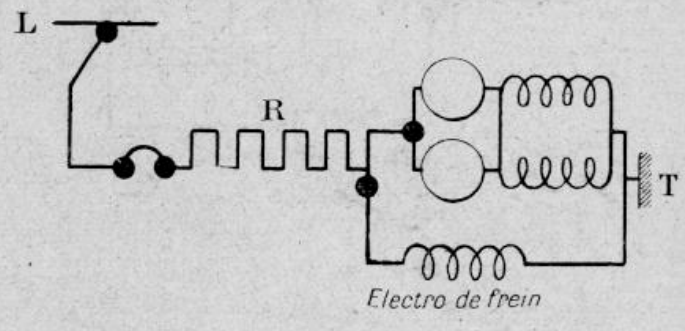


FIG. 339.

Schéma d'excitation des freins électromagnétiques.

Il suffit pour cela de prévoir l'arrivée du courant de ligne en particulier sur la dernière touche de freinage au contrôleur suivant la disposition du schéma de la figure 339, ce qui permet d'obtenir l'arrêt du véhicule par l'excitation indépendante, aussi bien du frein que des moteurs.

Remarquons que ce résultat ne pourrait être atteint si l'on ne faisait usage que du courant des moteurs.

Le schéma précédent pour excitation indépendante était employé par la Société Oerlikon, jusqu'en 1915. Il présente cependant un assez sérieux inconvénient. En effet, au moment du passage de l'auto-excitation des moteurs à l'excitation par le courant de la ligne, le courant passant dans les électros du frein change de sens et le freinage se trouve momentanément interrompu, d'où un retard apporté dans l'arrêt de la voiture.

Pour parer à cet inconvénient, les Ateliers Oerlikon ont adopté une nouvelle disposition représentée par le schéma de la figure 340.

Les bobines des freins sont connectées en série avec les inducteurs des moteurs pendant la période de freinage; de sorte que le courant les traverse toujours dans le même sens, que leur excitation se fasse par les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteurs fonctionnant en générateurs ou par le courant de ligne. Le circuit de freinage est fermé par un contact mobile P sur la résistance R, il comprend en outre une résistance appropriée de réglage R_1, mise d'autre part à la terre.

Ce mode de connexion permet en outre, pendant la période de freinage électrique, le réglage de la vitesse par variation de la résistance, suivant le nombre de crans de freinage au contrôleur, comme nous le verrons plus loin.

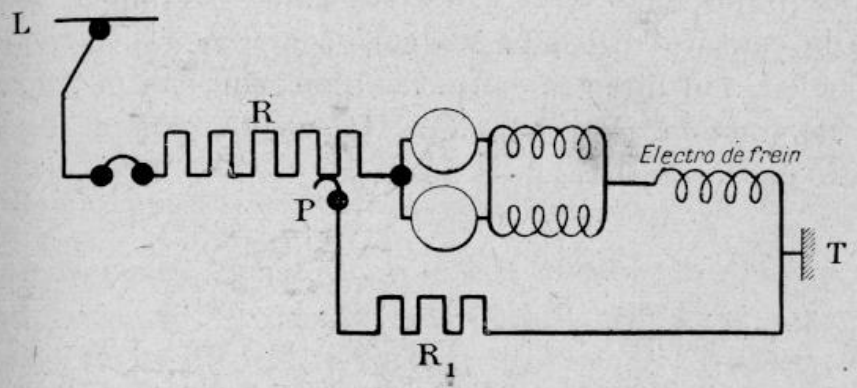


FIG. 340.

Schéma pour freins électromagnétiques ayant un seul enroulement (procédé Oerlikon).

Pendant l'excitation des moteurs et du frein par le courant de la ligne, le contact mobile P se trouve vers l'extrémité de la résistance R, côté moteur sur le schéma. En passant d'un mode d'excitation à l'autre, le sens du courant change seulement dans R_1, ce qui n'a aucune influence sur le fonctionnement du frein.

La double excitation avec deux enroulements séparés donne évidemment une plus grande sécurité, mais cela complique quelque peu la construction des freins et en augmente l'encombrement ; or, l'espace dont on dispose est le plus souvent assez réduit. En outre, le nombre de sorties de câble est doublé.

c) *Un dernier mode d'excitation des freins* consiste dans l'emploi d'une *batterie d'accumulateurs*, ce qui rend leur action complètement indépendante du circuit de traction.

Ce mode d'excitation sera avantageusement employé pour donner un freinage de secours, les freins étant normalement excités par le courant des moteurs. C'est, par exemple, dans ces conditions qu'il est appliqué sur les tramways de Nice de la ligne Menton-Sospel.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On aura encore recours à cette excitation dans le cas d'équipements monophasés ou triphasés. Dans ces cas, les freins électromagnétiques ne seront en général employés que comme frein de secours, la batterie d'accumulateurs pouvant d'ailleurs être remplacée par un petit groupe moteur-générateur à courant continu, comme cela a été réalisé au chemin de fer à crémaillère à courants triphasés de la Jungfrau où les locomotives et les voitures de remorque sont munies de freins électromagnétiques sur rails, employés comme secours sur les sections à adhérence. Ces freins sont assez puissants pour déterminer seuls l'arrêt complet du convoi. Le groupe moteur-générateur est alimenté dans ce cas particulier, soit directement par la ligne, soit par le rotor d'un des moteurs de traction. (Voir plus loin, le schéma général (fig. 367) des connexions des locomotives de la Jungfrau.)

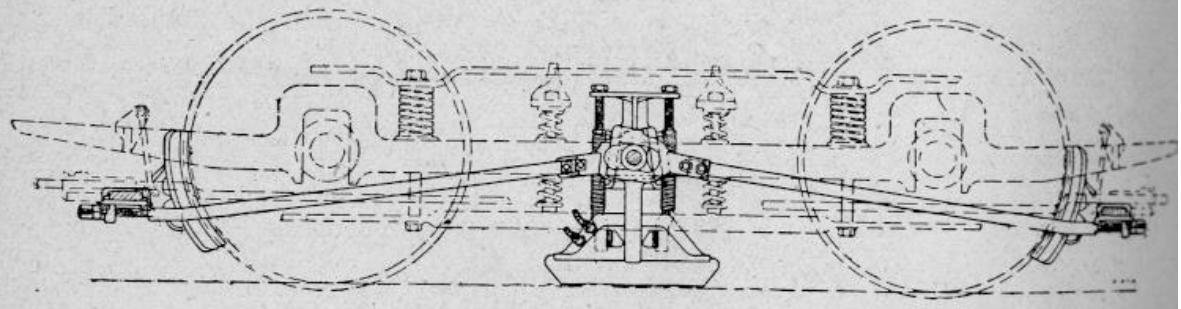


FIG. 341.

Frein sur rail Westinghouse pour remorque avec transmission aux sabots.

128. **Freins à patins sur rails pour voitures de remorque.** — Les freins précédents peuvent sans difficultés être employés sur des voitures de remorque : il suffit de les intercaler dans le circuit des freins des moteurs.

Afin de ne pas être forcé de se servir d'électro-aimants inutilement grands, en particulier, dans le cas de voitures lourdes, il est à recommander d'utiliser le poids adhérent même de la voiture. On y arrive dans la disposition Westinghouse, en transmettant horizontalement et mécaniquement la force de freinage des électros sur les sabots de frein des roues par l'intermédiaire de tringles, comme le montre la figure 341.

Par un choix approprié du ressort de la transmission, on peut empêcher d'une façon absolue le blocage des roues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

129. Application des freins électromagnétiques à patins sur rails. Calcul de la distance parcourue jusqu'à l'arrêt par une voiture.

Soient :

P Le poids en kilogrammes de la voiture ;

P′ Son poids d'inertie en kilogrammes ;

p La pression totale verticale en kilogrammes exercée sur les rails par les patins des freins électromagnétiques ;

f Le coefficient de frottement des roues sur les rails (soit, par exemple, $f = a = 0{,}14$) ;

f' Le coefficient de frottement des patins des freins sur les rails (soit, par exemple, $f = 0{,}15$) ;

i La pente sur laquelle descend la voiture (soit, par exemple, une pente de 5 p. 100, $i = 0{,}05$) ;

v_0 La vitesse en mètres-secondes au moment de l'application des freins.

En procédant, comme nous l'avons fait au début de ce chapitre pour déterminer les conditions d'arrêt d'une voiture freinée seulement par les sabots sur les roues, on voit que dans le cas actuel, l'équation différentielle du mouvement est :

$$\frac{P'}{g}\,dv = (P \sin \delta - F - pf')\,dt.$$

L'effort retardateur résultant de l'action des freins à patins étant évidemment pf' et de même signe que F.

Un calcul identique à celui donné en détail pour l'étude du cas ci-dessus rappelé, donne facilement pour l'expression de la distance cherchée :

$$X = \frac{P'}{P}\frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{1}{f - i + \frac{pf'}{P}} \text{ mètres.}$$

On observera que si on fait ici $p = o$, ce qui équivaut à supprimer le frein à patins, on retrouve la formule déjà établie.

En reprenant le même exemple que précédemment : P = 10.000 kilogrammes avec $\frac{P'}{P} = 1{,}10$, $f = a = 0{,}14$ (coefficient d'adhérence), une pente de 5 p. 100, c'est-à-dire $i = 0{,}05$ et $v_0 = 20$ kilom. heure, avec en outre $p = 5000$ kilogrammes (on suppose deux freins à patins donnant chacun 2.500 kilogrammes) et $f' = 0{,}15$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On trouve :

$$x = 1{,}10 \times \frac{\left(\frac{20}{3{,}6}\right)^2}{2 \times 9{,}81} \times \frac{1}{0{,}14 - 0{,}05 + \frac{5000 \times 0{,}15}{10.000}} = 10^{m},50 \text{ environ}$$

(au lieu de $19^{m},20$ précédemment trouvé, § 111).

Cas d'une automotrice et d'une remorque, l'automotrice étant supposée seule freinée. — Soient P, le poids en kilogrammes de la remorque; P'_1 son poids d'inertie en kilogrammes et r le coefficient global de résistance au roulement en palier et rapporté au kilogramme, soit $r = 0{,}01$ (ce qui correspond à 10 kilogrammes par tonne), les autres quantités pour l'automotrice étant celles du cas précédent.

L'équation différentielle du mouvement est alors :

$$\frac{P' + P'_1}{g} dv = \left[(P \sin \delta - F - pf') + (P_1 \sin \delta - P_1 r) \right] dt.,$$

laquelle donne finalement comme expression de la distance cherchée:

$$X = \frac{v_o^2}{2g} \cdot \frac{P' + P'_1}{P(f - i) + pf' - P_1(i - r)} \text{ mètres.}$$

De même que ci-dessus, si on fait ici $p = o$, on retrouve la formule déjà établie pour un tel train, mais sans freins à patins.

Nous rappellerons enfin, en passant et pour mémoire, la seconde méthode de calcul (§ 113) que nous avons employée pour établir les formules de parcours jusqu'à l'arrêt, soit d'une automotrice seule, soit d'une automotrice attelée d'une remorque, mais sans freins à patins; nous engageons le lecteur à l'appliquer à titre d'exercice aux deux cas qui viennent d'être étudiés.

130. **Avantages des freins électro-magnétiques.** — On peut les résumer ainsi :

Action immédiate du freinage, sûre et énergique à toute vitesse.

Pas d'à-coups sur les moteurs.

Grande puissance de freinage disponible.

Accroissement de l'adhérence du véhicule et pas de glissement de la voiture.

Economie de sable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Simplicité de construction et facilité d'adaptation aux châssis de tout genre.

Facilité de conduite.

Frais d'entretien minimes.

II. — Freinage électrique par les moteurs.

131. **Divers procédés.** — Le freinage électrique par les moteurs peut être réalisé par leur inversion de marche ou par leur fonctionnement en générateurs. Dans ce dernier cas, on peut faire débiter les moteurs sur des résistances appropriées réglables, réalisant un mode de *freinage continu réglable*, ou on peut les mettre en court-circuit franc, réalisant un mode de *freinage d'urgence*. Enfin, on peut, sous certaines conditions, les faire débiter sur le réseau, réalisant ainsi le *freinage par récupération*.

Nous allons examiner l'application du freinage électrique aux différents types de moteurs étudiés.

A. Courant continu.

132. **Freinage pour inversion de marche.** — C'est l'équivalent de la marche à contre-vapeur sur les locomotives. On inverse le couple moteur en inversant le courant dans l'inducteur ou l'induit. La f. é. m., développée par le moteur fonctionnant alors en dynamo, s'ajoute à la tension du réseau et tend à produire un courant exagéré, ce qui donne lieu à un arrêt trop violent, en même temps qu'on risque d'endommager le moteur, si l'on n'a soin d'intercaler dans le circuit une très forte résistance.

On sait que l'intensité absorbée par un moteur en marche est

$$I = \frac{U - E}{R}.$$

En fonctionnant en générateur, pour la marche arrière, il débitera un courant :

$$I' = \frac{U + E'}{R},$$

qui diffère de I d'une quantité voisine de $\frac{2U}{R}$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi, pour un moteur de 30 ampères normaux sous 500 V. et de résistance R = 1,3 ohm, on aurait, au moment de l'inversion :

$$I' = \frac{1,000}{1,3} = 770 \text{ ampères},$$

alors que la limite pratique pour ce moteur est d'environ 60 ampères.

Il faudra donc ajouter, au moment de l'inversion, une résistance de 15 à 20 ohms pour ramener le courant à 60 ampères; elle sera très volumineuse. En outre, ce rhéostat supplémentaire entraîne une dépense inutile d'énergie de :

$$500 \times I' \text{ joules par seconde.}$$

Il faut enfin remarquer que cette méthode n'est pas sûre parce qu'elle exige le contact du trolley sur la ligne et que toute rupture de ce contact la rend inefficace. De plus, la voiture, étant arrivée à l'arrêt, repart immédiatement en arrière, ce qui peut être la cause d'accidents.

Cette méthode ne doit donc être employée que dans des cas d'extrême urgence.

133. — **Freinage électrique par fonctionnement des moteurs en générateurs débitant sur résistances.** — Les inconvénients précédents disparaissent si on supprime au moment du freinage l'arrivée du courant de ligne, tout en fermant le moteur sur des résistances, lesquelles permettront d'éviter la production de courants exagérés et, en outre, de graduer l'action du frein.

Le moteur, dont l'induit se trouve mis en mouvement par l'essieu, devient générateur en s'excitant lui-même et débite son courant dans des résistances.

Soit ρ la résistance *totale* en circuit et E la f. é. m. du moteur fonctionnant en dynamo à l'instant t. L'énergie produite à ce moment est :

$$\int E\,I\,dt = \int E \cdot \frac{E}{\rho}\,dt = \frac{1}{\rho}\int E^2 dt,$$

et elle est transformée en chaleur dans les résistances. Elle est d'ailleurs empruntée toute entière à la force vive du véhicule, d'où action de freinage.

Cette méthode repose sur l'auto-excitation du moteur. Celle-ci se produit sans artifice spécial pour le moteur shunt, dont le champ induc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur reste fixe, mais avec le moteur-série, il n'en est pas de même. Si, le moteur étant disposé pour la marche normale en moteur, on fermait son circuit, le courant qu'il produirait dans ces conditions tendrait à détruire l'aimantation des inducteurs. Il faut donc avoir soin, ici, d'inverser en même temps les connexions entre l'induit et l'inducteur, tout comme pour le changement de marche.

Lorsqu'il s'agit d'un équipement à deux moteurs, les moteurs étant en parallèle (fig. 342), on peut se contenter, tout en coupant l'arrivée K du courant, d'inverser les connexions pour chaque moteur (fig. 343) entre son induit et ses inducteurs.

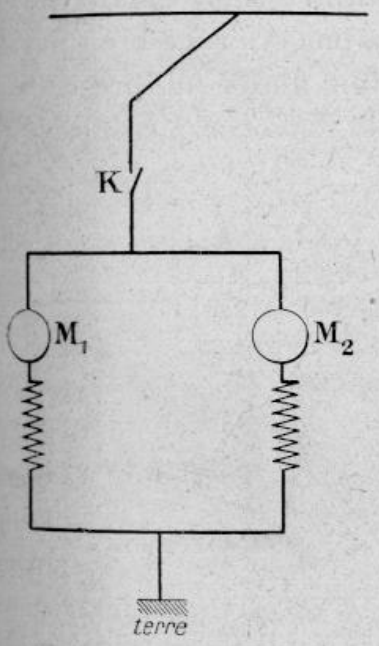


FIG. 342.

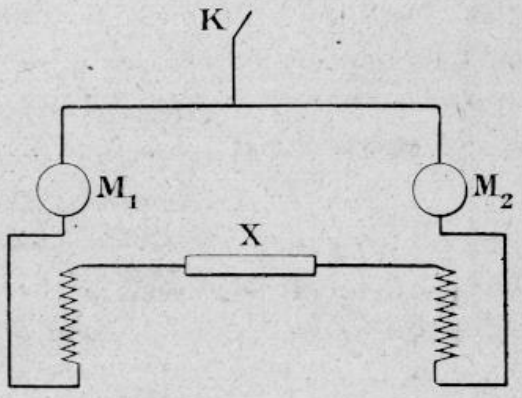


FIG. 343.

Dans ces conditions, les deux moteurs développent, par leur magnétisme rémanent, des f. é. m. opposées e, e'. Par suite de la petite différence qui existe toujours entre les champs magnétiques des deux moteurs, e et e' ne seront pas égales, soit $e' > e$. Il en résultera un petit courant dans le groupement en série qui sera formé, égal à

$$= \frac{e' - e}{X + 2R'}$$

X étant la résistance ajoutée dans le circuit.

Ce courant inversera la polarité du moteur le plus faible. A partir de ce moment, les moteurs s'amorceront rapidement et l'intensité du courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débité sur le circuit commun croîtra pour prendre une valeur égale à celle que donnerait chacun d'eux fermé isolément sur lui-même.

Cette méthode, dite de Short, présente deux inconvénients : si les moteurs sont bien construits, la différence $e' - e$ peut être très faible et alors les moteurs sont longs à s'amorcer, d'où résulte un freinage tardif. Enfin, en cas d'accident à un moteur, l'autre ne peut fonctionner puisque le circuit est commun.

On peut remédier à cet inconvénient en fermant séparément le circuit de chaque moteur sur des résistances; chaque moteur fait alors frein pour son propre compte.

Il est préférable et plus simple de faire simplement débiter les moteurs en parallèle sur une résistance commune X, réglable suivant le schéma ci-après (figure 344), avec emploi d'un fil d'équilibre entre les circuits des deux moteurs pour parer à une dissymétrie possible.

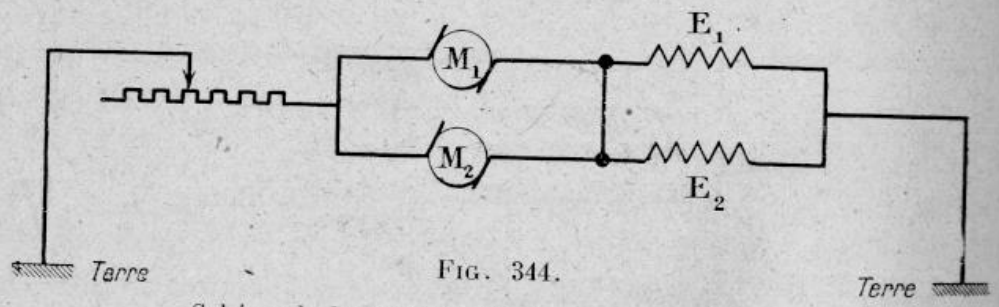


FIG. 344.

Schéma du fonctionnement des moteurs en freinage.

Il faut toutefois veiller, dans ce montage, à ce qu'il ne puisse se produire des courants de circulation locaux à travers les induits, par suite d'une dissymétrie exagérée des circuits, par exemple. De tels courants pourraient atteindre des valeurs dangereuses et ne produiraient, en outre, aucun effort de freinage supplémentaire, puisqu'ils ne passeraient pas dans les inducteurs. Il est d'ailleurs facile de se rendre compte si de tels courants se produisent, car ils passent forcément dans le fil d'équilibre. Or, théoriquement, celui-ci ne doit être parcouru par aucun courant. Pratiquement, il ne doit y circuler qu'un courant très faible, dû à la dissymétrie inévitable des deux circuits M_1E_1 et M_2E_2.

Il y a là un inconvénient auquel il remédié dans le montage représenté par le schéma ci-dessous (fig. 345), dans lequel les connexions entre induits et inducteurs sont croisées.

Ces deux derniers schémas sont ceux actuellement employés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

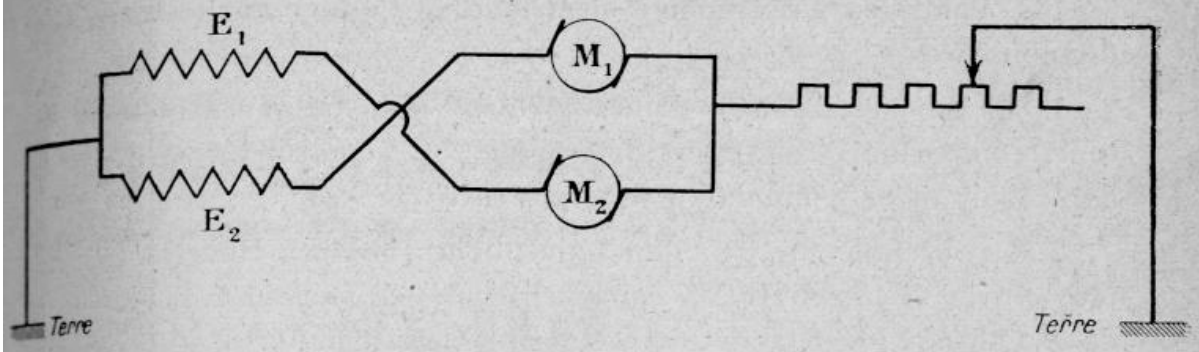


FIG. 345.

Schéma de freinage avec champs croisés.

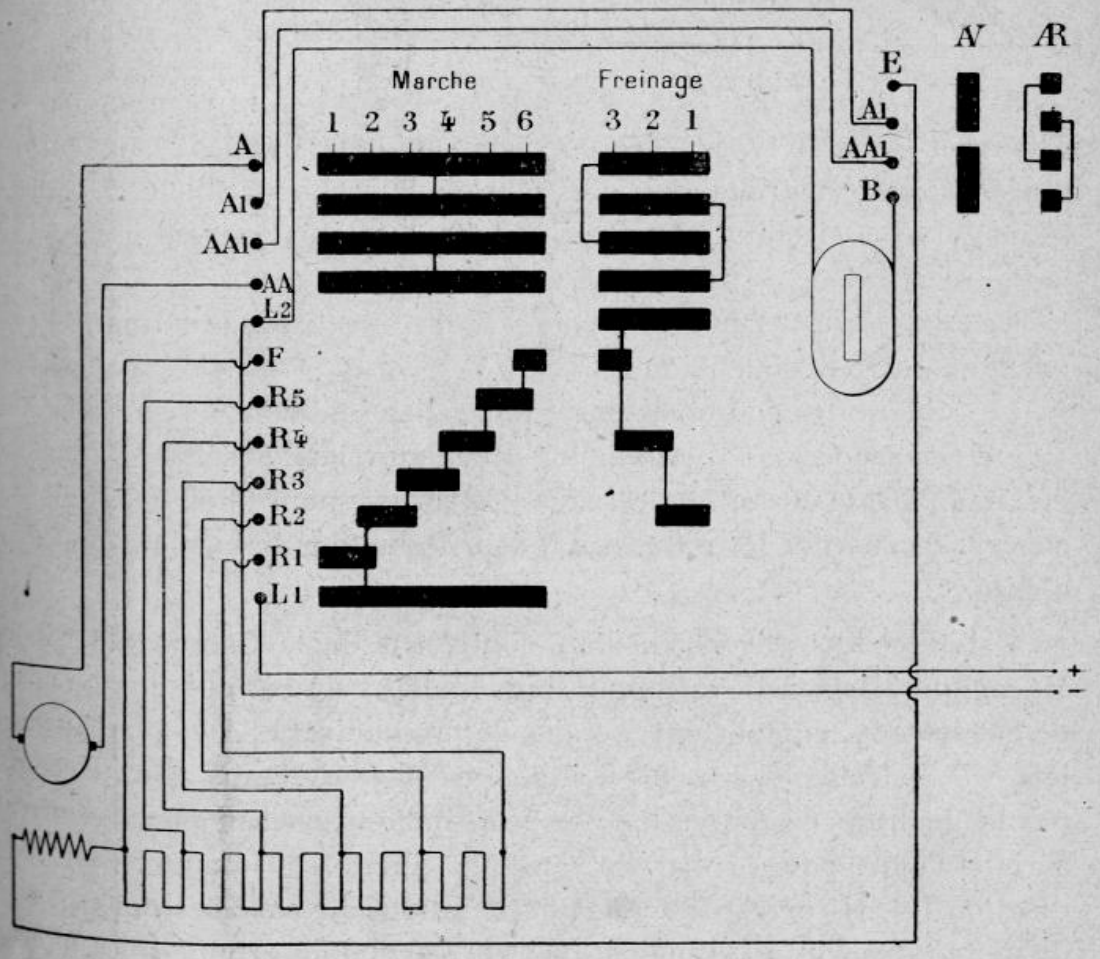


FIG. 346.

Schéma des connexions d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston à un moteur avec freinage sur résistances.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

134. **Contrôleurs à freinage électrique.** — Comme applications, nous donnons :

1° Le schéma (fig. 346) d'un contrôleur rhéostatique à un seul moteur, comportant trois crans de freinage. Ce contrôleur est dérivé du contrôleur précédemment vu des figures 33-35.

2° Le schéma (fig. 347) d'un contrôleur Thomson-Houston très employé, type B-13 (ou B-23), convenant à un équipement à deux moteurs de 40 chevaux (ou 60 chevaux). Ce contrôleur comporte cinq crans de marche en série, quatre de marche en parallèle et sept de freinage. Comme tous les contrôleurs de ce genre, il peut être employé en plus pour le freinage électro-magnétique. Les bobines des électros de ces freins sont représentées en B_1 et B_2 sur les schémas annexés à la figure.

Le circuit du freinage réalisé par ce contrôleur est conforme au schéma de la figure 344.

3° Le schéma (fig. 348) d'un équipement à contrôleurs modernes Thomson-Houston type B-302, pour deux moteurs de 60 chevaux, comportant 5 crans de marche-série, 3 crans de marche parallèle, 7 crans de freinage, avec circuit de freinage à champs croisés, suivant le schéma de la figure 345 (1).

Ce contrôleur permet l'emploi de freins électro-magnétiques et comporte en outre la connexion à pont.

Les différentes combinaisons qu'il réalise sont données sur la fig. 349.

On remarquera qu'il est en plus prévu un relais de sécurité à bobine à maxima dans le circuit de freinage. Ce relais a pour effet, en cas de surcharge, de shunter les inducteurs, d'où réduction immédiate du courant débité.

4° Le schéma (fig. 350) d'un contrôleur de la Compagnie Electro-Mécanique (Brown-Boveri) pour deux moteurs de 100 chevaux ou quatre de 50 chevaux, comportant 5 crans de marche-série, 4 de marche parallèle et 7 de freinage. En outre, il comprend deux crans pour le contrôle par le champ par suppression de spires inductrices, un pour la marche-série et l'autre pour la marche parallèle. Sur le schéma précédent, l'indication I + II correspond à la marche normale avec les deux groupes de moteurs en circuit, l'indication I correspond au groupe I des moteurs en circuit, le groupe II étant hors circuit, etc.

(1) Les figures (348), (349), (350) et (351), sont sur planches hors-texte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

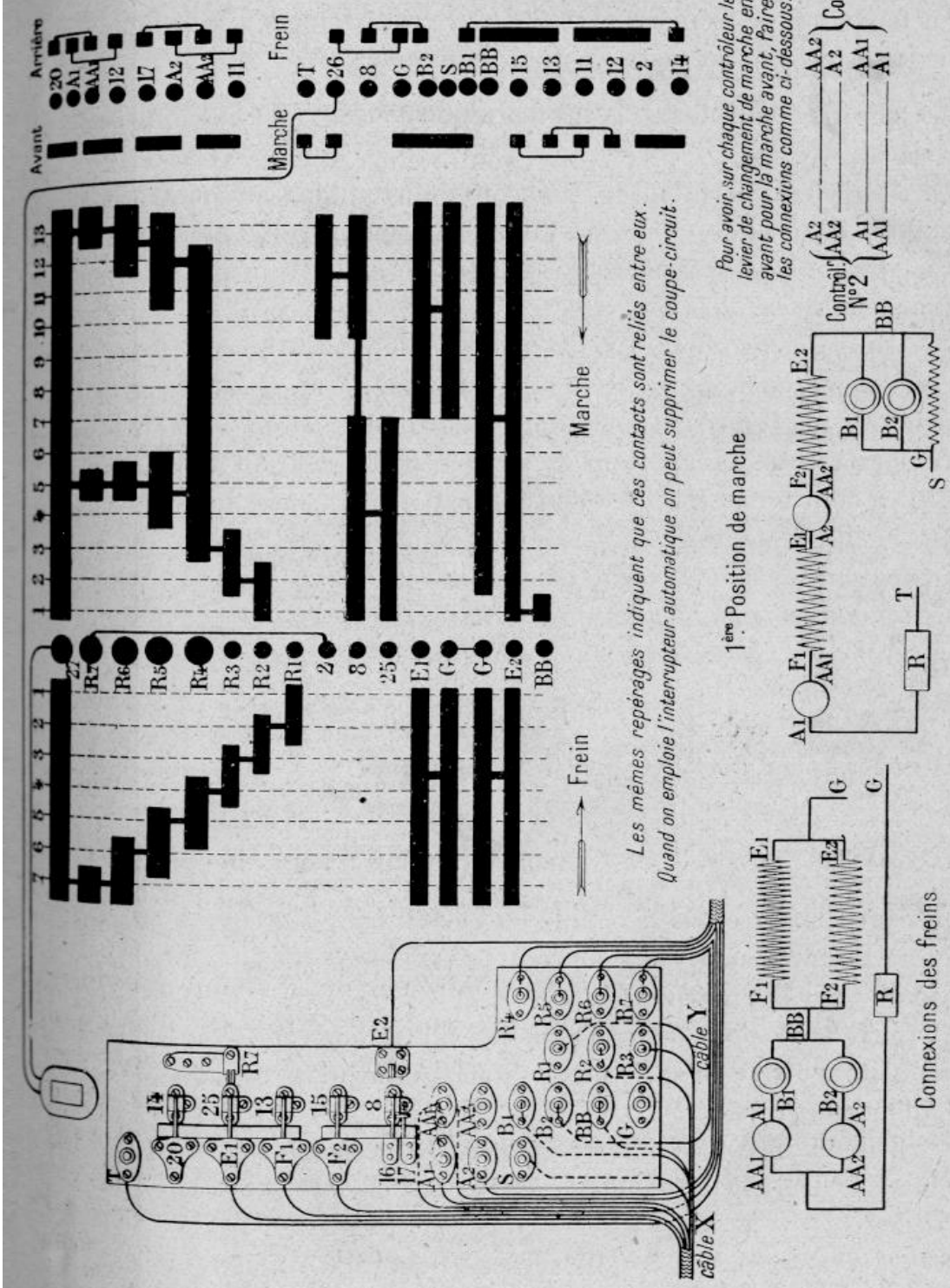


FIG. 347

Schéma d'un contrôleur Thomson-Houston, type B-13 à freinage rhéostatique et freinage électromagnétique.

Le circuit de freinage réalisé par ce contrôleur est conforme au schéma de la figure 345 avec champs croisés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

5° Le schéma (fig. 351) d'un contrôleur Westinghouse T-4, permettant les mêmes combinaisons que les précédentes : série-parallèle. contrôle par le champ et freinage avec champs croisés, mais avec, en plus, un fil d'équilibre entre les deux groupes de moteurs.

Certains contrôleurs à freinage permettent des combinaisons très variées.

Ainsi, les contrôleurs Thomson-Houston des automotrices à deux moteurs de la ligne Grenoble-Villars de Lans, permettent soit le freinage électrique seul, soit le freinage électrique et le freinage électro-magnétique combinés.

D'autres contrôleurs type B-234-A de la même ligne pour les voitures à quatre moteurs, permettent : *a*) le freinage sur résistances, *b*) le freinage sur résistances et le freinage électro-magnétique combinés, et *c*) le freinage électro-magnétique de secours par le courant de la ligne.

Les contrôleurs B-234-B des automotrices à quatre moteurs en service sur la ligne Menton-Sospel, de la Compagnie des Tramways de Nice, permettent les mêmes combinaisons que les précédents (B-234-A), mais le freinage électro-magnétique de secours est obtenu par l'emploi d'une batterie d'accumulateurs.

135. **Théorie du freinage électrique par fonctionnement des moteurs en générateurs débitant sur des résistances.** — Nous nous proposons d'analyser ce qui se produit dans le mode de freinage ci-dessus.

Nous admettrons que le champ magnétique du moteur fonctionnant en générateur reste sensiblement constant pendant toute la durée du freinage, de sorte que le couple retardateur produit par le moteur varie proportionnellement au courant. Cette hypothèse est suffisamment exacte pour la pratique.

Ceci étant, pour écrire l'équation du freinage, nous exprimerons que la puissance vive du système est égale au travail résistant nécessaire pour l'amener au repos.

Si donc ω est la vitesse angulaire du moteur, MK^2 son moment d'inertie, K étant le rayon de giration de l'induit, on a :

$$MK^2 \frac{d\omega}{dt} = \Sigma (- M\ F),$$

où $\Sigma(M_a F)$, c'est-à-dire la somme des moments des forces retardatrices, n'est autre que le couple retardateur électrique C du moteur, en *négli-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

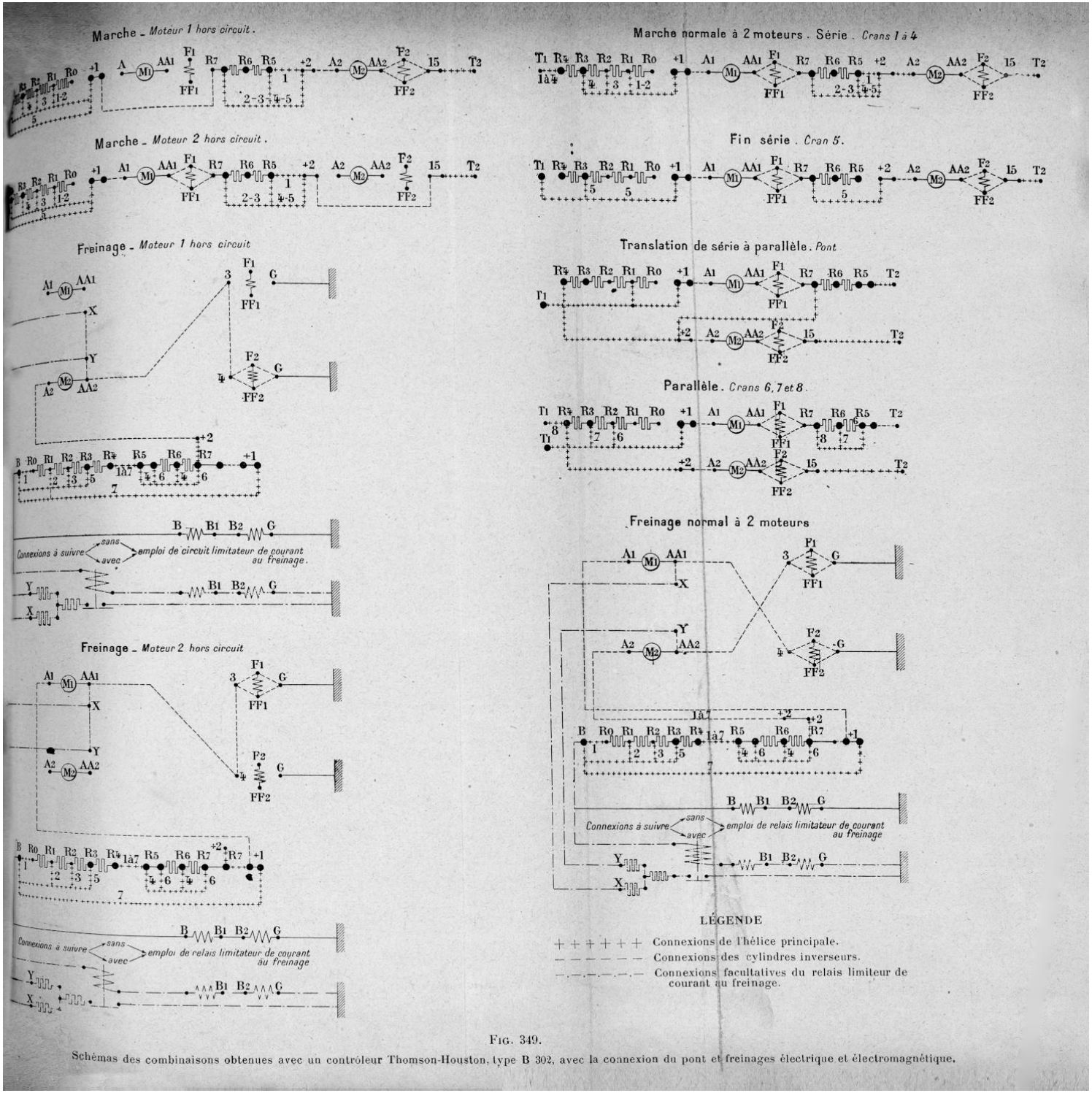
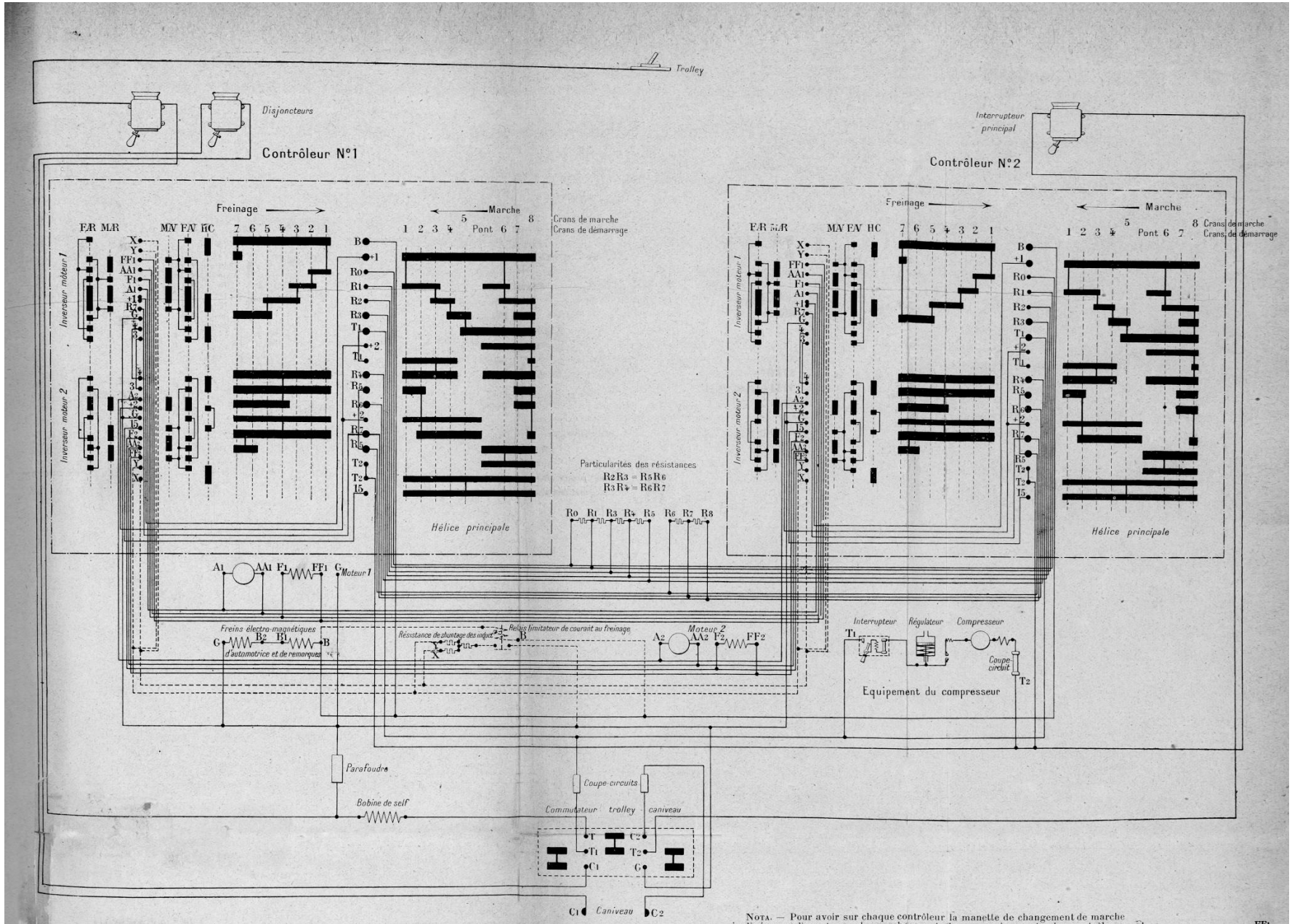


FIG. 349.

Schémas des combinaisons obtenues avec un contrôleur Thomson-Houston, type B 302, avec la connexion du pont et freinages électrique et électromagnétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



NOTA. — S'il n'y a pas de freins électromagnétiques, connecter les bornes B des contrôleurs à la terre. S'il y a des freins électromagnétiques sur l'automotrice et les remorques, brancher les deux coupleurs B_1 et B_2 respectivement entre eux. S'il n'y a des freins électromagnétiques que sur les remorques et non sur l'automotrice, le coupleur B_2 de l'automotrice est réuni directement à G et le coupleur B_1 à B. Dans le cas d'emploi du dispositif limiteur de courant à freinage par relais alimentant les inducteurs, suivre le tracé indiqué en éléments; l'entrée des freins n'est plus alors connectée à B, mais à la sortie du relais comme indiqué.

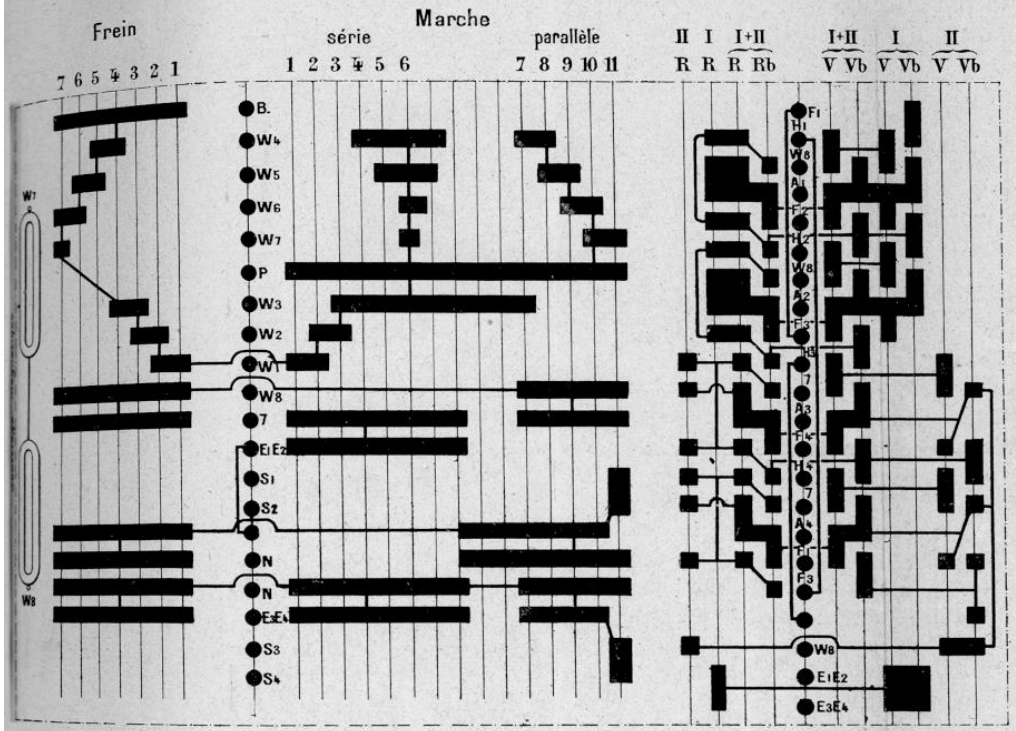
NOTA. — Pour avoir sur chaque contrôleur la manette de changement de marche inclinée vers l'avant pour la marche avant, les connexions entre les contrôleurs doivent être faites comme l'indique ce schéma, c'est-à dire : Contrôleur n° 1.....

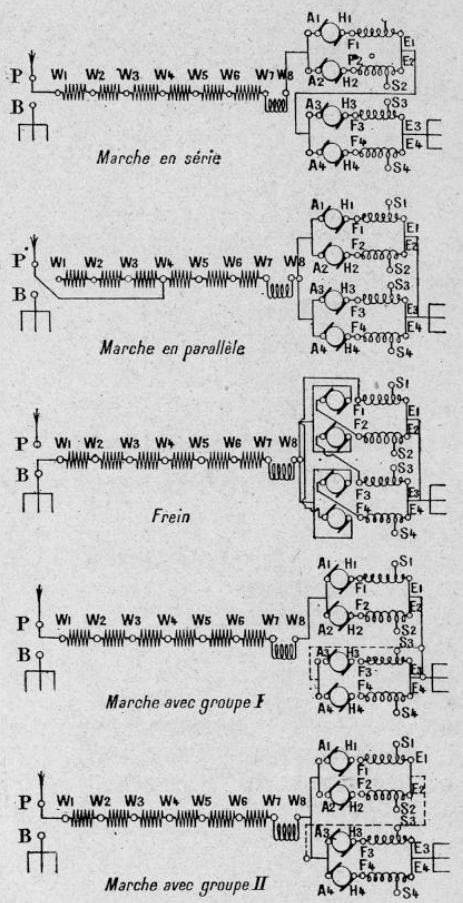


FIG. 348.

Schéma des connexions d'un équipement à contrôleurs Thomson-Houston, type B-302, à connexion à pont et à freinages électrique et électromagnétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires





LÉGENDE

V, avant.
R, arrière.
V*b*, frein avant.
V*b*, frein arrière.

NOTA. — Dans le contrôleur, les contacts ayant les mêmes désignation sont reliés entre eux.

FIG. 350.

Contrôleur Brown-Boveri, type G 6/0, pour 4 moteurs, avec freinage électrique et régulation par le champ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

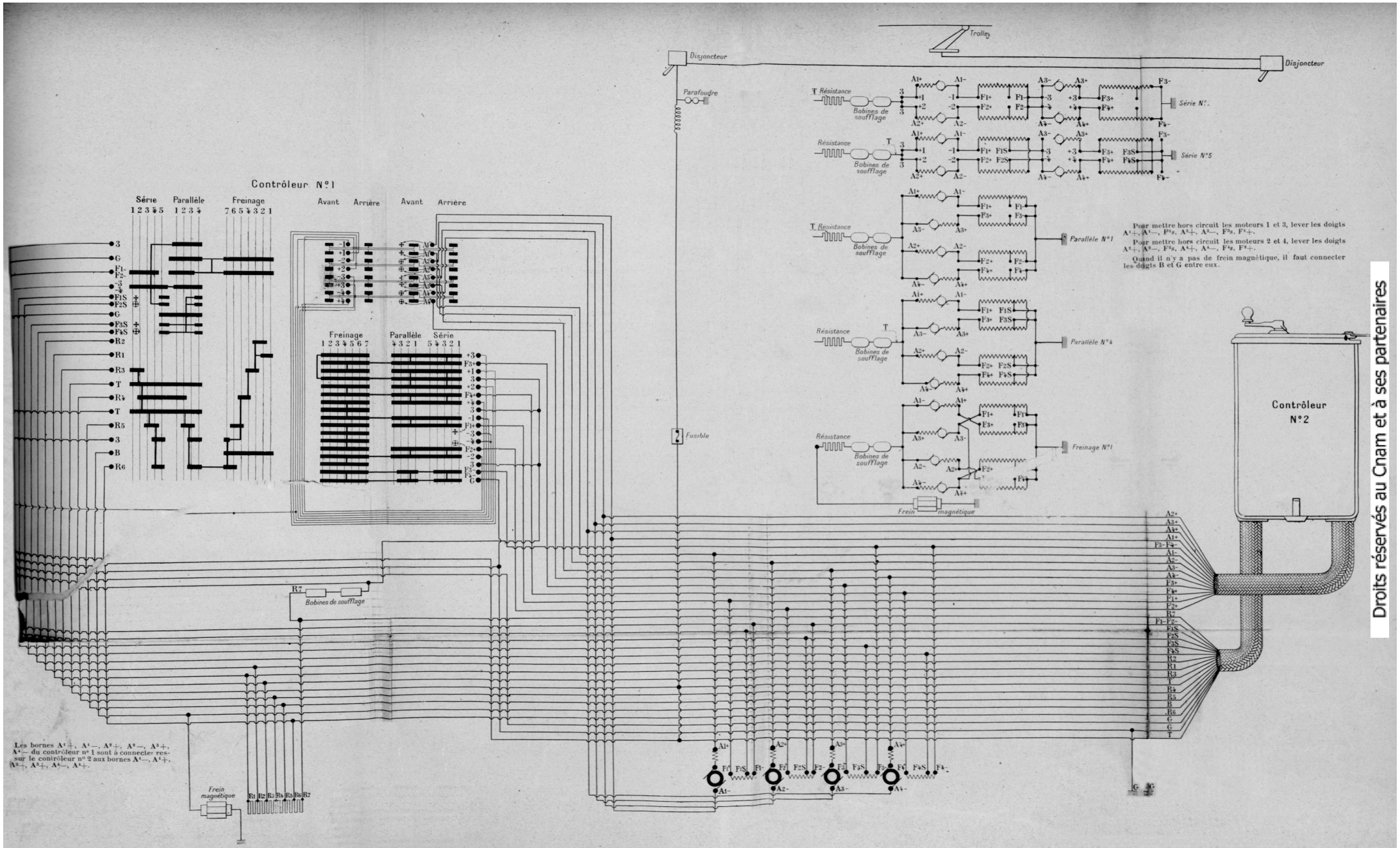


Fig. 351. — Contrôleur T. 4 S., de la Société anonyme Westinghouse, de Paris.

Schéma des connexions avec freinage rhéostatique, freinage magnétique et régulation par le champ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

geant les couples retardateurs produits par les frottements de toute nature.

On a donc :

$$MK^2 \frac{d\omega}{dt} = - C.$$

D'ailleurs,

$$EI = \omega C,$$

d'où :

$$C = \frac{EI}{\omega} = \frac{E^2}{\rho\omega},$$

en désignant par ρ la résistance *totale* du circuit de l'induit (moteurs et rhéostat), résistance que nous supposerons constante.

Or,

$$E = nN\Phi 10^{-8} = \frac{1}{2\pi}\omega N\Phi 10^{-8},$$

par suite,

$$C = \left(\frac{N\Phi 10^{-8}}{2\pi}\right)^2 \frac{\omega}{\rho},$$

ce que nous écrirons :

$C = H^2 \frac{\omega}{\rho}$, en posant, pour simplifier l'écriture : $H = \frac{N\Phi 10^{-8}}{2\pi}$.

L'équation du freinage s'écrit alors finalement :

$$MK^2 \frac{d\omega}{dt} = - H^2 \frac{\omega}{\rho}, \quad (1)$$

ou

$$\frac{d\omega}{\omega} = - \frac{H^2}{MK^2\rho} . dt,$$

d'où, en intégrant entre les limites o et t et appelant ω_o et ω les valeurs correspondantes de ω :

$$\text{Log} \frac{\omega}{\omega_o} = - \frac{H^2}{MK^2\rho} . t$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et finalement " e " étant la base des logarithmes népériens :

$$\omega = \omega_o \, e^{-\frac{H^2}{MK^2\rho} \cdot t},$$

ce qui est de forme exponentielle. On en conclut que :

La vitesse angulaire ω *ne s'annule jamais.*

L'amortissement est d'autant plus rapide que ρ est plus petit et H, c'est-à-dire Φ, plus grand.

La conclusion est différente *si on tient compte des résistances passives* jusqu'ici négligées.

Soit, en effet, P la somme de leurs moments, que nous supposerons constante, l'équation du freinage devient :

$$MK^2 \frac{d\omega}{dt} = -\left(\frac{H^2}{\rho}\omega + P\right)$$

et son intégration montre que $\omega = o$, *au bout d'un temps fini*.

En effet, l'équation précédente donne :

$$\frac{MK^2 d\omega}{\frac{H^2}{\rho}\omega + P} = -dt.$$

Son premier membre est de forme

$$\frac{a\,dx}{mx+n},$$

dont l'intégrale est :

$$\frac{a}{m} \operatorname{Log}(mx+n) + C^{te}.$$

Pour $t = o$, $\omega = \omega_o$, ce qui permet d'avoir la valeur de la constante. On a donc :

$$\frac{MK^2}{\frac{H^2}{\rho}} \operatorname{Log}\left(\frac{H^2}{\rho}\omega + P\right) + C^{te} = -t.$$

Faisons $t = o$, $\omega = \omega_o$. On a :

$$C^{te} = -\frac{MK^2}{\frac{H^2}{\rho}} \operatorname{Log}\left(\frac{H^2}{\rho}\omega_o + P\right).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'équation précédente devient alors :

$$(2) \qquad \frac{MK^2}{\frac{H^2}{\rho}}\left[\operatorname{Log}\left(\frac{H^2}{\rho}\omega + P\right) - \operatorname{Log}\left(\frac{H^2}{\rho}.\omega_o + P\right)\right] = -t,$$

d'où :

$$\operatorname{Log}\frac{\frac{H^2}{\rho}\omega + P}{\frac{H^2}{\rho}\omega_o + P} = -\frac{H^2}{MK^2\rho}.t,$$

et finalement :

$$\frac{H^2}{\rho}\omega + P = \left(\frac{H^2}{\rho}\omega_o + P\right)e - \frac{H^2}{MK^2\rho}.t.$$

Comme vérification, si on fait $P = o$, on retrouve bien l'équation du cas précédent.

On voit ici que $\omega = o$, au *bout d'un temps fini* " t_1 ", tel que :

$$t_1 = \frac{MK^2\rho}{H^2}\operatorname{Log}\frac{\frac{H^2}{\rho}\omega_o + P}{P},$$

valeur obtenue immédiatement en faisant $\omega = o$ dans l'équation (2).

Il est à remarquer que dans ces formules toutes les quantités peuvent être déterminées, ce qui permet d'obtenir un arrêt tout à fait précis dans des conditions voulues.

Cette question a son application non seulement pour déterminer le ralentissement des véhicules, mais pour le pointage des pièces d'artillerie, arrêts des monte-charges, ascenseurs, etc.....

Dans ce freinage électrique où les moteurs, fonctionnant en générateurs, débitent un courant d'autant plus grand qu'ils tournent plus vite, l'effort de freinage, considérable au commencement, va en diminuant progressivement avec la vitesse, et il ne peut y avoir calage des roues ou tout au moins il ne saurait être que partiel puisque la puissance EI, développée par le moteur, s'annule avec son mouvement ; les roues ne peuvent donc pas s'arrêter complètement, il y a ici une sorte de limitation automatique de l'effet du freinage, ce qui est une circonstance très heureuse. Le frein est en plus susceptible de graduation, par fermeture

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du moteur sur un rhéostat réglable et on diminue progressivement les résistances pour augmenter l'effort de freinage et le maintenir à une valeur raisonnable, malgré la diminution de vitesse du moteur.

Ce mode de freinage présente quelques inconvénients :

L'amorçage demande quelquefois un temps très appréciable.

Si les résistances sont trop fortes, l'amorçage est lent ou nul; si elles sont trop faibles, l'amorçage est brusque, il en résulte un choc brutal pour les voyageurs et le matériel, et il y a production de surtensions. Les roues commandent les moteurs dans le sens roue-pignon; le choc de l'arrêt, s'il y a choc, se répercute sur les engrenages et sur l'armature, ce qui peut les endommager assez rapidement.

On peut toutefois aisément éviter ces inconvénients et, en définitive, ce mode de freinage est éminemment pratique et sûr et est très employé, pas assez cependant, car certaines administrations sont encore rebelles à son utilisation, malgré les avantages incontestables qu'il présente sur tous les autres et qui ne sont plus à prouver.

Remarque. — Il est à noter que ce mode de freinage sur résistances, caractérisé par la mise hors-circuit des moteurs par rapport à la ligne, après inversion des connexions entre leur induit et leurs inducteurs et leur fermeture sur eux-mêmes avec insertion de résistances extérieures, ne s'applique qu'aux moteurs courant continu, les autres ne pouvant s'exciter eux-mêmes; observons d'ailleurs, en passant, que ce procédé s'appliquerait mal aux moteurs shunt, courant continu — non employés toutefois en traction — par suite du risque qu'il y aurait qu'ils ne se désamorcent si l'on réduisait trop la résistance en circuit avec l'induit.

136. **Résistances de freinage.** — Dans la plupart des cas, on emploiera comme résistances de freinage, celles de démarrage en les groupant d'une manière appropriée. Toutefois, il arrivera qu'en général la première résistance de freinage sera insuffisante, car avec une telle résistance, mise en circuit à la première touche de freinage, ou il se produira des surtensions exagérées, si la vitesse est trop élevée à ce moment, ou bien il arrivera que l'intensité du courant, sans atteindre en valeur absolue une valeur dangereuse, dépasse la valeur correspondant à l'effort de freinage maximum admis. Il faudra donc toujours vérifier qu'aucune de ces circonstances ne peut se produire. Si l'une d'elles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

se produisait, il faudrait adopter une résistance plus grande, en s'assurant toutefois que l'amorçage a bien lieu.

Comme surtension maxima, on admettra en général, suivant le type de moteur, une valeur de 25 à 50 p. 100, supérieure à la tension normale de service. Remarquons qu'à ce point de vue particulier, les moteurs à pôles de commutation sont avantageux.

En ce qui concerne l'effort de freinage maxima, fonction de la résistance maxima et aussi de la vitesse maxima admise, on ne dépasse guère 50 kilogrammes par tonne, ainsi que nous l'avons déjà vu (§ 111), afin de se tenir suffisamment éloigné des conditions limites d'adhérence.

Il y a dans ces déterminations un élément arbitraire servant de base et qui est la vitesse maxima à admettre pour le véhicule. Il suffira, en général, de prendre pour cette vitesse, celle atteinte par le véhicule à vide en palier et alignement droit.

Dans certains cas, il y aura lieu cependant de calculer directement les résistances de freinage en vue de satisfaire à des conditions particulières, par exemple d'obtenir sur la pente maxima d'un parcours donné une vitesse maxima donnée, quel que soit le tonnage des trains ou encore que la vitesse puisse toujours être maintenue entre deux limites données d'avance.

La solution de ces problèmes résulte immédiatement de l'étude suivante :

137. **Caractéristiques du fonctionnement d'une voiture en freinage électrique sur une pente donnée.** — Si une automotrice descend une pente d'inclinaison suffisante pour que l'accélération due à la pesanteur soit supérieure aux résistances à vaincre, les moteurs seront entraînés mécaniquement par l'essieu et seront susceptibles de produire de l'énergie électrique. En dissipant cette énergie dans des résistances, on produit un freinage continu. Il s'agit de régler ces résistances pour obtenir la régulation de la vitesse, c'est-à-dire pour obtenir sur la pente donnée une vitesse constante donnée. Le mode de freinage qui nous occupe résoud parfaitement le problème et on détermine facilement les conditions de fonctionnement des moteurs au moyen de leurs caractéristiques comme nous allons le voir.

On a là un freinage continu réglable d'un emploi très précieux sur les lignes à longues pentes.

Il s'agit, étant donnée la vitesse que l'on veut obtenir sur une pente

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donnée, de déterminer l'effort retardateur à produire, l'intensité du courant à faire débiter par les moteurs, fonctionnant en générateurs, enfin la valeur de la résistance à insérer dans leur circuit.

1° *Effort retardateur.* — Il est égal à l'effort moteur résultant de la gravité.

Soient : i, la pente en millimètres par mètre et r le coefficient global de traction rapporté à la tonne sur la voie considérée et que nous admettrons être le même, que les moteurs fonctionnent en moteurs ou en générateurs, et en outre constant.

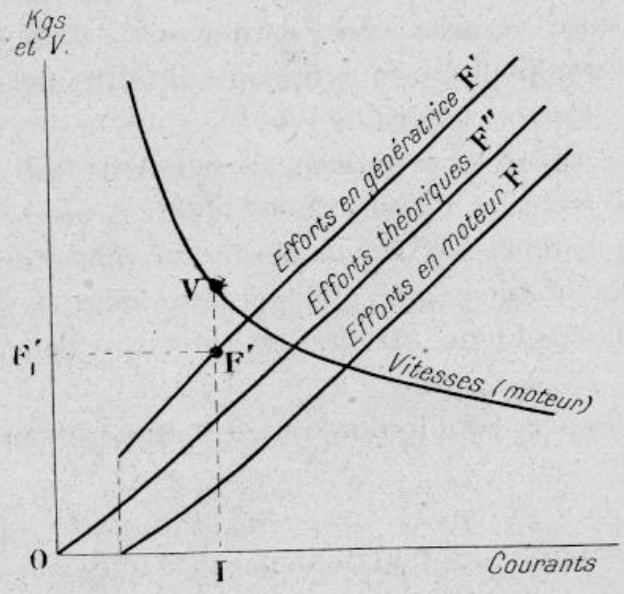


FIG. 352.

Soit enfin P en tonnes le poids du train.

L'effort total retardateur cherché est en kilogrammes :

$$F_1 = P\,(i - r),$$

c'est l'effort ou plutôt le travail correspondant qui doit être absorbé par les moteurs fonctionnant en générateurs. On en déduit l'effort par moteur F'_1.

2° *Intensité du courant débité.* — Ce courant est celui produisant un couple retardateur correspondant à l'effort F'_1 aux jantes.

On suppose connues les caractéristiques du moteur : vitesse V en kilom./heure et efforts F en kilogrammes à la jante (fig. 352).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S'il s'agissait d'un moteur sans pertes, les efforts théoriques F″ à la jante évalués en fonction de I seraient représentés par une courbe (sensiblement une droite), passant par l'origine, car on devrait avoir :

$$\frac{F''V}{3,6} = \frac{(U - RI)\,I}{9,81},$$

d'où :

$$F'' = \frac{(U - RI)\,I}{2,7\,V}.$$

On trace facilement la courbe des efforts théoriques F″ en fonction de I en s'aidant de celles des vitesses V.

Des deux courbes F et F″, on déduit facilement celle des efforts F′ correspondant à un courant débité I par les moteurs fonctionnant en générateurs, si on admet que dans les deux modes de fonctionnement les pertes dans les moteurs sont les mêmes pour un même courant et malgré les différences de vitesse correspondant aux deux régimes en question. Cette hypothèse est très suffisamment exacte en pratique. Dès lors, comme ces pertes (noyau et frottements divers) s'ajoutent à l'effort théorique F″ ci-dessus pour retarder la marche sur les pentes, c'est-à-dire dans le fonctionnement en générateur alors qu'elles se retranchent de cet effort F″ dans la marche en moteur, il suffit de reporter au-dessus de la courbe théorique F″ la différence F″ — F qui représente précisément ces pertes.

Les efforts F′ en générateur sont donc définis par l'équation :

$$F' = F'' + (F'' - F),$$

pour chaque valeur de l'intensité.

La courbe F′ étant tracée, il suffit de prendre sur cette courbe l'ordonnée $F' = F_1$, précédemment calculée, pour avoir en abscisse le courant cherché débité par un moteur fonctionnant en générateur et produisant un couple retardateur correspondant à F_1. Soit I, ce courant.

3° *Résistance à insérer dans le circuit des moteurs* :

Soit X, cette résistance et V la vitesse à maintenir constante sur la pente I donnée.

Soit R, la résistance totale intérieure du moteur.

La *f. é. m.*, induite par le moteur, fonctionnant en moteur, est :

(1)
$$E = U - RI.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S'il fonctionne en générateur, elle sera :

$$E' = (X + R)\,I. \tag{2}$$

Pour un véhicule équipé avec un seul moteur, si V et V′ sont les vitesses correspondant aux deux modes de fonctionnement précédents, on aura évidemment :

$$\frac{V}{V'} = \frac{E}{E'} = \frac{U - RI}{(X + R)\,I} \tag{3}$$

car le courant étant le même dans les deux cas, le flux inducteur est également le même.

Dans le cas où le véhicule serait équipé avec deux moteurs, ceux-ci étant en parallèle pour le freinage, la résistance X serait traversée par le courant total et on aurait :

$$\frac{V}{V'} = \frac{E}{E'} = \frac{U - \frac{R}{2}\cdot 2I}{\left(X + \frac{R}{2}\right)\cdot 2I},$$

c'est-à-dire :

$$\frac{V}{V'} = \frac{U - RI}{(2X + R)\,I}. \tag{4}$$

Or, V′ vitesse en générateur, n'est autre que V_o donné, $V' = V_o$. D'autre part, on connaît I d'après le calcul précédent et quant à V, c'est la valeur lue sur la courbe de vitesses en moteur et correspondant à I. L'équation précédente permet donc de calculer X, seule inconnue, soit :

$$X = \frac{1}{2}\left(\frac{V_o}{V} \times \frac{U - RI}{I} - R\right)$$

d'après l'équation (4).

Pratiquement, on termine le calcul en vérifiant que la résistance X à mettre en circuit peut dissiper sans échauffement exagéré la quantité de chaleur correspondant à $X \times (2I)^2$ watts pendant la durée du freinage dépendant de la longueur de la pente et de V_o. On choisit d'après des types de résistances de valeur ohmique X celle qui convient.

Remarque. — Ayant ainsi déterminé la résistance X à mettre en circuit pour obtenir une vitesse V_o sur une pente i, on peut se proposer de calculer la vitesse qui sera réalisée sur une pente i' pour la même résis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tance X en circuit. L'équation (4) résout évidemment le problème. X est ici connue. La seule inconnue est V′ et on a :

$$V' = \frac{(2X + R)\,I}{U - RI} \cdot V.$$

138. **Calcul des résistances de freinage, la vitesse devant rester dans des limites données.** — Nous nous proposons de calculer ces résistances, afin que la vitesse du véhicule puisse être maintenue entre des limites données a et b $(a < b)$.

Nous supposerons, pour simplifier, qu'il s'agit d'un véhicule à un seul moteur.

Remarquons d'abord que la formule établie ci-dessus :

$$\frac{V}{V'} = \frac{U - RI}{(X + R)\,I},$$

permet de construire en fonction de I, la courbe des vitesses d'un moteur fonctionnant en générateur, et pour une valeur quelconque de la résistance X.

Soit alors X_1, la résistance maxima admise, déterminée par tâtonnements, satisfaisant aux conditions précédemment indiquées. La courbe des vitesses correspondantes V_1, sera telle que :

$$\frac{V}{V_1} = \frac{U - RI}{(X_1 + R)\,I}.$$

Cette courbe est tracée sur la figure 353.

Traçons les deux horizontales des vitesses limites a et b. La partie utile de la courbe V_1 est le segment $A_1 B_1$, compris entre ces deux droites. Pour le point B_1 en particulier où la vitesse est " b ", on a :

(5) $$\frac{V}{b} = \frac{U - RI}{(X_1 + R)\,I},$$

et l'on cherche la résistance X_2 qui, sous le *même courant,* ramène la vitesse à la valeur " a ". correspondant au point A_2. On a pour ce point :

(6) $$\frac{V}{a} = \frac{U - RI}{(X_2 + R)\,I}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'où en divisant membre à membre, les formules 5 et 6 :

$$\frac{b}{a} = \frac{X_1 + R}{X_2 + R'}$$

expression qui permet de calculer X_2.

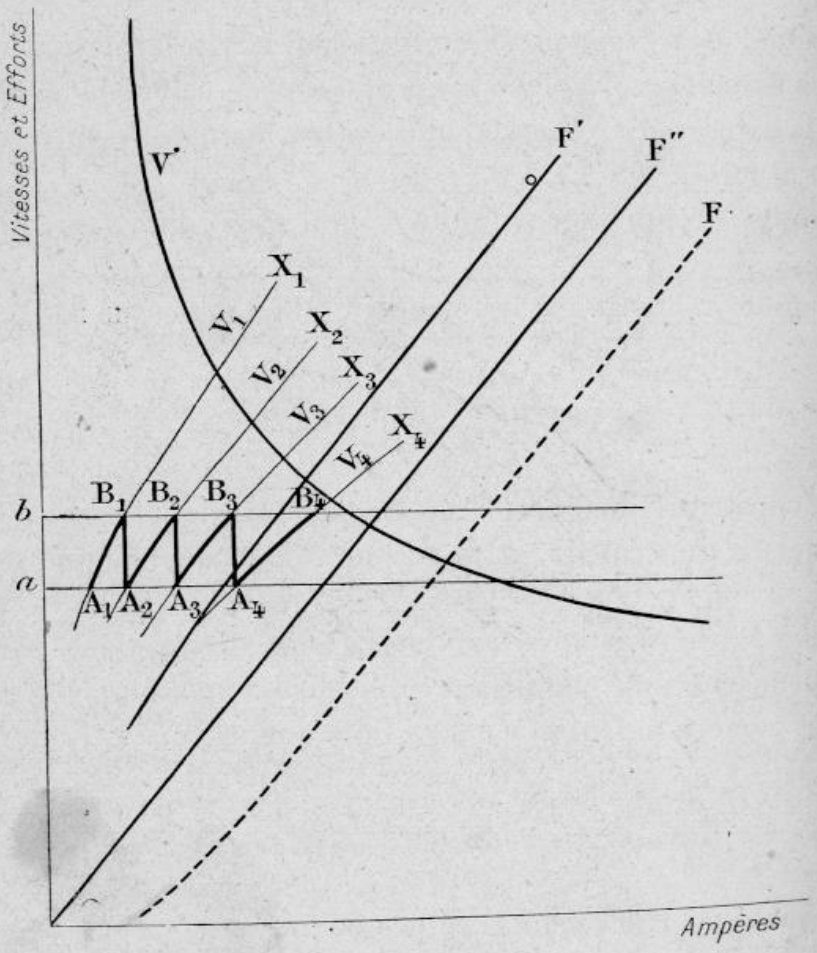


FIG. 353.

Epure de résistances de freinage.

On tracera la courbe des vitesses correspondant à X_2 et on calculera de même la résistance suivante X_3 pour laquelle on devra avoir :

$$\frac{b}{a} = \frac{X_2 + R}{X_3 + R'}$$

et ainsi de suite, de proche en proche.

La vitesse suit ainsi la ligne brisée $A_1\ B_1\ A_2\ B_2$, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

139. *Exemple.* **Epure du freinage.** — Soit une voiture à un seul moteur de résistance totale intérieure 0,7 ohm. Le poids de la voiture est 7 tonnes. La tension de service est 500 volts et les caractéristiques, vitesses V et efforts F, sont données (fig. 354). On construit comme il a été dit, les courbes F′ et F″.

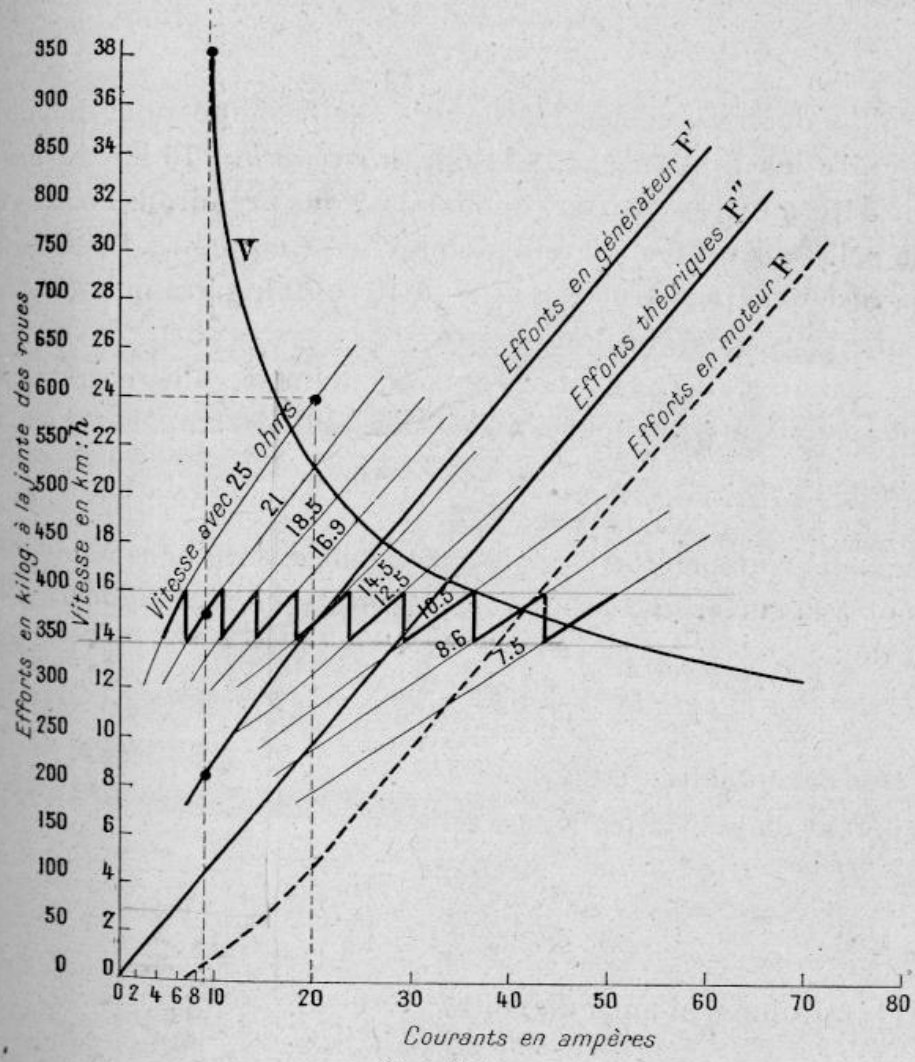


FIG. 354.

Etude graphique du freinage d'une voiture de 7 tonnes équipée avec un moteur-série.

1° Soit à maintenir une vitesse uniforme de 15 kilom.-heure, sur une pente de 40 millimètres par mètre.

L'effort accélérateur F'_1 dû à la pesanteur sur cette pente est :

$$F'_1 = 7\ (40 - 10) = 210 \text{ kilogrammes},$$

en admettant comme coefficient global de traction en palier 10 kilogrammes par tonne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En portant sur la courbe F′ l'ordonnée 210, on obtient comme valeur du courant débité 9 ampères, auquel correspondrait en moteur une vitesse de 38 kilom.-heures.

La résistance à mettre en circuit est (3) :

$$X = \frac{1}{9} \times \frac{15}{38} (500 - 0{,}7 \times 9) - 0{,}7 = 21 \text{ ohms.}$$

2° Soit à déterminer les résistances de freinage pour maintenir la vitesse entre les limites $a = 14$ kilom.-heure et $b = 16$ kilom.-heures.

Pour déterminer la résistance maxima, nous prendrons comme vitesse maxima celle correspondant à la pleine vitesse en palier. Dans ces conditions, la résistance à la traction est $7 \times 10 = 70$ kilogrammes, correspondant à une vitesse de 24 kilom.-heure.

Soit 25 ohms, la résistance maxima admise, elle correspond à la vitesse de 24 kilomètres-heure, à un courant de 20 ampères et à un effort résistant de 370 kilogrammes, soit $\frac{370}{7} = 53$ kilogrammes par tonne environ, valeur un peu forte, mais cependant encore acceptable.

Quant à la surtension produite à la vitesse de 24 kilomètres-heure, elle est de :

$$E' = (25 + 0{,}7) \times 20 = 514 \text{ volts,}$$

valeur très acceptable.

Ceci étant, la résistance X_2 est telle que :

$$\frac{0{,}7 + 25}{0{,}7 + X_2} = \frac{16}{14},$$

d'où $X_2 = 21$ ohms, et ainsi de suite.

140. Freinage par mise des moteurs en court-circuit franc. — Si dans le mode de freinage précédent, on supprime les résistances pour mettre les moteurs en court-circuit franc sur eux-mêmes, on réalise ce nouveau mode de freinage comme cas particulier du précédent.

Le mode d'action des moteurs est le même que ci-dessus, mais il est bien évident que ce freinage ne saurait être employé que pendant un temps très court. C'est un *freinage d'urgence* et, à ce titre, il est d'un emploi très pratique et est à recommander.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La plupart des contrôleurs modernes sont prévus en vue de la réalisation de ce freinage s'ils ne permettent pas le freinage continu et réglable, qui est surtout intéressant dans le cas de parcours comprenant de longues déclivités.

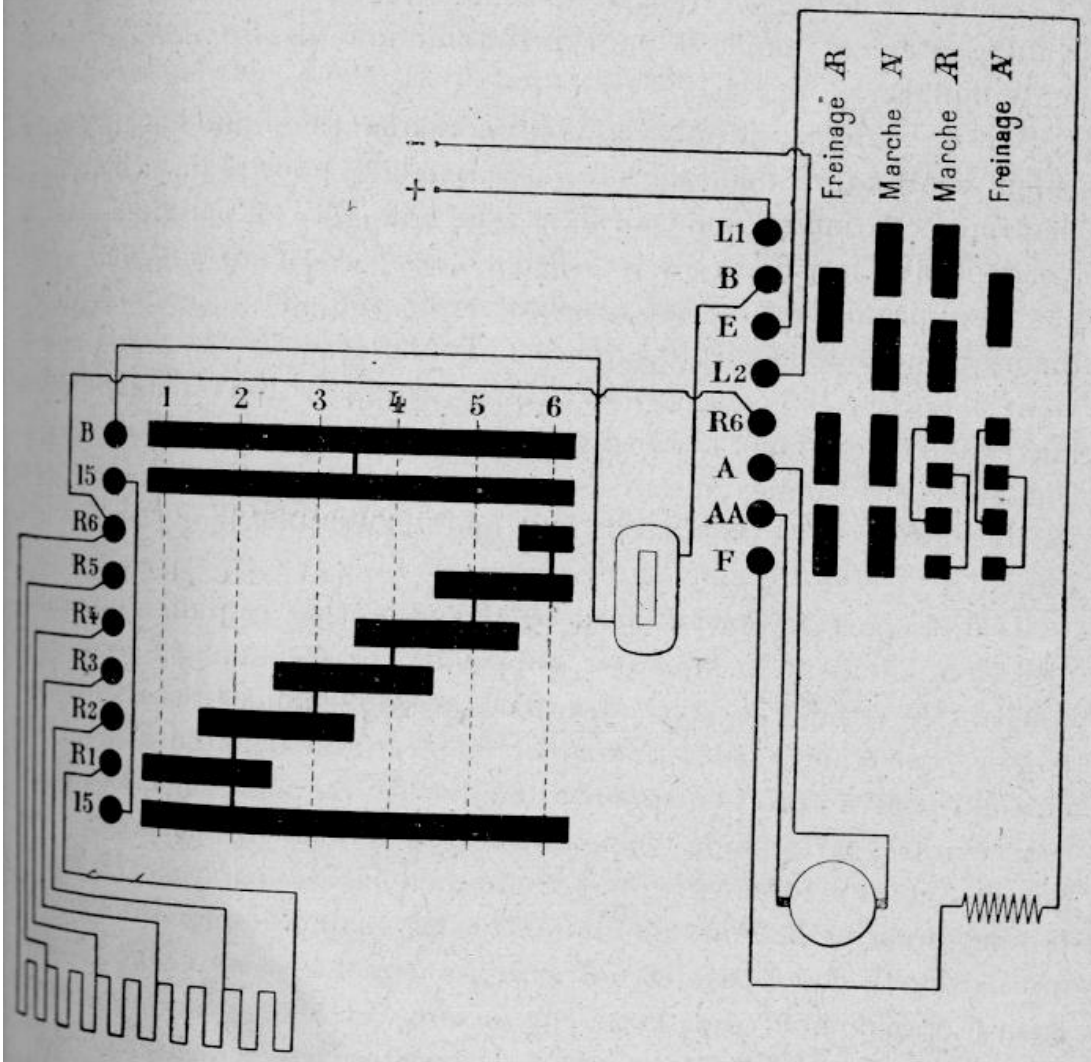


FIG. 355.

Schéma d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston avec freinage de secours par mise du moteur en court-circuit.

Nous avons donné antérieurement divers schémas de contrôleurs série-parallèle qui comportaient l'application de ce mode de freinage (fig. 41 et 47). Nous donnons en outre ici le schéma (fig. 355) d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston pour un moteur, dérivé de celui des figures 33 et 35, mais comportant ce freinage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

141. **Freinage par récupération.** — On se propose ici, au lieu de dissiper dans des résistances, l'énergie électrique produite par les moteurs, de la renvoyer à la ligne d'alimentation pour aider à la propulsion d'autres trains en l'ajoutant à celle produite par les stations génératrices.

Comme le mode de freinage que nous venons d'étudier, celui-ci est avantageusement employé pour maintenir une vitesse donnée sur une pente donnée.

Soit un moteur courant continu fonctionnant comme dans le cas précédent, c'est-à-dire débitant sur des résistances pour réaliser le freinage électrique continu réglable, si on le relie à la ligne en parallèle avec ces résistances *en supposant que la tension à ses bornes soit suffisante*, puisqu'on supprime ensuite ces résistances, on voit que le moteur renvoie théoriquement de l'énergie à la ligne. Toutefois, si la *f. é. m.* du moteur vient à baisser, le courant se renverse et on se trouve dans le cas de l'inversion de marche : la voiture s'arrête, puis repart en arrière si on ne coupe pas les connexions. Il est ainsi essentiel pour récupérer que la tension aux bornes du moteur soit maintenue supérieure à celle de la ligne.

D'autre part, la tension de la ligne au point de captation du courant est essentiellement variable. Or, supposons qu'elle vienne à décroître, le courant de récupération croîtra, d'où accroissement du champ du moteur, ce qui tendra encore à amener un accroissement du courant produit qui pourra ainsi facilement atteindre des valeurs exagérées. Supposons d'autre part que la tension de la ligne croisse soudainement après que le moteur a commencé de fonctionner en récupération. Le courant produit diminuera, d'où une diminution du champ du moteur et nouvelle diminution du courant, lequel sera finalement renversé pour croître ensuite rapidement dans ce sens inversé et il est alors susceptible d'atteindre des valeurs excessives de court-circuit, car la tension produite par le moteur s'ajoutera à celle de la ligne.

De tout ceci, il résulte que le moteur série ordinaire ne peut pas être employé sous sa forme normale pour récupérer, car, tel qu'il est construit, ce moteur ne peut pas produire une *f. é. m.* suffisante pour surmonter la tension de la ligne.

On est ainsi amené à envisager l'emploi d'une excitation séparée pour surexciter les moteurs dans le fonctionnement en récupération, ce qui conduit naturellement à l'installation sur la locomotive d'une machine supplémentaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais il se présente ici des difficultés particulières inhérentes à un service de traction.

Une locomotive fonctionnant en récupération n'est, en effet, en définitive, autre chose qu'une sous-station se déplaçant entre les sous-stations fixes et fonctionnant en parallèle avec celles-ci. Ces dernières fixent le voltage à la ligne et la locomotive doit produire ce voltage plus la chute de tension due au retour du courant aux barres omnibus. Si l'énergie récupérée alimente une autre locomotive, la tension à laquelle cette énergie doit être produite dépend de la chute de tension correspondant au courant pris aux sous-stations par les locomotives ne fonctionnant pas en récupération. Il est d'ailleurs possible pour un train descendant et récupérant, de faire mouvoir un train plus léger voisin montant, toute l'énergie produite passant par les barres omnibus d'une sous-station, mais sans que cette sous-station fournisse réellement de l'énergie. Dans ce cas, les groupes générateurs de la sous-station fixent simplement la tension du trolley.

Tout système de récupération doit ainsi tenir compte des mouvements du train récupérant et des autres trains, dont les uns peuvent être en pleine marche et les autres démarrer, des variations du profil de la ligne, d'où variations de la charge sur la ligne, de la distance variable du train récupérant aux sous-stations, etc., toutes circonstances qui se traduisent par de grandes et rapides variations de la tension de la ligne à l'endroit où le train récupérant se trouve à chaque instant. De là il résulte que les moteurs fonctionnant en générateurs doivent produire du courant sous une tension variable à chaque instant, cette tension devant, *du seul fait* que la locomotive s'éloigne ou s'approche d'une sous-station, croître ou décroître, l'effort de freinage ainsi que la vitesse étant supposés constants.

En définitive, les principales conditions auxquelles un système de récupération doit satisfaire, peuvent être formulées ainsi :

1° Éviter la production de courants d'armature trop intenses, surtout aux grandes vitesses. Il est à remarquer en effet, que le couple de freinage étant proportionnel au produit du courant d'armature et du champ inducteur, il est évident qu'aux grandes vitesses pour lesquelles le champ est faible, le courant d'armature sera relativement important pour un effort de freinage appréciable.

Ces courants d'armature sont, en outre, sujets à de brusques varia-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions, dont la cause principale réside dans les brusques variations de tension à la ligne dues à des démarrages voisins par exemple. Une autre cause peut être un réglage insuffisamment progressif de l'excitation du moteur. Il faudra donc un assez grand nombre de crans au rhéostat de réglage à moins que le système ne tienne compte automatiquement de cette circonstance.

Au point de vue qui nous occupe, les moteurs à pôles de commutation sont particulièrement avantageux, et, en fait, l'avènement de ces moteurs a beaucoup aidé à la solution du problème.

2° Dans le cas où pour le fonctionnement en récupération il sera nécessaire de séparer d'abord le moteur de la ligne pour le remettre en circuit ensuite, il sera nécessaire qu'à ce moment la tension produite à ses bornes ne soit que très peu supérieure à celle de la ligne.

3° L'énergie récupérée doit provenir, par parts aussi égales que possible, de chacun des moteurs de l'équipement.

4° L'effort de freinage ne doit pas décroître d'une manière trop sensible, quand la vitesse croît et croître d'une manière trop sensible quand la vitesse décroît. D'autre part, de brusques variations de cet effort doivent être évitées en cas de variations dans la tension de la ligne.

5° Enfin, les moteurs ne doivent pas produire de surtensions exagérées en cas d'interruption du courant de ligne. Or, la tension produite, n'étant plus alors limitée par celle de la ligne, tend à croître jusqu'à ce que la saturation soit atteinte et comme les moteurs sont toujours assez loin de la saturation aux grandes vitesses quand ils fonctionnent en générateurs, cette tension atteint facilement deux à trois fois la valeur normale, ce qui peut amener de violents crachements et même des ruptures d'isolants.

Il est bien évident que tout système de contrôle avec récupération doit tenir compte automatiquement de toutes ces nécessités.

On voit, par ce qui précède, que le problème est en réalité extrêmement complexe et, en fait, jusque récemment, la récupération en courant continu n'a pas été réalisée en traction. Les divers systèmes qui ont été successivement essayés, comportaient l'emploi de combinaisons d'enroulements shunt et série, mais aucun d'eux n'a été réellement mis en exploitation. Nous nous bornerons à examiner celui en usage sur la seule

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ligne où le freinage par récupération fonctionne en exploitation normale, celle du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul à 3000 volts et aussi le système de traction auto-régulateur à récupération dit système S. T. A. R. des Ateliers de Constructions Électriques du Nord et de l'Est, essayé par la Compagnie du Métropolitain de Paris en 1913, et que nous avons déjà mentionné au Chapitre V, § 54, à propos des méthodes de régulation de la marche des automotrices. Ce dernier système fait, dans son ensemble, l'objet d'un chapitre annexe au Chapitre XIII.

142. **Fonctionnement en récupération des locomotives du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul.**

a) Locomotives à huit moteurs de la General Electric (Locomotives, type 1915). — Le schéma de principe du fonctionnement en récupération des moteurs de ces locomotives est le suivant (fig. 356) :

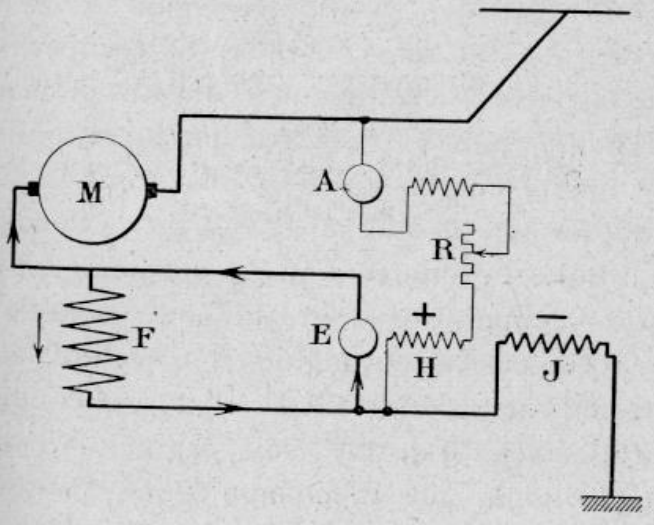


FIG. 356.

Schéma de principe du fonctionnement en récupération.

Il est fait emploi d'un petit groupe moteur-générateur A E, dont la génératrice E qui constitue l'excitatrice du moteur d'essieu M est branchée en dérivation aux bornes de l'enroulement série F du moteur. Cette excitatrice est à enroulement compound différentiel pendant la récupération et c'est là la caractéristique essentielle du système. Nous verrons plus loin son action.

Si le voltage de l'excitatrice est plus grand que la chute ohmique à travers l'enroulement série, le courant qu'elle débite passera dans ces

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

enroulements en s'ajoutant au courant venant du trolley, pendant le fonctionnement des moteurs en moteurs. Comme la vitesse ne change pas pratiquement, la *f. e. m.* des moteurs croîtra et ceci à peu près en proportion du courant ainsi ajouté. Si, par suite, l'excitation des moteurs est suffisamment renforcée, cette *f. e. m.* deviendra plus grande que la tension du trolley, le courant à travers les moteurs sera inversé, c'est-à-dire qu'il sera dans le sens rails-trolley et le système fonctionnera en récupération.

Remarquons que si, au moment où on établit les connexions nécessaires au fonctionnement en récupération, le voltage de l'excitatrice est plus petit que la chute ohmique à travers l'enroulement série, une portion du courant de cet enroulement passera par l'induit de l'excitatrice qui jouera alors le rôle d'un shunt. Il en résultera une diminution du flux inducteur des moteurs d'où un accroissement de vitesse de ceux-ci et par suite un accroissement de leur *f. é. m.*, ce qui rétablira l'équilibre avec la tension du trolley.

Lorsque le courant est renversé pour la récupération, le courant d'induit de l'excitatrice est la somme des courants de l'enroulement série et du courant d'induit du moteur, et, puisque le couple de freinage produit est proportionnel à cette somme, on voit que la puissance de freinage peut être réglée en agissant sur le voltage de l'excitatrice.

Nous avons dit que l'excitatrice était à enroulement compound différentiel pendant la récupération. Pendant cette période, son excitation série J est parcourue par le courant de récupération, lequel agit en sens opposé de celui de l'excitation shunt H. Dans ces conditions, si le courant de récupération tend à croître, soit par suite d'une baisse de tension sur la ligne, soit par suite de changements effectués dans le circuit de contrôle, cet accroissement provoquera une diminution de la tension de l'excitatrice, d'où il résultera une diminution correspondante du champ du moteur M fonctionnant en générateur, laquelle contrebalancera toute tendance à un nouvel accroissement du courant de récupération.

D'autre part, tout accroissement de la tension de la ligne est suivi d'un accroissement proportionnel du voltage d'excitation du moteur M.

La régulation de l'excitation du moteur M. est ainsi automatique suivant les variations de la tension à la ligne.

Nous avons vu que dans ce système, le courant de l'induit de l'excitatrice est la somme du courant d'excitation et du courant de récupé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ration du moteur M. Ceci conduit à une excitatrice relativement importante avec un collecteur également important.

Un avantage intéressant de ce système est qu'il évite la nécessité de séparer le moteur de la ligne pour le remettre en circuit lors de son fonctionnement en générateur. En effet, ici, le moteur reste relié à la ligne de la façon normale et l'excitatrice est simplement connectée au moment opportun, de manière à shunter l'enroulement série du moteur. Son excitation est alors augmentée jusqu'à ce que la tension produite soit suffisante pour surmonter celle de la ligne. La récupération se produit alors automatiquement. Ceci nécessite la manipulation de deux manettes séparées de contrôle.

Le système est appliqué comme suit aux locomotives, 1er type du Milwaukee, lesquelles comportent, comme nous l'avons déjà vu, deux unités, chacune étant à 4 moteurs à engrenages, de 430 chevaux, groupés par deux en séries, sous la tension totale 3000 volts.

Le schéma simplifié des connexions est donné figure 357.

L'excitatrice est à double induit, chaque induit étant connecté aux bornes extrêmes des enroulements série de chaque groupe de deux moteurs. Elle est entraînée par un petit moteur alimenté directement sous 3000 volts, qui entraîne en même temps le ventilateur des moteurs et une petite dynamo à 125 volts pour les circuits auxiliaires contrôle, éclairage, etc...

L'excitation shunt du schéma de principe de la figure 356 est, en outre, remplacée ici par une excitation indépendante réglable, alimentée par le circuit à 125 volts.

Le réglage du voltage de l'excitatrice est obtenu au moyen d'un relais R., dont le fonctionnement est sous la commande d'un petit contrôleur dit de récupération manœuvré par le wattman.

Ce relais a un double enroulement : un en série avec l'induit de l'excitatrice, l'autre est une bobine de tension alimentée sous une tension réglable par le petit contrôleur. Le noyau de ce relais agit sur une armature maintenue normalement par un ressort antagoniste convenablement réglé. Cette armature, qui est à double contact, permet de faire passer un courant dérivé du circuit auxiliaire à 125 volts dans l'une ou l'autre des deux bobines d'un embrayage magnétique, ce qui détermine la rotation dans un sens ou dans l'autre d'un petit moteur qui commande le rhéostat de l'excitation séparée de l'excitatrice et qui tourne pendant tout le temps de la récupération.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

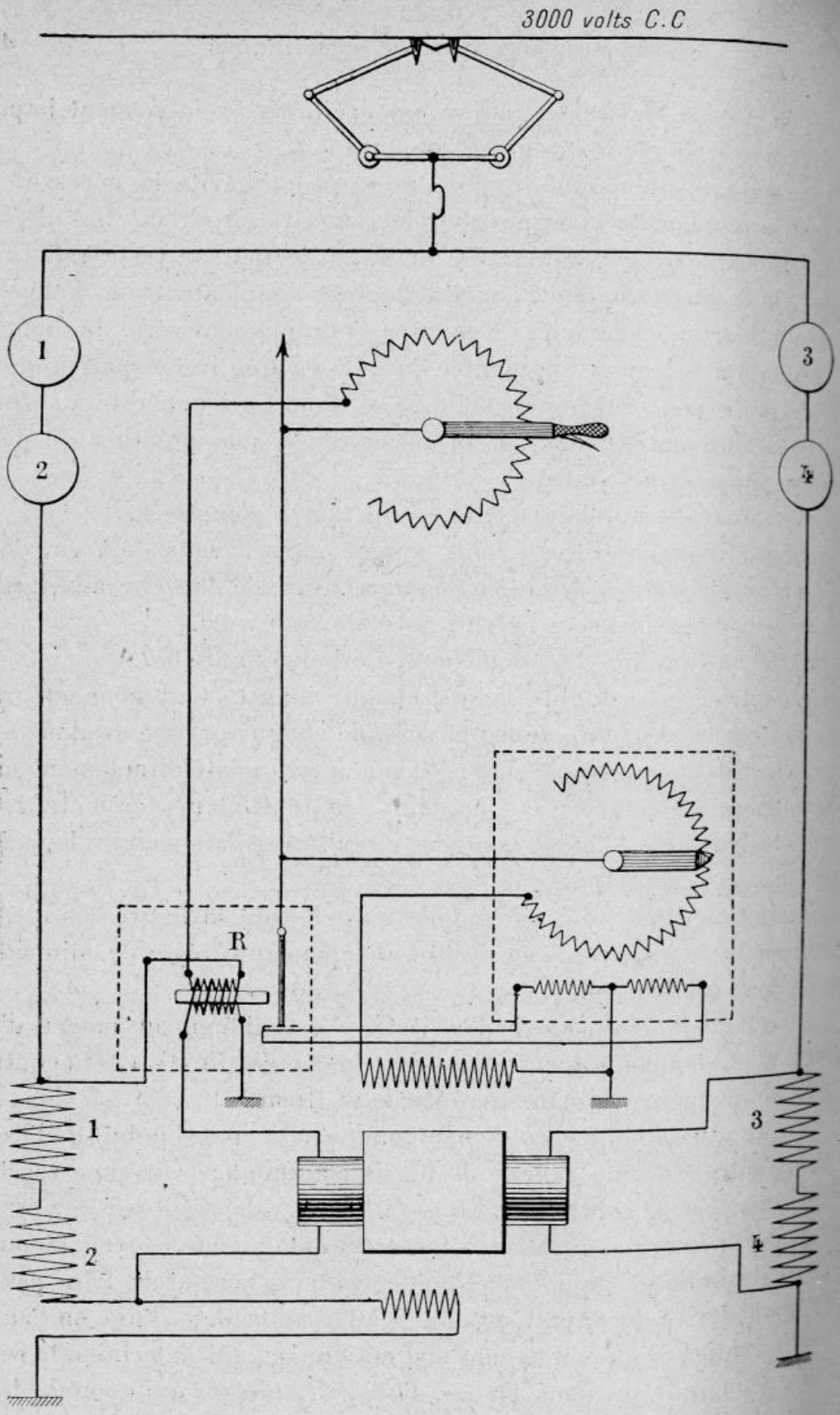


FIG. 357.

Schéma simplifié des connexions du freinage par récupération des locomotives du Chicago-Milwaukee-St-Paul de la Général Electric Co.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi, tandis que pendant la marche en moteur, le wattman règle la vitesse en agissant sur les résistances de démarrage au moyen du contrôleur principal, pendant la marche en récupération il règle le fonctionnement des moteurs en générateurs en agissant sur le rhéostat de l'excitation indépendante de l'excitatrice au moyen du petit contrôleur de récupération.

Enfin, le fonctionnement en récupération n'est possible que pour les deux positions de pleine marche du contrôleur principal correspondant à moteurs en série et moteurs en parallèle. A cet effet, les deux contrôleurs sont enclanchés de manière à rendre toute fausse manœuvre impossible.

D'après ce qui précède, on voit que la méthode de contrôle employée permet d'obtenir une assez notable variation dans la tension produite par les moteurs fonctionnant en générateurs et, par suite, une assez grande variation dans la vitesse du train marchant en récupération.

Cependant, dans ce système, et tout système analogue, la vitesse à laquelle on peut freiner par récupération ne peut pas être abaissée au-dessous d'une certaine valeur correspondant au couplage série des moteurs et dépendant en outre du degré de saturation des inducteurs : la vitesse minimum correspond à la saturation maximum possible des moteurs. En effet, d'abord la récupération ne peut avoir lieu que si la tension produite est supérieure à celle de la ligne. Ensuite, si la vitesse est telle que, même avec les inducteurs saturés, on ne puisse obtenir une tension supérieure à celle de la ligne, il est bien évident que la récupération ne pourra avoir lieu. Comme d'ailleurs, les moteurs usuels sont bien saturés à leur régime uni-horaire, on ne pourra pas, en général, obtenir de récupération à des vitesses sensiblement inférieures à celle de leur régime horaire. Des vitesses inférieures ne pourront être obtenues qu'en réduisant la tension à leurs bornes, ce qui pourra être obtenu au mieux par leur couplage en série.

Si cependant, par un moyen quelconque, la tension aux bornes des moteurs peut être abaissée à volonté, on conçoit qu'on puisse alors freiner par récupération jusqu'à l'arrêt. Ce moyen consiste dans l'emploi d'un survolteur-dévolteur automatique et constitue la caractéristique essentielle du système S. T. A. R., mentionné plus haut.

En ce qui concerne le système du Milwaukee, dans la marche moteurs en parallèle où les quatre moteurs de chaque demi-locomotive sont connectés en deux groupes en parallèle de deux moteurs en série, on peut obtenir, pratiquement, en freinage par récupération toute vitesse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

comprise dans des limites qui sont presque dans le rapport 2/1, soit entre 27 et 50 kilomètres-heure (1), avec un train ordinaire à marchandises de 2300 tonnes sur des pentes moyennes (2). Dans la marche moteurs en série, où les quatre moteurs de chaque demi-locomotive sont en série, le freinage peut être obtenu approximativement à demi-vitesse entre 14 et 27 kilomètres-heure environ.

Le fonctionnement en récupération est, en outre, entièrement automatique et l'effort de freinage est maintenu constant pour une position déterminée du contrôleur de récupération, étant entièrement indépendant de la variation de tension au trolley, de la distance de la locomotive à la sous-station ou à la locomotive la plus proche, de la variation de profil de la voie, etc...

Dans les essais de consommation d'énergie qui ont été effectués avec ces locomotives, un compteur wattheuremètre était branché de façon à tourner en sens inverse en cas de récupération, de sorte que les lectures faites sur cet appareil donnent l'énergie réellement consommée par les locomotives, circuits auxiliaires compris.

Le tableau suivant donne des résultats moyens obtenus à la suite d'un grand nombre de parcours pour l'énergie récupérée avec un train de voyageurs effectuant un voyage complet, aller et retour.

TRAJET	SENS	ÉNERGIE UTILISÉE entre stations, p. 100.	ÉNERGIE RÉCUPÉRÉE sur les pentes en p. 100 de celle utilisée.
Deer Lodge à Three Forks	Est	100	25
Three Forks à Deer Lodge	Ouest	100	7
Three Forks à Harlowton	Est	100	11
Harlowton à Three Forks	Ouest	100	9
Moyenne	Est	100	18
Moyenne	Ouest	100	8
Moyenne dans les deux sens		100	13

(1) La vitesse de 50 kilomètres-heure est la vitesse maxima de marche des trains à marchandises. La vitesse correspondant au régime horaire des moteurs est d'environ 24 kilomètres-heure. Courant : 240 ampères).

(2) Une seule demi-unité est utilisée sur ces pentes pour retenir le train.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit ainsi que la moyenne de l'énergie récupérée, dans les deux sens, est de 13 p. 100 de l'énergie utilisée.

Les localités ci-dessus, qui appartiennent à la région des Montagnes Rocheuses, sont situées l'une par rapport à l'autre suivant le schéma ci-dessous :

K. 366	K. 284	K. 242	K. 185	K. 0
Deer-Lodge	Donald	Piedmont	Three-Forks	Harlowton

et les parcours en question comprennent des rampes de 0,3, 1, 1,1 et 2 p. 100. Les trains réguliers comprennent une locomotive complète de 260 tonnes, remorquant neuf voitures d'un poids total de 600 tonnes environ.

En fait, les relevés de consommation enregistrés pendant le mois de novembre 1916 ont montré que, pendant cette période, la quantité d'énergie récupérée a été de 11,3 p. 100 de l'énergie totale consommée aux moteurs.

Pour donner, sous une autre forme, une idée de l'importance de l'énergie récupérée, nous ajouterons que le calcul et l'expérience montrent qu'un train descendant une pente de 2 p. 100, en récupérant, renvoie à la ligne presque 60 p. 100 de l'énergie qu'il absorberait dans la montée et qui est utilisée par d'autres trains montants.

On a constaté, en particulier, que sur la section Piedmont-Donald, du parcours Deer-Lodge-Three-Forks, d'une longueur de 42 kilomètres, sur laquelle règne uniformément la rampe maximum de 2 p. 100, une locomotive récupérant maintenait un train remorqué de 1.600 tonnes à la vitesse de 27 à 32 km./h., en produisant le même courant que celui qui serait absorbé par un train montant de 1.100 tonnes, à la vitesse de 24 km./h.

Le système précédent est en fonctionnement régulier depuis 1915 et a donné toute satisfaction.

b) Locomotives à 12 moteurs de la Général Electric (locomotives type 1918). — Pour ces locomotives, encore actuellement en construction, à 12 moteurs de 270 chevaux, de la même ligne, le fonctionnement en récupération est réalisé différemment. Le principe en est le suivant. On a supprimé le groupe moteur-générateur-excitateur des moteurs pour le remplacer par deux moteurs d'essieu dans chaque groupe de six moteurs. Ces six moteurs sont par suite ainsi divisés : deux moteurs servent à exciter les quatre autres, qui fonctionnent alors en récupération.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le schéma des connexions et le détail du fonctionnement du système n'ont toutefois pas encore été publiés.

c) Locomotives à 12 moteurs de la Westinghouse (locomotives type 1918). — Le fonctionnement en récupération de ces locomotives est encore obtenu par excitation séparée des moteurs d'essieu. A cet effet, comme la locomotive complète est formée de deux unités accouplées, les moteurs d'essieu, au nombre de six, par demi-locomotive, reçoivent leur excitation d'une petite dynamo, laquelle est entraînée par un des deux essieux (le second) du bogie porteur d'extrémité. Cette dynamo est montée sur cet essieu à la manière d'un moteur à engrenages ordinaires type tramway. L'encombrement de chacune des deux excitatrices est d'ailleurs à peu près celui d'un moteur ordinaire de tramway. Ces excitatrices sont représentées sur le schéma d'ensemble de ces locomotives, schéma donné en planche hors texte.

B. — Courant alternatif monophasé.

143. **Observation générale.** — Le moteur monophasé à collecteur, qu'il dérive du type-série ou du type-répulsion, peut être employé pour réaliser le freinage électrique comme le moteur-série courant continu.

Toutefois, les conditions de fonctionnement de ces moteurs en générateurs sont beaucoup plus complexes et dépendent de la façon suivant laquelle sont effectivement réalisés leurs différents enroulements, et elles peuvent donner lieu à des phénomènes divers et, par suite, à des dispositions particulières à chaque type exact de moteur. Comme dans les installations réalisées en traction, le moteur utilisé fonctionne en marche normale comme moteur-série, c'est seulement dans ces conditions que nous examinerons son fonctionnement en générateur.

144. **Freinage par inversion de marche.** — Pour réaliser ce freinage, il suffira, en général, comme en courant continu, d'inverser le sens des connexions des inducteurs à l'induit afin de renverser le sens relatif du flux inducteur, le moteur restant relié au réseau pour assurer son excitation.

Même observation qu'en courant continu : le procédé est brutal et ne saurait être admis que pour un cas d'extrême urgence.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

145. **Freinage par fonctionnement des moteurs en génératrices.** — De même qu'en courant continu, pour faire fonctionner un moteur monophasé à collecteur en génératrice, on inverse les inducteurs ou l'induit, le sens de rotation restant le même. Ceci n'est toutefois pas suffisant dans le cas actuel, car le moteur n'est pas auto-excitateur, ou plus exactement on ne peut pas être certain qu'il s'amorcera de lui-même. Il faut, par suite, commencer par l'exciter, ce qu'on réalisera le plus simplement en le laissant relié à la ligne d'alimentation par l'intermédiaire de son transformateur. Une autre méthode pour assurer son excitation consistera à le faire fonctionner en excitation séparée.

Nous verrons ci-après des applications de ces deux méthodes.

On peut réaliser les modes de freinage suivants :

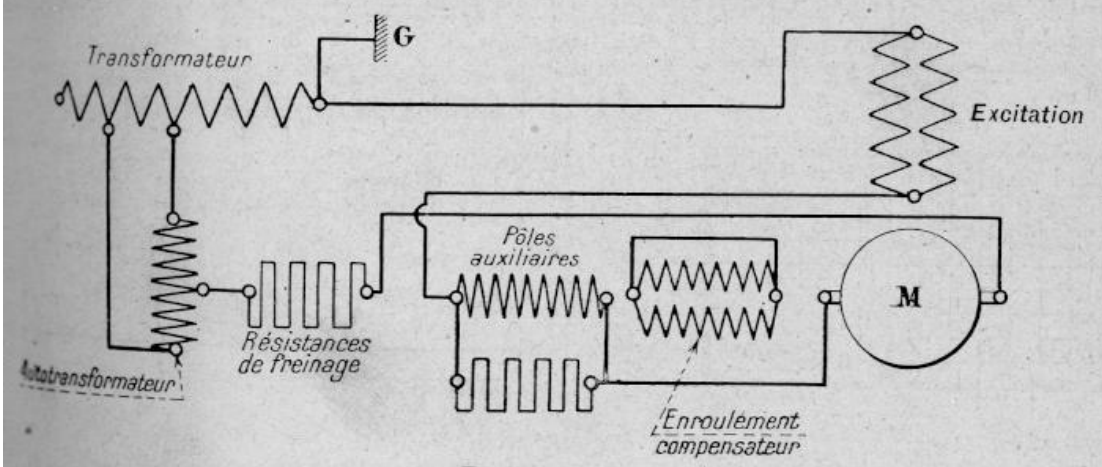


FIG. 358.

Schéma pour le freinage, avec moteur monophasé-série Oerlikon.

146. **Freinage sur résistances.** — En opérant comme il est indiqué ci-dessus et en absorbant l'énergie produite dans des résistances réglables, on réalisera le freinage comme en courant continu.

Voici quelques exemples de réalisation de ce procédé.

La figure 358 donne le schéma des connexions de freinage avec un moteur-série compensé Oerlikon. On règle l'excitation du moteur, c'est-à-dire l'intensité du freinage, et par suite la vitesse au moyen d'un transformateur auxiliaire qui est ici un auto-transformateur alimenté par le transformateur principal. Il est intéressant de noter que par cette méthode on peut régler le freinage pratiquement jusqu'à la vitesse zéro, ce qui ne peut être obtenu en courant continu en dehors de l'emploi de survolteurs-dévolteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur la locomotive d'essai Westinghouse du Midi, prévue à l'origine pour fonctionner en récupération, mais qui, en fait, a été utilisée avec freinage sur résistances, le problème est résolu différemment : le moteur fonctionnant en générateur est excité séparément. Les deux moteurs sont, pendant cette période, connectés de la manière suivante :

Marche

Manip.	Inter.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	o	o	o							o	o	o	o
2	o	o	o	o	o					o	o	o	o
3	o		o	o	o	o				o	o	o	o
4	o			o	o	o	o			o	o	o	o
5	o				o	o	o	o		o	o	o	o
6	o					o	o	o	o	o	o	o	o

Freinage

Manip.	Inter.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	o	o	o	o						o	o		
2	o		o	o	o	o				o	o		
3	o				o	o				o	o		
4	o			o	o	o	o			o	o		
5	o					o	o			o	o		
6	o				o	o	o	o		o	o		
7	o						o	o		o	o		
8	o					o	o	o	o	o	o		

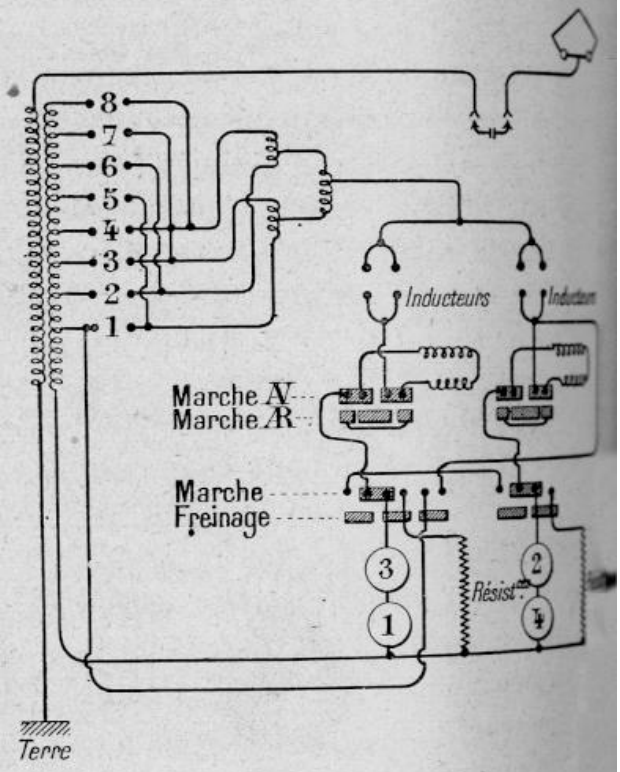


FIG. 359.

Automotrices monophasées Westinghouse du Midi. Schéma simplifié du circuit principal.

Les inducteurs du premier moteur sont alimentés séparément par une dérivation prise sur le transformateur principal; son induit, fonctionnant alors en excitatrice, alimente les inducteurs également séparés du second moteur, lequel débite en génératrice à excitation séparée sur des résistances.

Sur les automotrices à quatre moteurs Westinghouse du Midi, la méthode employée repose sur le même principe. Pour le freinage, tous les inducteurs sont connectés en série et alimentés séparément par le secondaire du transformateur et les induits débitent sur des résistances. Les moteurs fonctionnent ainsi encore en génératrice à excitation séparée. Le schéma des connexions du circuit principal est donné sur la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

figure 359, avec un tableau permettant de suivre la succession de fermeture des contacteurs en marche normale et en freinage.

Nous donnons encore comme exemple les schémas des connexions (fig. 360 et 361) en marche normale (I) et en freinage (II) des moteurs-série-répulsion Latour des Ateliers de Constructions Électriques du Nord et de l'Est, dont sont équipées les automotrices du chemin de fer monophasé 6.000 volts, 25 périodes, d'Arles-sur-Tech à Prat-de-Mollo et à Saint-Laurent-de-Cerdans, qui a un parcours assez accidenté, avec des rampes dépassant 5 p. 100. Ces automotrices sont à quatre moteurs de 50 chevaux. On remarquera que chaque moteur est pourvu d'une bobine de self branchée en dérivation aux bornes du moteur. Son but est de limiter à vide la vitesse à 26 km./h. Chaque bobine est en outre doublée d'un enroulement supplémentaire destiné à faciliter l'amorçage des moteurs fonctionnant en freinage. Les contrôleurs de ces voitures sont à cinq crans pour la marche normale et sept pour le freinage. Il y a un transformateur par groupe de deux moteurs.

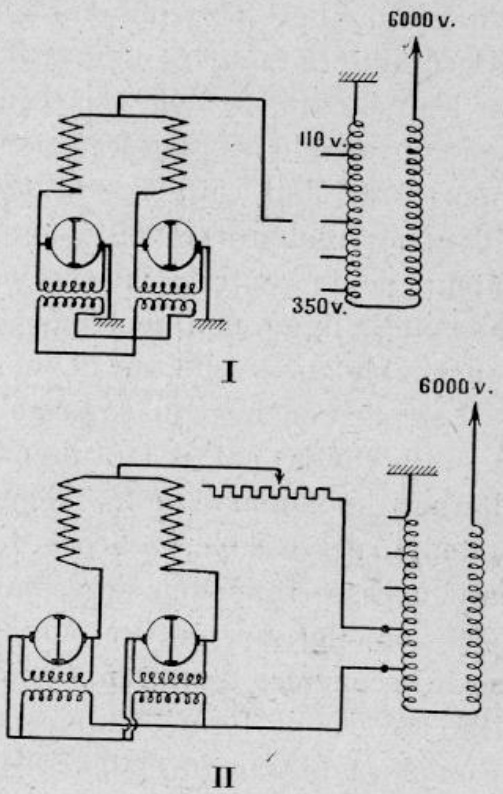


FIG. 360-361.

Tramway monophasé d'Arles-sur-Tech.
Schémas du circuit principal :
I. Marche en moteur.
II. Marche en freinage.

147. **Freinage par mise des moteurs en court-circuit.** — C'est un cas particulier du précédent en réduisant les résistances à zéro. Ce procédé n'est toutefois pas intéressant pratiquement, car devant constituer seulement un freinage d'urgence, il doit être absolument sûr, ce qui ne saurait être ici, puisque le moteur doit être relié à la ligne, tout au moins à l'origine du freinage, afin d'être assuré à ce moment de l'excitation du moteur, après quoi il fonctionnera en auto-excitation. Or, il peut toujours arriver que la prise de courant quitte inopinément la ligne au moment où son action est nécessaire ou qu'il y ait inter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ruption de courant sur la ligne, ce qui rendrait le freinage en question inopérant.

148. **Freinage par récupération.** — A priori, la récupération apparaît comme possible avec les moteurs monophasés, puisque les différents voltages qu'il est possible d'obtenir au secondaire des transformateurs alimentant ces moteurs donnent le moyen de régler la tension produite par les moteurs, de telle sorte qu'on pourra facilement obtenir une tension convenable à opposer à celle de la ligne, à laquelle elle devra être supérieure. Mais cette condition n'est pas la seule, car comme, en définitive, les moteurs travaillent en générateurs en parallèle avec les alternateurs de la centrale, la tension des moteurs doit avoir par rapport à celle de la ligne, non seulement une grandeur mais encore une phase convenable quelle que soit la vitesse de la locomotive.

Les phénomènes qui se produisent ici sont toutefois très complexes, et, au premier chef, il faut prendre des précautions afin qu'au courant alternatif monophasé de fréquence égale à celle du réseau produit par les moteurs, ne se superpose pas du courant continu et du courant alternatif à basse fréquence provenant de l'auto-excitation des moteurs.

Si, en effet, un moteur monophasé à connexions série est alimenté, par le secondaire d'un transformateur, sans autre intermédiaire, il constitue un circuit fermé contenant en série l'induit, les inducteurs et le secondaire du transformateur. Rien ne s'oppose, dans ces conditions, à ce qu'il ne s'amorce un courant continu dont l'intensité ne serait limitée que par la très faible résistance du circuit. Il a donc tendance à devenir très intense, et un fonctionnement stable n'est possible qu'à de très faibles vitesses. Un tel procédé, appliqué ainsi brutalement, est tout à fait impraticable et dangereux pour l'équipement.

En outre, rien ne s'oppose à la possibilité d'amorçage d'un courant alternatif parasite à faible fréquence, se superposant au courant principal, qui est aussi nuisible qu'un courant continu et qui produit un couple à pulsations lentes aussi dangereux pour le fonctionnement.

Il est facile d'éviter la propagation du courant continu en séparant l'enroulement d'excitation du moteur et en l'alimentant par un transformateur spécial dont le primaire est en série avec l'induit, comme le montre la figure 362, dans laquelle on a représenté un moteur-série compensé : E est l'enroulement d'excitation, et C l'enroulement de compensation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce dispositif, sous sa forme simple, est toutefois insuffisant, car il ne saurait s'opposer à la transmission du courant alternatif à faible fréquence.

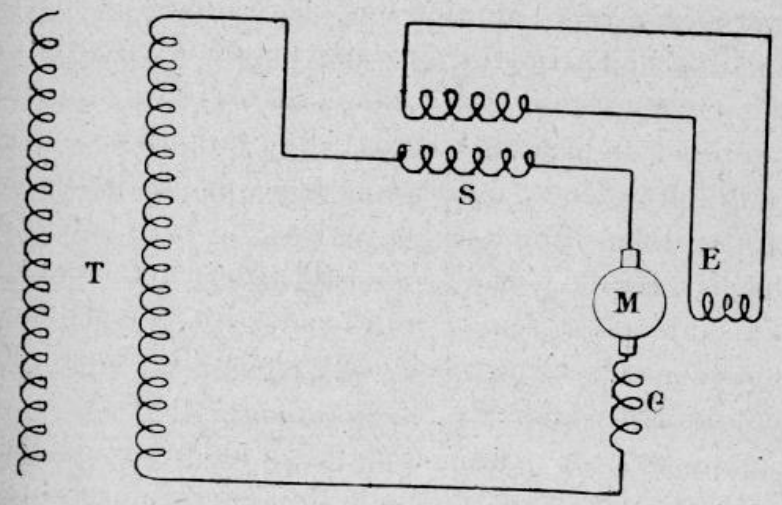


FIG. 362.
Schéma d'excitation avec transformateur.

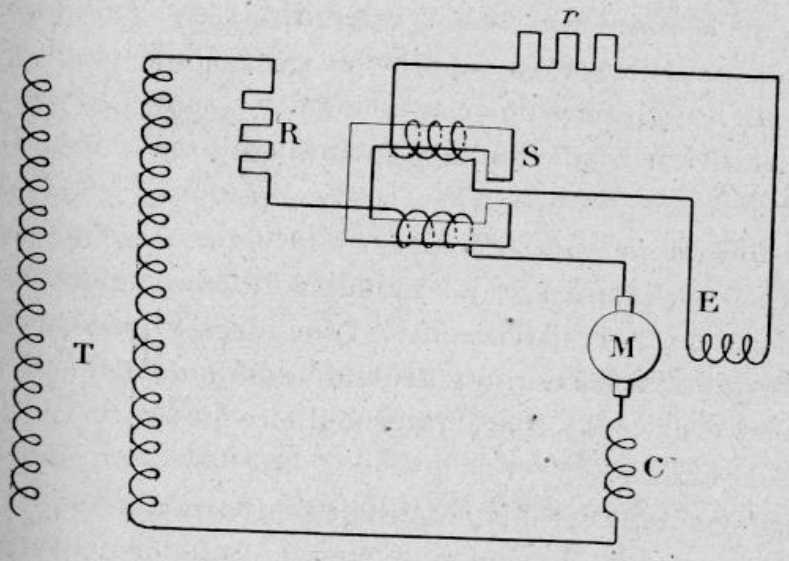


FIG. 363.
Schéma d'excitation avec transformateur et résistances en série.

Il peut toutefois être rendu efficace et pratique moyennant certaines précautions, ainsi que l'a montré M. Alexanderson, de la General Electric Co. Il suffira d'employer un transformateur à grand courant magnétisant qui sera, par suite, d'une efficacité moindre pour transmettre du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

primaire au secondaire des courants de faible fréquence que des courants de plus haute fréquence. Ceci sera réalisé en employant un transformateur présentant un entrefer dans son circuit magnétique principal. Il conviendra, en outre, d'ajouter des résistances appropriées dans le secondaire ou dans le primaire ou dans les deux circuits du transformateur-série pour empêcher la machine de s'exciter d'elle-même comme génératrice-série et de produire par auto-excitation un couple pulsatoire parasite de faible fréquence, nuisible au freinage. La figure 363 donne le schéma de cette disposition avec deux résistances r et R. S est le transformateur spécial. Il convient de remarquer que la résistance de l'induit peut être suffisante pour rendre non nécessaire la résistance R, tandis que la résistance r en série, avec le secondaire du transformateur, sera ordinairement indispensable.

Ces résistances R et r ainsi ajoutées ont toutefois l'inconvénient d'absorber une partie non négligeable de l'énergie produite par le moteur, diminuant d'autant le rendement de la récupération.

Cette disposition de principe, indiquée par M. Alexanderson, a été appliquée par la Compagnie Thomson-Houston sur sa locomotive d'essai du chemin de fer du Midi, dont nous avons précédemment (fig. 99) donné en planche hors texte le schéma général des connexions. Nous rappelons que les moteurs de cette locomotive sont du type série-répulsion, démarrant en répulsion et fonctionnant en marche normale en série-répulsion.

Le transformateur spécial S précédent est représenté en TS dans ce schéma, et son primaire est, au moment de la récupération, relié par l'intermédiaire de la résistance RE (1) au circuit formé par les induits M^1M^2 des moteurs et les enroulements de commutation C^1C^2, tandis que son secondaire est relié, par l'intermédiaire de la résistance RT, aux inducteurs E^1E^2.

Ce transformateur est mis en circuit par les contacteurs 16 et 17, qui se ferment au moment du freinage, pendant que le contacteur 15 reste ouvert, tandis que dans la marche en moteur le contacteur 15 reste fermé et les contacteurs 16 et 17 restent ouverts.

Aux essais de la locomotive, les conditions de freinage ont été rem-

(1) Cette résistance est en réalité une réactance pour s'opposer à des à-coups de courant trop importants par suite de fausse manœuvre ou autre cause.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plies et la puissance renvoyée à la ligne a souvent atteint 400 kws, mais le facteur de puissance était assez bas.

Dans la *locomotive du Midi des Ateliers de Constructions Électriques du Nord et de l'Est*, où les moteurs sont du type série-compensé-répulsion, avec démarrage en répulsion et marche normale en série-compensé, le procédé employé pour réaliser la marche en récupération est assez différent. Son principe est le suivant :

Pour cette marche, on substitue à l'excitation-série des moteurs une excitation indépendante qui est néanmoins liée au réseau par le système que nous allons voir. Ils fonctionnent ainsi en génératrice shunt sur le réseau.

Leur excitation est fournie par un enroulement auxiliaire pris sur le stator des moteurs de compresseurs, qui sont du type répulsion. Cet enroulement est dans l'axe du court-circuit et fournit du courant décalé de 90° en arrière sur le courant de ligne. Il s'ensuit que la f. é. m. E^1, développée dans l'enroulement auxiliaire, est en quadrature avec la tension aux bornes des transformateurs principaux T^r (voir en planche hors texte, fig. 100, le schéma général des connexions) et le courant d'excitation qu'il fournit est, par suite, sensiblement en phase avec E^1. Il en est alors de même de la f. é. m. E^2, engendrée par les moteurs de traction.

En agissant, d'autre part, sur les régulateurs d'induction, dont nous avons parlé à l'occasion de l'étude des moteurs de ces locomotives (chapitre VII, § 68), on peut faire en sorte que leur tension secondaire, ajoutée à celle des transformateurs, soit précisément identique à E^2 en grandeur et en phase.

Cependant, dès que les moteurs de traction débitent, il se produit un décalage considérable du courant par rapport à la tension de ligne dû à leur grande self de dispersion et à celle des régulateurs. On rectifie la phase du courant d'excitation proportionnellement au courant renvoyé à la ligne.

Ce but est atteint au moyen d'un petit transformateur *tr* à entrefer, qui agit automatiquement sur la phase de la tension appliquée aux moteurs de compresseur.

Les essais de récupération ont été satisfaisants, la puissance renvoyée sur la ligne a souvent atteint 350 kws, et il est à noter que le facteur de puissance est très voisin de l'unité. Le courant débité a même pu être décalé en avant de la tension de la ligne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quoique dans les deux exemples ci-dessus la marche en freinage par récupération ait rempli, aux essais, les conditions imposées, les locomotives qui suivront ne sont prévues que pour le freinage électrique sur résistances.

Le fonctionnement en récupération n'a, en effet, été obtenu qu'au prix de complications considérables de l'équipement et est, en outre, toujours d'une réalisation assez délicate et instable suivant la vitesse, due principalement à la possibilité de production du courant continu parasite se superposant au courant alternatif. Il faut remarquer d'ailleurs qu'un tel fonctionnement n'est réellement avantageux qu'à la condition que l'énergie récupérée soit utilisée pour la propulsion d'autres locomotives, ce qui n'était pas le cas; par suite, cette énergie devait être dissipée dans des résistances à la Centrale. D'autre part, si plusieurs locomotives récupèrent en même temps, on ne peut exactement prévoir ce qui se passera, les facteurs de puissance étant en général différents. Dans de telles conditions, le freinage électrique sur résistances donne de meilleurs résultats et est d'un fonctionnement sûr et simple. Il est, en outre, à noter que, dans ce mode de freinage, il importe évidemment peu qu'il y ait production de courants parasites, continu ou alternatif, à basse fréquence.

Nous ajouterons que, dans le cas qui nous occupe, il était d'ailleurs seulement stipulé par la Compagnie des Chemins de fer du Midi, que les locomotives devaient, dans des conditions données, freiner électriquement, ce freinage pouvant être réalisé, au choix du constructeur, par récupération ou sur résistances.

A noter enfin que pour la ligne plus récente du Lœtschberg et celle en construction du Saint-Gothard, les Ingénieurs des Compagnies du chemin de fer se sont prononcés contre la récupération.

En résumé, l'emploi de la récupération en courant monophasé n'a pas donné jusqu'alors des résultats pratiques satisfaisants et ne paraît pas actuellement être à recommander.

149. **Nouveau procédé de freinage par récupération (Oerlikon).** — Nous donnerons, pour terminer, le principe d'un nouveau procédé de freinage par récupération, en ce moment en cours d'essais aux ateliers Oerlikon et que cette firme se propose d'appliquer à une locomotive destinée au Saint-Gothard.

D'après le Dr. Behn-Eschenburg, de la société Oerlikon, qui a déve-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loppé récemment dans la presse technique (1) le fonctionnement de ce procédé, ses caractéristiques essentielles seraient les suivantes :

Le schéma de principe est donné sur la figure 364 : a est l'induit et m l'inducteur. Tous les enroulements éventuels de compensation ou de pôles auxiliaires sont figurés ensemble par l'enroulement c. Le mode de connexions de ces enroulements entre eux est sans importance pour le fonctionnement qui nous occupe. Une bobine d'induction ordinaire, d'une réactance de valeur fixe et déterminée est ajoutée en série avec l'induit en d. Cette bobine est le seul appareil qui vienne s'ajouter à l'installation normale des moteurs et constitue la nouveauté du procédé, en même temps que l'inducteur est connecté au transformateur t en deux points comprenant entre eux une tension e_2 convenablement choisie. Enfin, la tension e_1 appliquée au système de l'induit en série avec c et d est également réglable.

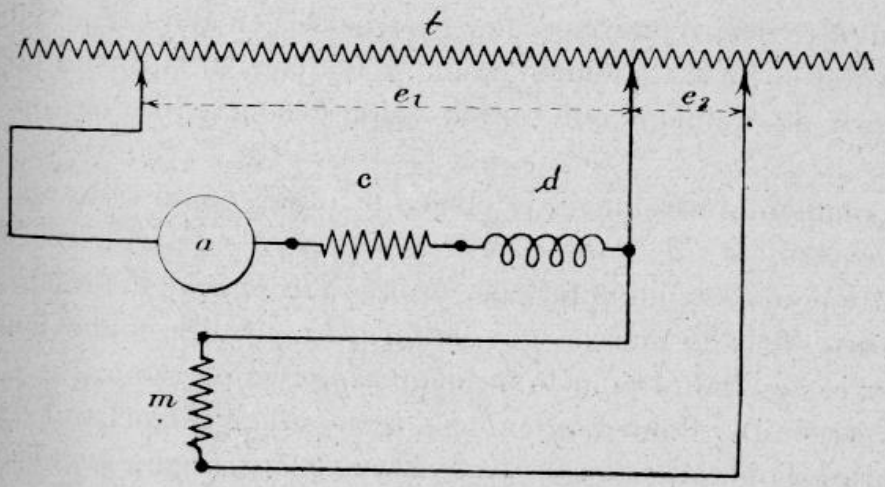


FIG. 364.

Schéma du montage Oerlikon

Le schéma représente ainsi dans son ensemble un moteur shunt ordinaire.

Si l'on choisit convenablement la valeur de la réactance d, cette machine développe, dans un sens comme moteur et dans l'autre comme générateur, à chaque vitesse à partir de l'arrêt complet, un couple constant pour chaque valeur des tensions appliquées e_1 e_2. La puissance croît proportionnellement à la vitesse.

(1) Voir en particulier la *Revue générale de l'Electricité* des 7 décembre 1918, d'où nous avons extrait les renseignements donnés ici, et 18 janvier 1919.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour une tension appliquée donnée, l'intensité du courant croît plus rapidement que la vitesse, à partir d'une valeur minimum à l'arrêt; le facteur de puissance s'approche de l'unité.

En générateur, comme le courant de l'induit et celui de l'inducteur sont complètement séparés, aucune auto-excitation n'est à craindre si les balais sont convenablement ajustés, et aussi si les enroulements transverses sont court-circuités. Pour régler l'effort de traction et la vitesse, seul le réglage de la tension appliquée e_1 est nécessaire. La tension e_2 peut également être rendue réglable. On peut d'ailleurs aussi faire varier la réactance de la bobine d et la faire contribuer au réglage.

Le passage de la marche en moteur à celle en générateur se fait par des moyens très simples : pour le premier service, la bobine d'induction peut être court-circuitée et l'enroulement inducteur connecté à l'induit.

Le passage du freinage en récupération au freinage sur résistance, qui peut être désiré pour descendre les pentes en étant séparé de la ligne d'alimentation, est également facile à réaliser; il suffit de prévoir une résistance de freinage qui sera à volonté court-circuitée ou mise en circuit.

Au moment du freinage, le changement des connexions ou l'ajustage des enroulements de compensation et des pôles auxiliaires qui serait nécessité pour les commutations, peut se faire en même temps et par le même inverseur de marche qui établit les nouvelles connexions de l'inducteur et de l'induit pour le freinage avec récupération.

D'après le Dr. Behn-Eschenburg, ce montage permettrait " d'étendre les limites d'opération du freinage avec récupération, sans aucune restriction, à toutes les charges et à toutes les vitesses, jusqu'à l'arrêt complet ".

C. — Courants alternatifs triphasés.

On peut réaliser les modes de freinage suivants :

150. Freinage par inversion de marche. — Ce procédé est analogue comme effet aux procédés correspondants du courant continu et du courant monophasés.

L'inversion du sens de marche se fait en intervertissant deux phases, ce qui a pour effet d'inverser le sens du champ tournant et de tendre par suite, à arrêter le moteur, puis à le faire tourner en sens inverse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce procédé est brutal, absorbe énormément de courant à la ligne, qui doit toujours demeurer reliée au primaire du moteur pour l'exciter comme nous le verrons en détail ci-après, et a en outre besoin pour être actif, qu'on ajoute une résistance supplémentaire en série avec l'induit, variable d'ailleurs avec la vitesse, afin d'obtenir à chaque instant, c'est-à-dire à chaque valeur de la vitesse, le couple maximum. Or, on ne peut certainement réaliser cette condition que fort imparfaitement, en intercalant des résistances que l'on fera varier à la main.

On peut se rendre compte de la manière suivante (1) de la valeur des résistances à mettre en circuit dans ce fonctionnement :

Soit g le glissement en moteur avant l'inversion. Dans le fonctionnement inversé, le glissement devient symétrique du précédent par rapport à $g = 1$, de sorte qu'au moment de l'inversion, si g' est le glissement,

$$\frac{g + g'}{2} = 1,$$

d'où :

$$g' = 2 - g ;$$

de sorte qu'au moment de l'inversion, la résistance R′ qui devrait théoriquement être insérée dans le circuit du moteur est telle que :

$$\frac{R' + r}{r} = \frac{2 - g}{g_m},$$

g_m étant le glissement correspondant au couple maximum sans rhéostat, r la résistance du secondaire.

On en déduit sensiblement en négligeant g devant 2 :

$$R' = \left(\frac{2}{g_m} - 1\right) r$$

ou encore approximativement :

$$R' = \frac{2}{g} \cdot r .$$

Quant à la dernière résistance ainsi intercalée correspondant à l'arrêt,

(1) D'après Blondel et Dubois, ouvrage déjà cité, tome II, page 323.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c'est-à-dire la résistance minima, elle sera précisément celle que nous avons trouvée pour le démarrage, savoir :

$$R = \left(\frac{1}{g_m} - 1\right).$$

Pendant le parcours d'arrêt, il faudra ainsi déplacer constamment la manette du rhéostat. Pratiquement, on déterminera la valeur moyenne unique qui sera la plus avantageuse.

Malgré cela, l'expérience montre que le freinage ainsi obtenu est beaucoup moins efficace qu'en courant continu.

151. **Freinage par fonctionnement des moteurs en générateurs asynchrones.** — On sait que la vitesse maxima à laquelle tend à tourner un moteur asynchrone est sa vitesse de synchronisme, laquelle ne peut d'ailleurs pas être atteinte tant que le moteur fonctionne comme moteur. Mais si, mécaniquement, on entraîne un tel moteur au-dessus de sa vitesse de synchronisme, il devient générateur ainsi d'ailleurs que nous l'avons déjà vu au moment de l'étude électrique des moteurs asynchrones. La vitesse et le glissement continuent à augmenter en valeur absolue, de même que le couple résistant et cela jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint, ce qui arrivera lorsque le couple résistant ou retardateur du moteur fera équilibre au couple moteur développé sur l'essieu moteur, sous l'influence de la gravité sur une pente d'inclinaison suffisante.

Quand le moteur devient ainsi générateur, le courant watté change de signe et est absorbé dans des résistances pour le freinage sur résistances ou renvoyé à la ligne pour le freinage en récupération, suivant que le courant secondaire est fermé sur des résistances ou renvoyé à la ligne. Mais le courant déwatté conserve toujours le même sens et est *toujours emprunté à la ligne.*

Dans ces conditions, le moteur fonctionne en génératrice asynchrone et on voit qu'une nécessité du fonctionnement du système est que le moteur *reste constamment relié à la ligne,* de façon qu'il en reçoive le courant déwatté nécessaire à son excitation, sans quoi il y aurait immédiatement décrochage et annulation du couple, donc de l'action du freinage.

La condition ci-dessus étant supposée remplie, le fonctionnement en générateur a lieu automatiquement sans qu'il y ait à modifier en quoi que ce soit les connexions de l'équipement, dès que la vitesse dépasse celle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du synchronisme. C'est là un avantage intéressant ; par contre, la vitesse minima obtenue dans ce mode de freinage demeure nécessairement supérieure à la vitesse de synchronisme, ce qui est un inconvénient. On peut toutefois aisément la réduire de moitié avec les équipements permettant le contrôle, soit par montage en cascade, soit par modification du nombre de pôles et avoir, en somme, autant de vitesses de freinage qu'on peut avoir de vitesses de régime en marche normale.

Le fait que dans le mode de fonctionnement qui nous occupe, les moteurs doivent rester constamment reliés à la ligne, constitue un sérieux inconvénient, surtout sur les lignes à crémaillère où la sécurité du freinage à la descente doit être absolue. Or, il peut toujours arriver que l'organe de prise du courant quitte inopinément la ligne d'alimentation, outre qu'il peut se produire une interruption de courant sur la ligne même par suite du fonctionnement intempestif ou non du disjoncteur ou de toute autre cause. Aussi, les véhicules automoteurs fonctionnant dans ces conditions devront-ils être munis — du moins ceux circulant sur des lignes à pentes très raides — de freins puissants, entrant automatiquement en action dès que le freinage électrique par les moteurs est rompu. C'est ainsi que sur les premières locomotives Brown-Boveri, de la Jungfrau, il était fait emploi d'un frein à ruban qu'un levier, actionné par un électro-aimant, serrait automatiquement dès qu'il était libéré par suite de la rupture du courant de ligne.

En toute rigueur, si on applique le procédé du freinage sur résistances en fermant le secondaire du moteur sur un rhéostat, on peut séparer le moteur de la ligne pendant cette période. Il suffira, en effet, d'exciter son primaire au moyen d'un petit alternateur monté, par exemple, en bout d'arbre du moteur. Toutefois, cette solution est compliquée, car il faudrait alors exciter l'alternateur; elle est, par suite, peu pratique, de sorte qu'en définitive dans le fonctionnement en générateur asynchrone, les moteurs resteront, de toute façon, en permanence reliés à la ligne, et la méthode en question n'est guère appliquée qu'en récupération, ce qui d'ailleurs en constitue l'intérêt.

Quand on veut opérer le freinage sur résistances, il est préférable de s'isoler complètement de la ligne et de faire fonctionner les moteurs en générateurs synchrones comme nous le verrons plus loin.

152. **Diagramme du fonctionnement en récupération.** — Nous allons maintenant examiner le diagramme de fonctionnement des moteurs en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

générateurs asynchrones, la possibilité de ce fonctionnement ayant été démontrée antérieurement (§ - 79).

Soit U la tension aux bornes, I_m le courant magnétisant, $I_{w.1}$ le courant watté absorbé en marche, I_1 le courant normal, $I_{w.2}$ le courant watté et I_2 le courant en générateur.

On construit le diagramme de la figure 365. La puissance développée par le moteur a toujours lieu sous un facteur de puissance cos φ très médiocre. C'est ce qui fait que la récupération est bien plus faible que ne semble l'indiquer l'intensité du courant qui circule alors.

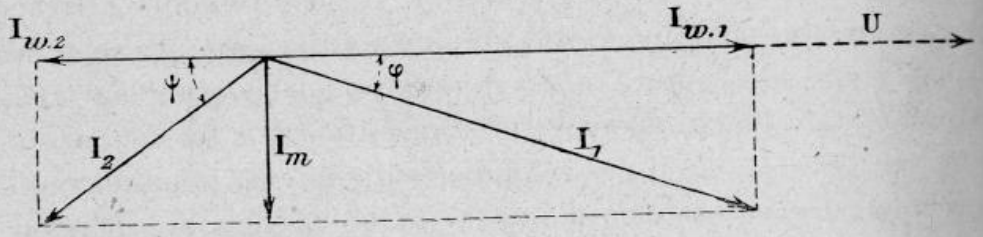


FIG. 365.

Diagramme des courants. Marche en récupération.

153. — **Caractéristiques du fonctionnement en freinage électrique sur une pente donnée.** — Pour étudier les conditions pratiques du freinage, nous nous reporterons aux caractéristiques électro-mécaniques du moteur.

Traçons en fonction du courant absorbé les courbes : vitesses et efforts effectifs développés à la jante, en marche normale en moteur. Les courbes du fonctionnement en générateur s'en déduisent en suivant la même méthode que pour le tracé des courbes de freinage des moteurs courant continu.

La courbe des vitesses est symétrique de la première par rapport à l'horizontale du synchronisme. On trace ensuite la courbe des efforts théoriques, déduits de l'épure circulaire, sans tenir compte des frottements et des engrenages, et en reportant les différences des ordonnées entre les courbes d'efforts effectifs et d'efforts théoriques, au-dessus de cette dernière, on obtient les efforts fournis par la pesanteur. On obtient ainsi une épure dans le genre de celle de la figure 366 (1).

(1) Empruntée à BLONDEL et DUROIS, ouvrage déjà cité, tome II, page 322.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

154. — **Rendement de la récupération aux moteurs.** — On peut facilement se rendre compte, en utilisant l'épure circulaire, du rendement de la récupération donnée par les moteurs.

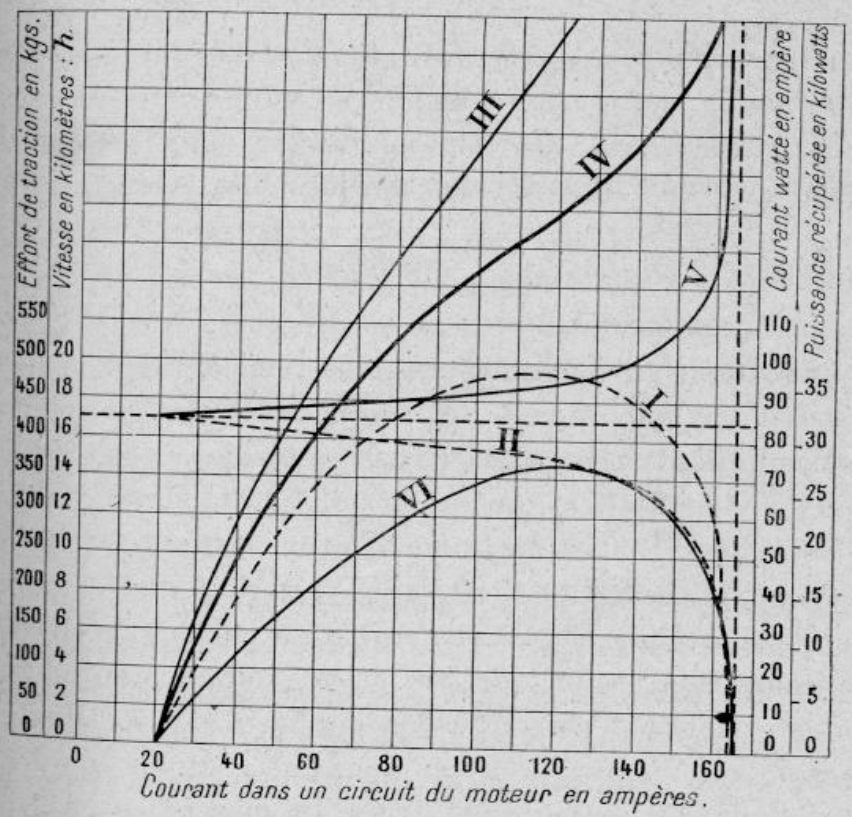


FIG. 366.

Etude graphique de la marche en récupération d'un moteur asynchrone.

Traits pointillés : régime normal { I. Effort de traction effectif. II. Vitesse en marche normale.

Traits pleins : régime en récupération { III. Composante de la pesanteur parallèle à la voie. IV. Effort théorique. V. Vitesse en récupération. VI. Courant watté et puissance récupérée.

Supposons qu'à une certaine pente corresponde un effort à la jante de 900 kgs, un courant absorbé de 8 ampères et une vitesse de 18 kilomètres à l'heure. En se reportant à l'épure circulaire que nous supposerons tracée, on en déduit par exemple que le courant watté est 58 ampères sous 220 volts composés. On en conclut que la puissance récupérée est :

$$58 \times 220 \times \sqrt{3} = 22110 \text{ watts.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La puissance fournie par la pesanteur étant donnée par la formule connue :

$$\frac{F.V.}{3,6} \times 9.81$$

qui donne ici :

$$\frac{600 \times 18}{3.6} \times 9.81 = 29450 \text{ watts};$$

le rendement théorique de la récupération donnée par le moteur est :

$$\frac{22110}{29450} = 0,75.$$

155. **Applications du fonctionnement en récupération.** — Le freinage par récupération a donné lieu en triphasé à des applications importantes, en dehors des lignes à crémaillère. Les principales ont été réalisées sur les chemins de fer italiens de la Valteline, du Giovi, de Savone et du Mont-Cenis. Aux Etats-Unis, nous trouvons celles du Great Northern, et plus récemment, celles du Norfolk et Western et du Pennsylvania, ces deux dernières particulièrement remarquables, en ce sens qu'elles constituent une innovation, les locomotives étant, comme nous l'avons vu, du système mono-triphasé à convertisseur de phases. La possibilité de récupérer l'énergie a même été, pour ces deux installations, un des facteurs déterminants pour l'adoption du système. La marche en récupération s'y fait exactement comme s'il s'agissait de locomotives triphasées ordinaires.

Des essais de récupération effectués en 1909 sur les lignes du Great-Northern, avec les locomotives triphasées de 100 tonnes à contrôle rhéostatique de la General Electric Co, ont donné les résultats suivants :

Un train pesant 850 tonnes descendant une pente de 17 millimètres par mètre à la vitesse de 24 kilomètres à l'heure, a renvoyé à la ligne, comme moyenne de plusieurs essais, une puissance d'environ 600 kws, soit 0,70 kws par tonne.

Dans d'autres essais, un train constitué par trois locomotives électriques accouplées, une locomotive Mallet et une charge attelée de 1.400 tonnes, a renvoyé à la ligne, dans les mêmes conditions de pente et de vitesse, une puissance de 950 kws.

Des essais effectués en 1910 en Italie, sur les lignes du Giovi, avec des locomotives de 60 tonnes (contrôle en cascade), sur des pentes de 35 mil-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètres avec des trains de 350 tonnes, ont montré que l'on récupérait 55 et même 60 p. 100 de l'énergie absorbée sur les mêmes rampes pendant la montée. La récupération est prévue normalement sur ces lignes quand la vitesse, dépassant 23 à 25 kilomètres à l'heure, est considérée comme trop élevée.

Il est intéressant de noter que les trois lignes italiennes du Giovi, de Savone et du Mont-Cenis sont reliées entre elles, constituant ainsi un véritable réseau; elles fonctionnent par suite en parallèle; l'énergie récupérée sur l'une ou l'autre est donc sûrement utilisée sur une partie quelconque du réseau électrifié.

La récupération est surtout importante sur les lignes du Giovi, à cause du plus grand nombre de trains qui y circulent. Elle est moindre, quoique non négligeable, sur les lignes de Savone et du Mont-Cenis. Au total, l'énergie récupérée a permis de réduire les consommations spécifiques jusqu'à 20 watts/heure par tonne kilomètre remorquée, ce qui constitue un résultat remarquable.

156. **Freinage par fonctionnement en générateur synchrone sur résistances.** — Nous avons vu que dans la méthode précédente, l'inconvénient du fonctionnement en générateur asynchrone résulte de la nécessité de laisser relié à la ligne le primaire du moteur. En séparant complètement les moteurs et les excitant au moyen de courant continu provenant, soit d'une batterie, soit d'une petite dynamo calée par exemple sur l'arbre de l'un d'eux, ils deviendront de véritables alternateurs, dont il suffira de fermer les induits sur des résistances graduées pour obtenir le freinage désiré.

Il faut toutefois que les résistances soient bien choisies, car en court-circuit, la puissance absorbée serait à peu près nulle. Les résistances devront décroître avec la vitesse.

Il est à noter que cette méthode présente cet autre avantage. Le champ de vitesse de freinage dans lequel on peut opérer est plus étendu que dans le cas précédent. On n'est plus, en effet, limité inférieurement par la vitesse de synchronisme.

Cette méthode a, en particulier, été appliquée aux locomotives Brown-Boveri, types 1912 et 1914, de la Jungfrau, pour lesquelles il est stipulé au point de vue freinage électrique que :

1°) *Normalement*, la descente des trains doit s'effectuer sans qu'il soit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nécessaire d'avoir recours à la ligne de contact, donc uniquement par freinage sur résistances ;

2°) *Exceptionnellement*, la descente doit pouvoir s'effectuer avec récupération totale de l'énergie sur la ligne.

Pour réaliser la première condition, les moteurs fonctionnent à différentes vitesses en générateurs synchrones, leur excitation étant fournie par une petite dynamo série à courant continu, disposée à l'intérieur d'un moteur, calée sur son arbre même, et alimentant en série deux des phases statoriques de chacun des deux moteurs. En réglant le courant d'excitation et les résistances de freinage, il est possible de faire varier la vitesse entre 6 et 9 kilomètres à l'heure sur les trajets à crémaillère et entre 12 et 18 kilomètres à l'heure sur les trajets d'adhérence.

Pour réaliser la seconde condition, les moteurs fonctionnent en générateurs asynchrones, empruntant leur excitation à la ligne de contact.

La figure 367 représente le schéma général des connexions d'une telle locomotive, sur lequel sont en outre représentés les schémas des deux modes de fonctionnement en freinage. On remarquera sur ce schéma que l'équipement comporte l'emploi de freins électro-magnétiques ainsi que nous l'avons déjà mentionné (§ 127-C).

D). — Remarques générales sur le freinage électrique par récupération ou sur résistances en courant continu, monophasé ou triphasé.

157. **Nature du freinage par récupération.** — Le procédé de freinage par récupération ne constitue pas, à proprement parler, un freinage, dans ce sens qu'il ne permet pas en général d'amener un véhicule à l'arrêt, mais on peut l'utiliser, en partie du moins, dans ce but, puisqu'il permet de l'amener d'une vitesse initiale V_o à une vitesse plus petite V.

Le poids d'inertie du véhicule — ou du train — étant P′, l'énergie mécanique que l'on pourra ainsi transformer en énergie électrique récupérable sera :

$$\frac{1}{2}\frac{P'}{g}(V_o^2 - V^2).$$

Supposons que V soit seulement égal à $\frac{V}{2}$ obtenu par exemple en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

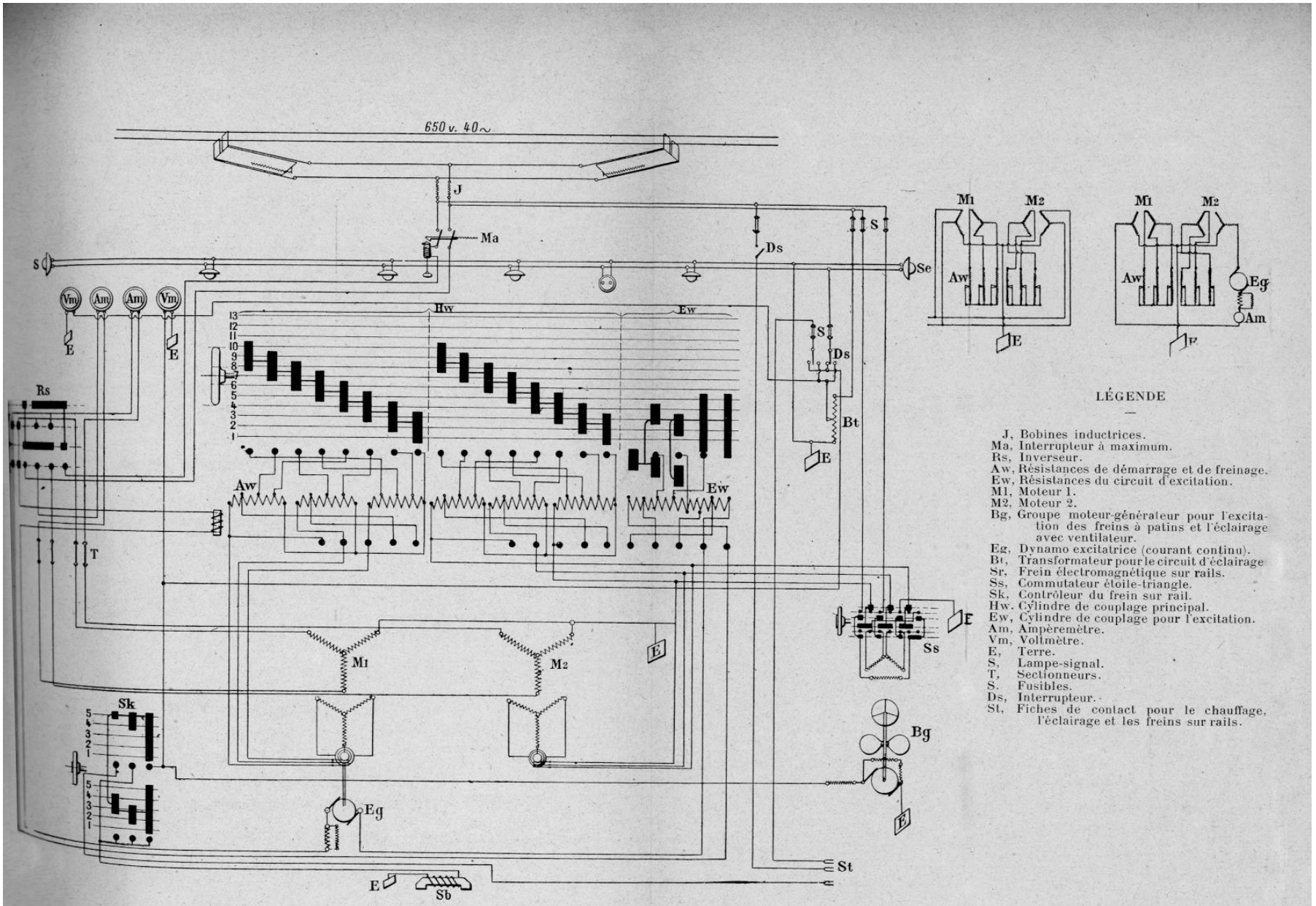


Fig. 367. — Locomotive Brown-Boveri, du chemin de fer de la Jungfrau.
(Schéma des connexions.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ssant au montage en cascade en triphasé, on voit qu'on pourra cupérer une quantité d'énergie égale à :

$$\frac{1}{2}\frac{P'}{g}\left(V_o^2-\frac{V_o^2}{4}\right)=\frac{3}{4}\times\frac{1}{2}\frac{P'}{g}V_o^2$$

it les 3/4 de la puissance vive du train. Ceci sera par exemple réalisé, automatiquement en triphasé, en employant le montage en cascade.

On terminera le ralentissement jusqu'à l'arrêt au moyen d'autres eins, celui à air, par exemple.

158. **Rendement de la récupération en fonction de la pente.** — Nous us proposons d'examiner à partir de quelle pente la récupération vient théoriquement intéressante.

Soient :

- η_1 Le rendement global moyen de la ligne et de la locomotive (équipement et moteurs) ;
- r Le coefficient de traction en kilogrammes par tonne ;
- i La pente en millimètres par mètre ;
- V La vitesse en mètres par seconde ;
- P Le poids du train en tonnes ;
- W La puissance en kilowatts fournie par l'usine au train à la montée et évaluée à la sortie de l'usine ;
- W′ La puissance renvoyée par le train à l'usine pendant la descente.

On a évidemment :

$$W=\frac{1}{\eta_1}\,\frac{0{,}736\times(i+r)PV}{75},$$

$$W'=\eta_1\,\frac{0{,}736\,(i-r)\,PV}{75}.$$

Nous supposons que le rendement des moteurs est le même, qu'ils nctionnent en moteurs ou en générateurs. Le rapport $\frac{W'}{W}$, que l'on t appeler le *rendement global de la récupération*, est égal à

$$\frac{W'}{W}=\eta^2\cdot\frac{i-r}{i+r},$$

ule qui permet d'étudier les variations de ce rendement en fonction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons un chemin de fer à crémaillère où $i = 200$ millimètres et $r = 15$ kg./t. Si la perte dans les transformateurs et les moteurs, engrenages compris, est de 25 p. 100, la perte en ligne de 15 p. 100 en moyenne, la perte totale moyenne sera de 40 p. 100, donc $\tau_i = 0{,}6$; par suite :

$$\frac{W'}{W} = 0{,}36 \times \frac{185}{215} = 0{,}31 \text{ environ,}$$

ce qui n'est pas négligeable ; l'importance pratique du rendement $\frac{W'}{W}$ dépendant bien entendu du coût de l'énergie électrique. C'est ainsi que sur les lignes suisses, même avec des systèmes se prêtant naturellement à la récupération comme le triphasé, on récupère rarement, vu l'extrême bon marché de l'énergie électrique, et on préfère le freinage sur résistances par fonctionnement des moteurs en génératrices synchrones, tel à la Jungfrau, pour rester absolument indépendant de la ligne à la descente.

Il faut cependant observer que par contre, la récupération, outre l'économie d'énergie qu'elle procure, présente l'avantage de la suppression des résistances de freinage toujours volumineuses et dont le prix, y compris celui de leur ventilateur généralement nécessaire et accessoires, ne représente pas une fraction négligeable dans le prix total de l'équipement électrique d'une locomotive.

159. **Avantages du freinage électrique par récupération ou sur résistances.** — On peut les résumer ainsi :

Suppression, pendant les périodes de freinage sur les pentes, de l'usure des sabots, des freins et bandages des roues des voitures, d'où réduction considérable des frais d'entretien, ce qui constitue un avantage très important pour une ligne de montagne. Dans le même ordre d'idées : réductions de l'usure des rails sur les pentes et dans les courbes de faibles rayons. Au Loetschberg, où l'on a cru pouvoir se passer du freinage électrique pour des trains de 300 tonnes, descendant sur des rampes de 22 millimètres se prolongeant pendant plusieurs kilomètres, les bandages des roues et les sabots des freins sont portés au rouge sombre à l'arrivée à Brigue : l'usure du matériel et de la voie est extrêmement rapide.

Elimination des difficultés d'obtenir un bon fonctionnement régulier du frein à air sur les longues pentes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Plus grande sécurité d'exploitation sur les pentes, par suite de l'emploi d'un double système de freinage : les freins à air doublant le freinage électrique, ce qui a permis d'augmenter la vitesse des trains sur les descentes, en particulier des trains de marchandises, d'où possibilité d'augmentation du trafic.

Plus grand confort des voyageurs et réduction de l'usure des attelages et parties mécaniques, par suite de la possibilité d'une vitesse uniforme maintenue automatiquement sur les pentes, et d'un freinage progressif dans les ralentissements pour les passages en courbe et les arrêts.

Suppression des grincements des roues et bruits dus au frottement des sabots contre les bandages sur les fortes pentes.

Facilités accrues pour l'exploitation de lignes à profil capricieux de la plupart des chemins de fer de montagne, avec réduction des frais d'exploitation.

Ces avantages sont communs aux deux modes de freinage électrique. En faveur du freinage par récupération, il y a naturellement à considérer en plus l'économie d'énergie qu'il procure, économie qui peut d'ailleurs varier notablement d'une ligne à l'autre. Sur la ligne de Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, dans la région des Montagnes-Rocheuses, cette économie a été trouvée égale à 15 p. 100 environ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIII

SYSTÈMES DE TRACTION A UNITÉS MULTIPLES. TRACTION DOUBLE SYMÉTRIQUE.

I. — Systèmes de traction à unités multiples.

SOMMAIRE. — Introduction. — Caractéristiques de ces systèmes. — Remarques sur les conditions économiques d'établissement.

A. SYSTÈMES A UNITÉS DOUBLES.

Premier système (Ligne Invalides Champ de Mars). — Deuxième système (Siemens et Halske). — Troisième système (Métropolitain de Paris, Thomson-Houston). — Critiques de ces systèmes.

B. SYSTÈMES A UNITÉS MULTIPLES.

Principe. — Systèmes divers.

1° *Systèmes à contrôleurs asservis.*

Système pneumatique Auvert. — Système électro-magnétique Sprague. — Système électro-pneumatique Westinghouse (Mersey). — Système électro-pneumatique Siemens-Schuckert.

2° *Systèmes à contrôleurs relayés.*

Système électro-magnétique General Electric ou Thomson-Houston. — Équipements modernes électro-magnétiques Sprague, General Electric ou Sprague-Thomson-Houston. Équipements non-automatiques, semi-automatiques, à accélération automatique par le contrôleur, à accélération automatique par un relais. — Détails des principaux appareils d'un équipement à relais automatique. — Système électro-magnétique Dick-Kerr. — Systèmes électro-pneumatiques modernes Westinghouse " Turret type " et " Unit Switch type ".

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C. APPLICATIONS DES SYSTÈMES A UNITÉS MULTIPLES.

Équipements à unités multiples pour la traction à courant alternatif monophasé ou pour la traction mixte courants monophasé et continu et pour la traction à courants triphasés. — Application des systèmes à unités multiples à des motrices isolées. — Extension des systèmes à unités multiples à la commande de machines fixes.

II. — **Traction double symétrique.**

Traction double symétrique sur les chemins de fer de l'État italien. — Répartition de la charge entre les locomotives d'un train à traction symétrique.

III. **Annexes.**

Équipements des automotrices du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris. — Équipements des automotrices de la Compagnie du chemin de fer de l'Ouest-Etat. — Systèmes de traction S.T.A.R. de la Compagnie du chemin de fer Métropolitain de Paris.

I. — Systèmes de traction à unités multiples.

160. **Introduction. Caractéristiques de ces systèmes.** — Toutes les méthodes vues précédemment pour la régulation de la marche des voitures automotrices se rapportent au cas où les moteurs sont réunis sur un seul véhicule automoteur soit du type locomotive, soit du type automotrice. Elles conviennent donc parfaitement au cas des tramways électriques, des lignes suburbaines de petite et moyenne capacité et aussi au cas où une locomotive sert à remorquer sur une portion de ligne (tunnel ou terminus de grandes lignes) des trains remorqués sur le reste du parcours par des locomotives à vapeur (locomotives électriques du quai d'Orsay, du New-York Central, etc.).

Une nouvelle classe d'application de la traction électrique correspond aux lignes de banlieue des grandes agglomérations et aux lignes métropolitaines. Ici, en effet, il faut transporter à certaines heures, matin, midi, soir, chaque fois dans un seul sens en général, un énorme afflux de voyageurs et prévoir pendant le reste du temps, c'est-à-dire pendant les heures mortes de la journée et de la soirée, un service assez restreint.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour de telles installations de traction électrique, il est nécessaire d'arriver à des temps de transport extrêmement réduits. Pour cela, étant donné les distances en général assez courtes entre les stations, il ne suffit pas d'augmenter la vitesse de pleine marche que l'on ne pourrait pas d'ailleurs augmenter au delà de certaines limites, il est nécessaire de réduire le temps de mise en vitesse, autrement dit d'adopter de fortes accélérations.

Pour résoudre complètement le problème assez complexe qui se présente, il faut en outre pouvoir modifier facilement la composition des convois et obtenir des efforts de traction très élevés pendant les mises en vitesse.

Avec un train remorqué par un seul véhicule automoteur, type locomotive, la modification de la composition des trains peut évidemment se faire, dans certaines limites tout au moins, par adjonction ou suppression de voitures de remorque. Or, pour un véhicule automoteur donné, l'importance du train qui peut être remorqué est limité, en dehors de toute condition de puissance, par la valeur admise pour l'accélération en même temps que par l'adhérence maxima sur laquelle on peut compter au démarrage.

Pour des services intensifs qui nous occupent, l'expérience semble prouver qu'il faut réaliser pendant les périodes de mise en vitesse une accélération moyenne d'au moins 50 à 60 centimètres par seconde/seconde (avec la locomotive à vapeur on ne dépasse guère 15 centimètres seconde/seconde). Une accélération de 60 centimètres seconde/seconde correspond à un effort accélérateur d'environ 60 kilog. par tonne de train, auquel vient s'ajouter la résistance au roulement de celui-ci, soit 5 kilog., ce qui conduit à un effort total à développer au démarrage d'au moins 65 kilog. par tonne de train, soit 75 à 80 kilog., en tenant compte du coefficient d'inertie des parties tournantes.

Avec des moteurs à couple constant ou sensiblement (courant continu ou triphasé), l'expérience montre que l'on peut compter sur un coefficient d'adhérence de 0,25 à 0,30. En admettant 0,25, le patinage des roues qui correspond à l'effort moteur limite utilisable aux jantes, commence à se produire pour un effort de 200 kilog. par *tonne de poids adhérent*. Or $\frac{75}{250} = 0{,}3$. Le poids adhérent devra donc être au minimum approximativement égal au tiers du poids du train.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme il s'agit de réaliser les accélérations précédentes avec des trains à pleine charge, on est rapidement conduit à des poids inadmissibles pour un tracteur unique.

La solution du problème consiste à utiliser comme poids adhérent le poids du convoi lui-même en totalité ou en partie : pour cela il suffit de placer les moteurs sur les essieux mêmes des voitures en multipliant ainsi le nombre des essieux moteurs. C'est ce qui caractérise les systèmes à unités multiples dont *Frank J. Sprague* a été l'initiateur. Dans ces conditions, la puissance totale du train peut avoir une valeur aussi élevée que l'on veut : cette puissance, ainsi que l'effort de traction que l'on se propose d'obtenir, déterminent la proportion du nombre d'essieux moteurs au nombre total d'essieux. En fin de compte, le nombre d'essieux moteurs dépend de la valeur choisie pour l'accélération, dont dépend, à son tour, la vitesse moyenne de marche.

Ainsi, dans ces systèmes, la puissance motrice est répartie sur un grand nombre d'essieux appartenant à plusieurs automotrices, une ou plusieurs remorques pouvant d'ailleurs être attelées à chacune d'elles, l'ensemble ne formant toutefois qu'un seul train.

Un tel train n'est autre, en définitive, que la réunion de plusieurs trains élémentaires ayant chacun son tracteur propre. Leur nombre pourra d'ailleurs être quelconque : on disposera toujours d'un effort total pour ainsi dire proportionné au poids à mettre en mouvement. D'ailleurs, chaque train élémentaire pourra être séparé à volonté du convoi total pour former une unité complète : d'où le nom d'*unités multiples* donné à ces trains.

Toutefois, pour être complète, la solution exige que le système soit tel que l'on ait autant de postes possibles de commande de tous les moteurs du train total que l'on veut obtenir de fractions ou trains élémentaires et tel en outre que la commande du train puisse se faire d'un poste quelconque.

Ces conditions sont effectivement et entièrement réalisées.

En outre, en disposant une automotrice à chaque extrémité du convoi total, on aura également un poste de commande à chaque extrémité, d'où un changement de marche sans retournement de convoi.

Les systèmes à unités multiples permettent donc bien aux heures mortes de la journée de ne lancer sur la ligne que des trains d'im-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

portance réduite, mais suffisante cependant pour offrir aux voyageurs toutes les facilités désirables, chacun de ces trains comprenant à peu près le nombre strict de places jugé nécessaire. Ce résultat sera obtenu par le fractionnement rationnel des convois en trains élémentaires.

Aux heures chargées, au contraire, l'accouplement de plusieurs fractions ou trains élémentaires ou unités simples, dont la marche sera réglée d'un seul poste de manœuvre par un seul agent, donnera le moyen d'utiliser aussi complètement que possible la puissance de transport de la ligne en y lançant, à des intervalles aussi rapprochés que peuvent le permettre les systèmes de « block » les plus perfectionnés, des convois offrant au public le plus grand nombre de places possible.

On voit ainsi que les combinaisons les plus variées sont possibles — et facilement réalisables — en vue d'une exploitation rationnelle et pratique.

En somme, de tels systèmes sont caractérisés par les propriétés suivantes : symétrie, réversibilité et divisibilité, et les avantages qui en résultent les rendent éminemment propres aux cas de trafics intenses et variables.

La répartition des moteurs sur un certain nombre d'essieux du train aura, en outre, pour conséquence de réduire dans une notable proportion la fatigue de la voie par suite de la diminution du poids supporté par chaque essieu moteur.

Cette répartition présente cependant un inconvénient.

En effet, il pourra arriver que l'on soit obligé, pour obtenir la puissance totale nécessaire, d'adopter, étant donné la place relativement restreinte dont on dispose, un nombre de moteurs tel que l'effort qui serait nécessaire pour faire patiner les roues ne puisse être atteint, sans danger tout au moins. Or, le patinage des roues, qui se produit aussitôt que la limite d'adhérence est atteinte, constitue le meilleur protecteur des moteurs en cas de surcharge, car aussitôt qu'il se produit, la vitesse du moteur croît et par suite sa f. c. e. m., d'où diminution du courant absorbé.

Ainsi, à l'inverse de ce qui se produit avec la locomotive, il peut arriver dans le cas actuel que l'on ait un poids adhérent trop considérable au point de vue qui nous occupe, le phénomène du patinage ne pouvant plus se produire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

161. **Remarques sur les conditions économiques d'établissement.** — Il convient, pour terminer, de noter que les dépenses d'établissement de semblables installations sont très élevées, et si, pour les métropolitains la solution s'impose, pour les lignes suburbaines et interurbaines elle peut, au contraire, être discutée, si le trafic n'est pas particulièrement intense et variable.

Par contre, il faut bien observer que le système à unités multiples permet de supprimer toutes les manœuvres de formation et de déformation des trains, manœuvres de mise en tête et autres, et que, étant donnée la rapidité des démarrages, le dégagement rapide des voies est possible. Les trains sont en effet immédiatement formés en groupant judicieusement les automotrices.

Tout ceci conduit, avec un système de voies existantes, à une augmentation notable du trafic possible et, par suite, à éviter des travaux d'agrandissement qui autrement seraient nécessaires.

Les conditions complexes du problème des unités multiples étant ainsi posées, nous allons aborder l'étude des systèmes dont la pratique a sanctionné l'emploi.

A. — Systèmes a unités doubles

162. **Premier système** (Ligne Invalides-Champ de Mars, 1900). — Considérons un train mû par une automotrice à quatre moteurs. Nous pouvons imaginer que ces quatre moteurs au lieu d'être montés sur la même voiture soient divisés en deux groupes de deux moteurs appartenant à deux voitures : un groupe étant, par exemple, monté sur la voiture de tête, l'autre sur la voiture de queue; les deux groupes étant réunis électriquement. Chaque voiture motrice comportera, en outre, un poste de manœuvre avec un contrôleur, un jeu de résistance et les appareils de prise de courant et accessoires, en un mot formera une automotrice complète à deux moteurs.

Les câbles reliant les contrôleurs aux moteurs vont d'un bout à l'autre du train. Ils sont jonctionnés entre les voitures par des pièces d'accouplement souples. L'ensemble du train peut être ainsi manœuvré de l'un des postes comme une voiture.

On réalise bien ainsi un train à « unités multiples » qui, en l'espèce, est un train à « unités doubles ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce système a été appliqué en particulier en 1893 sur la ligne des Docks de Liverpool et en 1900 aux trains légers de la ligne Paris-Invalides, Paris-Champ de Mars de la Compagnie des Chemins de Fer de l'Ouest. Pour cette dernière ligne, chaque train comprenait 4 voitures dont deux motrices encadrant deux remorques. Chaque motrice comportait deux moteurs de 30 chevaux, 22 fils, répartis en deux câbles de 11 conducteurs, régnant d'un bout à l'autre du train. Les deux câbles d'une voiture aboutissaient à des boîtes de jonction fixées sous les traverses. Sur les onze conducteurs d'un câble, huit avaient comme section 15 $^{mm^2}$, deux 6 $^{mm^2}$ et un 50 $^{mm^2}$.

La figure 368, en planche hors-texte, donne le schéma général des connexions d'une des automotrices précédentes.

Ce système a donné de bons résultats, mais il est toutefois très limité dans ses applications en raison de l'importance des câbleries et des accouplements. Il faut d'ailleurs remarquer que dans l'exemple ci-dessus la puissance des moteurs était assez faible et par suite les câbles relativement de faible diamètre.

Pour des équipements un peu puissants le système devient rapidement impraticable.

163. **Deuxième système** (Siemens et Halske). — On a cherché à diminuer le nombre et la section des conducteurs. Dans ce but, la Société Siemens et Halske a adopté, pour le Hochbahn de Berlin, le dispositif suivant : chacune des motrices porte un jeu complet des résistances nécessaires pour le train entier ; les résistances de la voiture de tête sont seules employées et un seul câble suffit à la commande de la régulation.

En outre, pour éviter de faire aller les câbles des moteurs de queue le long du train pour la marche arrière, la voiture de tête fonctionne seule dans cette manœuvre. Dans ce cas, pour éviter que les deux moteurs inactifs fonctionnent en générateurs, on a placé un électro (fig. 369) qui, lorsque la voiture motrice n'est pas en service rompt le circuit formé par les deux moteurs de cette voiture.

Sous cette forme le système est encore d'un emploi très limité.

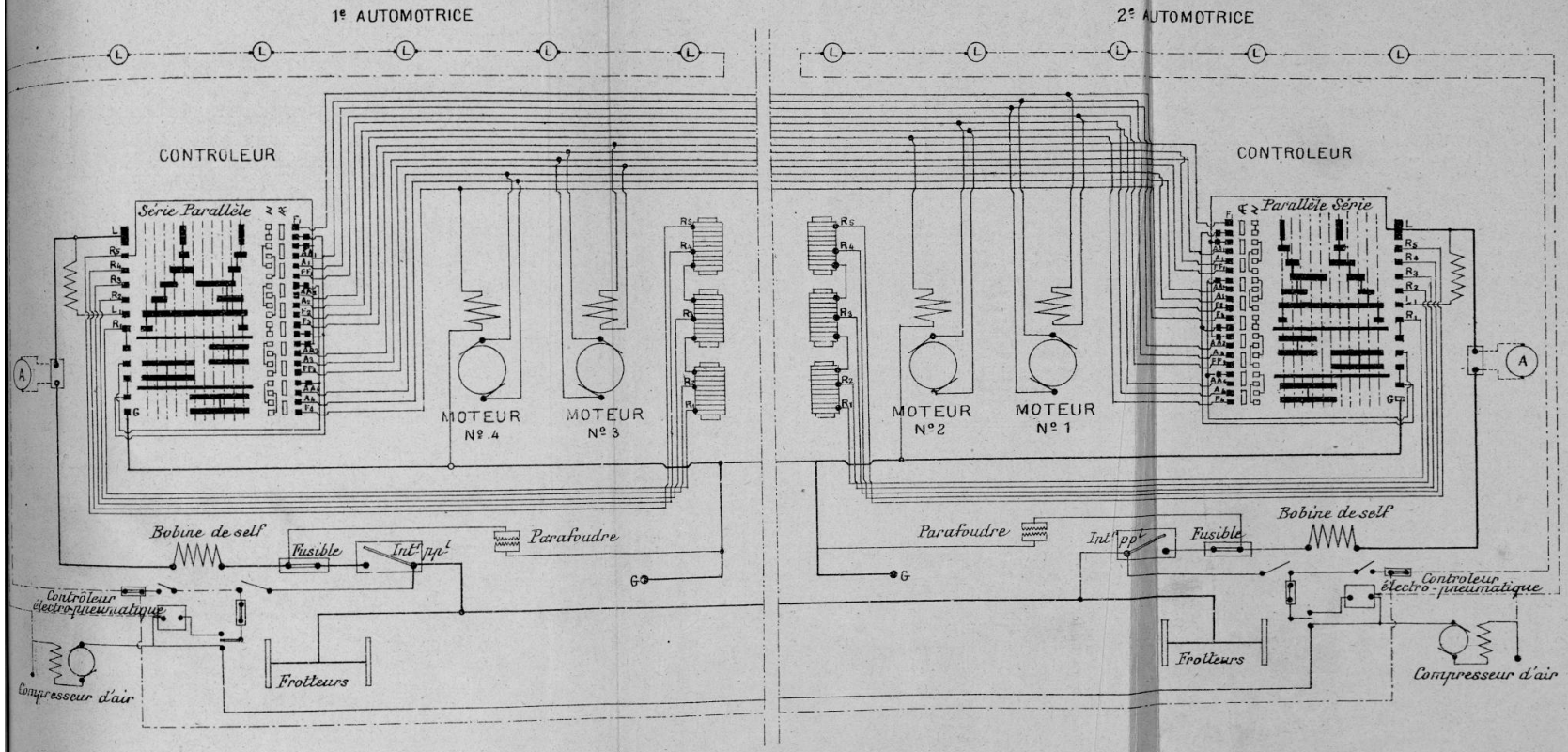
164. **Troisième système** (Thomson-Houston, Métropolitain de Paris). — On a cherché à diminuer le nombre des fils de jonction à forte section. On y est arrivé en appliquant le principe de la commande

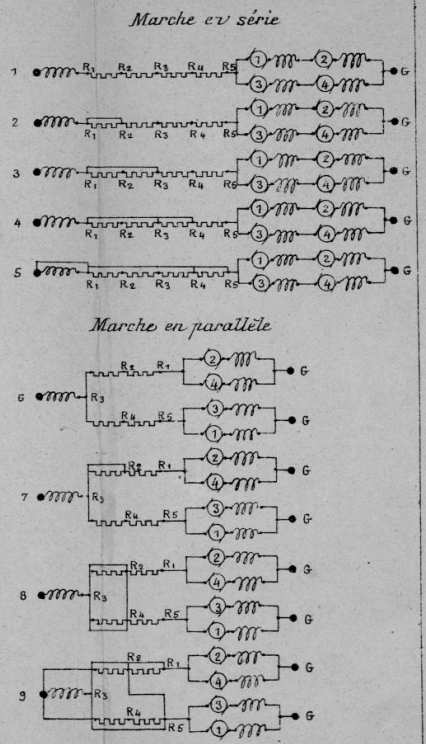
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 368 TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANT CONTINU

SYSTÈMES A DEUX UNITÉS MOTRICES — LIGNE CHAMP DE MARS — INVALIDES (1900)

Schéma des connexions





Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à distance à certains appareils de manœuvre au moyen d'électro-aimants et c'est pour assurer l'inversion du sens de marche qu'on y a songé tout d'abord.

En effet, la nécessité de croiser les connexions de l'induit par rapport à l'inducteur oblige à amener aux postes de manœuvre quatre conducteurs du circuit principal. Si ce croisement est effectué au moyen d'un appareil approprié dit « inverseur » commandé à distance, celui-ci peut être placé à proximité des moteurs et l'on n'a

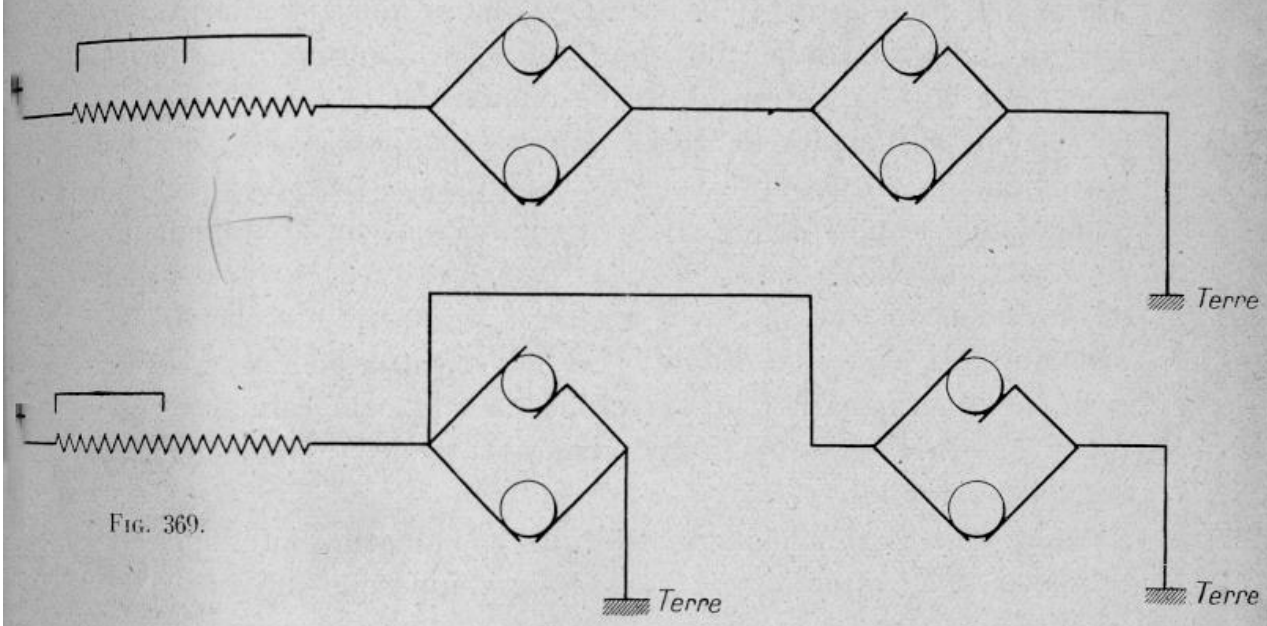


FIG. 369.

plus alors qu'à amener aux postes de manœuvre deux conducteurs par moteur correspondant aux bornes d'entrée et de sortie du courant. En outre, tous les moteurs devant être inversés à la fois, les différents inverseurs correspondant à chaque moteur ou à chaque groupe de moteurs peuvent être mis en parallèle et commandés tous ensemble, ce qui n'exige en définitive que deux fils de jonction et de faible section.

C'est ce qui a été réalisé par la General Electric Co et la Société Claret-Vuilleumier. Dans cette méthode, le train n'est plus parcouru que par un seul gros câble pour le circuit de traction et par les deux fils précités.

Un tel système, sous la forme encore d'unités doubles, a été appliqué au chemin de fer Métropolitain de Paris par la Compagnie Thomson-Houston avant l'adoption des systèmes modernes à unités

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

multiples à *contacteurs*. Dans ce cas, les deux moteurs de chacune des deux voitures motrices étaient normalement couplés en parallèle formant un groupe et le contrôleur effectuait le couplage série-parallèle de ces deux groupes.

Pour marcher avec les deux moteurs d'une voiture seulement, on manœuvrait un *commutateur spécial* qui permettait d'effectuer le couplage série-parallèle de ces deux moteurs.

Le fonctionnement de ce système s'explique facilement au moyen du schéma de couplage représenté par l'une ou l'autre des figures 370 et 371. Pour celui de la première figure, une automotrice est en tête de chaque train partiel; pour celui de la seconde, les motrices sont l'une en tête, l'autre en queue du train total.

Chacun des modes de couplage correspondant à ces schémas a ses avantages au point de vue de l'exploitation. Le mode qui semble avoir donné le plus de satisfaction sur la ligne du Métropolitain est celui qui consiste à avoir les deux motrices respectivement en tête et en queue du train total, de manière à pouvoir marcher dans un sens ou dans l'autre en cas de nécessité. Il suffit, pour cela, au wattman, de se transporter de la cabine de tête à la cabine de queue et de marcher en sens inverse pour reprendre immédiatement le service « en retour ».

Au Métropolitain, chaque motrice du type de celles qui nous occupe comporte une cabine où sont installés les appareils suivants :

1 contrôleur à soufflage magnétique comportant sept positions avec résistances dans la marche série, et six positions avec résistances dans la marche en parallèle;
1 disjoncteur automatique;
1 plomb fusible à soufflage magnétique;
1 parafoudre;
1 commutateur spécial à deux positions;

Puis, sur la voiture motrice se trouvent encore :

1 jeu de résistances pour la marche en série-parallèle;
1 inverseur électro-magnétique pour la marche en arrière;
2 moteurs de 150 chevaux (type T-H 4);
4 frotteurs de prise de courant pour troisième rail;
1 compresseur d'air électrique à commande automatique pour les freins.

Enfin, sur chacune des faces avant et arrière de la voiture, se trouvent :

1 coupleur pour câble principal de train (circuit des moteurs);
1 coupleur à deux fiches pour inverseurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

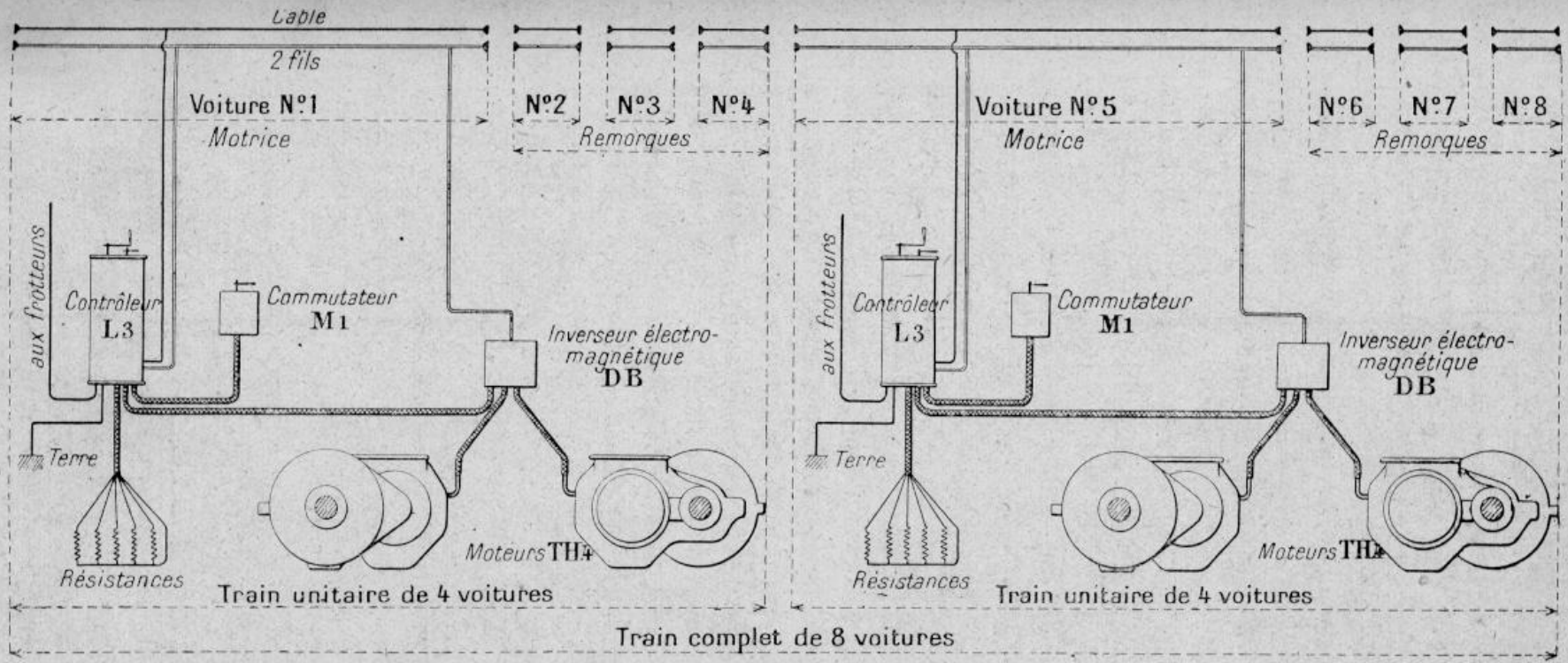


FIG. 370.

Schéma de câblage d'un train à 8 voitures (1re combinaison).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

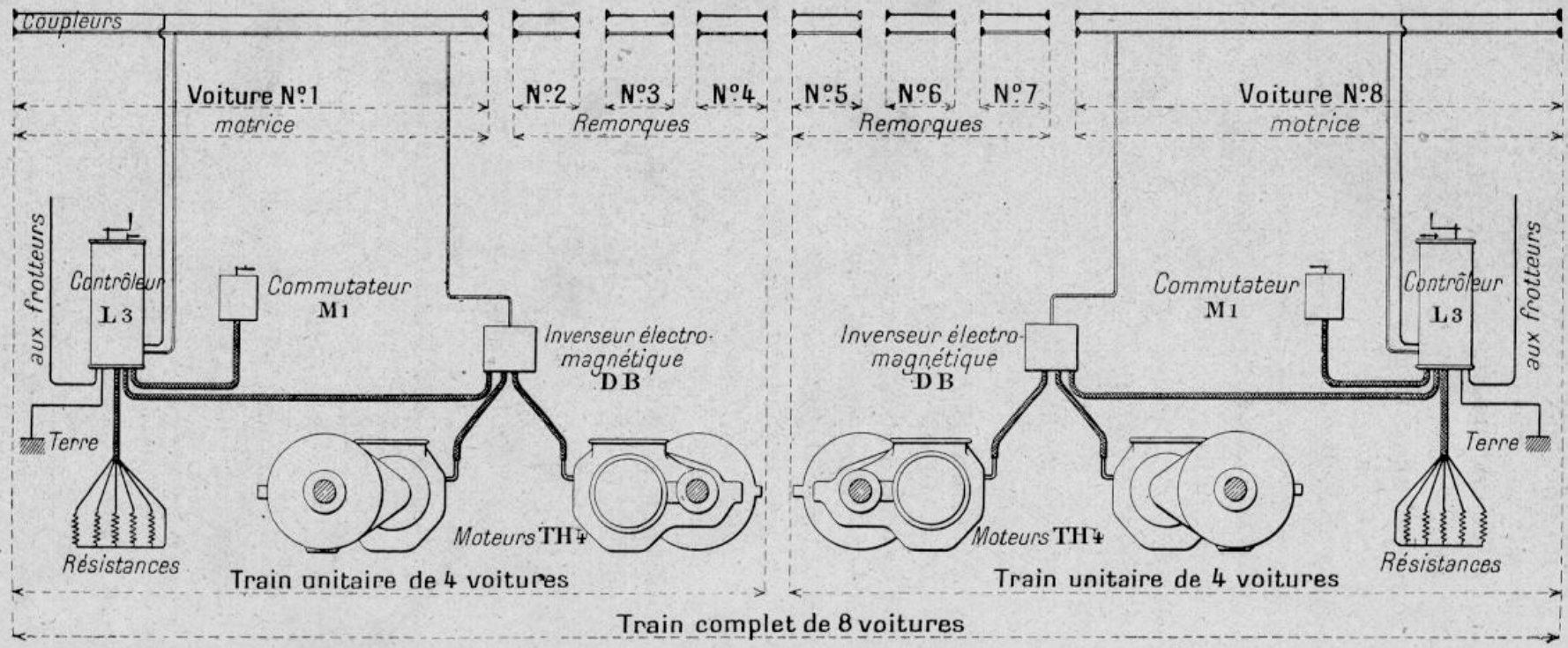


FIG. 371.

Schéma de câblage d'un train à 8 voitures (2e combinaison).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

165. **Critique de ces systèmes.** — La principale critique de ces systèmes résulte de la nécessité d'un câble du circuit de traction régnant sur toute la longueur du train, car si l'installation d'un tel câble parcouru par le courant total ne présente aucune difficulté pratique, elle fait naître des craintes au sujet des incendies dont ce câble pourrait être la cause dans les voitures qu'il traverse. Dans ces conditions, il est difficile de multiplier le nombre des motrices. C'est ainsi que l'on a été amené à rechercher des systèmes dans lesquels les intercommunications soient uniquement constituées par des conducteurs ne donnant passage qu'à de faibles courants. C'est dans cet ordre d'idées que sont conçus les systèmes modernes à unités multiples dont nous allons maintenant nous occuper.

B. — Systèmes a unités multiples

166. **Principe. Systèmes divers.** — Le principe fondamental de ces systèmes dans lesquels on peut employer un nombre quelconque de motrices est celui de l'*emploi exclusif de la commande asservie.*

Pour supprimer les grosses canalisations, *Sprague,* en 1885, proposa d'attribuer à chaque motrice un régulateur distinct et d'actionner tous ces appareils par une seule transmission.

En 1894, *Siemens et Halske* proposèrent de commander les régulateurs par des *tringles articulées,* mais l'effort à fournir pour un certain nombre de voitures devenait considérable et le système devenait rapidement peu pratique.

On a été ainsi conduit à des systèmes dans lesquels chaque paire de moteurs, le contrôleur et les résistances qui lui correspondent, forment un ensemble que l'on commande à distance par l'intermédiaire d'un servo-moteur actionnant le tambour principal du contrôleur, d'où le nom de systèmes à *contrôleurs commandés à distance* ou « asservis ».

Le servo-moteur actionnant le contrôleur peut être pneumatique, comme dans le système Auvert, ou électro-magnétique comme dans le système Sprague, dont le principe a été particulièrement fécond, ou encore électro-pneumatique comme dans les systèmes Westinghouse et Siemens-Schuckert.

On est ensuite arrivé aux systèmes plus modernes dans lesquels chaque manœuvre est effectuée à distance au moyen de relais, d'où

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le nom de *systèmes à contrôleurs relayés*. Les uns sont à commande électro-magnétique, tels les systèmes General Electric ou Thomson-Houston et Sprague-General Electric ou Sprague-Thomson-Houston, qui participent du principe du système Sprague, et le système Dick-Kerr dont le principe est assez différent bien que toujours purement électro-magnétique.

Les autres sont à commande électro-pneumatique, c'est-à-dire que les relais, au lieu d'être électriques, sont électro-pneumatiques : l'électricité qui est empruntée à une source étrangère à basse tension (batterie) servant uniquement à régler, au moyen de soupapes appropriées, l'admission de l'air dans les appareils de commande des circuits des moteurs. Tels sont les systèmes Westinghouse, deuxième et troisième types (Turret type et Unit Switch type).

On voit d'après cet exposé d'ensemble, que l'on a des systèmes pneumatiques, électro-magnétiques et électro-pneumatiques.

Nous allons examiner successivement ces différents modèles.

1° *Systèmes à contrôleurs asservis*

167. **Système pneumatique Auvert (1895).** — Ce système a été appliqué par la Compagnie du chemin de fer P.-L.-M. à la ligne du Fayet à Chamonix. Il a en outre comme autre caractéristique celui d'être rhéostatique. (Le système Sprague et ceux que nous verrons par la suite sont à contrôle série-parallèle.)

Chaque automotrice comprend un servo-moteur commandant l'arbre du contrôleur rhéostatique appelé ici « combinateur ». Le poste du mécanicien est sur la motrice de tête.

Tous les servo-moteurs du train sont mis en relation entre eux par deux conduites générales servant, l'une pour la marche avant, l'autre pour la marche arrière, et réunies, d'un véhicule à l'autre, par des demi-accouplements à soupape comme ceux du frein Westinghouse-Henry.

Principe du fonctionnement du système (1). — Chaque servo-moteur de voiture se compose, en principe, d'un gros cylindre contenant un piston relié par une tige au combinateur.

(1) Cette description et la figure qui l'accompagne sont empruntées à l'*Industrie électrique*, du 10 mars 1901.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En temps normal, le piston est au milieu de sa course et le combinateur à zéro; mais si on vient à envoyer de l'air à une certaine pression sur l'une ou l'autre face, le piston va se déplacer et entraîner avec lui l'arbre du combinateur. On pourra donc provoquer à volonté soit la marche avant, soit la marche arrière du véhicule.

Restait à obtenir un démarrage graduel avec crans d'arrêt correspondant à chaque touche du combinateur, suivant les vitesses à réaliser. Le problème a été résolu en envoyant sur les pistons de l'air à des pressions déterminées et graduellement croissantes.

La pression, qui a une certaine valeur pour le premier cran de marche, est rendue plus grande pour passer au deuxième, et ainsi de suite. Pour que le piston ne se déplace chaque fois que juste de la quantité nécessaire, on a échelonné sur son parcours une série de butées constituées par les tiges de petits pistons soumis, eux, sur une de leurs faces, à une pression toujours uniforme. Le gros piston du servo-moteur commence par rencontrer la tige d'un premier petit piston qui l'arrête si la pression ne dépasse pas la valeur initiale. Si on vient à augmenter la pression de l'air sur le gros piston, ce dernier se déplacera, repoussant le premier petit piston jusqu'à la rencontre du deuxième, et ainsi de suite.

Le retour à zéro du combinateur se fait automatiquement en cas de rupture d'un attelage, car, à ce moment, les conduites se rompent et laissent échapper l'air comprimé agissant sur les gros pistons. Les petits pistons qui, eux, reçoivent l'air du réservoir à frein placé sous la voiture, ramènent alors immédiatement le gros piston au milieu de sa course et, par suite, le combinateur à zéro, en même temps que se produit le bloquage automatique du frein Westinghouse.

Ce dispositif présente donc une grande sécurité pour l'ascension des fortes rampes.

Description. — Le système comprend une série de servo-moteurs secondaires placés sur chaque véhicule et actionnés simultanément par un appareil de commande dit servo-moteur principal placé en tête et que nous supposerons réduit au principe de deux robinets R et R'.

Chaque servo-moteur secondaire se compose (fig. 372) :

1° D'un bâti G, sur lequel sont boulonnés deux groupes de cylindres H composés chacun de cinq petits cylindres parallèles entourant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un cylindre plus grand; le grand cylindre a 130 millimètres de diamètre et les petits 50 millimètres;

2° D'un grand piston K, qui porte en son milieu un plateau venu de fonte avec lui par l'intermédiaire duquel il vient buter sur les tiges des petits pistons ;

3° D'une tige O fixée au grand piston et par laquelle celui-ci commande par crémaillère et pignon le combinateur électrique de la voiture;

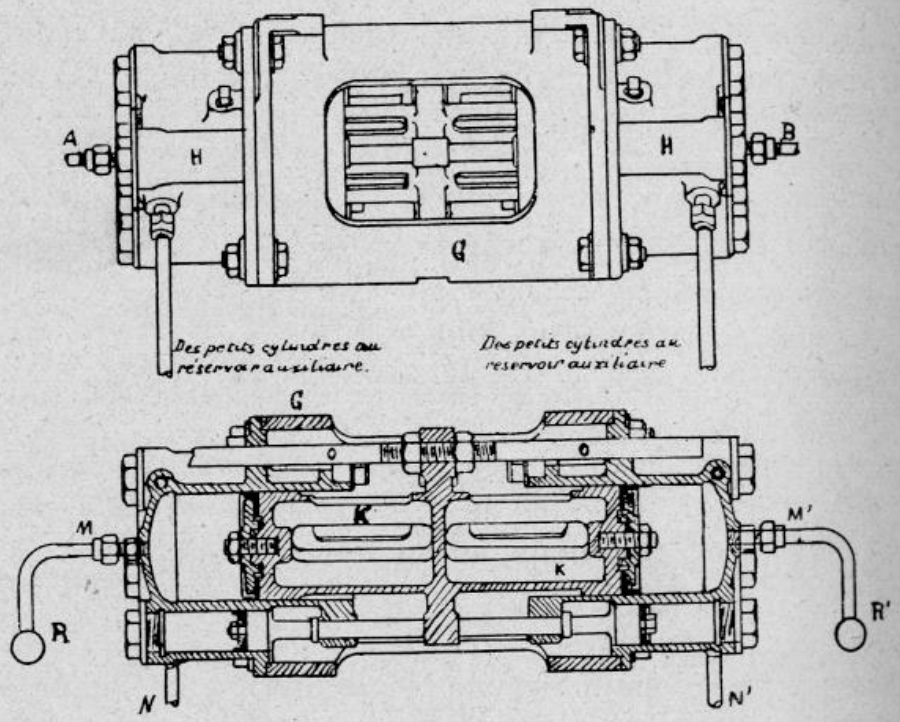


FIG. 372.

Appareil de commande (système Auvert) du chemin de fer électrique de Chamonix.

4° De deux conduites d'air M et M′ mettant l'un des côtés du grand piston en communication avec la conduite générale de marche avant et l'autre avec celle de marche arrière; ces conduites aboutissent chacune à un robinet R ou R′ disposé d'une manière analogue aux appareils de manœuvre du frein modérable Westinghouse; ces deux robinets R, R' sont placés sur la motrice de tête du train et permettent d'envoyer, sur l'une ou l'autre des faces du grand piston K, de l'air comprimé à une pression déterminée, variable à volonté;

5° De dix petits pistons formant deux groupes symétriques de cinq, l'un pour la marche avant, l'autre pour la marche arrière. Quand

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le grand piston est dans sa position médiane, les tiges des cinq petits pistons de chaque groupe portent sur des butoirs venus de fonte avec le bâti. En même temps, la tige de l'un d'eux est en contact avec le plateau du grand piston. La tige du deuxième piston, plus courte de 16 millimètres, est en retrait sur celle du premier et ainsi de suite jusqu'au cinquième, dont la tige est en retrait de 54 millimètres;

6° De deux conduites N et N′ faisant communiquer en permanence les petits cylindres entre eux et avec le réservoir auxiliaire d'air comprimé à pression sensiblement constante, soit 4 à 5 kg/cm², de manière à appliquer toujours tous les petits pistons sur leurs butoirs.

Fonctionnement. — Au repos, le volant de manœuvre du servo-moteur principal est enclanché au cran zéro. Les soupapes d'admission des conduites marche avant et marche arrière sont fermées et les soupapes d'évacuation sont ouvertes. Les grands pistons des servo-moteurs ne supportent donc aucune pression.

L'air comprimé (sous pression constante) des réservoirs auxiliaires et, par suite, des petits cylindres maintient tous les petits pistons contre les butées des corps de cylindre H; deux petits pistons, un de chaque côté, maintiennent les grands pistons dans la position médiane.

Ceci posé, soit $2p$, la pression en kilogrammes par cm² que l'on doit donner à l'air agissant sur un grand piston pour équilibrer exactement l'effort dû à un petit piston. Si l'on établit sur l'une des faces des grands pistons une pression $3p$, ceux-ci refoulent les premiers pistons et viennent buter contre les deuxièmes. Ils ne vont pas plus loin, parce que, pour refouler en même temps ces deuxièmes petits pistons, il faudrait une pression de $4p$.

Les combinateurs électriques sont alors placés dans leur première position de démarrage par l'intermédiaire de la tige O.

Si maintenant on établit une pression $5p$ sur la même face des grands pistons, ils refoulent les deuxièmes petits pistons et sont arrêtés par les troisièmes. Ils ne vont pas plus loin car, pour refouler ces derniers, il faudrait une pression de $6p$. Les combinateurs électriques sont alors placés dans la deuxième position de démarrage, et ainsi de suite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par conséquent, pour amener tous les combinateurs des diverses voitures du train à leurs positions 1, 2, 3, 4, 5, il suffit d'établir, puis de maintenir automatiquement, soit dans la conduite générale de marche avant, soit dans celle de marche arrière, des pressions égales à $3p$, $5p$, $7p$ et $11p$ kilogrammes : cm^2 ; ce résultat s'obtient au moyen du servo-moteur principal et les mouvements des divers combinateurs sont bien simultanés et synchrones.

Nous donnons, en planche hors-texte (fig. 373), le schéma général des connexions de l'équipement électrique d'une des motrices de la ligne en question.

168. **Système électro-magnétique Sprague.** — Ce système a reçu sa première application au « South Side Elevated Ry » de Chicago, en 1897.

L'équipement d'une voiture motrice comprend un contrôleur actionné par servo-moteur électrique, un inverseur commandé par électros et un tableau des relais.

Un train Sprague se présente alors schématiquement sous la forme donnée par la figure 374.

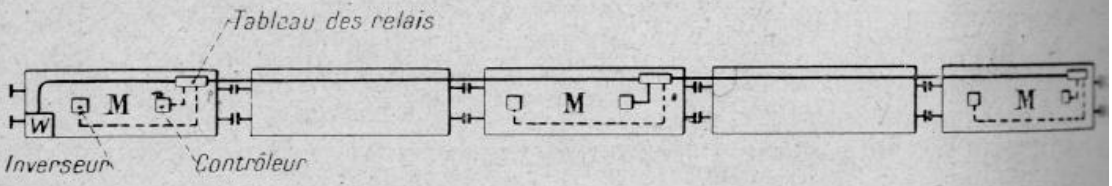


FIG. 374. — Train Sprague.

Les relais agissent sur les circuits du servo-moteur du contrôleur et des électros de l'inverseur.

Au total cinq fils, soit trois de commande des relais et deux de commande de l'inverseur courant d'une extrémité à l'autre du train. L'appareil de manœuvre est un petit commutateur qui permet de lancer le courant dans les fils de commande.

Le servo-moteur est muni d'un inducteur à deux enroulements correspondant aux deux sens de rotation. Il attaque le contrôleur par l'intermédiaire de ressorts et d'une roue à cames de manière à assurer un passage brusque d'une position à la suivante. En plus des touches ordinaires correspondant aux couplages série-parallèle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

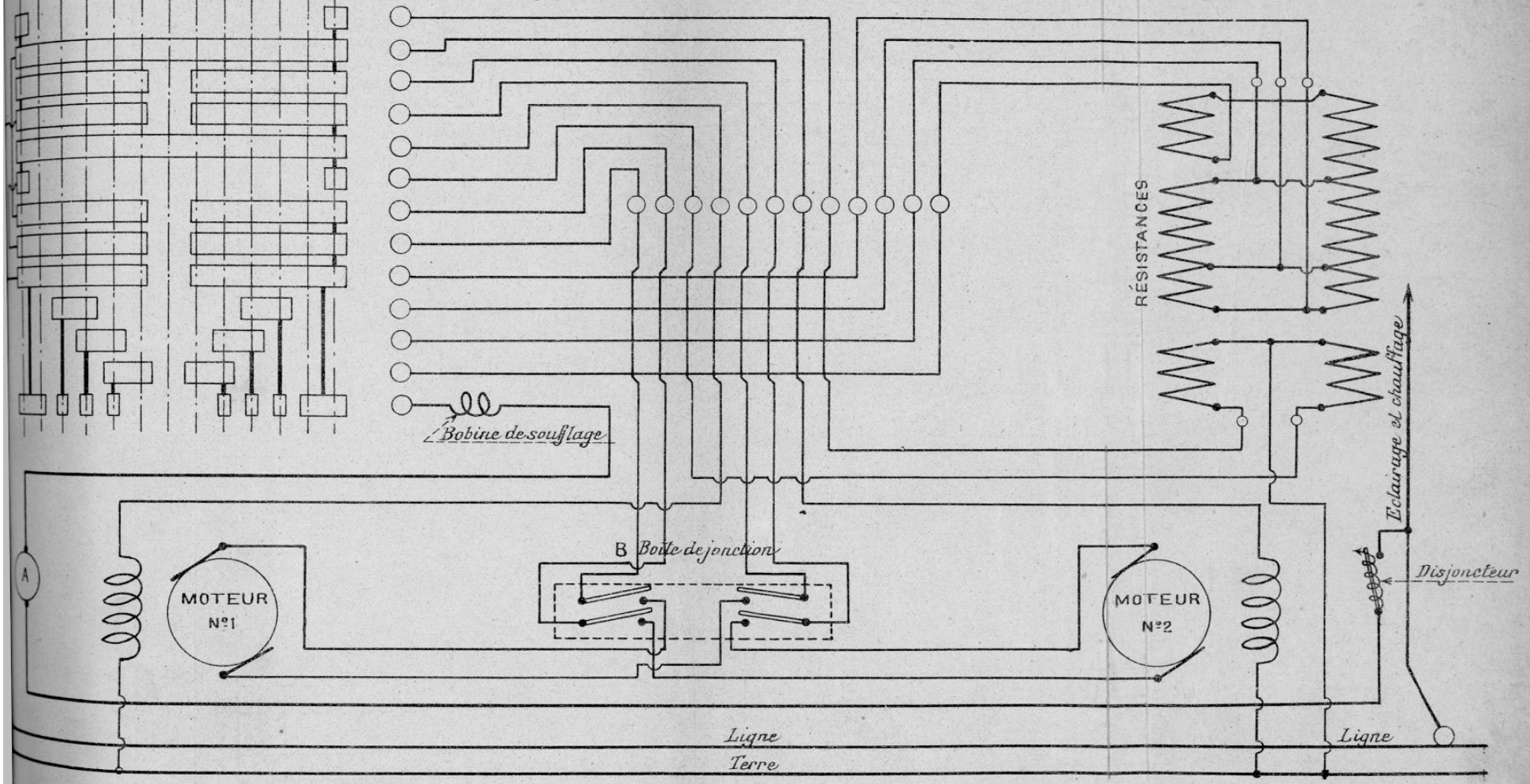
Fig 373 TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANT CONTINU

SYSTEMES A UNITÉS MOTRICES MULTIPLES

CONTROLEURS RHÉOSTATIQUES ASSERVIS DE LA LIGNE DU FAYET A CHAMONIX

PROCÉDÉ DE M. AUVERT (1895)

Schéma des connexions



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

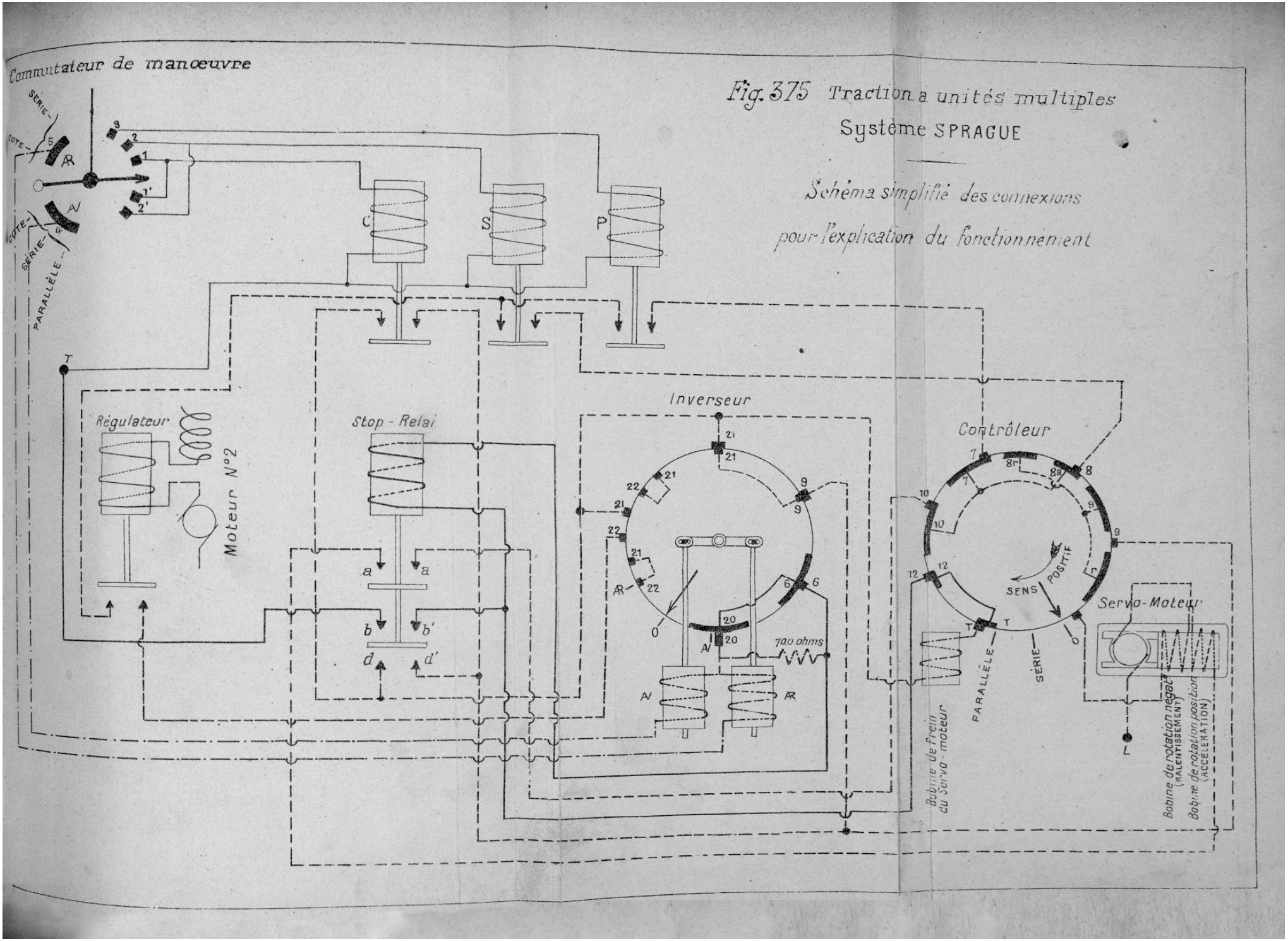


Fig. 375 Traction a unités multiples

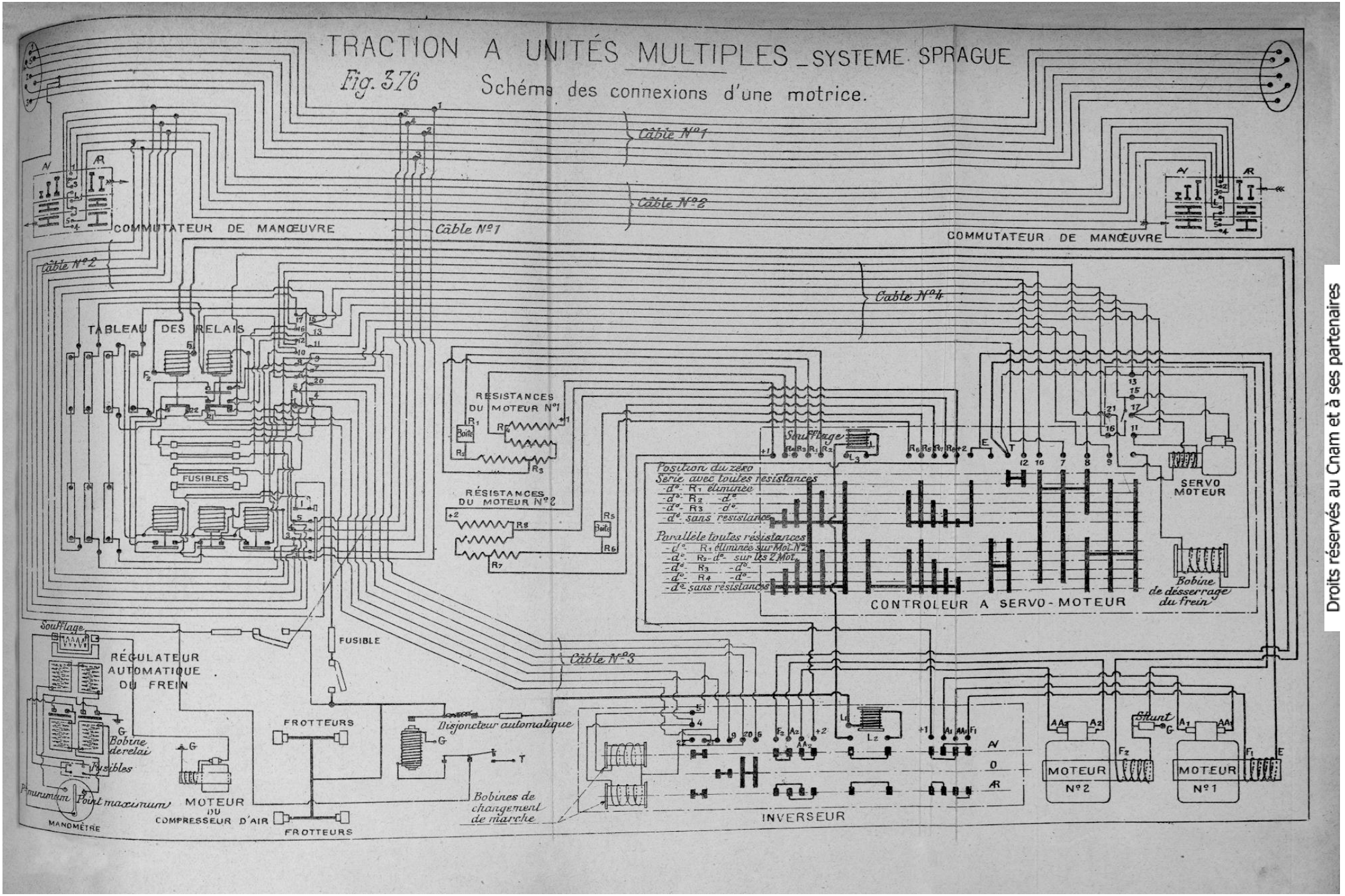
Système SPRAGUE

Schéma simplifié des connexions pour l'explication du fonctionnement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TRACTION A UNITÉS MULTIPLES _ SYSTEME SPRAGUE

Fig. 376 Schéma des connexions d'une motrice.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et aux différentes résistances, le tambour du contrôleur porte un certain nombre de segments dont l'utilité sera indiquée plus loin. Le servo-moteur est muni d'un frein électro-magnétique qui le bloque dès qu'il ne reçoit plus de courant. L'inverseur est disposé de manière à revenir au zéro lorsqu'aucun des deux électros n'est excité; comme le contrôleur, il porte des touches supplémentaires. Lorsque l'inverseur est au zéro, le courant n'arrive plus au moteur.

Les relais sont au nombre de cinq.

Trois de ces relais correspondent respectivement à la marche sans courant, à la marche en série et à la marche en parallèle. Le quatrième, dit « stop-relai », est placé dans un but de sécurité. Le dernier, dit « régulateur », dont la bobine est parcourue par le courant d'un des moteurs, réalise l'automaticité du démarrage.

La figure 375 représente un schéma simplifié du système Sprague et la figure 376 le schéma détaillé.

Les cinq fils de commande sont marqués 1, 2, 3, 4, 5.

Les relais C, S, P sont ceux de marche sans courant, en série et en parallèle. Pour simplifier, nous n'avons conservé au contrôleur et à l'inverseur que les touches supplémentaires qui ont été figurées sur un cercle, alors qu'en réalité elles forment des lignes de segments parallèles sur les tambours. Le commutateur de manœuvre a été également figuré plan, bien qu'il soit construit sous la forme combinateur. La poignée de l'appareil de manœuvre doit être manœuvrée vers la droite ou vers la gauche, suivant que l'on veut faire marcher le train en avant ou en arrière. Dans la marche arrière, on ne peut pas passer en parallèle. Un ressort tend à ramener la poignée au zéro, ce qui oblige le machiniste à ne pas l'abandonner pendant la marche.

Le commutateur de manœuvre a pour effet de mettre les entrées des bobines des relais C. S. P. et les bobines de l'inverseur en communication avec la ligne.

L'inverseur, le contrôleur et le manipulateur étant au zéro, comme sur la figure 375, aucun courant ne peut passer.

Si l'on pousse le manipulateur sur la touche 1 de marche avant, le relais C reçoit du courant; il se lève, mais aucun courant ne peut parvenir au servo-moteur.

En même temps, le courant amené à l'électro de marche AV gagne la terre par les contacts 20 et 6 de l'inverseur, la bobine du stop-relai,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les contacts 12 et 9 du contrôleur. Le stop-relai se lève et l'inverseur se place dans la position AV. Dans cette position, le courant de l'inverseur ne passe plus par 20 et 6, mais à travers la résistance de 700 ohms, il continue à passer par la bobine du stop-relai et gagne la terre à travers les contacts *bb'* qui sont alors en prise.

En poussant le manipulateur sur la position 2, le relai S se lève. Le courant passe dans le servo-moteur en traversant la bobine de rotation positive (accélération), passe par deux touches du stop-relai, traverse le contrôleur par 10 et 8, vient aux touches de relais S, puis aux touches du régulateur et de là passe par les touches 22 et 21 de l'inverseur, traverse la bobine du frein du servo-moteur et gagne la terre.

En conséquence, le frein se desserre, le contrôleur quitte la position zéro, le courant est lancé dans les moteurs et le train démarre. Le contrôleur continuant à avancer, le courant augmente dans les moteurs et, lorsqu'il atteint une certaine valeur, le régulateur se lève et coupe le courant dans le servo-moteur. Celui-ci s'arrête, le contrôleur reste en position jusqu'à ce que le courant des moteurs diminue par suite de l'accélération imprimée au train. Le régulateur finit par retomber et laisse de nouveau progresser le servo-moteur. Les choses continuent ainsi jusqu'à ce que le contrôleur soit dans la position série sans résistances. Le courant du servo-moteur est alors coupé en 8.

On pourra suivre de même ce qui se passe lorsqu'on fait avancer le manipulateur sur la touche 3 (marche en parallèle) et lorsque ensuite, on le ramène à l'une des premières positions. Dans ce dernier cas, c'est la bobine de rotation négative qui agit.

Lorsqu'on ramène le manipulateur au zéro, à partir d'une position quelconque, le courant est coupé dans les électros de l'inverseur qui revient au zéro et coupe ainsi immédiatement le courant dans les moteurs. Le contrôleur revient ainsi de lui-même au zéro. L'inverseur ne peut se mettre sur une position de marche tant que le contrôleur n'est pas revenu au zéro.

La commande est donc entièrement automatique et ne permet pas les fausses manœuvres.

Il est enfin à remarquer que, dans ce système, chaque contrôleur fonctionne indépendamment des autres et que sa marche n'est réglée que par la diminution de courant due à la *f. c. e. m.* déve-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loppée par les moteurs correspondants, c'est-à-dire par les résistances propres de l'unité considérée. Il est donc possible d'employer des moteurs différents, pourvu que le tableau des relais correspondants soit réglé d'une manière appropriée pour le groupe de moteurs qu'il commande.

169. **Système électro-pneumatique Westinghouse.** — Ce système, à commande *électro-pneumatique,* résoud également le cas général du contrôle série-parallèle. Il existe un gros contrôleur sur chaque voiture motrice, manœuvré par des pistons à air comprimé dont l'alimentation est réglée par des robinets-valves commandés par des relais à électros, dans lesquels passe un courant, sous 14 volts, fourni par des accumulateurs. Ce système, employant une énergie étrangère, soustrait ainsi la manœuvre à l'influence des incidents qui peuvent se produire en ligne. De plus, la tension du courant de commande est absolument inoffensive.

Trois modes de réalisation ont été successivement appliqués; nous verrons ici le premier et plus loin les deux autres qui sont du type à contrôleurs relayés.

Dispositif du chemin de fer du tunnel de la Mersey (« drum type », à contrôleurs asservis.)

Dans le premier dispositif Westinghouse, lequel a été employé à la Mersey (1), et dont le schéma est donné sur la figure 377, chaque motrice est munie d'un contrôleur dit « régulateur-coupleur » représenté sur la figure 378 et qui comprend deux parties : la partie inférieure ou coupleur est le correspondant du contrôleur ordinaire de tramway et en remplit les fonctions; la partie supérieure ou régulateur comprend l'ensemble du système des servo-moteurs.

Tous les organes du coupleur (inverseur, disjoncteur, touches de résistances et de couplage des moteurs, etc.) sont mis en action par des servo-moteurs à air comprimé, lesquels sont mis en relation (fig. 377) par une ligne électrique à sept conducteurs, dite ligne de train, avec les manipulateurs des postes de commande qui se trouvent dans chaque cabine d'avant et d'arrière de toutes les voitures motrices. De chacun de ces postes indifféremment, mais d'un seul à la

(1) La description de cet équipement est empruntée à la *Revue générale des chemins de fer*, de décembre 1903.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

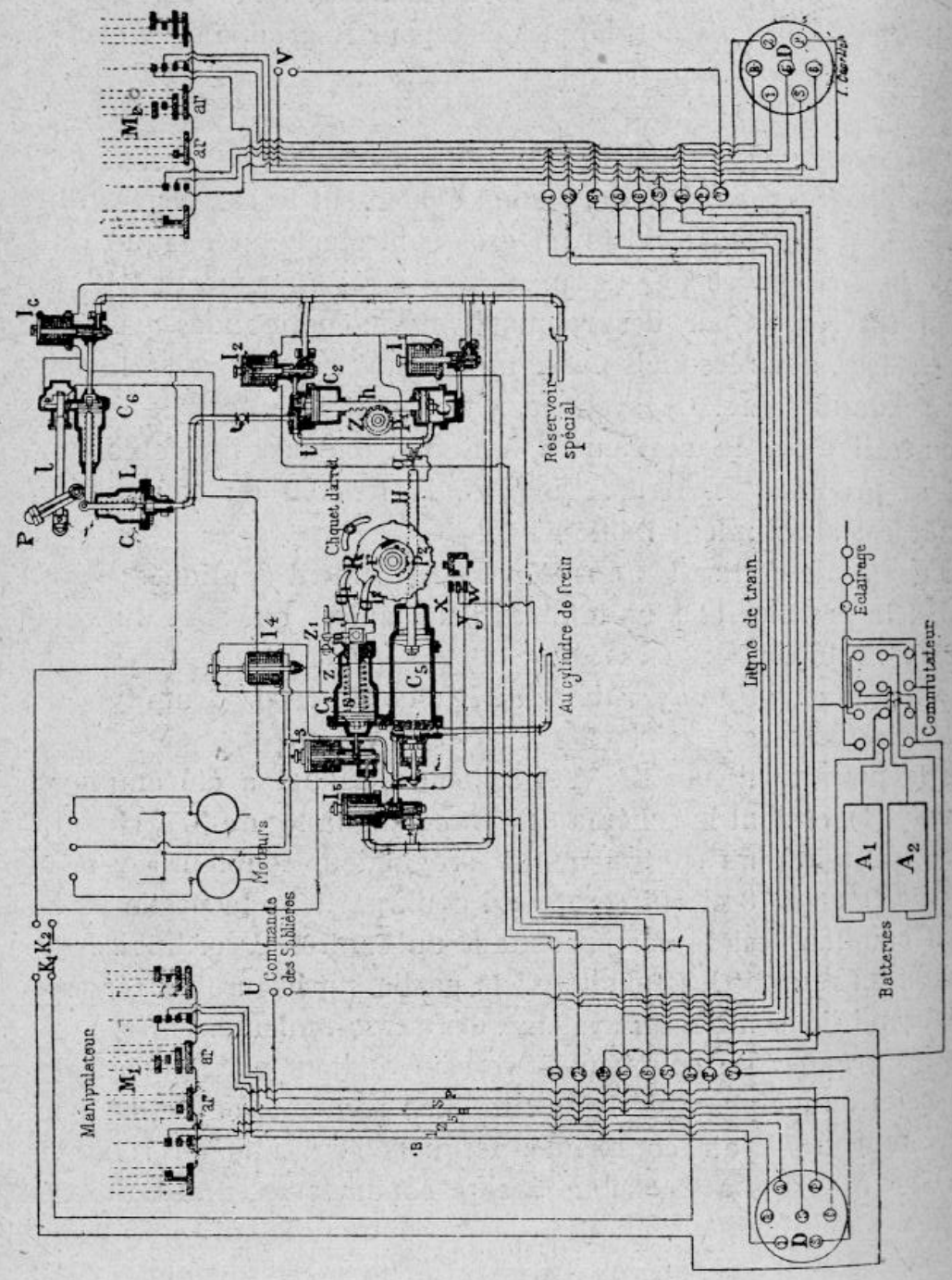


FIG. 377.

Schéma des servo-moteurs de l'appareil de commande à distance avec l'indication des circuits les reliant aux manipulateurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

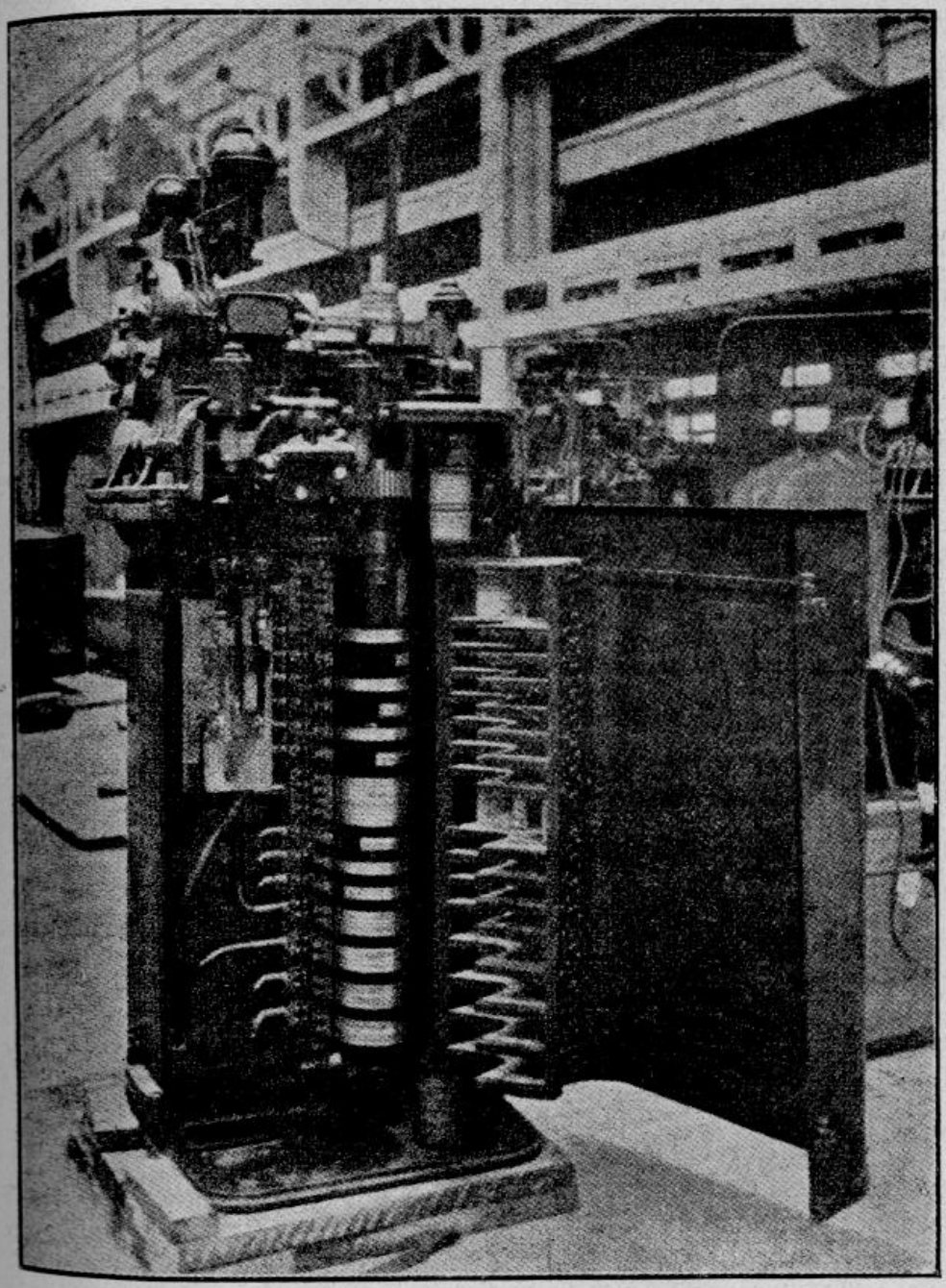


FIG. 378.

Contrôleur ouvert surmonté de l'appareil de commande à distance.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fois, le wattman appelé à la conduite du train peut gouverner, au moyen d'un manipulateur très simple, tous les contrôleurs du train et obtenir le synchronisme parfait dans leur fonctionnement.

Tous les appareils susceptibles d'être mis en mouvement dans chaque appareil de commande pour le contrôle et le fonctionnement des moteurs sont munis de servo-moteurs à air comprimé lesquels sont alimentés par un réservoir spécial indépendant des cylindres de frein, à savoir :

Inverseur. — L'axe de rotation de l'inverseur est terminé par un pignon denté engrenant avec une crémaillère H horizontale qui constitue la tige unique de deux pistons conjugués se mouvant chacun dans un cylindre différent, C^1 et C^2. L'inverseur sera ainsi tourné dans un sens (marche avant) ou dans l'autre (marche arrière) suivant que l'air comprimé arrivera à l'arrière de l'un ou l'autre des deux pistons.

Coupleur-combinateur. — Le coupleur-combinateur, qui est du même type que ceux des contrôleurs dont sont munies les automotrices isolées, a son axe vertical terminé à sa partie supérieure par un pignon p^2; ce pignon engrène avec une crémaillère H calée sur la tige d'un piston se mouvant dans un cylindre à simple effet C^3. Sur ce même axe du coupleur se trouvent deux roues à came r et R, dans lesquelles peuvent engrener deux cliquets q_1, q_2, solidaires d'un piston qui se meut dans un cylindre C^3. Un ressort antagoniste s maintient normalement le piston appliqué sur le fond du cylindre. Quand on envoie l'air comprimé sur la face arrière du piston, celui-ci se déplace de gauche à droite et les cliquets engrènent les dents des roues r, R, en faisant tourner le coupleur d'un cran, dans le sens des aiguilles d'une montre. Un nouveau mouvement du piston, après qu'il est revenu en arrière sous l'action de son ressort antagoniste, provoque l'avancement du coupleur d'un nouveau cran.

Disjoncteur automatique. — Le disjoncteur automatique, qui fonctionne de lui-même pour couper le courant en cas de court-circuit ou de surcharge, doit être relevé (pour la reprise du fonctionnement normal) après que le motif qui a nécessité sa mise en jeu, a disparu.

Ce relèvement se fait par un servo-moteur C^6 actionnant la poignée P du disjoncteur. Un servo-moteur C peut être mis en action

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en cas de danger pour s'opposer à la fermeture du disjoncteur sous l'action du servo-moteur C^6.

Electros et lignes de commande. — Tous ces servo-moteurs sont munis de valves commandées par des électro-aimants I_1, I_2, I_3, I_5, I_6. Tous ces électros sont donc branchés sur des circuits de commande, lesquels sont en relation aussi bien avec les manipulateurs M_1 et M_2, situés respectivement sur la cabine avant et la cabine arrière de l'automotrice qui les porte, qu'avec tous les manipulateurs situés sur les autres voitures motrices. Toutes les voitures communiquent en effet entre elles, comme nous l'avons déjà dit, par un câble électrique à 7 conducteurs qui parcourt tout le train, l'assemblage se faisant de voiture à voiture au moyen des accouplements D.

Le courant à faible tension qui parcourt ces circuits est pris sur des batteries A_1, A_2 et non sur les prises de courant de traction, de façon qu'on soit toujours sûr qu'il ne circule pas dans ces circuits de commande parcourant le train d'un bout à l'autre, de courants à haut voltage pouvant donner lieu à des courts-circuits dangereux.

Fonctionnement. — Il est facile de voir, sans cependant entrer dans trop de détails, comment fonctionne l'appareil.

Si on tourne la manette du manipulateur M vers la droite, pour la marche avant, on commence par envoyer le courant dans l'électro I_1 qui ouvre la valve du cylindre C_1, la crémaillère H se mettant en mouvement tourne l'inverseur pour le mettre sur la marche avant (pour la marche arrière, c'est le cylindre C_2 qui fonctionnerait) (1).

Les électros I_1 ou I_2 ne peuvent d'ailleurs être excités que lorsque la crémaillère H du contrôleur dont il sera parlé plus loin est en *d* (position de la figure 3); car c'est seulement dans cette position (contrôleur au zéro) que le circuit des électros est fermé par le contact *g* solidaire de la crémaillère H.

Le manipulateur envoie ensuite le courant dans l'électro I^3 qui fait arriver l'air comprimé dans le cylindre C^3 ; la pression de l'air fait alors avancer le piston de ce cylindre en combattant l'effort antagoniste du ressort *s*. Les cliquets q^1, q^2, solidaires de ce piston, engrè-

(1) Un tuyau de communication peut mettre en communication les deux cylindres C_1 et C_2, de manière à équilibrer la pression sur chacun des pistons solidaires de la crémaillère *h* et éviter le déplacement de celle-ci dans le cas où l'air comprimé arriverait intempestivement par une déviation au cylindre de l'inverseur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nent avec les roues r, R du contrôleur et font avancer celui-ci d'un cran. La monture m du piston vient alors buter contre un butoir j qui coupe un contact z sur le circuit de l'électro I_3, le courant est interrompu, la valve commandée par I_3 est relevée, le cylindre C^3 est mis à l'échappement et le ressort antagoniste s ramène en arrière le piston et les cliquetis q^1 et q^2 qui en sont solidaires ; le contact z^1 se referme alors, le courant se rétablit sur l'électro I_3, un nouvel avancement se produit, et le contrôleur avance d'un nouveau cran et ainsi de suite automatiquement, réduisant progressivement les résistances pour arriver enfin à la marche en parallèle où l'avancement, cran par cran, par répétition automatique, est interrompu par l'effet des contacts x, y, w qui sont fermés par le contrôleur lui-même arrivé à la position de marche normale.

La remise au zéro du contrôleur pour l'arrêt se fait par l'électro I^4 qui envoie l'air comprimé dans le cylindre C^5.

Le piston de ce cylindre, solidaire de la crémaillère H, ramène d'un seul coup le contrôleur au zéro.

Le fond du cylindre C^5 communique par une conduite avec les cylindres des freins, de manière que si le wattman freine sans avoir ramené le conducteur à zéro, cette omission se trouve réparée automatiquement et immédiatement par l'effet de l'air comprimé provenant du cylindre de frein en action.

Batteries. — Les deux batteries A^1, A^2 sont disposées de telle sorte que l'une puisse toujours être mise en charge quand l'autre fonctionne. La charge des batteries se fait au moyen d'un circuit en série avec le circuit d'éclairage.

Pour charger les batteries, on fait usage d'un commutateur à 4 plots dont les connexions sont telles qu'on puisse facilement intervertir les batteries pour les mettre en charge ou en fonctionnement.

Avantages de ce système. — Les principaux avantages attribués dès l'origine à ce système sont les suivants :

1° L'usage de l'air comprimé au lieu de courants à haut voltage pour la manœuvre des appareils de marche ;

2° Emploi d'un circuit tout à fait indépendant du courant de traction et à très bas voltage pour commander les servo-moteurs ;

3° Maniement facile du manipulateur des commandes ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

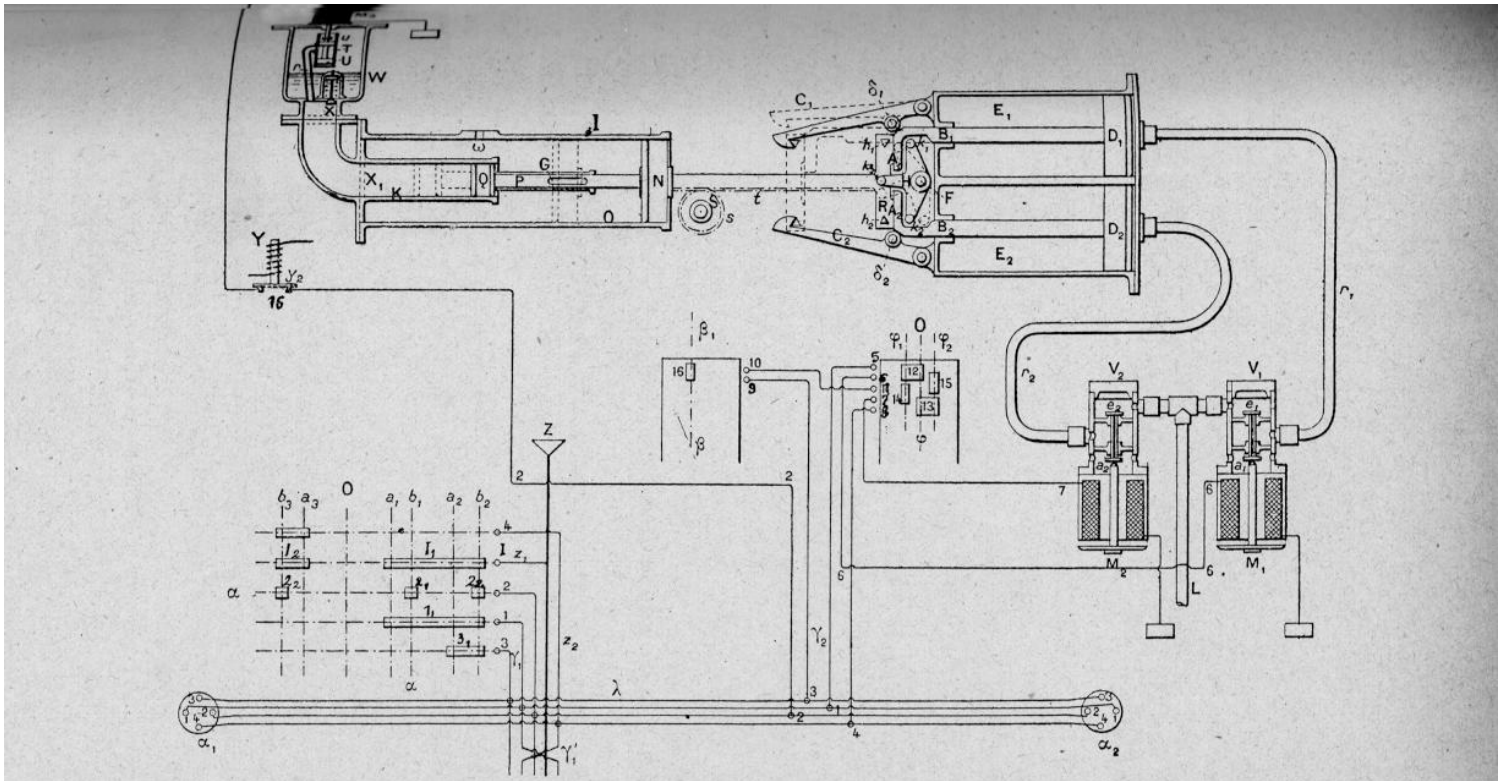


FIG. 379. — Système électropneumatique de traction à unités multiples Siemens-Schukert. — Schéma général des appareils de commande d'un équipement.

S, arbre de commande du cylindre du contrôleur principal ou coupleur de vitesse. — *s*, pignon d'entraînement du contrôleur. — F, arbre de commande du cylindre de l'inverseur. — *t*, crémaillère de commande du contrôleur. — E_1, E_2, cylindres d'avancement. — D_1, D_2, pistons d'avancement. — N, piston antagoniste. — O, cylindre admettant l'air comprimé à la gauche du piston antagoniste. — ω, orifice d'admission d'air comprimé. — P, commande du piston à huile. — K, cylindre à huile. — Q, piston correspondant. — X, soupape de retour d'huile. — *r*, tube d'admission d'huile au tiroir équilibré U. — U, tiroir équilibré réglant le frein à huile. — T, chambre du tiroir de frein à huile. — M_3, électro réglant l'avancement du contrôleur. — W, réservoir d'huile. — *u*, orifice d'échappement d'huile. — Y, électro limiteur de courant.

Z, prise de courant générale. — z_1, dérivation du courant pour l'appareil de commande. — z_2, dérivation du courant pour les moteurs et les résistances. — λ, ligne de train à 4 fils. — γ_1, dérivation de la ligne de train sur le poste de commande. — γ_2, dérivation de la ligne de train sur les contacts accessoires. — α_1, α_2, coupleurs assurant la continuité de la ligne de train.

M_1, M_2, soupapes électromagnétiques d'avancement. — L, conduite d'amenée d'air comprimé aux soupapes. — V_1, V_2, enveloppes des clapets d'admission. — r_1, r_2, conduites d'admission d'air aux cylindres D_1, D_2. — a_1e_1, a_2e_2, tiroirs mettant r_1 et r_2 en communication avec l'air sous pression ou avec l'atmosphère.

B_1, B_2, tiges d'avancement. — A_1, A_2, projection servant à l'avancement de la tête de la crémaillère R. — B, tête de crémaillère. — H, pièce de commande de l'arbre d'inverseur. — h_1, h_2, butées d'arrêt. — C^1, C_2, cliquets d'arrêt des butées h_1 et h_2. — δ_1, δ_2, galets entrant en contact avec A_1 B_1, A_2 B_2.

α, développement du cylindre du manipulateur ou coupleur du wattman. — a_1b_1, marche avant, position série. — a_2 b_2, marche avant, position parallèle. — a_3 b_3, marche arrière, position série.

β, développement partiel du cylindre du contrôleur principal, montrant les contacts auxiliaires. — β_1, position série du contrôleur principal.

φ, développement partiel du cylindre de l'inverseur, montrant les contacts auxiliaires. — φ_1, position de marche avant de l'inverseur. — φ_2, position de marche arrière de l'inverseur. — X_1, cylindre de frein à huile.

Les traits ponctués représentent les positions des appareils pour la marche en série sans résistance.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4° Mise automatiquement au zéro de tous les contrôleurs quand les freins sont actionnés ;

5° Ouverture de tous les circuits en cas de rupture d'attelage.

Ce système a cependant dû être perfectionné à cause des grandes masses en mouvement qu'il comporte.

170. **Système électro-pneumatique Siemens-Schuckert.** — Ce système fait appel, comme le système Westinghouse, à l'air comprimé pour effectuer le déplacement des organes divers de régulation et au courant électrique à basse tension provenant d'une batterie pour la commande des soupapes à air comprimé.

Il repose encore sur le déplacement d'un piston par l'air comprimé envoyé au cylindre dans lequel se meut le piston, mais, au lieu d'une course complète du piston pour chaque avancement d'un cran du contrôleur, le servo-moteur effectue le tour complet du contrôleur par le seul déplacement du cylindre d'une extrémité à l'autre de sa course. Enfin, ce déplacement ne s'obtient pas, comme dans le système Auvert, par l'action de pressions échelonnées sur le piston ou sur une série de pistons, mais par l'action antagoniste d'un frein dans lequel entrent en action l'air comprimé et l'huile sous pression d'air : cette dernière règle également la vitesse d'avancement du contrôleur, d'après l'orifice, le réglage des organes d'écoulement, la fluidité même de l'huile employée, etc....

Comme exemple, nous décrirons (1) l'équipement adopté pour les automotrices du métropolitain de Berlin (1903), dont la figure 379 représente le schéma général des appareils de commande d'un équipement.

Les deux appareils principaux du contrôle, appelés ici coupleurs, correspondent l'un, le compteur de vitesse, au contrôleur ordinaire, et l'autre à l'inverseur dont ils ont respectivement les fonctions. Ils sont d'ailleurs comme eux du type tambour et sont représentés sur la figure 379 par leurs axes : S pour le coupleur de vitesse (contrôleur) et F pour le coupleur-inverseur.

Ces deux appareils automatiques sont commandés par les pistons B_1, B_2, des deux cylindres à air E_1, E_2, qui sont reliés par les tuyaux

(1) Cette description est empruntée à l'*Électricien*, du 5 décembre 1903.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

r_1, r_2 aux boîtes à soupape V_1, V_2. Les deux électro-aimants M_1, M_2 servent à la commande de ces soupapes. L'air comprimé est admis dans les boîtes à soupapes par le tube L. Ces boîtes sont à trois compartiments séparés les uns des autres par une soupape double solidaire (e_1, e_2) ; tant que les solénoïdes sont inactifs, la chambre inférieure est en communication avec l'atmosphère et avec la chambre intermédiaire d'où partent les tuyaux de distribution r_1 et r_2. Au contraire, quand le courant traverse les bobines de ces solénoïdes, les chambres médiane et supérieure sont reliées ensemble et l'air comprimé est admis dans les tuyaux r_1 et r_2.

Les tiges des pistons B_1, B_2 des cylindres E_1, E_2 sont terminées par deux projections d'équerre A_1, A_2 dirigées l'une vers l'autre. Entre ces deux pièces est logée une manivelle à trois bras H portant un galet (K_1, K_2, K_3) à l'extrémité de chacun de ces bras ; F est un axe horizontal autour duquel peut tourner la manivelle H.

Le coupleur de vitesse S est commandé par un pignon s et une crémaillère t qui est fixée par une de ses extrémités à un piston N et se termine à son autre extrémité par une tête d'équerre placée vis-à-vis des deux projections A_1, A_2 des pistons des cylindres E_1, E_2. La pièce R porte deux goupilles h_1, h_2 qui font saillie et permettent, concurremment avec les taquets mobiles C_1, C_2, de limiter la course de la crémaillère t dans la position « série » des coupleurs de vitesse.

Le cylindre I dans lequel se meut le piston N est en communication constante avec la canalisation d'air comprimé ; mais la pression y est à peu près la moitié de celle qui existe dans les cylindres E_1, E_2. La tige du piston N est solidaire de celle du piston Q ; ce dernier piston vient obturer le cylindre K qui est rempli d'huile. Ce cylindre K se prolonge par un tuyau qui vient aboutir sous un réservoir W du fond duquel part un tube r ; ce tube réunit le cylindre K à une boîte à soupape T identique à celles décrites ci-dessus, dont les soupapes sont commandées par l'électro-aimant M_3 ; la soupape de retenue X sert à relier la chambre W à K.

Ce système amortisseur est destiné à régulariser et à limiter la vitesse du coupleur de vitesse.

Pour permettre de suivre la marche du courant et par suite le fonctionnement du système automatique que nous venons de décrire, on a représenté sur la figure, le développement schématique d'un ensemble de trois coupleurs comprenant les deux coupleurs automa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiques (coupleur de vitesse, coupleur-inverseur) et le coupleur de commande du wattman ou manipulateur.

Supposons que le coupleur du wattman soit sur la position marquée a_1 (moteurs série, en avant), le courant à basse tension entrant par I passe par L_1, 1_1, 1, de là se rend au plot 5 du coupleur-inverseur, par 12 passe à 6 et aboutit finalement au solénoïde M_1 pour se rendre à la terre ; d'autre part, ce même courant se dérive par le chemin 2, 2, 16, aboutit au solénoïde M_2 puis à la terre. Voyons ce qui va se passer. Le noyau du solénoïde M_1 étant soulevé, l'air comprimé est admis en E_1 ; le piston B_1 s'avance grâce à la différence de pression dans les cylindres E_1 et I, tandis que, d'autre part, la soupape U est attirée par le solénoïde M_2 et qu'une petite quantité d'huile peut s'échapper de K dans W. Le coupleur de vitesse S est mis en marche par la crémaillère *t*. Mais le mouvement du piston B_1 manœuvre la manivelle à 3 bras H qui est solidaire du coupleur d'inversion et place celui-ci dans la position « en avant » (marquée en pointillé). En même temps le taquet C_1 est soulevé (position marquée en pointillé). Le mouvement du coupleur inverseur a eu pour effet de rompre la connexion 7 à 8 par le plot 13 et de relier 7 à 11 par 14. La vitesse de manœuvre est réglée par la soupape U et par le coupe-circuit à maximum 16 qui ouvre le circuit du solénoïde M_3 dès que le courant dans le moteur dépasse une valeur déterminée. Toutefois, le wattman peut arrêter le mouvement à un moment quelconque en mettant la manette de son coupleur (manipulateur) sur la position marquée a_1. La crémaillère continue d'avancer jusqu'à ce que l'ergot h_2 rencontre le taquet C_2. Les moteurs sont alors groupés en série et la pièce de contact 16 du coupleur de vitesse réunit 9 et 10. Pour atteindre la grande vitesse, le wattman met alors sa manette sur la position marquée a_2 (moteurs en parallèle, en avant) et le courant passe maintenant de 1 à 3_1, puis à 3, 9, 16, 10, 11, 14, 7, pour se rendre au solénoïde M_2 qui, en actionnant la soupape e_2, admet l'air comprimé dans le cylindre E_2 ; le piston B_2 se déplace d'une petite quantité, jusqu'à ce qu'il rencontre le galet K_3; ce petit déplacement est suffisant pour écarter légèrement le taquet C_2 qui laisse passer l'ergot h_2 permettant par suite à la crémaillère *t* de continuer son mouvement. Mais le plot 16 du coupleur de vitesse s'étant déplacé, ne relie plus 9 à 10, le solénoïde M_2 devient inactif et le cylindre E_2 se vide d'air comprimé.

Pour arrêter les moteurs, on place la manette du coupleur de com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mande (manipulateur) dans la position marquée « arrêt », par laquelle tous les circuits sont coupés. Le piston B est ramené à sa position initiale par la pression qui s'exerce contre le piston Q et l'huile s'écoule de W dans le cylindre K par la soupape X. En même temps, le coupleur de vitesse S est ramené à sa position antérieure par la crémaillère t, tandis que le coupleur inverseur est également remis au départ par le mouvement de recul de la projection A_1 du piston B_1. Comme le courant se trouve coupé par le coupleur S, il n'y a pas d'étincelles à craindre sur le coupleur inverseur.

Pour la marche arrière, le wattman doit placer sa manette sur la position marquée a_3 (moteurs-série, arrière) et sauf que l'air comprimé est admis d'abord en E_2, la manœuvre automatique des coupleurs s'opère de la même façon. Dans cette position, on ne peut mettre les moteurs en parallèle.

La figure 380 représente le dispositif monté sur une voiture. On voit que les cylindres E_1 E_2 sont placés côte à côte ; la pièce R du diagramme a été remplacée par des crémaillères et des pignons. Les pistons des deux cylindres et celui du cylindre I sont reliés aux crémaillères t_1, t_2 et t qui engrènent avec les pignons dentés 3_1, 3_2 et 3_3; le pignon 3_1 est fou sur l'arbre 1 tandis que les deux autres sont clavetés sur cet arbre qui est relié au contrôleur de vitesse par l'intermédiaire du point K. Les deux taquets m et n fixés sur le pignon 3 et qui correspondent aux deux butées a et p des pignons 3_2 et 3_3 servent à relier les cylindres E_1 E_2 au cylindre I.

L'arbre F porte la manivelle à trois bras H avec ses trois galets k_1, k_2, k_3, les mouvements de cette manivelle sont commandés par les saillies A_1, A_2 et les crans B_1, B_2 des tiges des pistons des cylindres E_1, E_2. Les mouvements sont transmis au coupleur d'inversion à l'aide d'un engrenage conique et d'un joint de couplage j. Les autres organes de l'appareil sont conformes à ceux décrits plus haut.

Signalons enfin que le coupleur de vitesse est muni de souffleurs magnétiques et que, en cas d'avaries, on peut couper rapidement un moteur et marcher avec l'autre seulement.

II. — Systèmes a contrôleurs relayés

171. Système électro-magnétique General Electric ou Thomson-Houston. — Le combinateur à servo-moteur du système Sprague est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

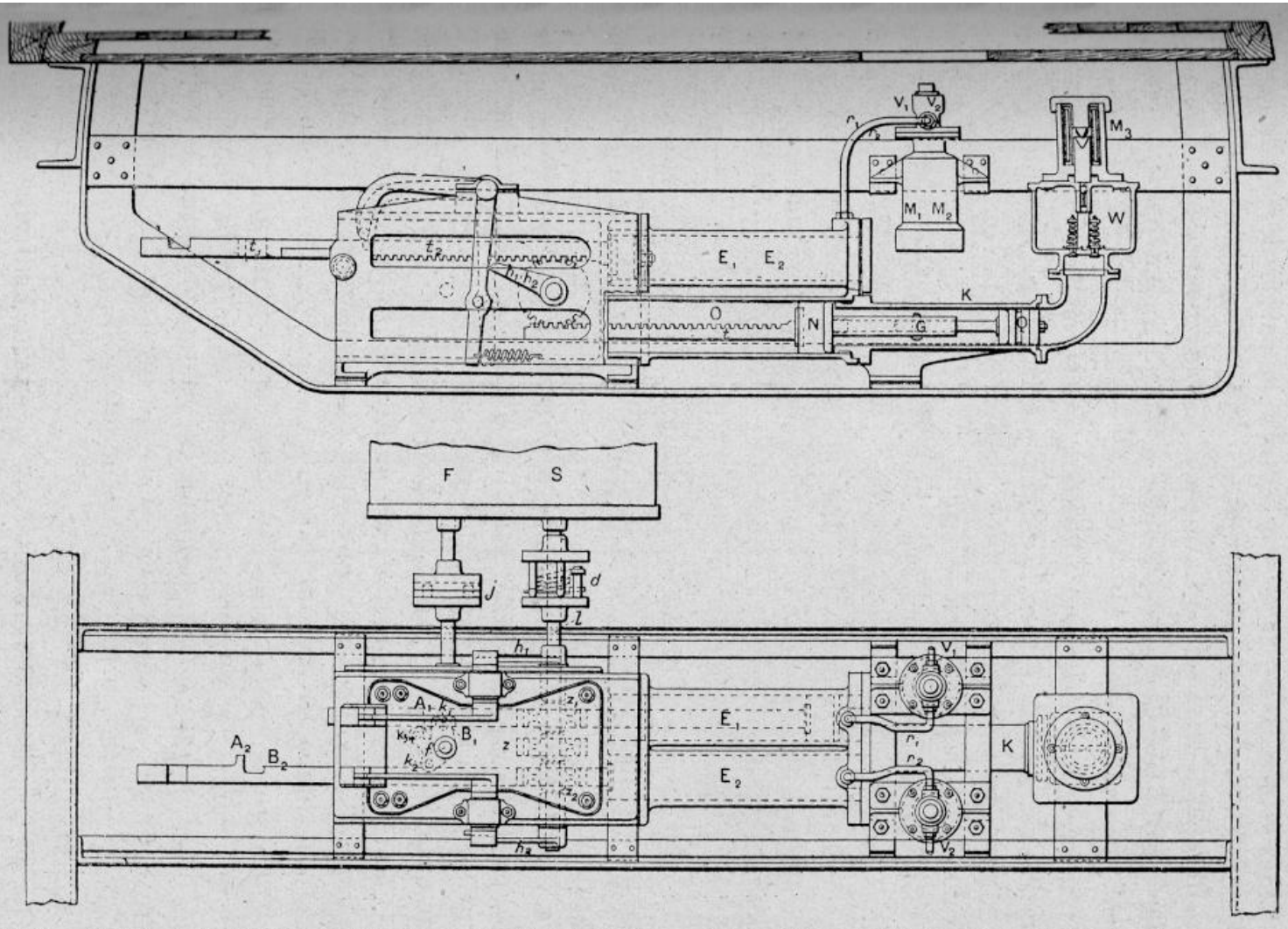


FIG. 380. — Système électropneumatique de traction à unités multiples Siemens-Schuckert. Ensemble des appareils.

Les organes essentiels subsistent dans cette figure avec la même dénomination que dans la figure 379.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ici remplacé par une série d'appareils dits « contacteurs » qui sont des interrupteurs électro-magnétiques commandés électriquement à distance et répartis, par exemple, sous la caisse de la voiture, dans des boîtes appropriées où ils doivent être accessibles. Ces appareils effectuent les mêmes combinaisons que les contrôleurs ordinaires : insertion de résistances, couplage en série ou en parallèle, marche avant ou arrière, etc.

L'interrupteur-inverseur destiné à assurer les changements de marche, est mis en action par deux électros à pistons plongeurs déterminant sa rotation de l'angle voulu pour passer de la marche avant à la marche arrière.

La commande de tous ces électros est obtenue au moyen d'un contrôleur du type série-parallèle, basé sur les mêmes principes que les contrôleurs ordinaires que nous avons étudiés, mais dans ce contrôleur il ne passe que le « courant de contrôle » nécessaire à faire fonctionner les électros. Le courant de traction n'y a plus accès. Cet appareil est, par suite, de dimensions plus réduites.

Les électros des différentes automotrices sont évidemment commandés rigoureusement en synchronisme et, par suite, les moteurs eux-mêmes.

Le contrôleur peut être placé à n'importe quel point du train, et pratiquement un contrôleur sera installé en dérivation sur le circuit de commande en chaque point d'où on peut avoir à commander la marche du train.

Quant aux contacteurs, ils seront autant que possible placés près des moteurs, ce qui aura pour effet de réduire d'autant l'importance du gros câblage.

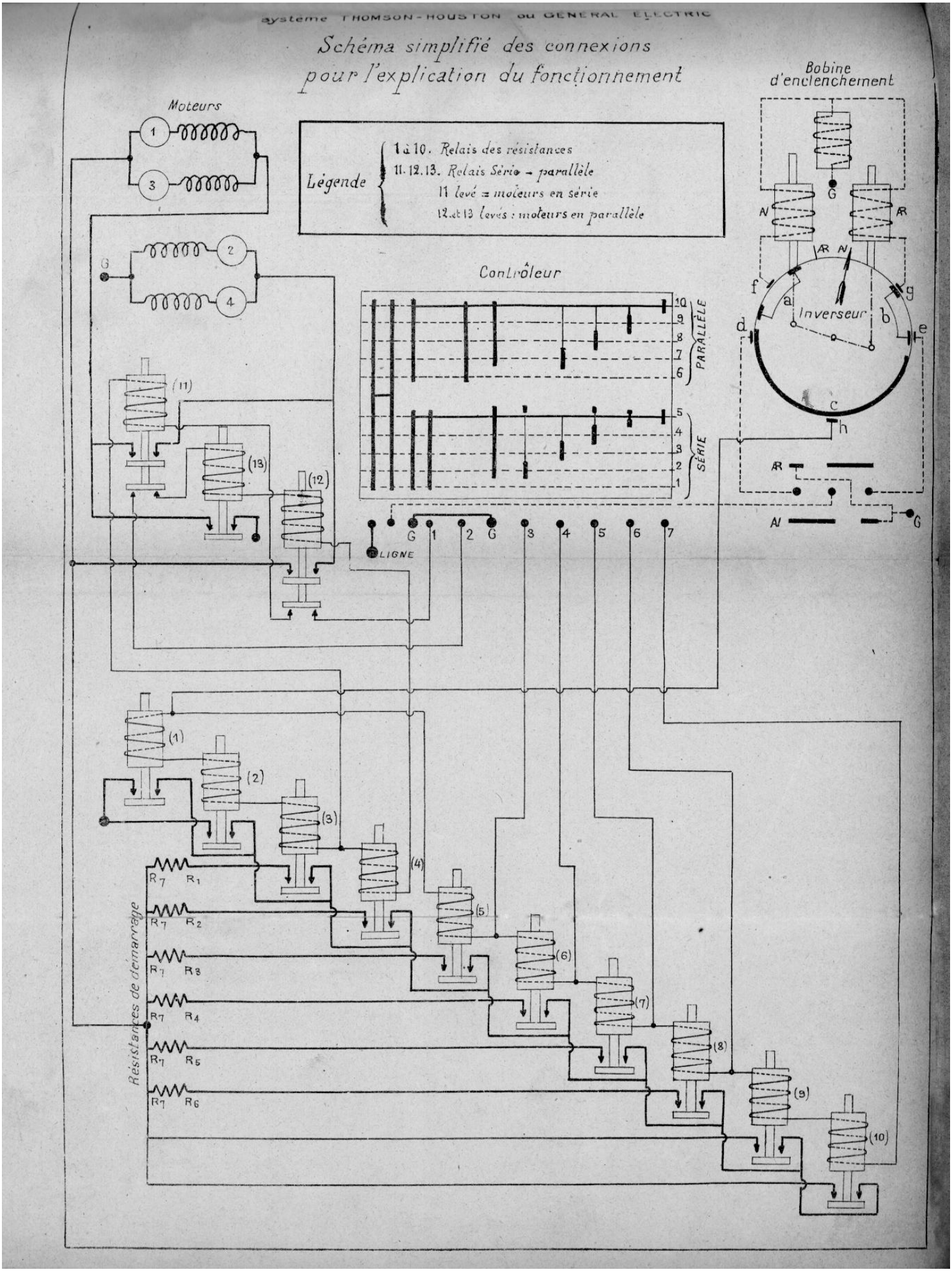
Enfin, les circuits principaux de chaque automotrice d'un train sont autonomes, aboutissant à des frotteurs spéciaux, qu'on est d'ailleurs libre de laisser indépendants ou de relier entre eux. Cette dernière disposition pourra être utile dans le mode d'alimentation par troisième rail où celui-ci présente des interruptions aux croisements ou aux aiguillages.

De ce qui précède, il résulte qu'en définitive la seule intercommunication nécessaire régnant tout le long du train est constituée par un circuit de contrôle à fils fins. Ce circuit comprend 9 fils, à savoir : 2 fils pour l'inverseur et 7 fils pour les électros.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

système THOMSON-HOUSTON ou GENERAL ELECTRIC

Schéma simplifié des connexions pour l'explication du fonctionnement



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

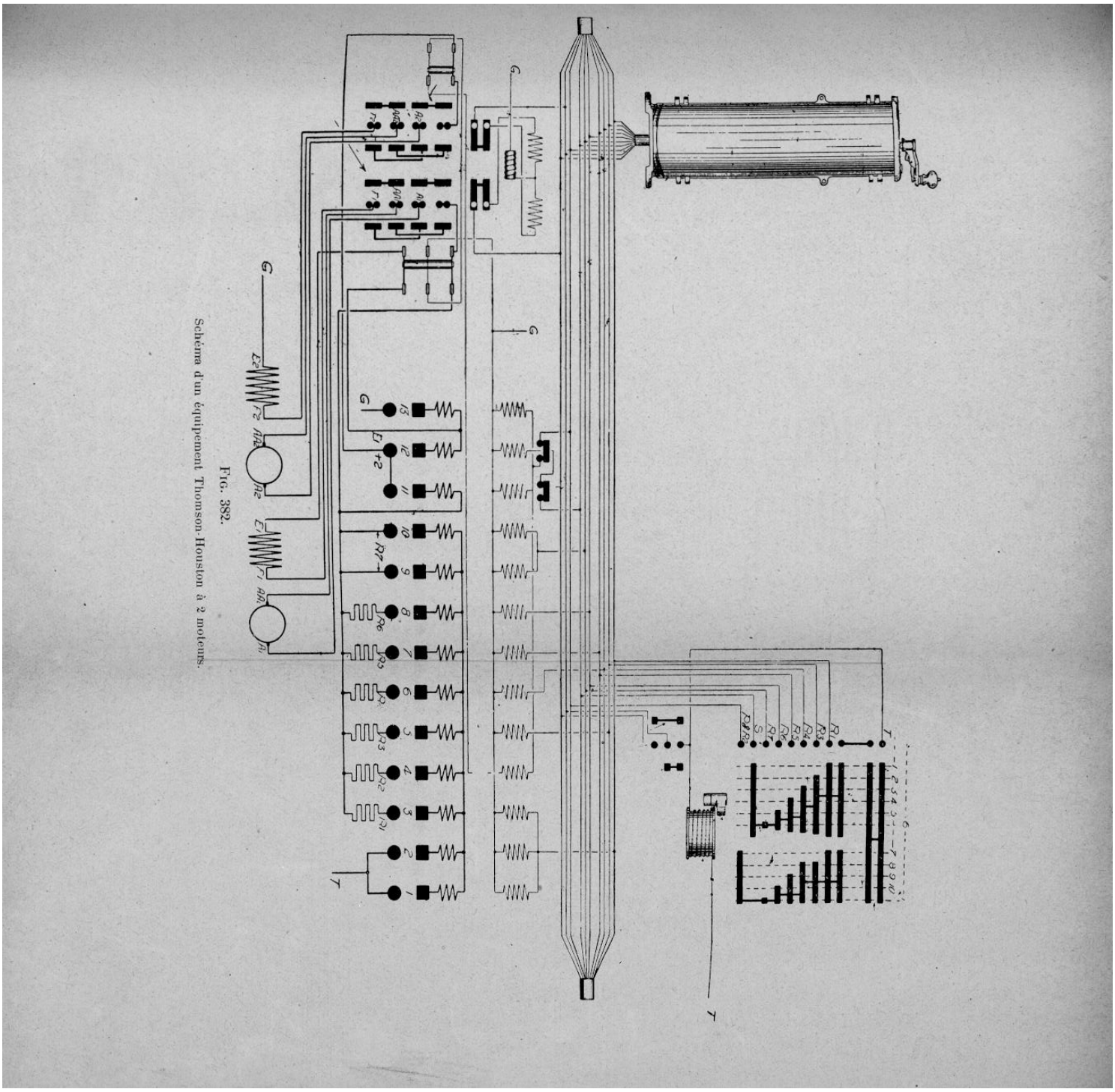


Fig. 382.

Schema d'un équipement Thomson-Houston à 2 moteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce système est ainsi essentiellement un système électro-magnétique.

La figure 381 représente le schéma simplifié de démonstration des connexions d'un équipement Thomson-Houston, la figure 382 le schéma d'ensemble d'un équipement à 2 moteurs, enfin la figure 383 montre la disposition usuelle sur une automotrice des différents organes d'un tel équipement.

Ce système a reçu sa première application en France, en 1900, à des automotrices du chemin de fer d'Orléans (Paris-Juvisy), lesquelles étaient à bogies et à quatre moteurs. Leur équipement ne diffère de celui de la figure 382 que par les détails résultant de l'emploi de quatre moteurs au lieu de deux. Nous signalerons toutefois un point particulier relatif à leurs contrôleurs, qui comportaient un dispositif de sécurité pour assurer l'arrêt automatique du train au cas où, pour une raison quelconque, il échapperait au contrôle du mécanicien, ou si celui-ci voulait couper instantanément le courant. A cet effet, les premiers segments du contrôleur qui amènent le courant de ligne dans les électros de l'inverseur et les contacteurs ne sont pas solidaires de la poignée de manœuvre et des autres segments que cette poignée entraîne ; ils sont montés séparément sur un manchon traversé par l'arbre de commande du contrôleur. Pour assurer le mouvement d'entraînement, on solidarise les deux pièces en pressant sur un bouton d'enclenchement approprié placé au sommet de la manivelle. En cessant la pression, un ressort rappelle brusquement au zéro le manchon, d'où coupure totale du courant de contrôle, et les contacteurs s'ouvrent immédiatement, d'où coupure du courant d'alimentation des moteurs.

Divers perfectionnements ont été par la suite apportés à ces équipements, tels que :

Adoption de la poignée de sécurité. — La manette du contrôleur est disposée de telle façon que si le wattman venait à tomber ou perdre connaissance, le courant soit coupé automatiquement sur toutes les voitures. En outre, dans certains contrôleurs, ce dispositif fait fonctionner les freins.

Démarrage automatique et adoption de la connexion à pont pour la transition de série à parallèle, et l'on est ainsi arrivé aux systèmes suivants.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

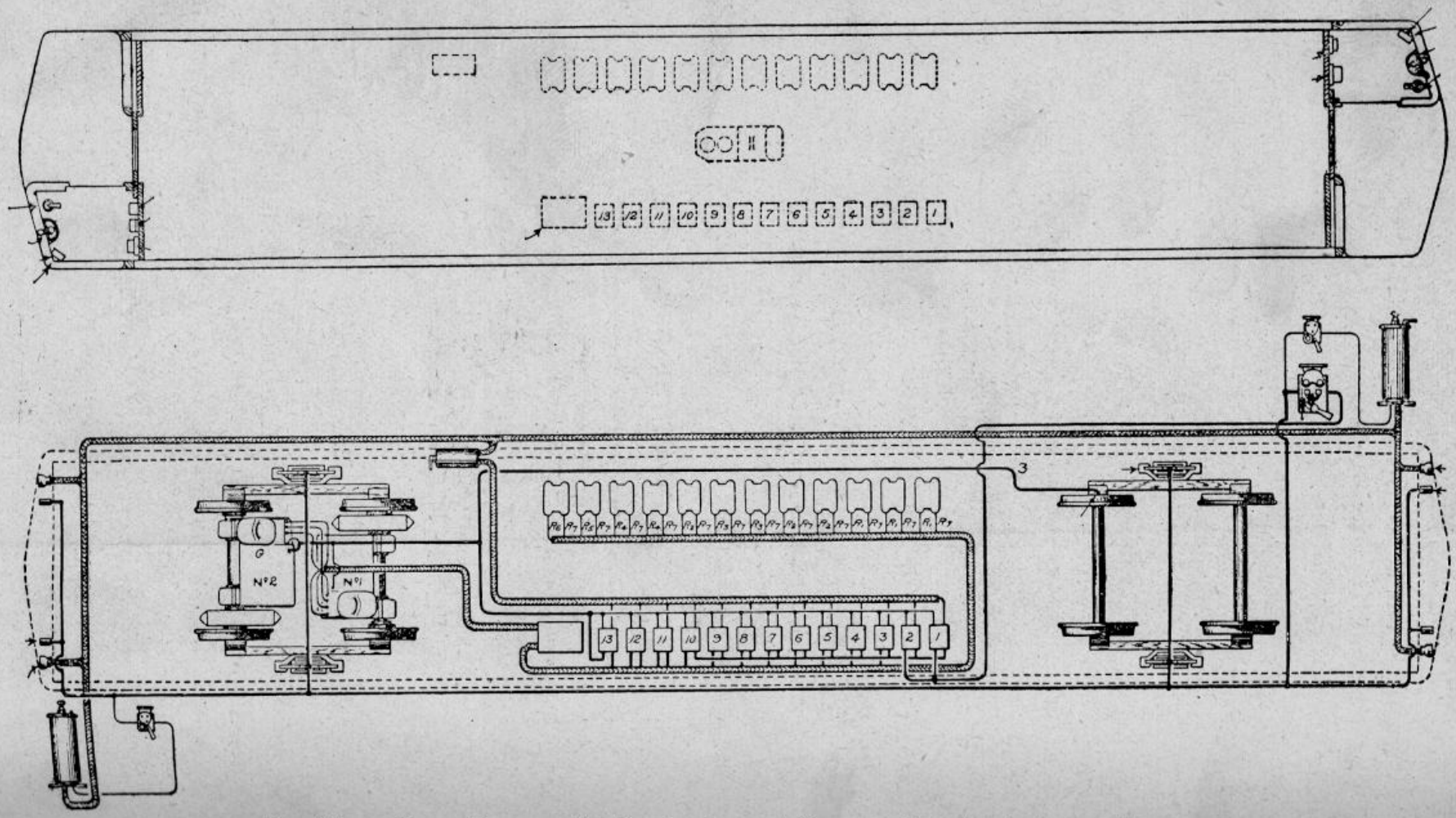


FIG. 383. — Disposition usuelle d'un équipement Thomson-Houston à deux moteurs.

1 à 13 représentent les interrupteurs électromagnétiques ; de l'autre côté sont symétriquement groupées des résistances de réglage, et au milieu, sous la caisse, le compresseur d'air. Enfin les plates-formes comportent les appareils de manœuvre décrits plus loin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

172. **Équipements modernes électro-magnétiques « Sprague-General Electric » ou « Sprague-Thomson-Houston ».** — Ces équipements, perfectionnements des précédents, sont de quatre types différents, suivant les exigences qu'ils sont appelés à remplir :

1° Equipements non automatiques.
2° — semi-automatiques.
3° — à accélération automatique par le contrôleur.
4° — — — par un relais.

Nous allons les examiner succintement :

D'abord, tous ces équipements sont établis pour que la transition entre le couplage en série et le couplage en parallèle s'effectue sans interruption de courant par application de la « méthode du pont », méthode que nous avons étudiée au chapitre V, à propos de l'étude de la régulation de la vitesse des voitures (§ 39).

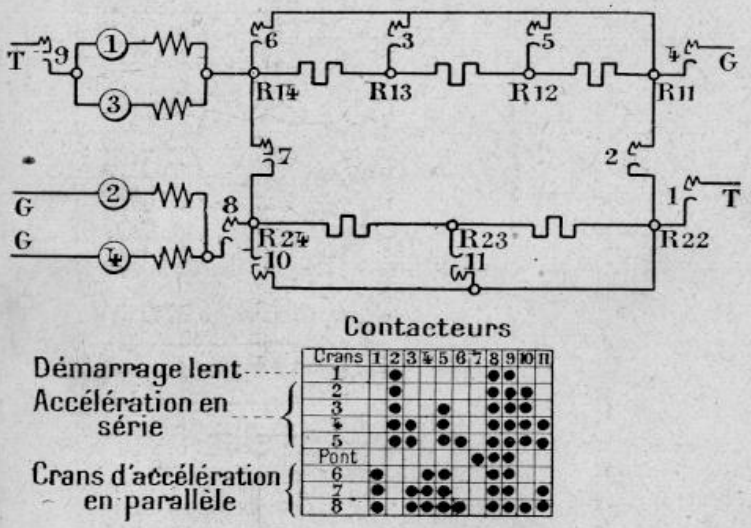


FIG. 384.

Schéma du circuit principal d'un équipement utilisant le système du pont au passage de série à parallèle.

Grâce à cette méthode, qui n'était pas appliquée dans les premiers équipements à unités multiples, l'effort de traction oscille régulièrement sans interruption entre deux valeurs constantes pendant la période de démarrage.

Les figures 384 et 385 représentent les schémas du circuit principal d'un équipement utilisant la connexion du pont au passage de série à parallèle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° *Equipements non automatiques.* — Ils diffèrent des équipements G. E. ou T. H., vus ci-dessus, par l'adoption de la *méthode du pont.*

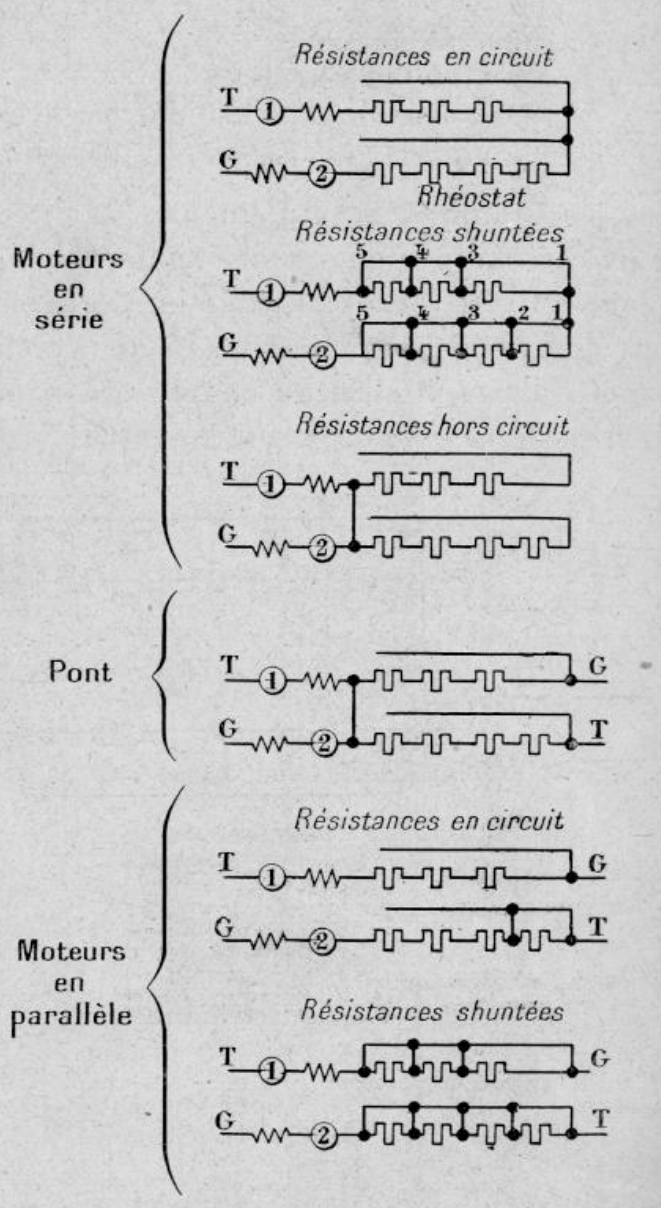


FIG. 385.

Développement des connexions du circuit principal.

Chaque équipement comporte alors, en résumé, deux circuits : le *circuit de contrôle* et le *circuit principal* ou *circuit de traction*, alimentés tous deux par le trolley ou le troisième rail, suivant le cas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

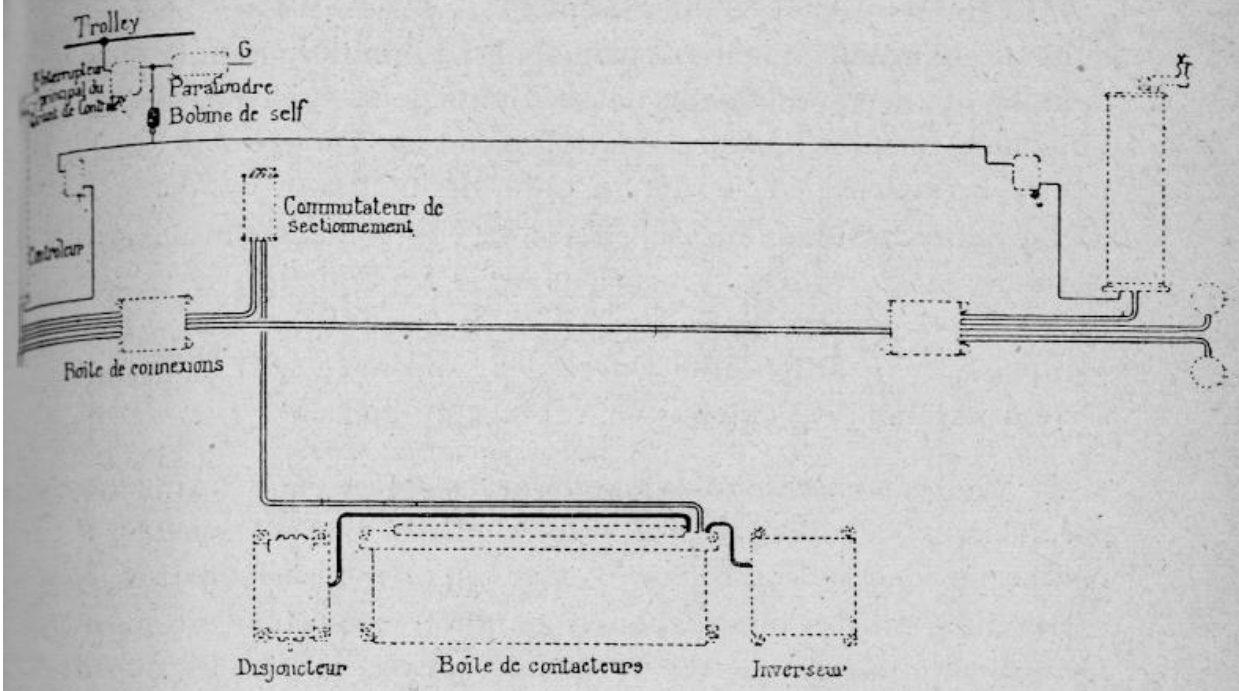


FIG. 386.

Câblage du circuit de contrôle.

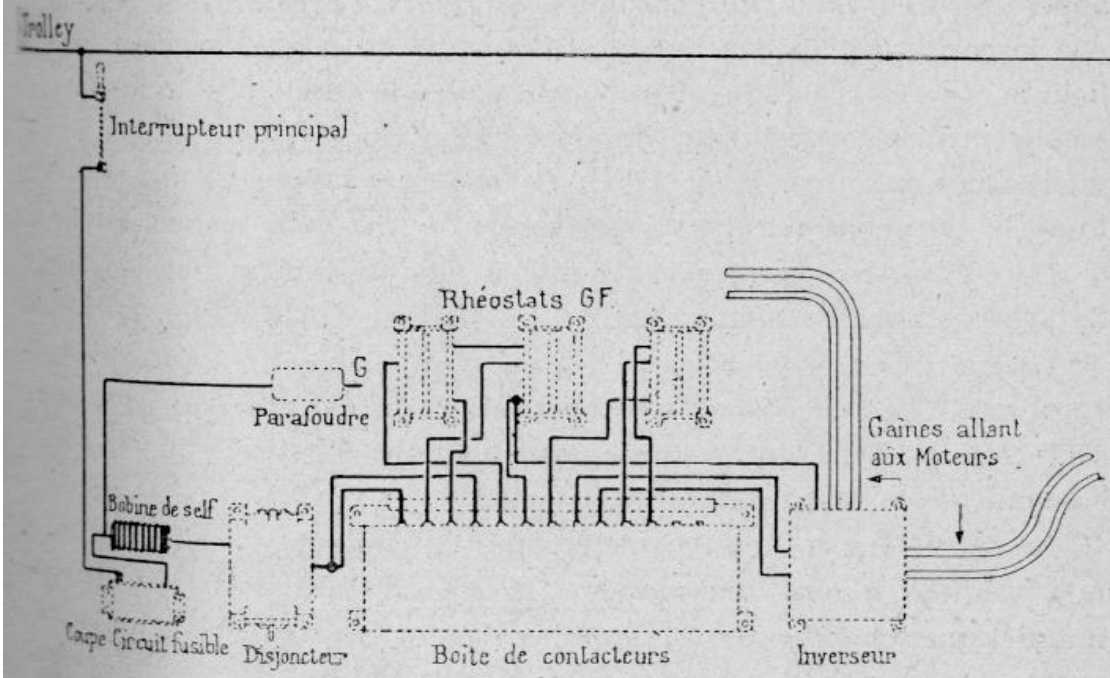


FIG. 387.

Câblage du circuit principal.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les figures 386 et 387 montrent la disposition des câbles des circuits de contrôle et du circuit principal. La première indique, en outre, l'emploi d'un commutateur de sectionnement. Cet appareil est installé dans chaque motrice sur le circuit de contrôle. Il permet de mettre la motrice en circuit ou hors circuit.

La figure 388 donne le schéma d'un équipement non-automatique à quatre moteurs avec passage de série à parallèle par la méthode du pont et, pour comparaison, nous donnons (fig. 389) celui d'un équipement ne différant du précédent qu'en ce que le passage de série à parallèle est obtenu par rupture du courant.

2° *Equipements semi-automatiques.* — Ces équipements ont été spécialement établis pour les locomotives dans lesquelles il est nécessaire que le contrôleur n'exige qu'une manœuvre très facile.

Ils diffèrent des précédents en ce que le contrôleur est muni d'un frein électromagnétique. Ce frein immobilise le cylindre du contrôleur à chaque touche de démarrage et ne le rend libre qu'au moment où l'intensité dans les moteurs a atteint une limite inférieure appropriée déterminée à l'avance.

Ce réglage de l'intensité est obtenu par l'intermédiaire d'un relais appelé *relais d'intensité* (Sprague) ou *relais d'accélération* parcouru par le courant d'un des moteurs. Cet appareil ouvre le circuit de la bobine de frein lorsque le courant dans les moteurs a atteint la valeur minima qu'on s'est imposée (Voir chap. V, régulation de la vitesse des voitures, § 35 et 36), et ferme ce même circuit pendant toute la période où le courant est supérieur à cette valeur minima.

Le courant maximum est limité à chaque touche par la valeur de la résistance de démarrage.

Le contrôleur est également muni d'un dispositif à force centrifuge, réglé de telle façon que la rotation du cylindre du contrôleur s'effectue dans un temps donné, sensiblement constant pour un effort constant de la main du wattman.

Le contrôleur est manœuvré comme un contrôleur ordinaire, mais à la première touche, la manette se trouve arrêtée par le frein électromagnétique, car le courant, dans les moteurs, est supérieur au minimum.

Le wattman continue néanmoins à exercer un effort sur la manette de telle sorte que, aussitôt que le frein n'agit plus, le cylindre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

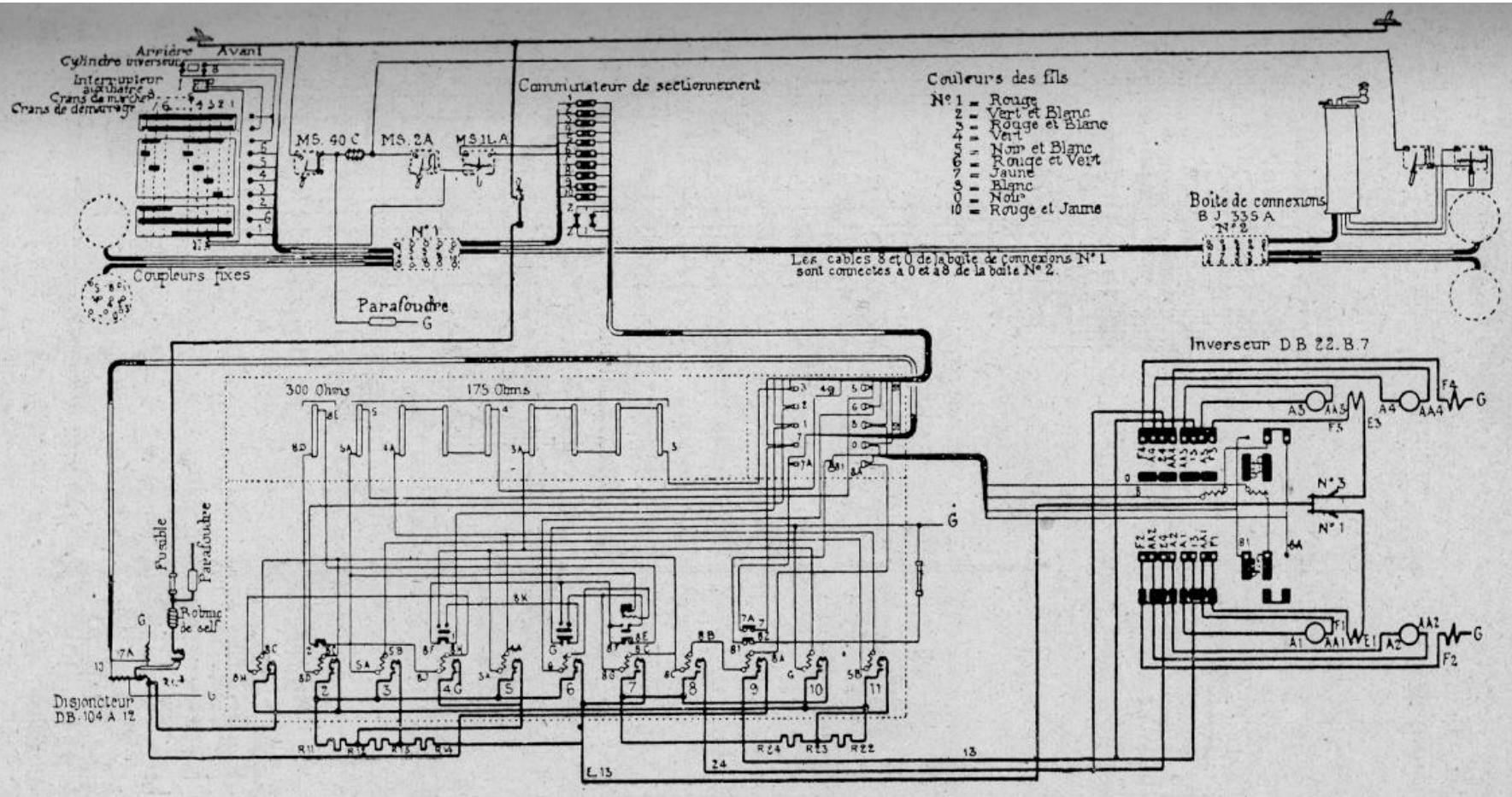


FIG. 388.

Schéma d'un équipement à 4 moteurs avec contrôleur non automatique, utilisant le système du pont au passage de série à parallèle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

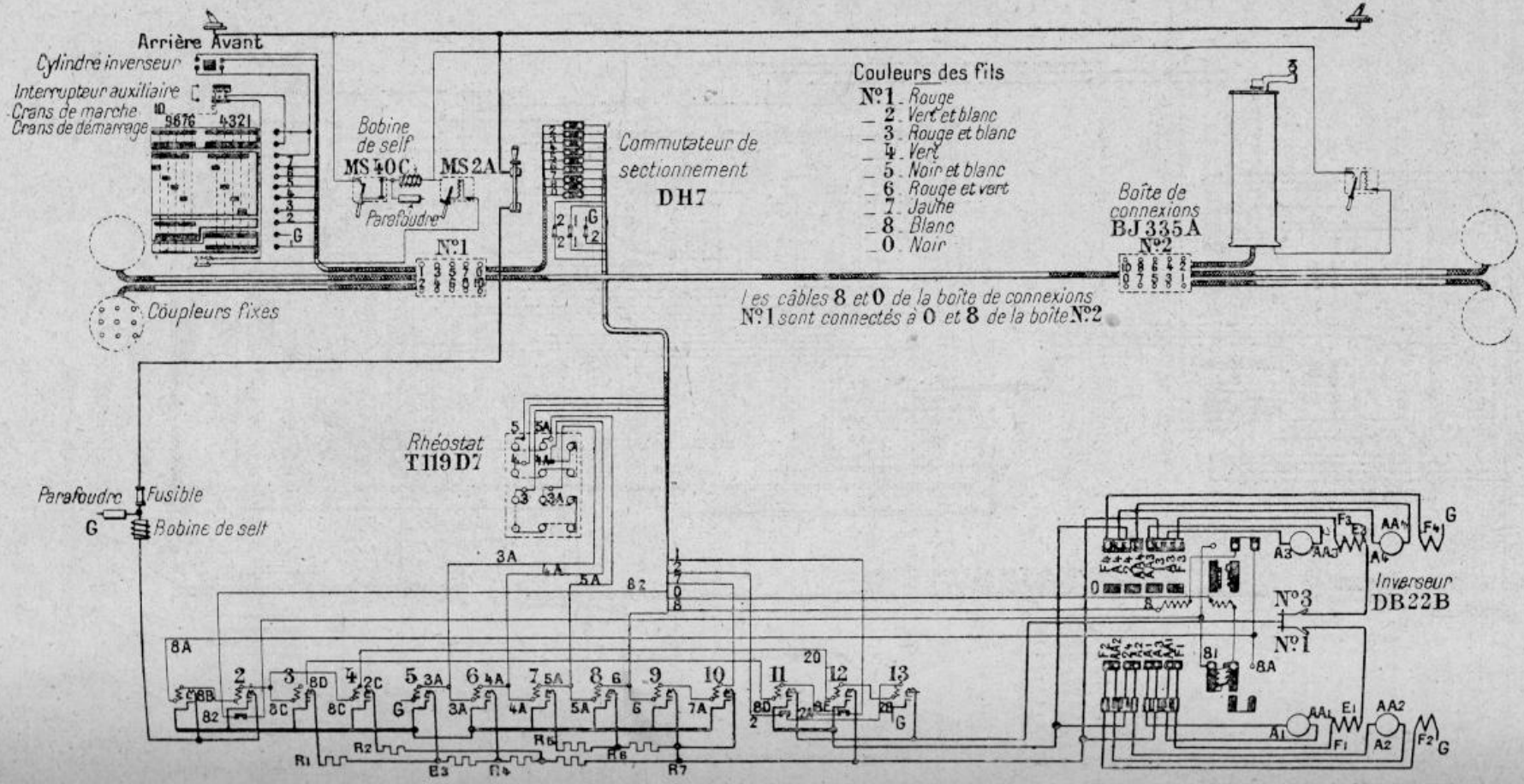


FIG. 389.

Schéma d'un équipement à 4 moteurs avec contrôleur non automatique et avec rupture de courant au passage de série à parallèle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

porte-contacts puisse tourner jusqu'à la touche suivante où il se trouve de nouveau bloqué et ainsi de suite.

On conçoit donc qu'avec un tel dispositif, si le wattman exerce un effort constant sur sa manette, le démarrage obtenu est pratiquement aussi bon que s'il se faisait automatiquement.

3° et 4° *Equipements à accélération automatique.* — Dans les réseaux métropolitains et sur les lignes à arrêts fréquents, où il est par conséquent nécessaire d'obtenir le maximum possible d'accélération, sans que ce maximum soit dépassé au détriment de la bonne conservation des moteurs, le système semi-automatique est insuffisant, car il nécessite une attention trop soutenue de la part du wattman.

On emploie alors les *équipements à accélération automatique* suivant l'un des deux types ci-après.

3° *Equipements à contrôleur automatique* (Métropolitain de Paris). – Ils ne diffèrent des semi-automatiques que par le contrôleur qui, en plus des organes dont il a été parlé plus haut, comporte un ressort servant de liaison entre la manette et le cylindre du contrôleur.

Le démarrage automatique est obtenu en mettant *directement à fond de course la manette du contrôleur.* Cela constitue vraiment la caractéristique des équipements modernes Sprague-Thomson-Houston. Cette manœuvre a pour effet immédiat la tension du ressort qui, à son tour, entraîne le cylindre du contrôleur.

Le mouvement de rotation du cylindre est réglé, comme il a été dit précédemment, par un dispositif ralentisseur et un frein électromagnétique agissant sous l'action d'un relais.

On conçoit facilement que, aussitôt que le frein magnétique a libéré le cylindre du contrôleur, ce cylindre, sollicité par le ressort, passe, sans aucune perte de temps, au cran suivant où il est arrêté de nouveau par le frein.

Il est bien évident que si on désire ne pas dépasser une certaine vitesse, soit en courbe, soit pour une manœuvre, il suffit, au lieu de mettre la manette du contrôleur à fond de course, de la mettre directement au cran correspondant à la vitesse désirée.

On peut également démarrer cran par cran pour obtenir une accélération inférieure à celle du démarrage automatique ; dans ce cas, le relais n'aura d'autre but que d'empêcher un démarrage plus rapide que le démarrage automatique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut enfin, si cela est nécessaire, supprimer l'automaticité d'un contrôleur automatique, autrement dit supprimer l'action du frein magnétique et du relais. Dans ce but, une manœuvre simple permet de relier directement la manette au cylindre et de débrayer le dispositif à force centrifuge. Le frein magnétique et le relais n'ont plus alors aucune action.

La figure 390 représente le schéma d'un équipement à 4 moteurs, avec contrôleur automatique (même schéma pour un équipement semi-automatique).

Les circuits de contrôle des équipements ci-dessus comportent neuf fils (deux pour l'inverseur et sept pour les électros) visibles sur les schémas précédents (fig. 388, 389, 390). Ils sont numérotés de 0 à 8.

4° *Equipements à relais automatiques* (Equipements récents, Métropolitain, et équipements Nord-Sud et Ouest-Etat). — Dans les équipements à contrôleur automatique, l'automaticité est en somme obtenue par l'action combinée du relais et du contrôleur et le contrôleur est relativement compliqué.

Dans les équipements à relais automatique, l'automaticité est réalisée par l'action combinée d'*un relais* et de *contacts auxiliaires* reliés mécaniquement par groupes plus ou moins nombreux aux différents contacteurs, et le contrôleur est extrêmement simple et de dimensions très réduites. Enfin, *cinq fils* seulement suffisent à constituer le circuit de contrôle au lieu de neuf.

Dans ces équipements, le contrôleur joue le rôle d'un simple commutateur qui a pour but de contrôler les phases principales du démarrage : sens de la marche, mise en marche, arrêt et couplage des moteurs ; mais le démarrage proprement dit, c'est-à-dire le shuntage progressif des résistances, est réglé automatiquement dans chaque automotrice par un *relais d'accélération.*

Ce relais est connecté en série avec les moteurs et son réglage est fait de telle sorte que le courant de démarrage des moteurs oscille entre deux valeurs absolument constantes, à condition évidemment que les résistances de démarrage soient bien établies.

Ce relais est à deux enroulements : l'un à gros fil dans lequel passe le courant de l'un des moteurs, l'autre en fil fin qui reçoit le courant du fil n° 1 (voir plus loin) du circuit de commande. L'action

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

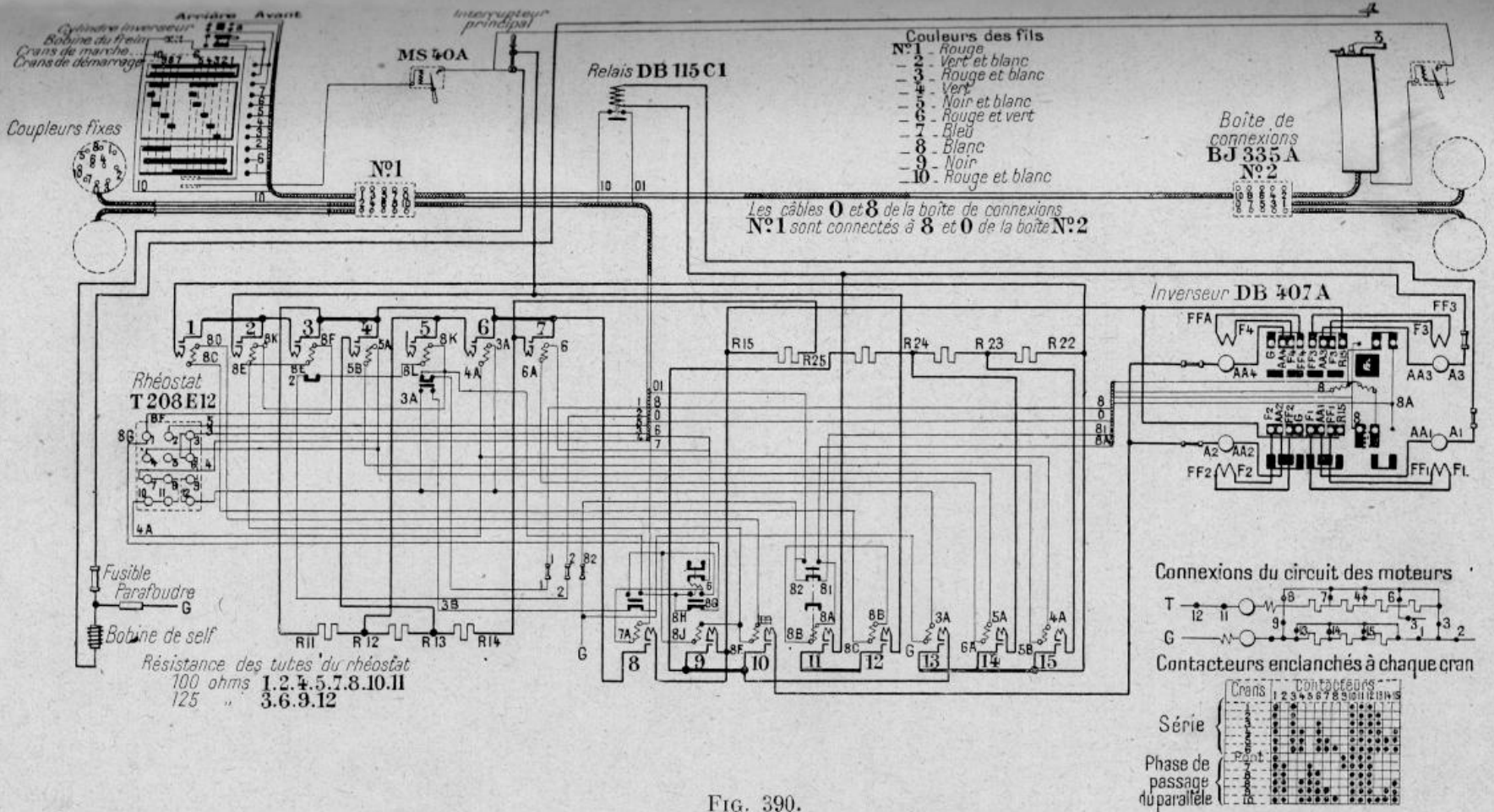


FIG. 390.

Schéma d'un équipement à 4 moteurs avec contrôleur automatique, utilisant le système du pont au passage de série à parallèle (même schéma pour un équipement semi-automatique).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de ce dernier enroulement s'ajoute à celle des spires série pour venir soulever un noyau d'acier doux.

A ce noyau est fixé un plateau qui, en venant reposer sur deux bornes, ferme le circuit du fil (1) de commande.

Aussitôt le noyau soulevé, le courant du fil (1) est coupé et le noyau ne retombe que lorsque l'intensité du courant passant dans les spires série n'est plus suffisante. Un dashpot ralentit et règle la chute en même temps qu'il atténue l'effet des trépidations.

En retombant, le plateau ferme le circuit du fil (1), ce qui a pour résultat de supprimer une résistance du circuit de traction et par suite d'augmenter l'intensité du courant de traction jusqu'à la valeur maxima admise. Sous l'action des deux enroulements, le noyau est soulevé et le plateau coupe le fil 1. Le noyau retombe quand l'intensité est descendue à la valeur minima admise et ainsi de suite.

Au moyen d'une première série de contacts auxiliaires, on verrouille électriquement les contacteurs entre eux, de telle sorte que les contacteurs agissent successivement et toujours dans le même ordre.

L'ordre d'enclenchement des contacteurs est le même, que le contrôleur *soit manœuvré lentement ou bien placé d'un seul coup en position de pleine marche.*

Tous les contacteurs du train sont contrôlés simultanément par le contrôleur en ce qui concerne l'interruption et le rétablissement du courant, mais le *démarrage est réglé sur chaque motrice par son relais particulier* : il dépend donc du réglage de ce relais, qui a été réglé pour le courant requis sur chaque motrice particulière.

La figure 391 représente le schéma d'un équipement à 4 moteurs avec relais automatique utilisant le système du pont au passage de série à parallèle.

Le contrôleur consiste simplement en un cylindre entraîné directement par la manette. La manette peut se mouvoir dans les deux sens par rapport à sa position zéro. Dans un sens, on obtient la marche avant. La manette peut occuper dans ce sens quatre positions : la première correspond au démarrage lent, avec toutes les résistances en série; la deuxième correspond au démarrage automatique en série ; la troisième correspond au démarrage en parallèle avec toutes les résistances en série ; la quatrième correspond au démarrage automatique en parallèle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

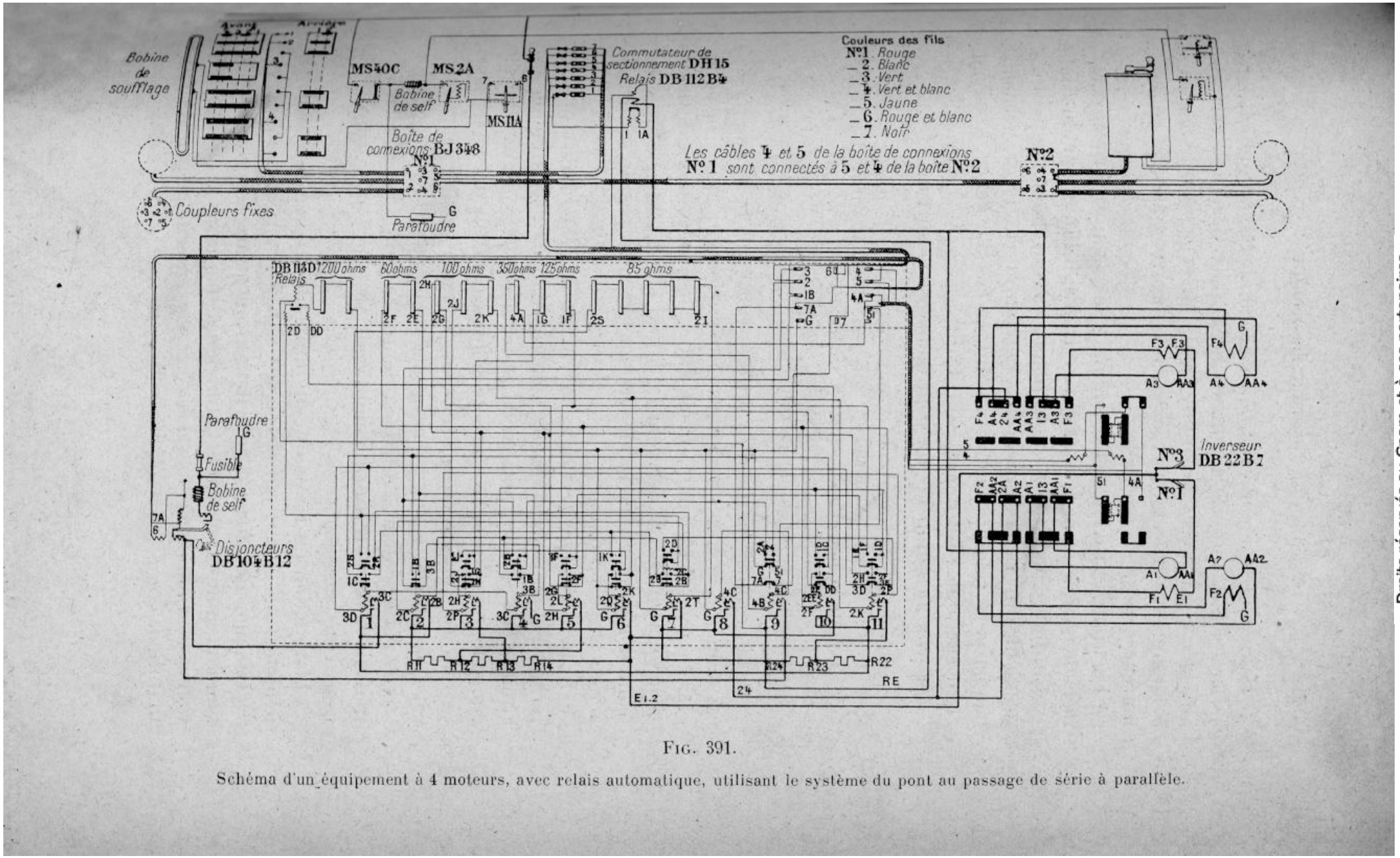


FIG. 391.

Schéma d'un équipement à 4 moteurs, avec relais automatique, utilisant le système du pont au passage de série à parallèle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans l'autre sens de rotation de la manette, on obtient la marche arrière. Elle comporte habituellement deux positions correspondant aux deux premières positions de la marche avant, mais on peut évidemment, si cela est nécessaire, prévoir sur le contrôleur la marche arrière en parallèle.

La manette revient d'elle-même à la position zéro aussitôt qu'on la lâche, grâce à un ressort qui se trouve à l'intérieur du contrôleur.

Cinq fils partant du contrôleur servent pour le contrôle proprement dit. Deux autres fils parcourant le train permettent de couper et de rétablir d'un seul point, en cas d'urgence, le circuit principal sur toutes les motrices du train.

Le rôle des cinq fils du contrôleur est le suivant :

1 pour la marche avant,
1 — arrière,
1 pour la marche en série,
1 — en parallèle,
1 pour le contrôle de l'accélération.

A la *première position* avant du contrôleur, le fil de marche avant est alimenté et fait fonctionner l'inverseur qui prend la position de marche avant. Immédiatement après, les contacteurs de marche en série enclanchent et ferment le circuit sur toutes les résistances. Le train démarre à très faible vitesse. A cette position, aucune autre action ne se produit.

A la *deuxième position,* le circuit d'accélération (fil n° 1) est fermé. Le premier contacteur de résistances est alimenté et court-circuite la première portion de résistances. Le courant alimentant ce contacteur passe aussi dans la bobine à fil fin du relais ainsi qu'à travers les contacts et le disque de ce relais. Le plongeur de ce relais est attiré, mais il n'agit pas immédiatement sur le disque, il y a un temps perdu calculé de telle sorte que le temps nécessaire à l'attraction du relais soit sensiblement égal au temps nécessaire à l'attraction d'un contacteur.

L'attraction du relais et celle du contacteur se font donc simultanément.

Chaque contacteur de résistances ou groupe de contacteurs fonctionnant simultanément est alimenté d'abord par le circuit d'accélération sous l'influence du relais et reste enclenché par un circuit de maintien.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le circuit d'accélération de chaque groupe de contacteurs traverse un contact auxiliaire de ce groupe. Ce contact auxiliaire ferme le circuit d'accélération lorsque le contacteur est au repos et coupe ce même circuit lorsque le contacteur est enclanché.

Le circuit de maintien traverse également un contact auxiliaire. Ce contact auxiliaire ouvre le circuit lorsque le contacteur est au repos et ferme ce circuit lorsque le contacteur est enclanché.

Ces deux contacts auxiliaires ont, comme on le voit, deux rôles absolument différents et constituent deux nouvelles catégories de contacts.

Il y a donc, en résumé :

contacts auxiliaires de verrouillage,
contacts auxiliaires d'accélération,
contacts auxiliaires de maintien.

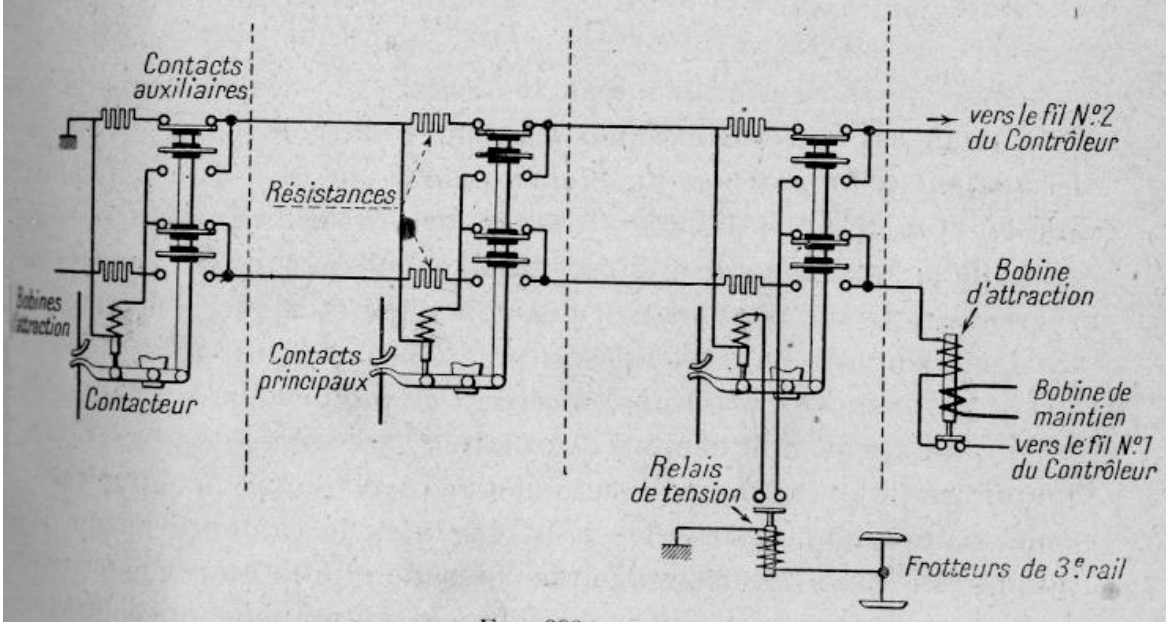


FIG. 392.

Schéma d'un groupe de contacteurs avec contacts auxiliaires.

La figure 392 représente le schéma d'un groupe de contacteurs avec contacts auxiliaires.

La première résistance ayant été court-circuitée, il en résulte un accroissement du courant dans les moteurs; ce courant traversant la bobine à gros fil du relais, son accroissement est suffisant pour maintenir le plongeur du relais attiré (nous avons vu que ce plongeur avait été attiré par la bobine à fil fin). Le train accélère et il en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résulte une diminution de courant. Lorsque ce courant a atteint la limite inférieure pour laquelle le relais a été réglé, le plongeur du relais retombe, rétablissant le court-circuit d'accélération.

Une nouvelle série de contacteurs enclenchent et court-circuitent une nouvelle portion de résistances. Le premier contacteur enclenché reste enclenché. Les nouveaux contacteurs viennent se connecter en série avec le contacteur déjà enclenché et deviennent indépendants du circuit d'accélération qui, d'ailleurs, se trouve coupé par le relais et ainsi de suite.

A la *troisième position* du contrôleur, le circuit parallèle est établi et le contacteur du « pont », ainsi que les contacteurs de parallèle, enclenchent et les moteurs se trouvent connectés en parallèle avec les résistances en série.

A la *quatrième position* du contrôleur, le démarrage continue et les résistances sont court-circuitées progressivement comme pendant la marche en série.

La même succession d'enclenchements et de déclenchements des contacteurs est obtenue lorsque la manette du contrôleur est *placée directement à la position de pleine marche,* c'est-à-dire à fond de course.

Pendant le démarrage, le wattman peut, à son gré, arrêter la progression de l'enclenchement des contacteurs de façon à continuer la marche sur résistances. En sorte qu'*il peut ralentir le démarrage,* mais *il ne peut, en aucun cas, accélérer ce mouvement* au delà de la limite qui dépend uniquement du relais.

Pour maintenir une vitesse quelconque de marche en série, il suffit, au moment où la vitesse est atteinte, de ramener la manette à la position 1. Si la vitesse désirée correspond à la marche en parallèle avec résistances, il suffit de ramener la manette du contrôleur à la position 3.

Un autre *relais automatique* dit *relais de tension* est placé sur chaque équipement. La bobine de ce relais est constamment connectée, d'une part, à la prise de courant de la motrice à laquelle il appartient et, d'autre part, à la terre.

Lorsque la prise de courant passe sur une interruption de la ligne, la bobine du *relais de tension* n'est plus alimentée et le plongeur de ce relais retombe, entraînant dans sa chute un disque qui coupe le circuit des contacteurs et ramène le tout à la première posi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion de démarrage en série. Aussitôt que le courant est rétabli, le relais de tension est de nouveau attiré et ferme le circuit des contacteurs ; l'enclenchement successif des contacteurs se reproduit dans l'ordre jusqu'à la position correspondant à la vitesse du train.

Nous venons de voir le rôle des cinq fils de contrôle. Il reste deux fils dont voici l'usage :

Le *sixième et le septième fil* règnent sur toute la longueur du train et sont reliés aux bornes d'appareils *enclencheurs-déclencheurs* permettant de faire enclencher ou déclencher simultanément sur toutes les motrices un interrupteur placé sur chacune d'elles. Ces derniers interrupteurs sont en même temps disjoncteurs automatiques.

Cette disposition est recommandable, car il peut arriver que, par suite de courts-circuits locaux dans le circuit de contrôle, les contacteurs d'une motrice restent enclenchés et n'obéissent plus au contrôleur. Le train continue alors à marcher jusqu'au moment où l'on coupe le circuit sur la bobine avariée. Cette manœuvre devient très simple, grâce aux interrupteurs commandés à distance.

173. **Détail des principaux appareils d'un équipement à relais automatique.** — Les figures 393 à 398 représentent les vues d'un contrôleur, d'un contacteur, d'un inverseur, d'un relais d'accélération, d'un relais de tension et d'un commutateur de sectionnement de l'équipement de la figure 391.

Nous avons déjà vu comment est constitué un *contrôleur*. Le contrôleur actuel, construit sur le même principe, est particulièrement simple et de dimensions réduites. En outre des organes dont il a été question, ce contrôleur comprend souvent un dispositif agissant sur les freins à air pour arrêter le train au cas où le wattman lâcherait la manette.

Un *contacteur* est, ainsi que nous l'avons vu, un *interrupteur électro-magnétique* destiné à fermer ou ouvrir certaines parties du circuit de traction, de façon à permettre le couplage en série ou en parallèle de deux moteurs ou de deux groupes de moteurs, ainsi que la mise hors ou en circuit de résistances.

Un contacteur comprend deux parties : l'une est formée par deux mâchoires jouant le rôle d'interrupteur. Dans la position de repos, les mâchoires sont écartées. Le courant du circuit de commande pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duit leur fermeture en passant dans une bobine dans laquelle il fait mouvoir un noyau d'acier doux articulé à l'une des mâchoires.

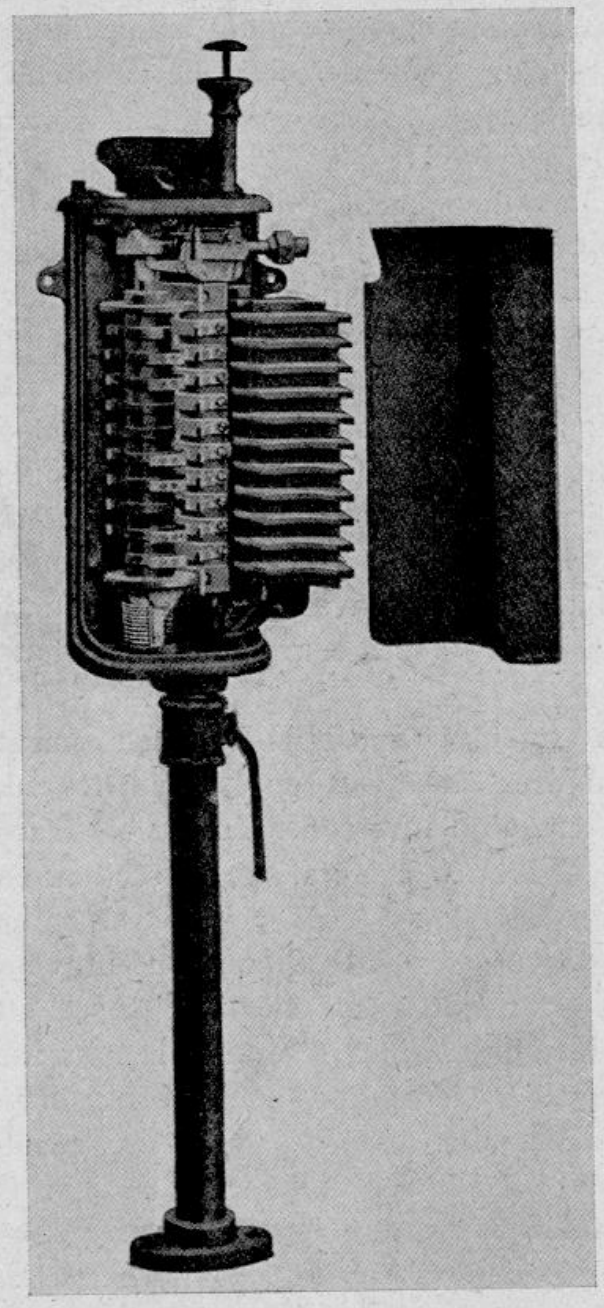


FIG. 393.

Contrôleur pour unités multiples Sprague-General Electric ou Thomson-Houston.

L'autre partie du contacteur comprend une série de plateaux 4, 3 ou 2), qui forment autant d'interrupteurs du circuit de commande.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces plateaux sont manœuvrés par le noyau d'acier doux ; ils constituent les contacts auxiliaires. Quand le contacteur est ouvert, certains plateaux sont en contact avec des bornes fixes et d'autres sont écartés de leurs bornes ; quand le contacteur est enclenché, l'inverse se produit.

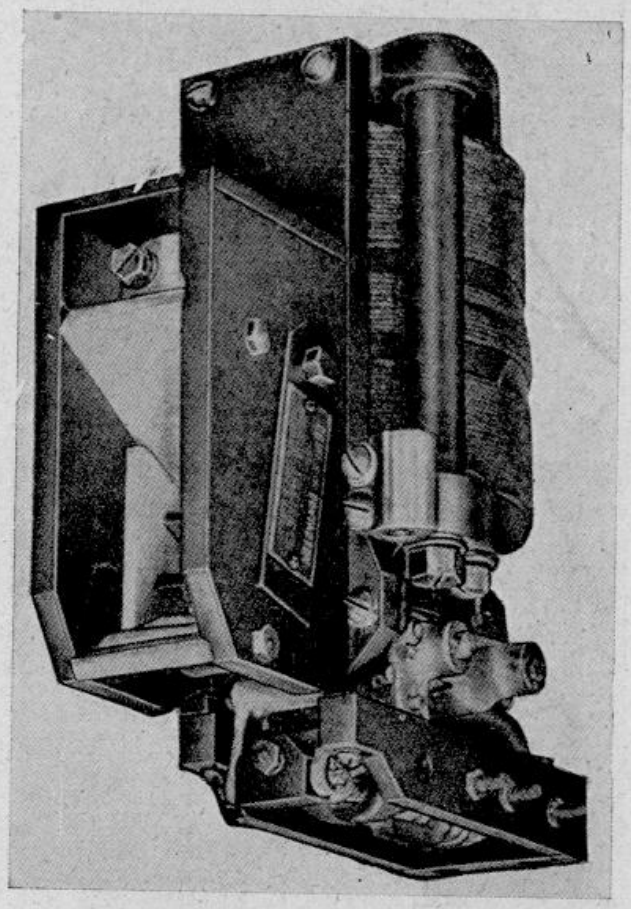


FIG. 394. — Contacteur.

L'*inverseur* est également du type électro-magnétique et est formé par un balancier que deux noyaux d'acier doux placés dans deux bobines font basculer. Suivant la bobine dans laquelle on lance le courant des fils 4 ou 5 du circuit de contrôle, l'inverseur bascule dans un sens ou dans l'autre, ce qui inverse le courant dans les inducteurs des moteurs et en même temps change la direction du courant dans les fils 4 et 5 (voir schéma) du circuit de commande.

Relais d'accélération. — Nous avons vu que cet appareil est un électro-aimant à deux enroulements, un à gros fil (circuit de traction),

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure est à l'envers

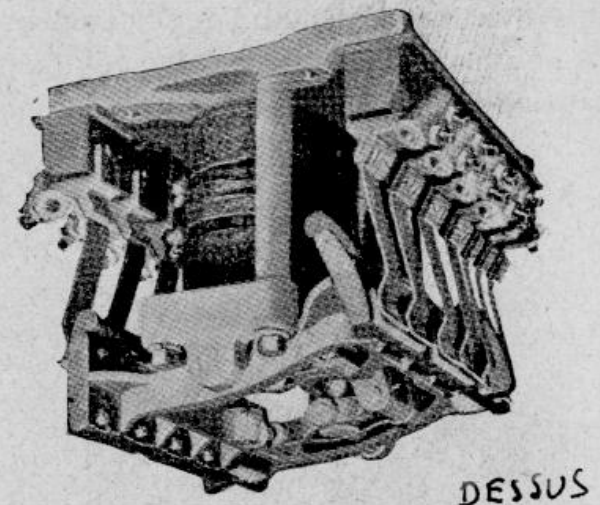


FIG. 395. — Inverseur.

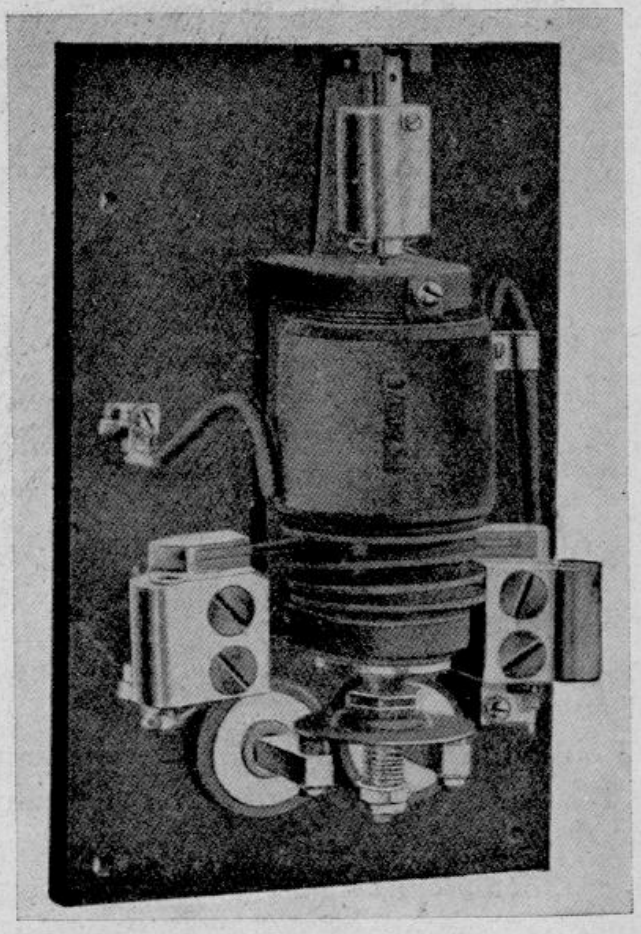


FIG. 396.

Relais d'accélération (pour équipements à relais automatique).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'autre à fil fin (circuit de contrôle). Il agit neuf fois pendant le démarrage : cinq fois en série et quatre fois en parallèle. On peut dire que c'est, au point de vue du contrôle de la marche du train, l'organe le plus important de l'équipement. De son fonctionnement dépend, en effet, l'accélération du train. Le dash-pot ralentisseur de la chute du plongeur est visible sur la figure, placé dans le prolongement du plongeur à la partie supérieure du relais.

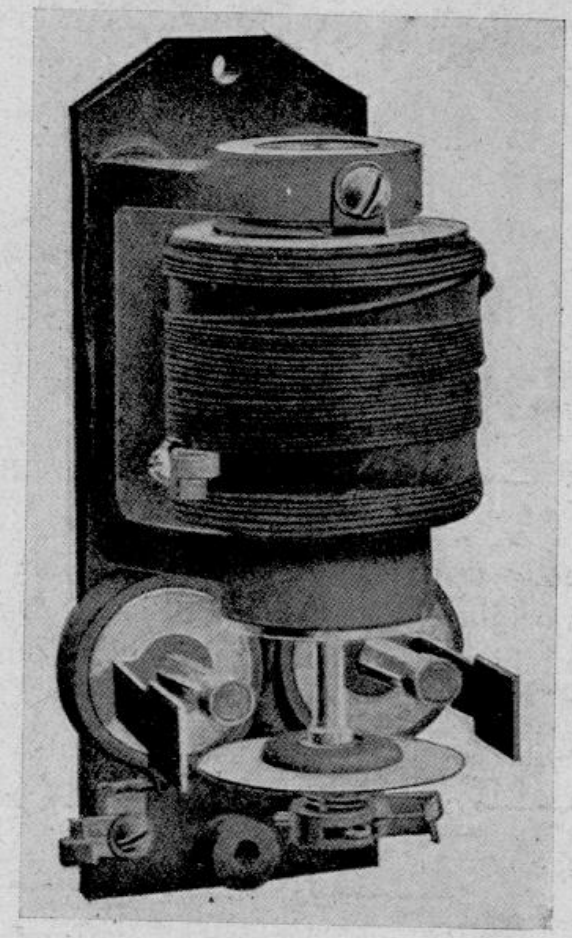


FIG. 397. — Relais de tension.

Relais de tension. — C'est un électro-aimant à un enroulement en dérivation entre la prise de courant de la motrice à laquelle il appartient et la terre.

Commutateur de sectionnement, 2 moteurs, 4 moteurs. — Cet appareil est destiné, ainsi que nous l'avons vu, à mettre hors circuit un groupe de deux moteurs en cas d'avarie; ce commutateur se com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pose de contacts fixes entre lesquels se déplace, par rotation, un cylindre muni de segments de formes et de longueurs appropriées.

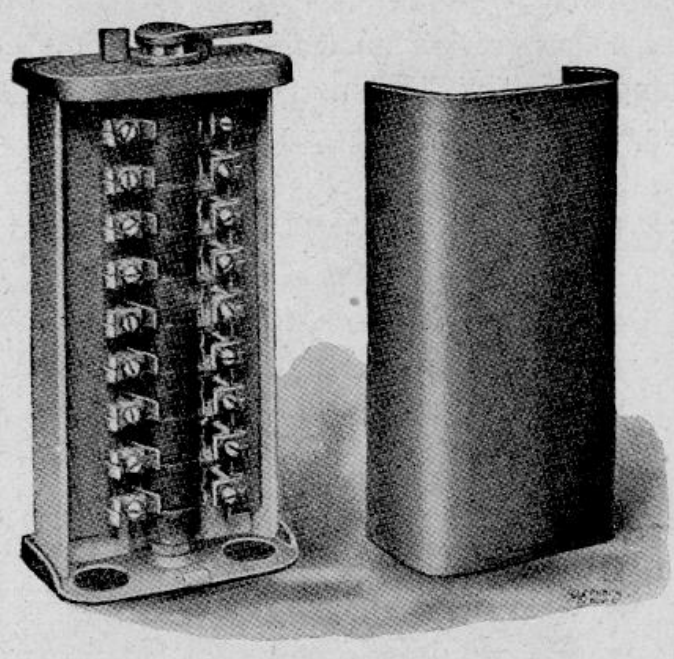


Fig. 398. — Commutateur de sectionnement DH-7.

174. Système électro-magnétique Dick-Kerr : « Unit Series Control ». — Ce système très original, adopté par la Société Dick-Kerr pour le Lancashire et Yorkshire Ry (1907), est encore purement électro-

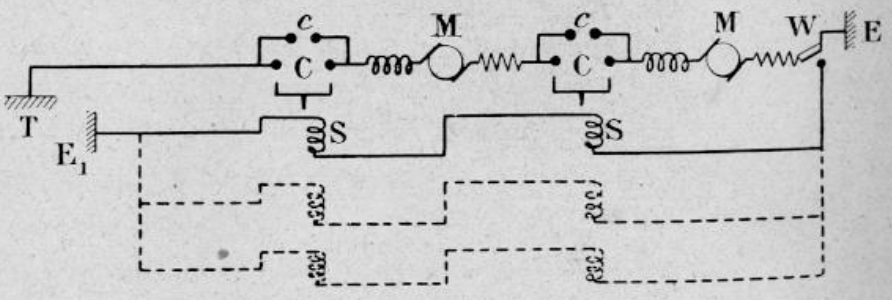


Fig. 399.

Schéma de principe d'un équipement Dick-Kerr " séries multiple unit ".

magnétique, mais au lieu que les solénoïdes de commande des contacteurs soient, comme dans le système Sprague et dérivés, des solénoïdes shunt alimentés par des courants locaux sous la pleine ten-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sion de la ligne, ils sont ici des *solénoïdes série alimentée par le courant de retour des moteurs du train.* Par suite, il n'y a plus de courants sous la pleine tension de la ligne circulant d'un bout à l'autre du train.

La figure 399 représente le schéma de principe d'un équipement Dick-Kerr pour deux moteurs. Le fonctionnement du système est le suivant : T est la prise de courant. Le circuit entre T et la terre peut être complété soit au moyen des contacts *cc* et E, soit au moyen des contacts CC, des solénoïdes SS et de E_1.

La première connexion qu'il est nécessaire d'établir est la connexion entre T et E. On l'obtient en fermant *cc* vers la terre E par l'intermédiaire des moteurs par la manœuvre du commutateur W à 2 directions. Si *cc* sont maintenus fermés, et si W est déplacé pour faire passer le courant vers la terre E_1, à travers les solénoïdes SS, et si ces solénoïdes ferment les contacteurs CC, les moteurs démarrent. Si les contacts *cc* sont ouverts, aucun circuit n'est interrompu, puisque ces mêmes contacts sont doublés par les contacteurs CC. On manœuvre alors vers E le commutateur W, le courant qui passait par les solénoïdes *ss* va directement à la terre et les électro-aimants ne sont plus excités, les circuits sont donc ouverts en CC. Sur le circuit W, SS, E_1 peuvent être dérivés d'autres circuits indiqués en pointillé, contenant autant de solénoïdes qu'il est nécessaire pour la commande et le réglage de la vitesse, et le déplacement de W permet de mettre ces solénoïdes en circuit ou hors circuit. Tel est le principe sur lequel repose ce système de commande.

La figure 400 donne le schéma développé des connexions d'un équipement à 2 moteurs correspondant au schéma de principe de la figure précédente. Les mêmes lettres de référence y sont reproduites.

Un tel équipement comprend le contrôleur du wattman, lequel n'est encore parcouru que par le courant du circuit-contrôle, et un ensemble de contacteurs : contacteurs de l'inverseur, contacteurs des résistances et contacteurs du couplage série-parallèle commandés par le courant du circuit de contrôle.

Le contrôleur (un contrôleur est installé sur chaque plate-forme de chaque motrice, comme à l'ordinaire) se compose lui-même de trois parties distinctes : 1° un tambour série parallèle (switch barrel); 2° le tambour des contacteurs CC (contactor barrel) et 3° le tambour inverseur (reversing barrel).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

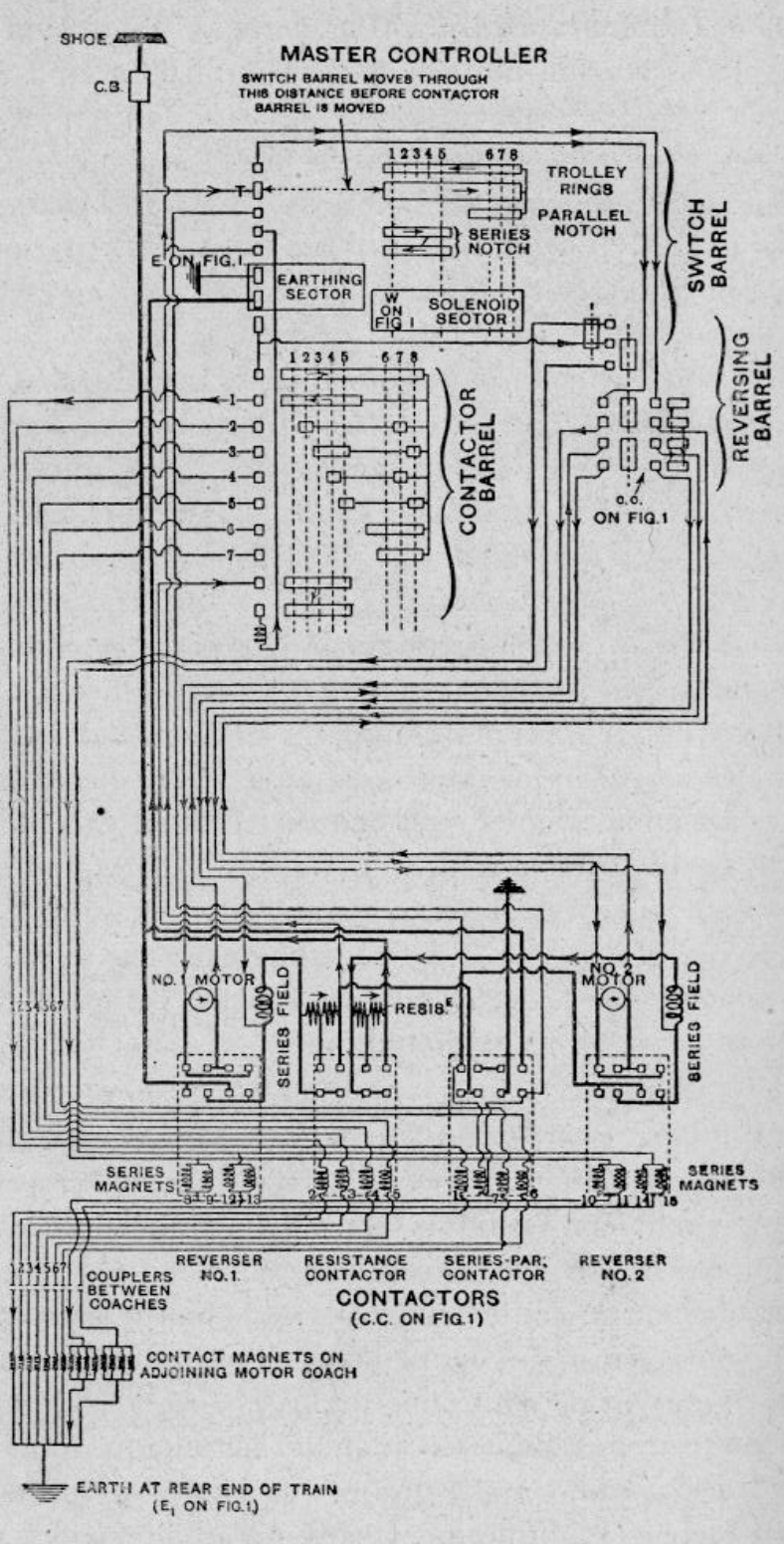


FIG. 400.

Schéma d'un équipement à 2 moteurs, système " Series Multiple Unit " Dick Kerr.
(*Nota.* — Où il est indiqué figure 1 sur ce schéma, se reporter à la figure 399.)

Les deux premiers sont montés sur le même arbre et sont manœuvrés par la même poignée, mais le premier peut se déplacer indépendamment du second, suivant un arc indiqué en développement sur la figure. Après ce premier déplacement, le second tambour est entraîné en même temps que le premier jusqu'à la position de pleine marche.

Il y a 8 crans au contrôleur ; la direction du courant correspondant au premier cran est celle indiquée par les flèches sur la figure.

La première manœuvre à faire est de mettre le tambour inverseur à sa position convenable pour la direction de marche voulue. Ceci a pour effet d'établir le circuit de contrôle à travers les moteurs à la terre E par le secteur de mise à la terre (earthing sector) dans le contrôleur. En même temps, la manette principale du contrôleur, qui était mécaniquement maintenue en place, est libérée.

Au premier cran, le courant arrive aux touches supérieures du tambour série-parallèle, les quelles ferment un circuit de contrôle qui comprend l'inverseur, les moteurs avec leurs inducteurs et résistances, les solénoïdes 8, 9, 10, 11 de l'inverseur et le solénoïde 1, série du groupe, des contacteurs série-parallèle, le tout en série et aussi avec les organes analogues des autres motrices du train, la connexion E à la terre étant faite à l'arrière du train.

Les quatre crans suivants donnent l'élimination des différentes résistances.

Au cran 6 commence le couplage en parallèle des moteurs. Au passage du cran 5 au cran 6 il y a rupture du courant, les contacteurs des résistances et le contacteur de marche en série s'ouvrent immédiatement. Le circuit de contrôle correspondant au cran 6 ferme les contacteurs de marche en parallèle 6 et 7, éliminant les résistances, et au cran 8 les moteurs sont en parallèle pour la pleine marche.

Pour couper le courant, on ramène la poignée du contrôleur à zéro, ce qui a pour effet de mouvoir le tambour série parallèle indépendamment du tambour des contacteurs, lequel reste à la position de marche en parallèle, et d'amener en place le secteur de mise à la terre par E. A ce moment, le courant de retour des moteurs est détourné de son circuit à travers les solénoïdes pour passer par ce secteur et de là à la terre, d'où ouverture des contacteurs et rupture du circuit de traction.

Il est important que les deux mises à la terre soient effectuées

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chacune à une extrémité du train, et afin que la commande de l'équipement puisse être effectuée de chaque plate-forme d'extrémité, le circuit de contrôle est réversible à chaque contrôleur.

Les contacteurs sont disposés par quatre dans des caisses en fer placées sous le truck de chaque automotrice. Les électro-aimants série ayant une très faible self-induction, les fermetures et les ruptures se produisent presque immédiatement. L'arc formé à la rupture du circuit à chaque contact est soufflé par l'action d'une bobine de soufflage. Cette bobine est commune aux quatre contacteurs disposés dans le même coffre, elle est placée sur un noyau en fer central. Chaque contacteur est établi pour porter normalement 300 ampères, les solénoïdes sont prévus pour un courant normal de 10 ampères. Quand les solénoïdes ne sont plus excités, leurs noyaux retombent par leur propre poids et ouvrent les circuits des contacteurs

Le contrôleur de commande pour le réglage des moteurs est un peu plus gros que ceux habituels pour les unités multiples, mais le mécanisme des appareils répartis le long du train est simplifié. Comme il n'a pas à rompre directement de courant, il ne comporte aucune bobine de soufflage.

Toute la manœuvre dépend du mécanicien et il n'y a aucun appareil automatique.

Le contrôleur comporte toutefois un régulateur mécanique qui permet seulement une avance cran par cran.

175. **Systèmes électro-pneumatiques modernes Westinghouse.** — a) *Dispositif du chemin de fer métropolitain de Paris* (« *Turret type* »). — Au contrôleur des équipements de la Mersey vu plus haut (§ 160), avec contacts circulaires, étagés les uns au-dessus des autres, a été substitué un appareil « Turret » (Tourelle) ainsi appelé à cause de sa forme (fig. 401) et où les contacts circulaires sont remplacés par des contacts indépendants à pression, au nombre de 13 (contacteurs) et rangés sur le pourtour de la tourelle.

La tourelle Westinghouse comprend (1) ainsi 13 interrupteurs unipolaires fixés circulairement autour d'un socle en fonte muni d'un soufflage magnétique formé d'une seule bobine centrale B commune

(1) Cette description est empruntée à la *Revue générale des Chemins de fer* de décembre 1903.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à tous les interrupteurs. Ces derniers sont actionnés par des pistons p à air travaillant verticalement.

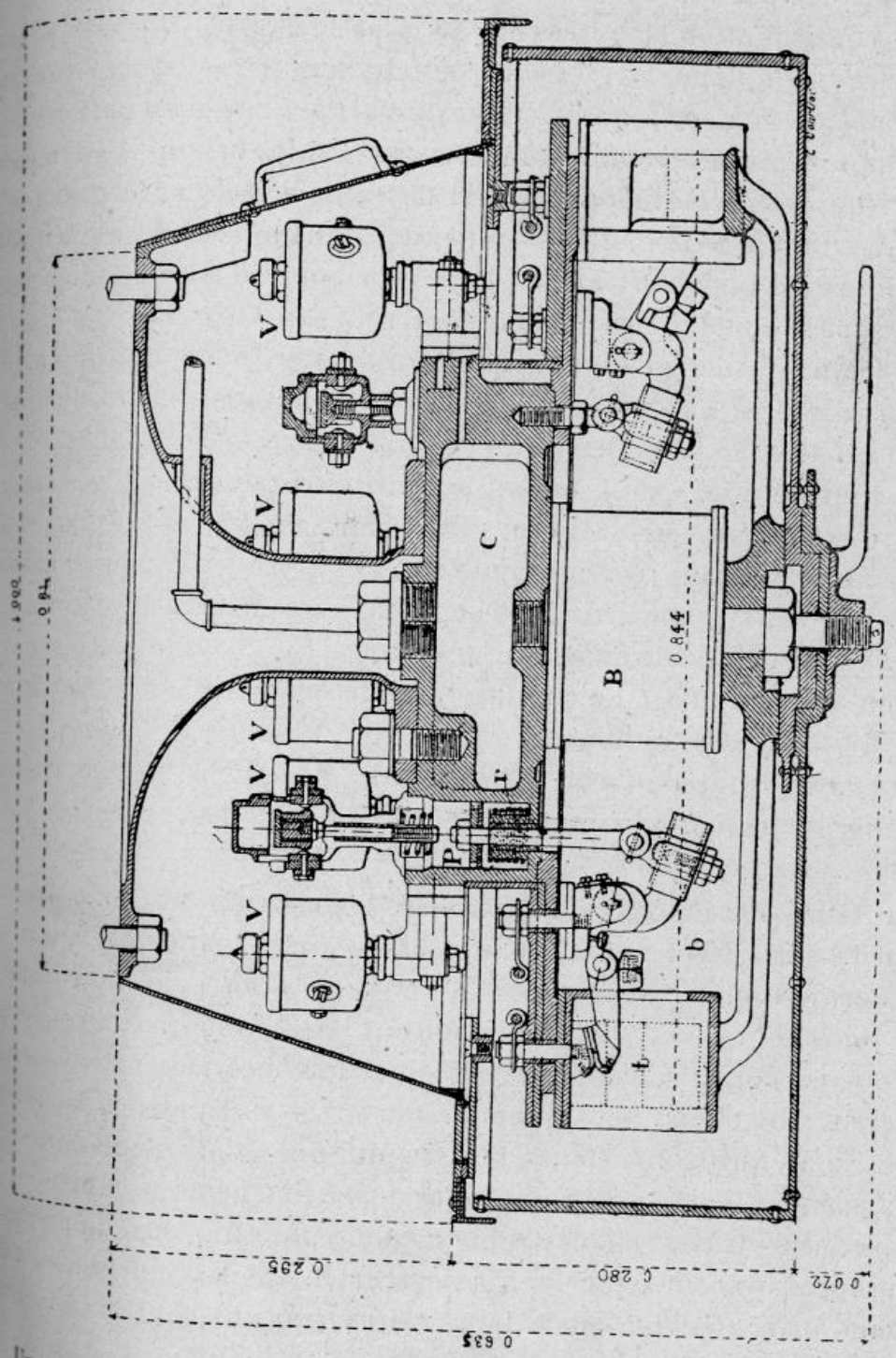


Fig. 401.
Coupe verticale de l'appareil " Turret " ou " Contacteur " placé sous les voitures.

Une canalisation unique amène l'air comprimé dans une chambre centrale C, de laquelle partent des canaux aboutissant à 8 valves

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électro-magnétiques V qui commandent l'admission dans les cylindres des pistons des interrupteurs. (Il n'y a que 8 valves pour 13 contacts, car plusieurs de ces derniers ont lieu simultanément, par exemple les contacts 3 et 11 ou encore 13, 4 et 12).

La pression dans le réservoir est maintenue constante par une valve spéciale, de sorte que l'action de l'air est toujours uniforme.

Lorsque l'air arrive dans la chambre d'un piston P, il refoule celui-ci qui était relevé par son ressort antagoniste *r*, le piston agit alors sur un train de bielles *b* qui produisent le contact en *t*. Quand la chambre du piston est mise à l'échappement, le ressort antagoniste le relève et le contact en *t* est détruit.

Le train de bielles *b* est combiné de telle façon que lorsque le contact a lieu, il s'opère aux surfaces en présence une friction latérale qui nettoie le contact.

La rupture du courant, quand le courant cesse, se fait très rapidement sous l'action puissante du ressort antagoniste *r*. En outre, l'ouverture pour l'arc de rupture peut être très grande, puisqu'on dispose ici dans le sens vertical de tout l'espace qu'on désire, ce qui n'a pas lieu dans le sens horizontal avec les contrôleurs ordinaires où l'intervalle où se forme l'arc de rupture ne dépasse pas 25 millimètres; cet intervalle peut être facilement porté à 75 millimètres et même davantage dans les contacteurs à tourelle.

Enfin les contacts sont bien isolés les uns des autres dans des chambres successives.

La figure 402 donne le diagramme des circuits de commande qui relient la batterie et le manipulateur M et les organes de la tourelle, cette dernière étant placée sous la voiture. La batterie, indépendante de la ligne de travail, donne un courant de 14 volts ; c'est ce courant seul qui parcourt le train s'il y a plusieurs motrices actionnées par le même contrôleur. Sept fils, comme on le voit dans le haut de la figure, sont suffisants pour l'intercommunication nécessaire à la marche du système (il n'y a en effet que 7 touches au manipulateur). Le courant de travail est capté par chaque unité motrice au moyen de ses propres moteurs sur le troisième rail, et il va directement du frotteur au contacteur et de là aux moteurs qui sont voisins de ce dernier sous la voiture, en sorte que si un court-circuit se déclarait il serait localisé dans un espace très restreint qu'on peut facilement mettre à l'épreuve du feu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

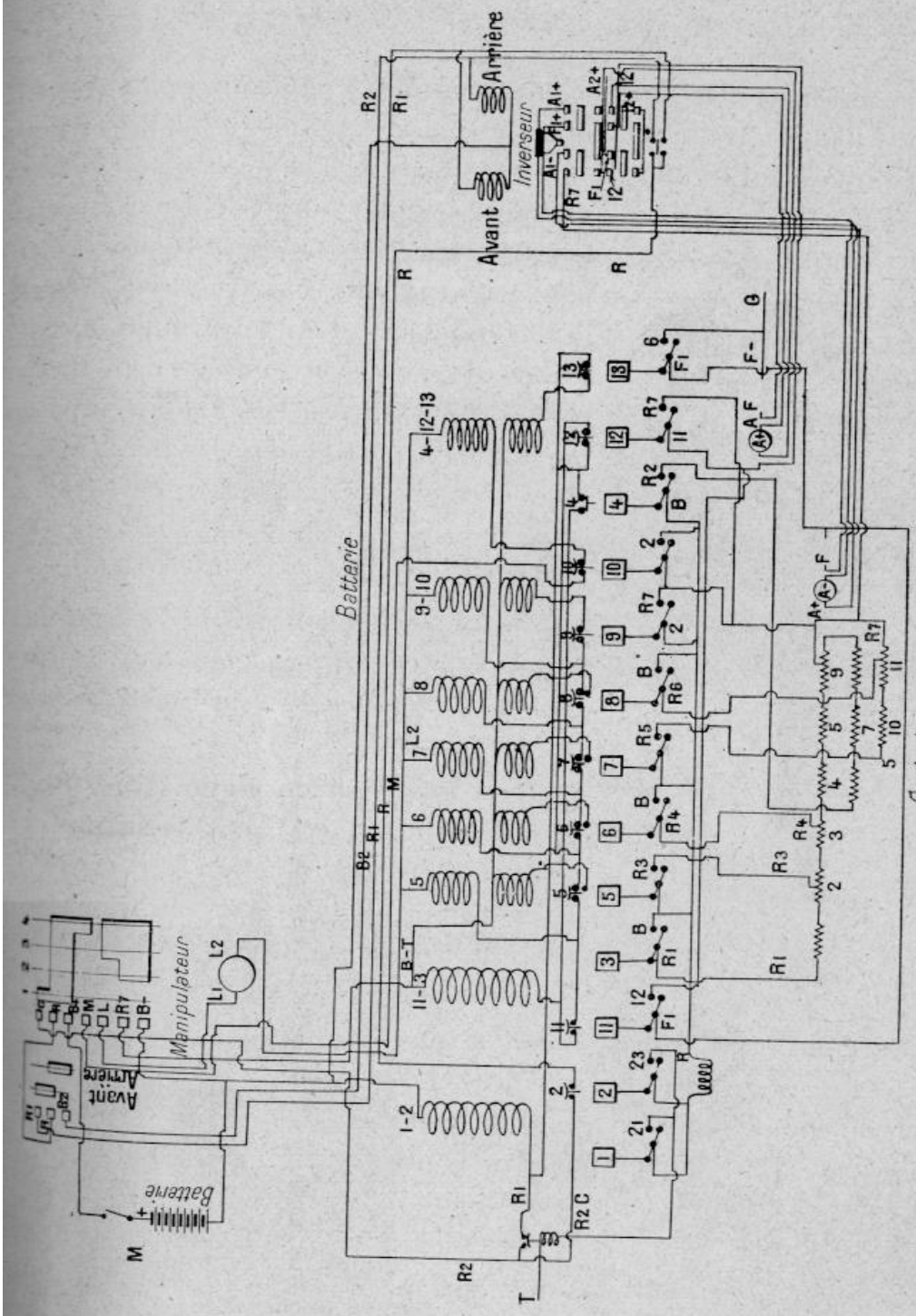


Fig. 402.
Schéma des connexions de l'équipement Westinghouse-Turret.

Le contacteur peut être très facilement inspecté en ouvrant le couvercle circulaire qui permet de visiter chaque interrupteur séparément.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'appareil de commande du wattman est très réduit. La figure 403 en montre l'aspect.

b) *Dispositif moderne dit à « contacteur unité » « Unit Switch System ».*— Dans ces nouveaux équipements, les contacteurs à commande électro-pneumatique sont montés dans une caisse et l'ensemble constitue un groupe de contacteurs (« Switch group »). Les figures 404 et 405 représentent un de ces groupes, vue avant et vue arrière. Les contacteurs d'un tel groupe assurent les connexions convenables des moteurs et des résistances. Un contacteur comporte deux parties essentielles : l'interrupteur et le cylindre pneumatique avec son électro-valve. Les figures 406 et 407 en montrent l'aspect.

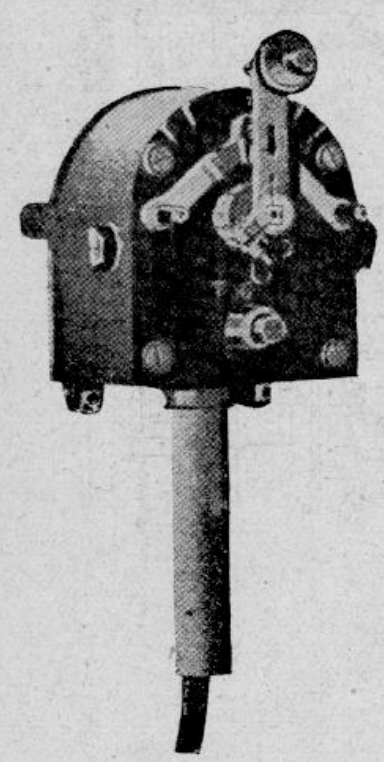


FIG. 403.
Manipulateur du wattmann.

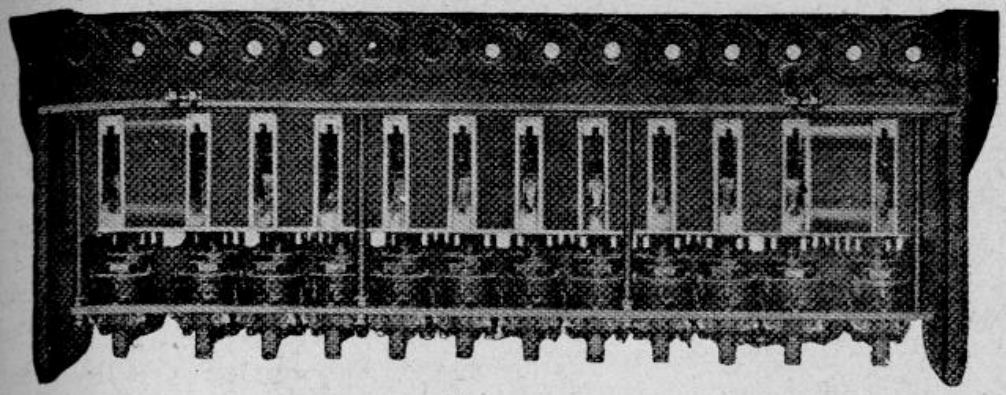
La figure 408 représente le schéma de principe des connexions d'un équipement à 4 moteurs dont le fonctionnement est le suivant :

Le contacteur de ligne (line switch) et les contacteurs M_1 et J R sont fermés les premiers par l'action du contrôleur du wattman au premier cran, ce qui met en circuit et en série les moteurs et toutes les résistances.

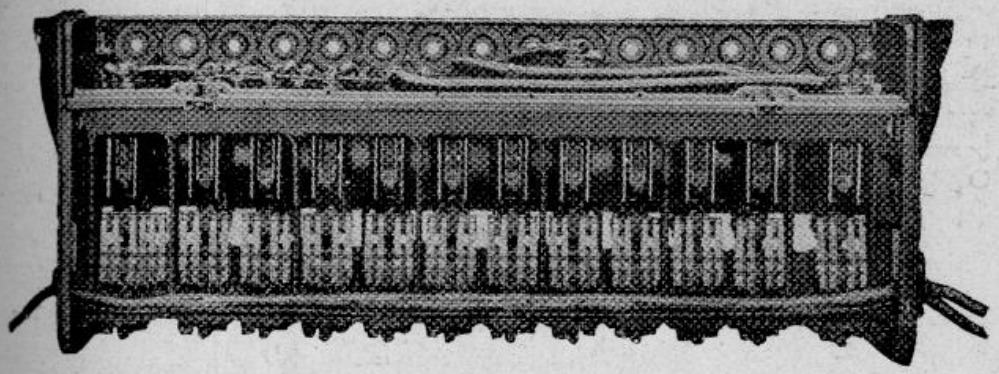
Le second cran correspond à la pleine marche moteurs en série avec la fermeture du contacteur S. La fermeture de S entraîne au moyen de contacts auxiliaires (interlocks) appropriés la fermeture du circuit par R R_1, lequel par des contacts auxiliaires détermine la fermeture de R_1, puis successivement R R_2, R_2 R R_3 et R_3 éliminant ainsi dans l'ordre prévu les différentes résistances.

Au troisième cran du contrôleur le circuit est fermé par J qui détermine l'ouverture de J R et de tous les contacteurs de résistance. Ceci détermine la fermeture de M et G, puis ensuite l'ouverture de J. Les moteurs sont alors en parallèle. L'ouverture de ce dernier rétablit le circuit par les contacteurs des résistances, lesquels se ferment

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Vue avant.



Vue arrière.

FIG. 404 et 405.

Groupe de contacteurs, système " Unit Switch " électropneumatique Westinghouse.

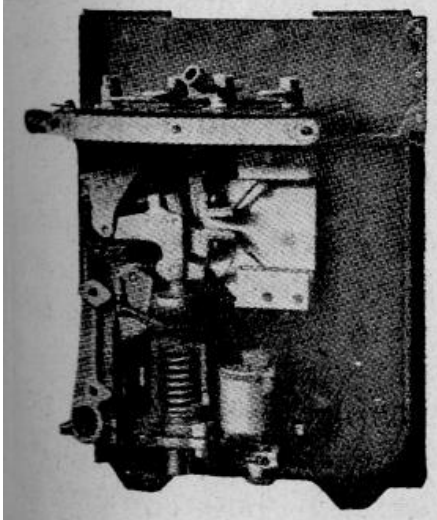


FIG. 406.

Contacteur électropneumatique.

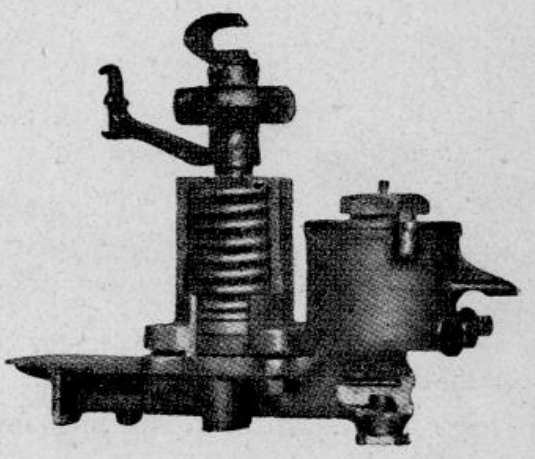


FIG. 407.

Le cylindre pneumatique avec son électrovalve.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans le même ordre que précédemment jusqu'à la marche en parallèle sans résistance.

La vitesse suivant laquelle les contacteurs se ferment successivement est réglée par un relais d'intensité (limit coil, fig. 408).

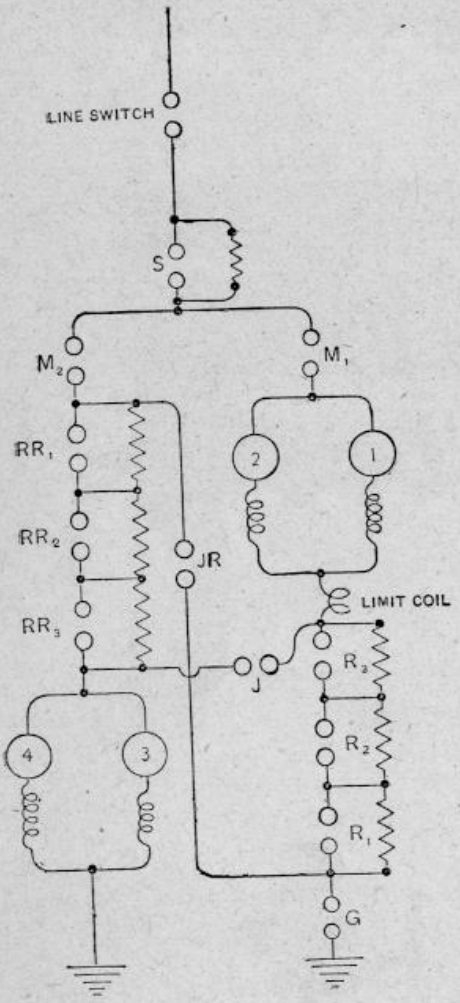


FIG. 408.

Schéma des connexions d'un équipement "Unit Switch" Westinghouse.

La figure 409 représente le schéma complet de l'équipement ci-dessus et la figure 410 montre en perspective la disposition générale des appareils.

Inverseur. — Cet appareil est également à commande électro-pneumatique comme les contacteurs. Il est commandé par le contrôleur du wattman quand la poignée de celui-ci est poussée dans un sens ou l'autre à partir de la position zéro, suivant la direction de marche désirée. Il est disposé de telle sorte que les contacteurs ne peuvent pas être fermés tant qu'il n'est pas dans la position convenable, marche avant ou marche arrière, déterminée par le mouvement du contrôleur.

Contrôleur. — Le contrôleur du wattman, de dimensions réduites, a le même aspect que celui vu précédemment.

Autres organes. — L'équipement comprend encore un commutateur de sectionnement 2 moteurs-4 moteurs, un relais de tension, un relais d'accélération, une batterie à 14 volts fournissant le courant de contrôle (en réalité deux batteries sont installées : une étant en service pendant que la seconde se charge) et différents accessoires, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

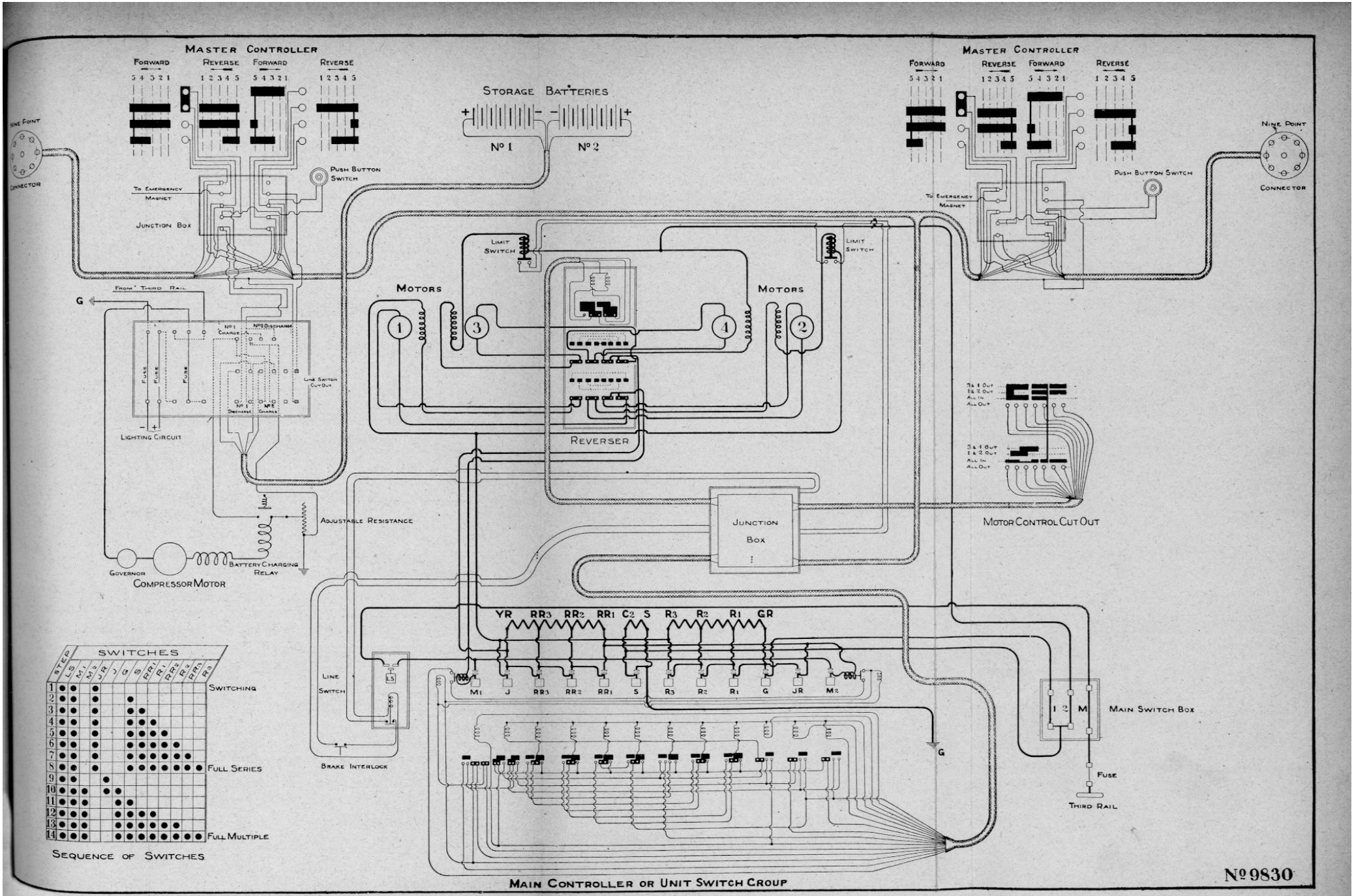


FIG. 409.

Schéma complet d'un équipement électropneumatique " Unit Switch " Westinghouse à 4 moteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C) Applications des systèmes a unités multiples

176. Equipements à unités multiples pour la traction à courant alternatif monophasé ou par la traction mixte, courants monophasé et continu, et pour la traction à courants triphasés. — Les systèmes précédents d'équipements à unités multiples, système électro-magnétique General Electric, Thomson-Houston ou électro-pneumatique Westinghouse, sont évidemment applicables aux lignes à courant alternatif monophasé seul ou aux lignes divisées en sections telles que les unes soient alimentées par ce courant, qui sera, en général, à haute tension, 3.300, 6.600, 11.000 volts... (sections interurbaines), et les autres par du courant continu, qui sera, en général, à basse tension, 600 volts (sections urbaines).

Les appareils de l'équipement proprement dit sont, dans l'ensemble, très semblables à ceux figurant dans les équipements à courant continu, et leur fonction ainsi que leur fonctionnement sont les mêmes. Les modifications qui leur sont apportées, modifications nécessitées par la nature du courant monophasé d'alimentation, sont des plus simples, et les caractères essentiels et avantages des équipements à unités multiples courant continu sont conservés.

L'ensemble d'un équipement comprend encore deux circuits : l'un, circuit principal ou de traction, comprenant les contacteurs et les moteurs avec leurs résistances ; l'autre, circuit de commande ou de contrôle, permettant d'actionner les contacteurs et comprenant le contrôleur et les bobines des électros.

On sait que pour les lignes de traction à courant alternatif monophasé, la méthode de régulation de la vitesse consiste à faire varier la tension aux bornes des moteurs en employant en général à cet effet un transformateur à rapport de transformation variable. Ce transformateur remplace les résistances employées en courant continu.

Quand il s'agit d'une ligne mixte, courant monophasé et courant continu, on emploie un commutateur spécial qui permet d'effectuer en une seule manœuvre tous les changements nécessaires dans les connexions, y compris la substitution du transformateur aux résistances ou inversement, ces deux organes étant naturellement prévus dans l'équipement. De plus, les inducteurs sont connectés en série pour la marche en courant continu et en parallèle pour la marche en courant alternatif.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

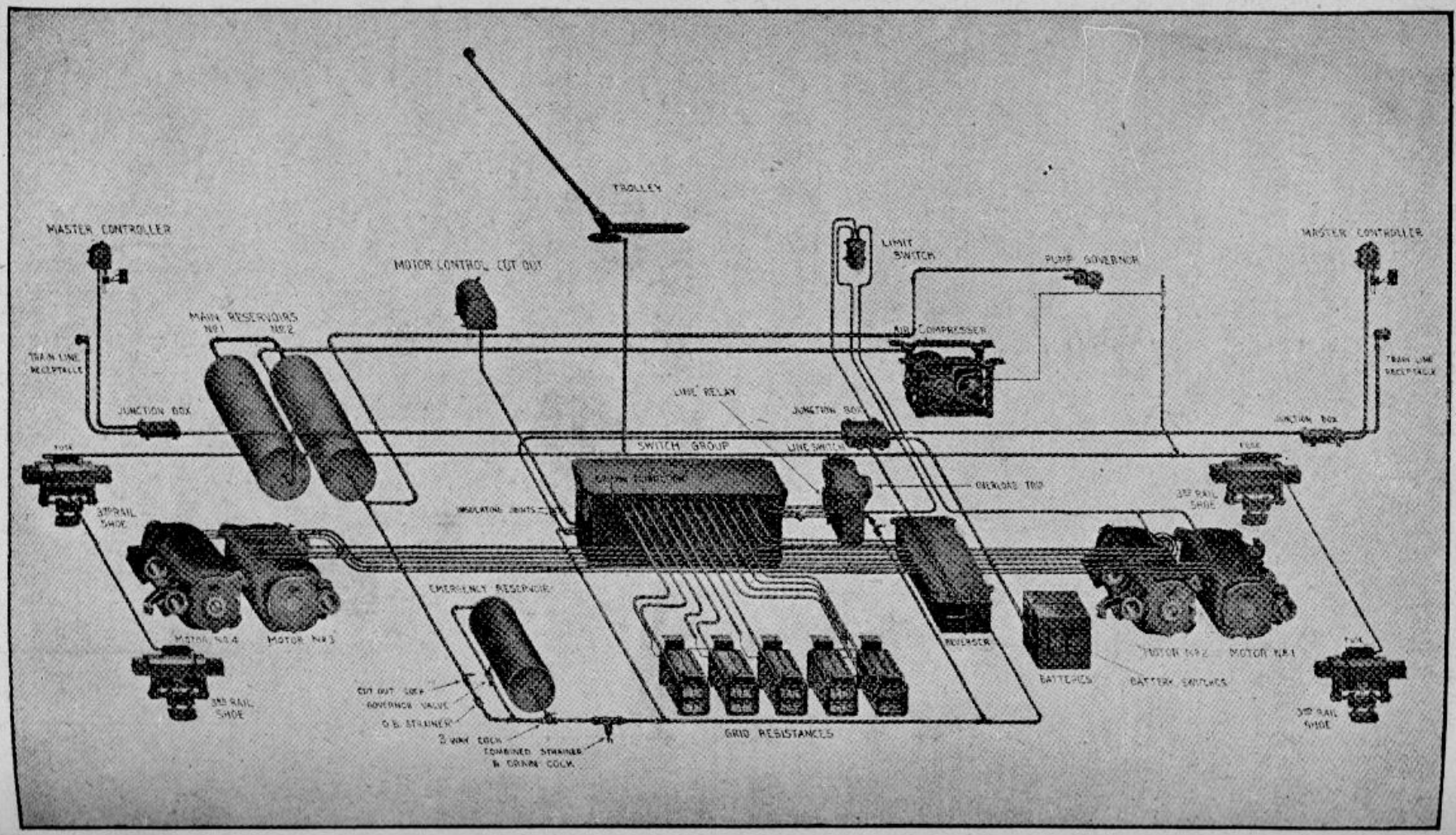


FIG. 410.

Vue perspective montrant la disposition d'un équipement " Unit Switch " Westinghouse (système électropneumatique).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

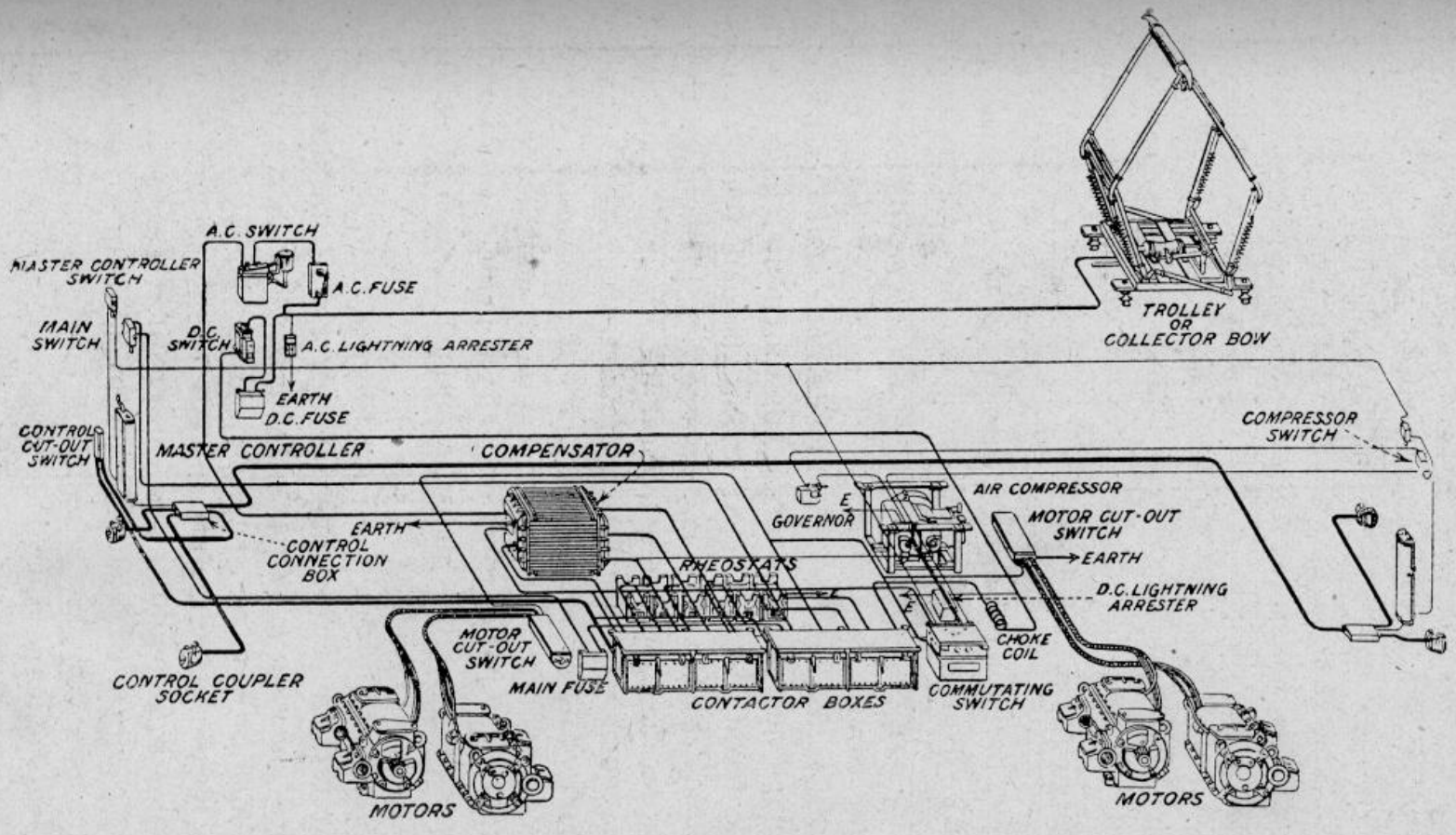


FIG. 411.

Schéma perspectif d'un équipement à unités multiples Sprague General Electric pour alimentation mixte, courant monophasé et courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La manœuvre indiquée ci-dessus est faite au passage de la « section morte » qui est une section sans courant séparant la section courant monophasé de celle courant continu. La voiture franchit cette section morte à pleine vitesse et au moment où elle quitte une section sous courant, un interrupteur principal actionné par un solénoïde coupe *automatiquement* le circuit principal parce que le courant qui passe dans son solénoïde et qui fait fonction de courant de maintien est naturellement supprimé. Le wattman a alors, et seulement, à enclencher le commutateur spécial indiqué plus haut et à fermer l'interrupteur principal courant alternatif ou courant continu suivant le cas.

Comme exemple, nous donnons, figure 411, le schéma d'un équipement mixte monophasé-continu Sprague General Electric, et figure 412 celui d'un équipement Westinghouse pour courant monophasé seul.

Remarque sur les contacteurs. — Dans les systèmes électro-magnétiques, les contacteurs à courant alternatif sont construits sur le même principe que ceux à courant continu; toutefois, à cause de la nature du courant, ils sont à circuit magnétique feuilleté. En plus, des précautions doivent être prises pour éviter le bruit qui se produirait par suite du mouvement vibratoire qui prendrait naissance comme conséquence de la nature pulsatoire du courant et aussi pour obtenir un effort d'attraction suffisamment constant. A cet effet, on munit les contacteurs d'un second bobinage dans lequel on envoie un courant déphasé par rapport au courant principal de contrôle qui circule dans le bobinage principal (London Brighton et South Coast Ry. A. E. G.).

On peut aussi employer (General Electric Co) de petites bobines en court-circuit sur elles-mêmes et formées d'anneaux de cuivre logés sur les faces de la carcasse feuilletée de l'électro, du côté de l'armature mobile et dans lesquels il se développe des courants de Foucault suffisants pour maintenir l'attraction de l'armature mobile aux passages aux zéros du courant alternatif.

Les contacteurs du système électro-pneumatique sont naturellement intégralement applicables dans le cas du courant monophasé puisqu'ils sont actionnés par l'air comprimé et que le courant de contrôle des valves est fourni par une batterie d'accumulateurs.

Enfin le système des unités multiples a reçu une intéressante

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

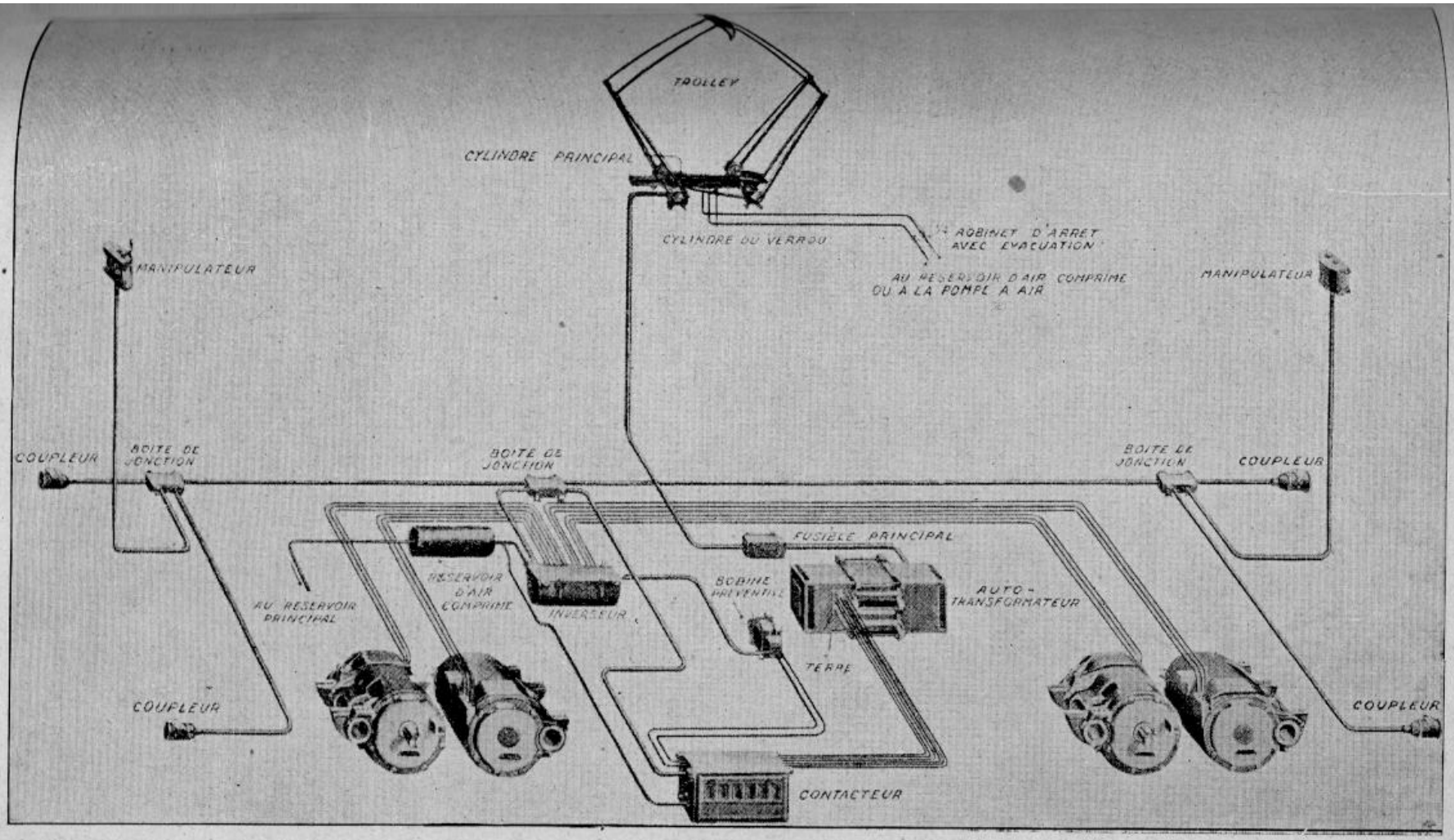


FIG. 412.

Traction par courant alternatif monophasé, système Westinghouse. Equipement à unités multiples. Schéma perspectif des connexions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

application à la traction par courants triphasés aux locomotives à 6.000 volts du Great Northern de la General Electric, à 4 moteurs de 475 chevaux, qui fonctionnent normalement pour être accouplés par deux ou trois unités, ainsi que nous l'avons déjà signalé. L'équipement de ces locomotives, qui est à contrôle rhéostatique, est du type « Sprague General Electric ».

177. Application des systèmes à unités multiples aux motrices isolées. — L'emploi des systèmes à unités multiples se généralise de plus en plus et l'on peut dire qu'actuellement, pour la traction électrique des chemins de fer, il est devenu la règle plutôt que l'exception.

Ces systèmes sont utilisés avec avantage pour des automotrices toujours mises en service isolément genre tramway et locomotive. Dans ce cas, leur adoption est tout à fait indiquée et même s'impose quand la puissance des moteurs est trop considérable pour permettre de faire usage d'un contrôleur ordinaire de plate-forme. Il en résulte la suppression complète des coups de feu, évitant ainsi les avaries au matériel, et offrant d'autant plus de sécurité pour les voyageurs dans le cas de tramways) que l'on peut généralement disposer les appareils du circuit principal en dehors de leur portée.

De tels systèmes devraient même toujours être employés sur les tramways de préférence à celui à contrôleur ordinaire, dont ils sont une généralisation et un perfectionnement, si leur application n'était pas limitée pratiquement par leur prix et par l'encombrement de leurs organes qui seraient tout à fait exagérés pour les voitures ordinaires de tramways.

Pour les locomotives, il offre cet avantage :

Il permet immédiatement l'accouplement de deux ou plusieurs locomotives si on a besoin de remorquer un train plus lourd que le train normal correspondant à une locomotive. Si, par suite, les conditions d'exploitation sont telles que l'on ait à envisager normalement la remorque de trains de X tonnes et exceptionnellement de trains de Y tonnes, Y nettement plus grand que X, soit 2 X, on pourra prévoir seulement l'emploi d'une locomotive pour le train X, et on en accouplera deux pour le train Y. Ce sera là, la solution vraisemblablement la plus économique en même temps que la plus pratique.

Cette méthode a reçu entre autres une application importante avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les locomotives de 1.900 chevaux du Great Northern, triphasées à 6.000 volts, de la General Electric. Ces locomotives fonctionnent normalement, soit seules, soit accouplées par deux ou par trois, suivant le tonnage à remorquer sur le parcours du tunnel des Cascades, en rampe de 1,7 p. 100. Normalement, deux locomotives sont accouplées pour les trains de voyageurs pesant au total environ 800 tonnes et qui comprennent, outre les deux locomotives électriques, une locomotive à vapeur et dix voitures à voyageurs, et elles sont accouplées par trois pour la remorque des trains de marchandises pesant au total environ 1.900 tonnes et qui comprennent, outre les trois locomotives électriques, une locomotive à vapeur Mallet et le train de marchandises. Ces locomotives fonctionnent même exceptionnellement par quatre unités accouplées.

178. **Extension des systèmes à unités multiples à la commande de machines fixes.** — Ainsi qu'il a déjà été dit, les contacteurs ou interrupteurs à commande électro-magnétique jouent exactement le rôle d'un contrôleur et en tiennent place. Les ruptures de courant se font entre les mâchoires des contacteurs au lieu de se faire entre les contacts et doigts du cylindre du contrôleur.

Chaque contacteur peut être comparé à un doigt de contact de contrôleur avec son soufflage magnétique propre et constitue un organe complet. Il présente une grande flexibilité relativement aux groupements qu'il permet de réaliser en vue d'obtenir diverses combinaisons de moteurs et résistances pour correspondre à diverses conditions de fonctionnement.

Concurremment avec les contacteurs, un contrôleur doit être employé, mais son rôle est seulement de « contrôler » le courant de commande des solénoïdes actionnant les dits contacteurs et il n'a jamais à couper de forts courants. Comme conséquence, il est de petites dimensions et aisément maniable.

On conçoit bien alors que le système de commande par petit contrôleur et contacteurs dont l'emploi est en somme la base du système à unités multiples de traction, pourra être avantageusement utilisé où l'on aura à distribuer des courants très intenses.

L'idée, on le voit, est très féconde et susceptible d'applications extrêmement variées.

Comme exemple remarquable d'applications à la commande de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

machines fixes, nous citerons seulement celle de moteurs d'induction de 6.000 chevaux employés aux aciéries de Gary de l'Indiana Steel Trust Co (Ohio-Etats-Unis), pour la commande de trains de laminoirs. Ici, le contrôleur ordinaire à cylindre était absolument prohibé à cause des dimensions auxquelles on aurait été conduit et de la difficulté de manœuvre d'un tel appareil.

II. — Traction double symétrique.

La puissance des locomotives n'est pas la seule circonstance qui puisse intervenir dans la limitation du tonnage des trains à remorquer, la résistance de l'attelage (1) entre aussi en jeu et cette considération devient prépondérante sur nos lignes de chemins de fer pour les trains de marchandises sur des rampes de 10 millimètres et plus. Là, en effet, le poids de ces trains n'est pas, comme celui des express, limité par la puissance des machines, mais bien par la résistance des attelages. Un seul moyen permet de tourner la difficulté pour franchir ces rampes ; il consiste à mettre une machine en queue pour réaliser le poussage du train. Cette machine pouvant d'ailleurs être dételée en dehors de ces passages.

Ce procédé, dit « de traction symétrique », est couramment employé en traction à vapeur.

Voyons comment il est réalisé en traction électrique.

Le système à unités multiples est ici en défaut, car on ne peut songer à installer tout le long d'un train de marchandises les câbles nécessaires à assurer l'intercommunication électrique entre les deux locomotives. Néanmoins, la traction électrique fournit encore une solution plus complète que la traction à vapeur où il n'existe pas pratiquement de mode sûr de communication entre la tête et la queue du train.

Il y a plusieurs années déjà, M. Parodi, ingénieur en chef du Service électrique, du Matériel et de la Traction à la Compagnie du Paris-Orléans, a proposé un moyen très simple de communication qui utilise le conducteur même du courant de traction, dans le cas où le courant est continu. Le courant de correspondance

(1) Voir à ce propos la note au bas de la page de " l'Avant-Propos ".

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est un courant périodique, de faible intensité, émis et reçu par induction et qui se superpose sans difficulté au courant de traction. En faisant varier la forme du courant périodique et la durée de ses émissions, on établit entre les deux machines une communication très complète par signaux conventionnels. On peut aller plus loin et employer ces courants secondaires à actionner à distance sur la locomotive de queue, par l'intermédiaire de relais électriques ou électropneumatiques le contrôleur de mise en marche et le frein à air comprimé. L'électricien de tête devient ainsi complètement maître de la marche et de l'arrêt des deux machines.

L'emploi d'une semblable combinaison, sans être impossible, est beaucoup plus délicate quand le courant de traction est lui-même périodique à haute tension. En outre, quelle que soit la nature du courant de traction, ce double emploi du fil de traction devra être complété par un dispositif empêchant le courant secondaire émis par la machine de tête d'atteindre les machines de trains voisines.

Si l'expérience démontrait que la correspondance par le fil de traction soulève des difficultés pratiques trop grandes, rien ne serait plus aisé que d'ajouter à côté du fil de traction un fil pilote de petit diamètre, complètement isolé et divisé en sections concordant avec les cantons de circulation. La prise de courant de chaque machine porte alors deux frotteurs isolés l'un de l'autre, un qui capte le courant de traction, l'autre qui établit la communication par le fil pilote avec retour du courant par les rails.

Le fil pilote n'est utile qu'au dessus des voies principales franchies en pleine vitesse. Dans les grandes gares, qui sont toujours établies en palier et parcourues à vitesse réduite, la machine de queue n'a pas besoin d'intervenir et le fil pilote est supprimé. On évite ainsi la complication du double fil au-dessus des aiguillages où il est gênant.

Dans la traction par courant continu ou monophasé direct, qui assure l'indépendance complète des deux machines, on est conduit à répartir le travail entre elles de la façon suivante : l'assistance de la machine de queue, pour pousser ou retenir, n'est utile que dans les fortes déclivités ; en palier et sur les déclivités faibles, la machine de queue roule comme un simple véhicule; sur les déclivités fortes, pentes ou rampes, elle travaille à pleine charge. Elle sera donc soumise au régime du *tout ou rien*, avec changements peu fréquents

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et les petites variations de la marche seront réglées par la machine de tête seule.

Ces conditions de marche sont, on le voit, bien différentes de celles des trains à unités multiples étudiés plus haut.

La Compagnie du Paris-Orléans a procédé, en décembre 1917 et janvier 1918, à des essais que nous allons indiquer de marche en double traction symétrique sur une portion de sa ligne électrifiée de Paris à Juvisy. Trois trains d'expérience ont circulé d'Ivry à Juvisy, ils ont été formés en gare d'Ivry avec du matériel quelconque, comme des trains de marchandises ordinaires : le premier comportait 50 wagons pesant 685 tonnes et les deux autres 70 wagons pesant 910 tonnes.

Ils ont été remorqués, à la vitesse de 46 km.-h., par deux locomotives électriques semblables, attelées, l'une en tête, l'autre en queue. La section parcourue, longue de 17 kilomètres, présente des déclivités variant de —6 à +5 mm., avec ses points bas. A chaque voyage, on a exécuté cinq démarrages et cinq arrêts, en appliquant toujours à la machine de queue la *règle du tout ou rien*. Dans le dernier voyage, un wagon dynamomètre, placé au milieu du train, enregistrait les variations de la vitesse et celles de l'effort transmis ou reçu par l'attelage.

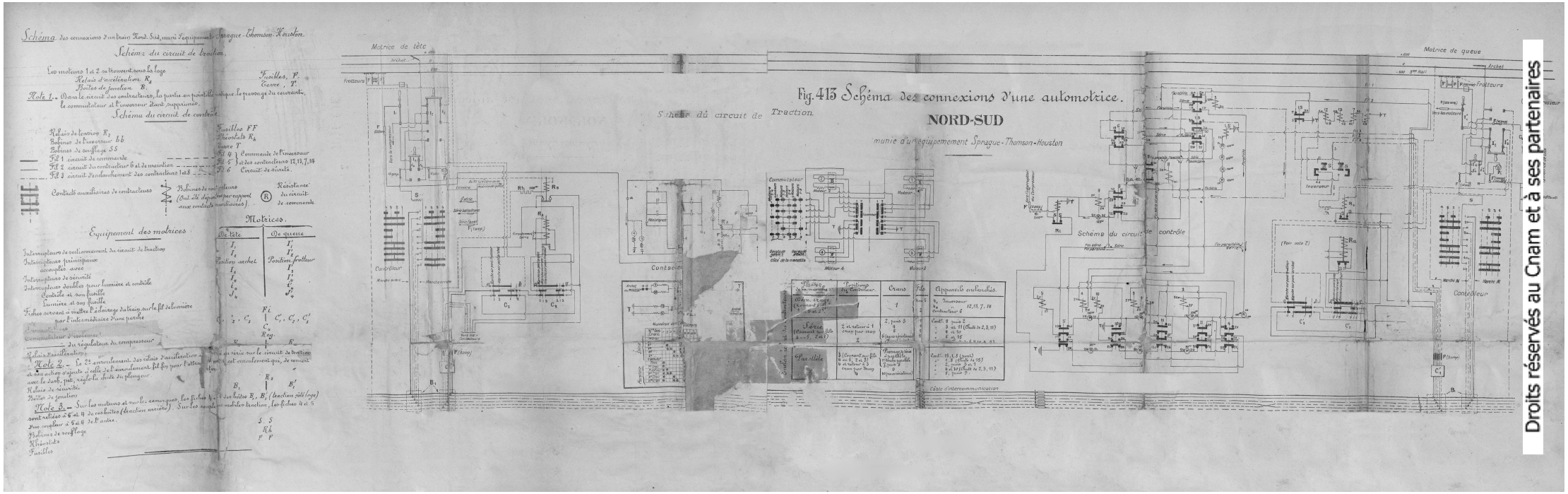
La communication entre les deux machines était établie au moyen d'un fil volant, unique, qui fonctionnait exactement comme le ferait un fil pilote doublant le conducteur de traction. Le courant de retour passait par les rails, se superposant à celui de traction. Le courant de communication était, soit continu de 1 ampère et de 100 volts, soit alternatif de 6 volts et 300 périodes. Les deux machines communiquaient en outre téléphoniquement par le fil pilote.

L'électricien de tête, en se servant du courant continu, commandait, à l'aide d'une seule manette, deux relais électro-pneumatiques placés sur la machine de queue, l'un qui actionnait le levier de la mise en marche, l'autre le frein modérable.

Des quinze manœuvres complètes exécutées, neuf l'ont été à l'aide des relais, sans l'intervention de l'électricien de queue, et six avec l'intervention de cet agent sur envoi de signaux.

Les résultats obtenus ont toujours été satisfaisants ; l'enregistrement de l'effort de traction par le dynamomètre, au milieu du train, a montré que les attelages tantôt tirés, tantôt comprimés, oscillent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lentement sans aller à fond de course. Les arrêts, très courts, ont été remarquablement doux.

Les divers systèmes de communication entrevus permettront à l'électricien de tête de commander simultanément plusieurs machines placées en des points quelconques du train ; ils conviendront donc au cas d'un train en forte rampe, assez lourd pour justifier l'emploi d'une troisième machine qu'on placerait au milieu pour obtenir le maximum de garantie contre la dérive.

En supprimant la limitation des trains par la résistances des attelages, la traction électrique symétrique est de nature à modifier radicalement le mode d'exploitation des lignes accidentées. M. Sabouret estime que les trains pourront être composés *sans limite de charge* de :

50 wagons sur les lignes à rampes de 25 à 20 millimètres et rayons de 250 à 200 mètres ;

60 wagons sur les lignes à rampes de 19 à 11 millimètres et rayons de 450 à 300 mètres ;

70 et 80 wagons sur les lignes de 10 à 8 millimètres et rayons de 500 mètres et plus.

Ces prévisions semblent raisonnables, par comparaison avec les trains symétriques de 3.000 tonnes de la ligne des montagnes Rocheuses (Chicago-Milwaukee-Saint-Paul Ry) qui circulent avec un nombre de wagons dépassant souvent 60, sur un tracé sinueux, où le rayon des courbes descend à 175 mètres (1).

A noter, toutefois, que sur cette dernière ligne, la traction symétrique est réalisée simplement comme suit : le mécanicien de la locomotive de queue se borne à surveiller l'attelage du wagon qui précède cette machine et règle, en conséquence, le démarrage, la marche et l'arrêt suivant, en s'aidant des lectures des ampèremètres et wattmètres.

Traction symétrique sur les chemins de fer de l'Etat italien. — Un exemple remarquable de double traction symétrique, en exploitation, est fourni en traction par courants triphasés par les loco-

(1) Ce qui précède est extrait d'une conférence très documentée, faite le 9 novembre 1918, à la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, par M. Sabouret, ingénieur en chef des Ponts-et-Chaussées, ingénieur en chef des services techniques de la Compagnie du chemin de fer de Paris-Orléans.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

motives Brown-Boveri de l'Etat italien, que nous avons précédemment étudiées (Voir § 84-4°).

Plusieurs essais de démarrage et de marche continue, sur rampes de 12 millimètres, ont été effectués avec des locomotives en traction symétrique, avec des trains de voyageurs et de marchandises, et ils ont montré, en particulier, que les dispositions prises pour les résistances de démarrage répondaient au but recherché qui est la division égale du travail entre les deux locomotives, par réglage du glissement des moteurs des locomotives (§ 86-6). Ces essais ont été les suivants :

Le poids remorqué était pour les trains de marchandises de 600 tonnes (poids total 784 tonnes avec les deux locomotives), et celui des trains de voyageurs de 374 tonnes (poids total 558 tonnes avec les deux locomotives). Les trains de marchandises marchaient à la vitesse maxima de 50 kilomètres à l'heure et les trains de voyageurs à celle de 100 kilomètres à l'heure. Les deux locomotives étaient placées l'une en tête, l'autre en queue du train. Primitivement, on voulait établir entre les deux locomotives une communication par signaux donnés au moyen du sifflet; on dut y renoncer, parce que les signaux acoustiques, par suite de la grande longueur des trains et du bruit pendant la marche, n'étaient plus suffisamment distincts. Ces essais ont du reste prouvé que le réglage de la marche au moyen de l'observation des wattmètres installés dans les postes de mécanicien était pleinement suffisant. Au démarrage, le branchement des deux locomotives sur la première vitesse du régime se faisait à peu près simultanément. Pour passer à une vitesse supérieure, l'on procédait ainsi : la première locomotive prenait le rôle de conductrice ; dès que les connexions pour le nouveau couplage des moteurs étaient établies, l'effet se répercutait sur la locomotive d'arrière, dont l'aiguille du wattmètre montait d'abord fortement (au moment de la mise hors circuit des moteurs de la première locomotive) et descendait ensuite (après le changement de mode de couplage des moteurs de la première locomotive) au-dessous de la position qu'elle occupait primitivement. A ce signal, le mécanicien opérait aussi le changement des connexions sur la seconde locomotive le plus rapidement possible. De cette manière, le démarrage put s'opérer sans réactions dans les attelages et sans que la puissance absorbée momentanément par la locomotive de tête, qui avait naturellement à supporter les à-coups

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les plus forts, ne dépasse 2.000 kilowatts. Le personnel s'assimila facilement ce procédé de démarrage et exécuta ensuite les démarrages avec une grande sûreté.

Les essais de durée, qui furent effectués à de grandes vitesses, particulièrement à 75 et à 100 kilomètres à l'heure, ont donné également des résultats satisfaisants.

La traction symétrique est également employée normalement sur les lignes du réseau du Giovi. Elle est réalisée comme suit avec des trains non munis de freins continus (1).

Les trains sont de 350 à 650 tonnes suivant la ligne, une locomotive en tête et une locomotive en queue. (Lignes de Gênes à Ronco, ligne succursale et ligne de Savone à Ceva.)

Pour le démarrage en palier, après échange de signaux entre les deux locomoteurs, c'est le mécanicien de queue qui met en route le premier, sur le cran de vitesse, 25 km.-h., poussant ainsi le train ; lorsque le mécanicien de tête sent que son locomoteur est poussé, il démarre à son tour progressivement. Arrivé à la vitesse normale de 25 km.-h., le mécanicien de tête fait le passage au cran de grande vitesse en prévenant le mécanicien de queue par un coup de sifflet prolongé. Le mécanicien de queue observe attentivement ses appareils, ampèremètre et wattmètre, règle le démarrage pour que son locomoteur soit régulièrement chargé, et passe à la grande vitesse quand il s'aperçoit que son collègue de tête a exécuté lui-même cette manœuvre.

A l'arrêt, en palier ou en montée, c'est le mécanicien de tête qui coupe le courant sur ses moteurs, en appelant l'attention de son collègue par un coup de sifflet prolongé. Le mécanicien de queue constatant ce qui se passe par l'observation de ses appareils (augmentation de charge) désinsère à son tour ses moteurs, et participe au freinage, en même temps que les garde-freins répartis le long du train; s'il s'aperçoit que le train va s'arrêter trop vite, il remet en route pour le pousser légèrement jusqu'au point d'arrêt.

En principe, quand le courant s'abaisse à la valeur de 60 ampères, qui correspond au courant d'aimantation des moteurs à 15 périodes et 3.000 volts, les mécaniciens mettent leurs moteurs hors circuit.

---

(1) D'après les règlements pour le personnel des machines des trains électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au démarrage en rampe, exceptionnellement le mécanicien de tête met en route le premier, suivi presque aussitôt du mécanicien de queue.

Chaque locomotive comporte un petit carton de forme spéciale qui, intercalé entre les mâchoires de l'interrupteur de court-circuit du rhéostat liquide, sert à empêcher sa mise en court-circuit et à maintenir, par suite, dans le rotor la résistance la plus faible correspondant au niveau le plus élevé de l'électrolyte dans la cuve. Les mécaniciens se servent fréquemment de ce petit carton pour éviter qu'une mise en court-circuit intempestive ne provoque des chocs dans le train.

Dans les descentes, il est fait un fréquent usage de la récupération, avec deux vitesses de 50 km.-h. et 25 km.-h.; les longues descentes doivent être parcourues seulement à 25 km.-h. par les trains de marchandises n'ayant pas de frein continu.

Pour opérer un arrêt ou un ralentissement en descente, le machiniste de tête coupe ses moteurs et freins, et le machiniste de queue, prévenu par la diminution de la puissance récupérée, coupe à son tour, quand il s'aperçoit que cette puissance est devenue sensiblement nulle, puis freine autant qu'il est besoin.

Les mécaniciens doivent faire attention à ne pas remettre leurs moteurs en service par récupération, avec une vitesse du train trop différente de la vitesse normale, car la puissance mise en jeu serait très grande et provoquerait des à-coups dangereux.

Répartition de la charge entre les locomotives d'un train à traction symétrique. — Quoique nous ayons déjà étudié la question de la répartition de la charge entre les différents moteurs d'une locomotive triphasée, il nous paraît utile d'y revenir pour examiner comment la conduite des trains à traction symétrique ci-dessus est réalisée pour tenir compte de cette circonstance.

On pourrait craindre, en traction symétrique, que la moindre différence entre les caractéristiques des locomotives d'un même train (diamètre des roues, résistance du retour) amène des écarts de charge considérables entre les deux locomotives.

En fait, la pratique a montré que la répartition de charge se faisait dans de très bonnes conditions et qu'il était seulement nécessaire de prendre certaines précautions lorsque les roues des loco-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

motives présentaient des diamètres trop différents par suite de l'usure.

Le diamètre des roues motrices d'une locomotive type Giovi E 550 est 1.070 mm. à l'état de neuf, et on le laisse diminuer jusqu'à 1.006 mm., soit une usure de 64 mm., ou 6 p. 100.

En montée, c'est la locomotive à roues plus grandes dont le moteur tournant le moins vite présente le glissement le plus important et absorbe la puissance la plus élevée; en descente, au contraire, c'est la locomotive à roues plus petites dont le moteur tournant le plus vite a le glissement le plus important et fournit la puissance récupérée la plus grande. Pour égaliser les charges, il faut introduire une résistance dans le rotor du moteur à glissement plus grand, c'est-à-dire dans la locomotive à grandes roues à la montée et dans la locomotive à petites roues, à la descente.

Les dispositions réglementaires adoptées sont les suivantes :

Le mécanicien est prévenu du diamètre des roues de sa locomotive et de celle de son collègue. Pour un écart de diamètre inférieur ou égal à 5 mm. on ne prend aucune disposition spéciale, mais on se contente seulement de veiller à une bonne ventilation des moteurs les plus chargés et à une utilisation convenable des sablières pour éviter le patinage.

Pour un écart compris entre 6 mm. et 15 mm., on supprime le court-circuit du rhéostat (par interposition du carton isolant) dans les deux locomotives; le mécanicien de la locomotive à plus petit glissement conserve sa manette dans la position de résistance minimum, et celui de l'autre locomotive règle la charge d'après le profil de la ligne et l'indication de ses appareils.

Pour un écart de diamètre égal ou supérieur à 6 mm., la locomotive à plus petit glissement voyage avec rotor en court-circuit franc, et l'autre règle la charge au moyen de son rhéostat.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — **Annexes.**

Equipements des automotrices du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris.

179. — Ces équipements sont du type à unités multiples Sprague Thomson-Houston, à accélération automatique par relais.

La distribution du courant est à trois fils réalisés par un conducteur aérien, un rail latéral et les rails de roulement, ces derniers constituant le fil neutre. La tension totale est de 1.200 volts soit 600 volts sur chaque pont, + 600 sur le fil aérien, — 600 sur le troisième rail et zéro sur les rails de roulement.

Le fil aérien d'alimentation est un fil de 150 millimètres carrés en cuivre, il est supporté en moyenne tous les 18 mètres.

Le troisième rail est en acier extra doux de 49 kilogrammes au mètre courant.

Les organes des équipements fonctionnent sous 600 volts, mais l'isolement est prévu pour 1.200 volts.

Chaque train comporte deux motrices avec une, deux ou trois remorques ; les poids respectifs des trains étant de 96, 121 et 146 tonnes.

Les motrices sont à deux bogies à deux essieux et à traverse danseuse. Chaque essieu est actionné par un moteur de 125 chevaux par l'intermédiaire d'engrenages dont le rapport de réduction de vitesse est $\frac{17}{69} = \frac{1}{4,05}$ pour le moteur Thomson-Houston, TH-206.

Un train normal comporte par suite 8 moteurs de 125 chevaux, soit une puissance totale de 1.000 chevaux.

Les quatre moteurs d'une motrice sont couplés en deux groupes de deux moteurs. Les deux moteurs de chaque groupe sont constamment montés en parallèle. Enfin un groupe comprend les deux moteurs extérieurs des bogies et l'autre groupe les deux moteurs inté-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rieurs. Les deux groupes de moteurs d'une automatrice permettent le contrôle série-parallèle.

Les huit moteurs d'un train sont également répartis sur les deux ponts, soit les quatre moteurs d'une motrice sur chaque pont.

Il en est de même des compresseurs. Le compresseur d'une motrice est alimenté par le même pont que les moteurs de la motrice correspondante.

L'éclairage et le contrôle sont alimentés normalement par le conducteur aérien ; le courant pour cet ensemble étant pris sur la voiture de tête. Normalement, c'est donc là seulement le seul courant de désiquilibrage des ponts et par suite le seul qui circule dans les rails de roulement et il est naturellement très faible. Les phénomènes d'électrolyse sur les conduits métalliques environnantes sont donc pratiquement nuls.

Chaque automotrice est munie de deux prises de courant aériennes du type pantographe double Védovelli, dont les frotteurs sont à base d'aluminium et capables de capter 800 ampères sans étincelles et de deux patins frotteurs sur troisième rail.

Normalement, le pantographe, ou plutôt l'ensemble des pantographes de la voiture motrice de tête est en prise avec le conducteur aérien + 600 volts, et les frotteurs de la motrice de queue sont en contact sur le troisième rail — 600 volts.

Les pantographes sont à commande pneumatique.

Les tensions limites de fonctionnement de l'équipement sont 350 et 600 volts.

Deux gaînes de câbles séparées parcourent le train total d'un bout à l'autre. La première gaîne comprend 7 fils dont 5 pour le contrôle, 1 pour des relais spéciaux dits de « sécurité » et 1 de disponible. La deuxième est aussi composée de 7 fils dont 2 en parallèle pour l'éclairage, 3 pour les sonneries et 2 disponibles.

Normalement, les appareils sont combinés pour réaliser les conditions suivantes pour démarrer :

Les deux motrices doivent être sur deux ponts différents.

La motrice de tête doit être sur le fil aérien et celle de queue sur le troisième rail.

Les archets pantographes des deux motrices ne peuvent pas être en prise en même temps.

Si ces conditions ne sont pas toutes réalisées, le train ne démarre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas normalement. Mais on peut, en cas de nécessité, mettre tout le train sur le pont troisième rail.

Nous donnons, en planche hors texte (fig. 413), le schéma des connexions d'un équipement Nord-Sud. La légende qui y est annexée en explique la constitution.

Les organes principaux de l'équipement d'une motrice sont :

Les deux contrôleurs, l'inverseur, le commutateur 2 moteurs-4 moteurs, le relais d'accélération, le relais de tension, un groupe de 15 contacteurs, des résistances sur le circuit de traction, le relais de sécurité, 2 commutateurs spéciaux.

Ceux-ci sont destinés à assurer au courant de contrôle un sens convenable, quand les circuits de contrôle et de traction, pour une même motrice, ne sont pas sur le même pont. Leur action est combinée à celle des relais de sécurité.

Le relais de sécurité est un organe spécial destiné à assurer l'alimentation des deux voitures motrices du train par des ponts différents. Il se compose d'un enroulement à fil fin, agissant sur un noyau d'acier doux, auquel est fixé un plateau qui, en se soulevant ou en s'abaissant ferme ou coupe le circuit (fil 2 du schéma) entre deux contacts appropriés. Les relais de sécurité sont normalement enclanchés.

Les relais de tension coupent le fil 2 pour une interruption du fil aérien ou du troisième rail.

L'enclanchement des contacteurs dépend des fils 1, 2, 3.

Le basculement des inverseurs et la préparation à la mise en marche se font à l'aide des fils 4 ou 5.

Nous ajouterons enfin que des résistances sont intercalées dans le circuit de contrôle pour régler le courant de contrôle.

Equipements des automotrices de la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest-Etat.

180. — Les nouvelles automotrices de la ligne Paris-Invalides-Versailles dont la mise en service a été effectuée en 1912, comportent l'emploi d'équipements à unités multiples modernes. Les trains sont généralement formés de trois automotrices. La longueur des quais permet un maximum de 8 motrices. Elles sont à bogies à deux ou trois essieux. Un seul bogie est moteur et comprend 2 moteurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Jeumont ou Westinghouse) de 235 chevaux sous 600 volts, donnant une vitesse maxima en palier de 80 kilomètres à l'heure, et en rampe de 10 millimètres (tunnel de Meudon, Val Fleury) une vitesse de 60 kilomètres à l'heure.

Les moteurs sont prévus pour marcher avec un cran de shuntage au delà de la marche à plein champ, moteurs en parallèle, donnant une vitesse supérieure d'environ 5 à 6 p. 100 à celle correspondant à ce dernier régime. La marche en shuntage n'est, toutefois, prévue que dans le but de pouvoir forcer l'allure pour compenser un retard.

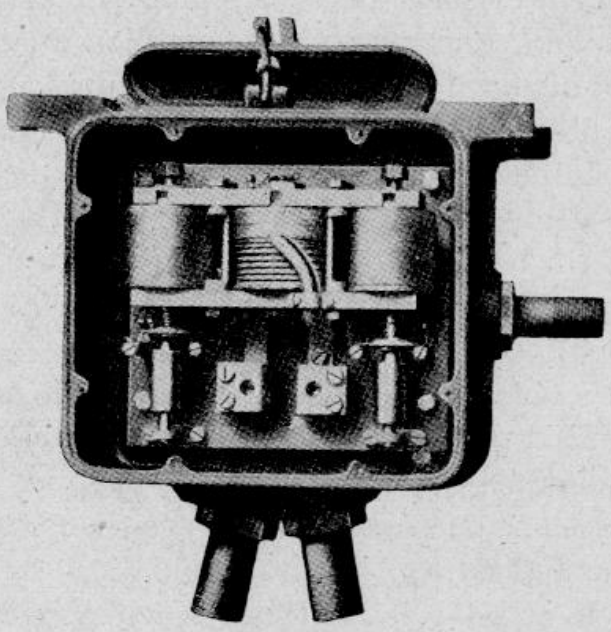


FIG. 414.

Relais double d'accélération ces nouveaux équipements Sprague-Thomson-Houston de l'Ouest-État.

L'équipement de contrôle des premières voitures était uniquement du système Sprague-Thomson-Houston. Ensuite (1915), quelques équipements de contrôle Westinghouse furent mis en service, lesquels devaient pouvoir fonctionner en unités multiples dans un train Sprague-Thomson.

Nous allons examiner sommairement les caractéristiques particulières de ces équipements.

Comme caractéristiques communes, ces équipements fonction-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nent avec accélération automatique par relais et permettent la marche avec shuntage des inducteurs.

1° *Equipements Sprague-Thomson-Houston.* — Ils sont dans leur ensemble semblables aux équipements que nous avons décrits antérieurement (§ 172-4°) et comprennent, en particulier, le contrôleur à poignée de sécurité avec freinage et la connexion à pont. En dehors de quelques perfectionnements de détail, nous signalerons le suivant :

Emploi d'un double relais d'accélération à la place du relais simple de la figure 396. Ce dernier appareil doit être établi, ainsi que nous l'avons vu, de telle sorte qu'il y ait simultanéité dans les attractions du relais et d'un contacteur. Cette condition est souvent difficile à remplir, surtout quand il y a des variations appréciables de tension sur le réseau, et il arrive que les contacteurs n'enclanchent pas avec régularité d'un équipement à l'autre. Dans le but de remédier à cet inconvénient, on a imaginé un double relais dont l'aspect est montré sur la figure 414. Un tel relais a deux bobines d'attraction à fil fin et une bobine commune de maintien (enroulement série traversé par le courant de traction).

Les circuits des bobines fil fin sont alternativement fermés sur la ligne 1 (fil de démarrage série et fermeture automatique des contacteurs) qui bifurque ainsi à l'entrée des deux bobines. Par suite, dans l'ordre de succession où fonctionnent les contacteurs, ceux de rang pair, sont actionnés par le courant d'une des lignes, et ceux de rang impair par le courant de l'autre. Les deux relais agissent ainsi alternativement, ce qui annule l'influence de la variabilité des constantes de temps des circuits et rend impossible le jeu d'un contacteur avant que les opérations du précédent ne soient complètes.

Une autre caractéristique de ces équipements résulte de l'emploi d'un cran de shuntage.

Nous donnons, figure 415, le schéma simplifié du circuit principal avec le tableau (figure 416) donnant l'ordre de succession de la fermeture des différents contacteurs qui sont au nombre de 17.

Le contrôleur comprend 6 crans de marche en série, 4 crans de marche en parallèle et un cran de shuntage.

Le circuit de contrôle proprement dit, alimenté comme à l'ordinaire sous 600 volts, comprend 6 fils au lieu des 5 des équipements normaux, le 6e correspondant précisément à la marche avec shun-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

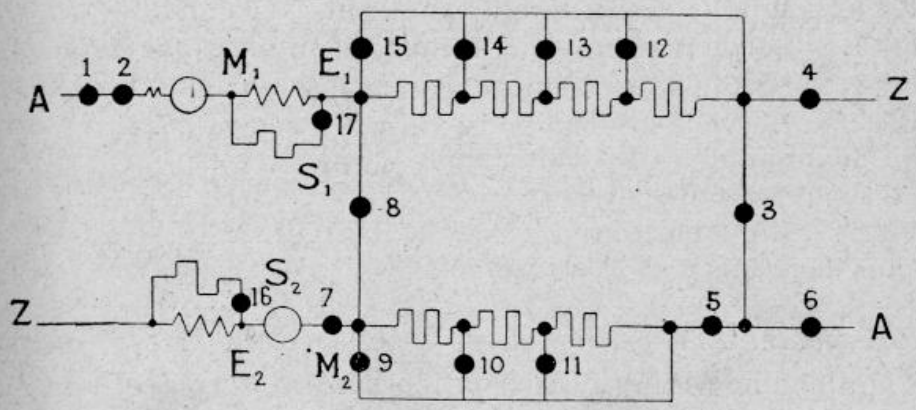


FIG. 415.

Schéma simplifié du circuit principal.

POSITIONS		NOS DES CONTACTEURS																
Séries	Parallèles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1		●	●	●		●		●										
2		●	●	●		●		●		●								
3		●	●	●		●		●		●			●					
4		●	●	●		●		●		●		●	●	●				
5		●	●	●		●		●		●	●				●			
6 init.		●	●	●		●		●		●	●				●	●		
6 final		●	●			●		●	●									
	7	●	●		●	●	●	●					●					
	8	●	●		●	●	●	●				●	●	●				
	9	●	●		●	●	●	●			●				●			
	10	●	●		●	●	●	●		●	●				●	●		
	Shunt	●	●		●	●	●	●		●	●				●	●	●	●

FIG. 416.

Tableau de fermeture des contacteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tage. Ces six fils, numérotés 0, 1, 2, 3, 4, 8, en plus desquels il y a le fil 5 des compresseurs, ont les fonctions suivantes :

Fil 0. Marche avant, établit les circuits;
Fil 1. Démarrage en série, fermeture automatique des contacteurs.
Fil 2. Maintien des combinaisons réalisées par les fils 1 et 3.
Fil 3. Marche parallèle.
Fil 4. Shuntage des inducteurs.
Fil 5. Compresseurs.
Fil 8. Marche arrière.
En plus deux Fils 6 et 7 en réserve.

2° *Equipements Westinghouse.* — Ces équipements, qui sont du type à contacteur unité (« Unit switch system »), présentent quelques particularités dues à la condition qu'ils doivent pouvoir fonctionner en multiple avec des équipements Sprague-Thomson.

Dans les équipements normaux Westinghouse, les électro-valves sont alimentées par un courant à 14 volts fourni par une batterie; dans le cas actuel, ils sont alimentés sous 100 volts par des dérivations prises sur une résistance dite de « commande à distance », branchée en potentiomètre entre la ligne à 600 volts et la terre. En outre, on a intercalé entre la ligne du circuit de contrôle Sprague-Thomson et le circuit de commande électro-pneumatique Westinghouse un relais auxiliaire dit « relais transformateur ». Cet appareil ne demande d'ailleurs aucun réglage.

Chaque équipement comporte trois relais transformateurs intercalés sur chacun des fils suivants :

Fil 1 de marche série.
Fil 3 de marche parallèle.
Fil 4 de shuntage.

Les fils 0 et 8 qui, dans le système Sprague-Thomson, actionnent respectivement les bobines d'inverseur pour marche avant et marche arrière traversent, dans le système Westinghouse, chacun une résistance et alimentent les électro-valves d'inverseur pour marche avant et arrière, ils aboutissent ensuite à la terre.

Le fil 2, au lieu d'alimenter les contacteurs, alimente une résistance de commande à distance et aboutit à la terre. C'est sur cette résistance que sont dérivés les circuits à 100 volts, alimentant les électro-valves des contacteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les fils 1, 3 et 4, au lieu d'alimenter des contacteurs, alimentent chacun un relais transformateur qui a pour fonction de fermer un circuit ou un ensemble de circuits d'électro-valves.

Le manipulateur Sprague-Thomson envoie des courants de commande à 600 volts dans la ligne de train, dans les conditions suivantes :

1° A sa position 1 (manœuvre): fils 0 (ou 8 en marche arrière), 2.
2° A sa position 2 (démarrage et marche série) : fils 0 (ou 8 en marche arrière), 2, 1.
3° A sa position 3 (transition et démarrage parallèle) : fils 0 (ou 8 en marche arrière), 2, 3.
4° A sa position 4 (démarrage et marche parallèle) : fils 0 (ou 8 en marche arrière), 2, 3, 1.
5° A sa position shunt. Fils 0 (ou 8 en marche arrière), 2, 3, 1, 4.

La figure 417 représente le schéma simplifié du circuit principal d'un équipement Westinghouse avec un tableau (fig. 418) donnant la succession de fermeture des contacteurs.

On retrouve dans ce schéma les dispositions essentielles de celui de la figure 408 qui se rapportait à l'équipement normal à contacteur unité. On remarquera entre autres, sur le nouveau schéma, l'adjonction des shunteurs.

Treize contacteurs sont employés et leurs fonctions sont les suivantes :

Le contacteur $L S_1$ admet le courant des frotteurs dans l'équipement.

Le contacteur $L S_2$ court-circuit au premier cran du démarrage une résistance L, en même temps que, par la disposition même des connexions, il diminue de moitié l'intensité du courant à couper par le contacteur $L S_1$ dans la marche en parallèle.

Le contacteur M_1 admet le courant dans le moteur 1.

Le contacteur M_2 admet le courant dans le moteur 2 pour la marche en parallèle.

Le contacteur J R groupe en série les deux moteurs avec leurs résistances.

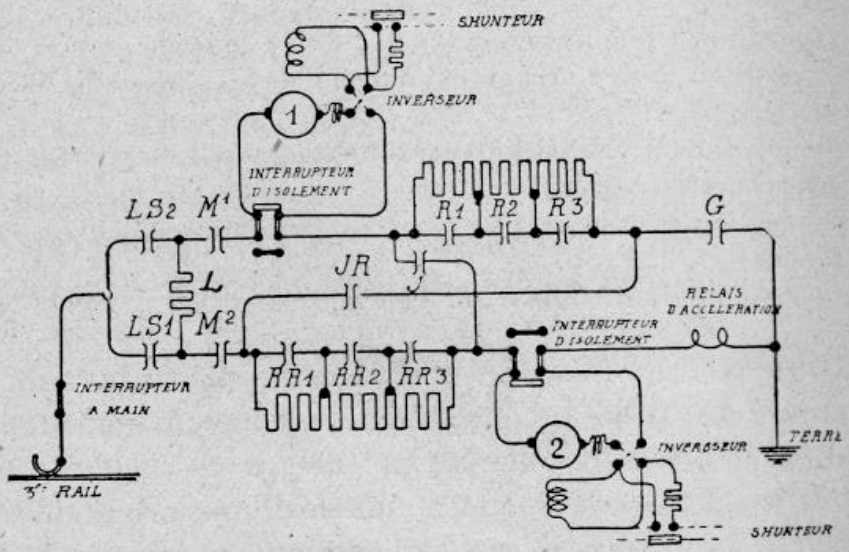
Le contacteur G met le premier moteur en relation directe avec la terre pendant la marche parallèle.

Le contacteur J court-circuite les résistances de démarrage pendant la période de transition de marche série à marche parallèle et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ferme le pont qui permet le passage d'une formation à l'autre sans coupure de l'alimentation des moteurs.

Enfin, les contacteurs R et RR court-circuitent progressivement les résistances pendant les périodes de démarrage série et parallèle.



ORDRE DE FERMETURE DES CONTACTEURS

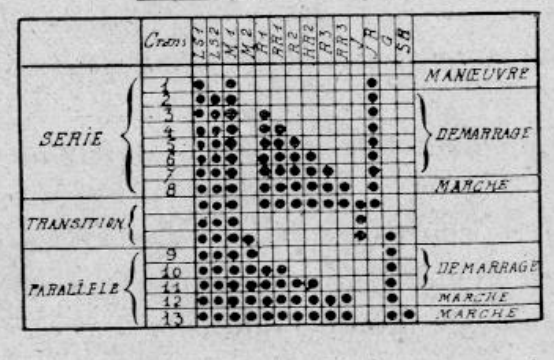


FIG. 417 et 418.

Schéma des circuits de puissance.

Le shunteur place une résistance en dérivation aux bornes des inducteurs de chaque moteur, pour accroître leur vitesse par réduction du champ inducteur.

On remarquera sur ce schéma deux interrupteurs bipolaires à deux directions, dont les connexions avec le circuit principal sont telles que, dans leur position normale (comme figurée), le courant tra-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

verse le moteur correspondant, tandis que, dans leur position renversée, il est dévié par un court-circuit et les moteurs se trouvent isolés. Chacun de ces interrupteurs permet de mettre un moteur avarié hors circuit.

Ces deux interrupteurs bipolaires, du type à couteaux, sont montés dans une boîte protectrice à l'extrémité du groupe des 11 contacteurs.

Quand on rabat l'un d'eux on rabat en même temps un interrupteur unipolaire qui coupe le circuit de commande de la formation du groupement parallèle, et modifie le réglage du relais d'accélération. Il en résulte que, si la voiture a un moteur mis ainsi hors circuit, elle continue à fonctionner dans le train avec l'autre moteur seul, le démarrage de celui-ci restant placé sous l'asservissement du relais d'accélération qui le protège contre les excès de courant.

A part ce dispositif, l'ensemble des contacteurs Westinghouse opère comme l'ensemble des contacteurs Sprague-Thomson, c'est-à-dire que, dans le démarrage en série comme en parallèle, la transition et le shuntage se produisent pour les diverses voitures d'un train simultanément, et avec la même accélération.

L'équipement Westinghouse comprend 8 crans de marche en série, 4 crans de marche en parallèle et un cran de shuntage. Le nombre de crans marche en série est ainsi plus grand que dans l'équipement Sprague-Thomson, mais cela n'a aucun inconvénient dans le cas de traction en unités multiples.

Ces équipements ont ainsi résolu, et d'une manière satisfaisante, le problème assez délicat du fonctionnement en unités multiples d'équipements électro-magnétiques Sprague-Thomson et électro-pneumatiques Westinghouse, de sorte que des équipements de ces deux systèmes entrent normalement ensemble dans la composition d'un même train.

Système de Traction auto-régulateur à récupération, dit système S. T. A. R. des ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est.

(*Compagnie du chemin de fer Métropolitain de Paris*)

181. — Ainsi que nous l'avons mentionné au chapitre V, ce système est caractérisé par les propriétés suivantes :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Démarrage automatique;
Récupération, soit au freinage, soit sur les pentes ;
Applicable aux trains à unités multiples.

La première application a été réalisée pour la Compagnie du Métropolitain de Paris et essayée en 1913 sur la ligne « Gambetta-Champerret ».

Le fonctionnement de ce système est essentiellement basé sur l'emploi d'un survolteur-dévolteur automatique à intensité constante, intercalé dans le circuit des moteurs de traction (fig. 420 et 421). Il est entraîné par une dynamo à vitesse constante, calée sur le même arbre ; une petite excitatrice placée en bout d'arbre, dont le rôle dans la récupération sera expliqué plus loin, complète le groupe (1).

Le survolteur-dévolteur dit *régulatrice,* est une machine à courant continu à induit ordinaire, mais dont l'excitation comprend un enroulement branché aux balais de la régulatrice et un enroulement indépendant parcouru par un courant constant pris sur le réseau. Son induit est connecté en série avec les moteurs de traction.

La dynamo à vitesse constante est simplement une dynamo compound, branchée sur le réseau.

Fonctionnement de la régulatrice. — Soit (fig. 419) X X un axe suivant lequel nous porterons les ampères-tours d'excitation et Y Y celui des différences de potentiel aux balais.

La caractéristique de l'excitation shunt, supposée seule, représentant les variations des ampères-tours de cet enroulement en fonction de la différence du potentiel à ses bornes, c'est-à-dire aux balais, est une droite. Ceci étant, on comprend facilement que en agissant sur la résistance ohmique de l'enroulement shunt, on puisse faire varier à volonté l'inclinaison de cette droite et la faire coïncider avec la caractéristique à circuit ouvert O R (ou caractéristique magnétique) de la régulatrice, qui est très sensiblement une droite, pour la partie non saturée du circuit magnétique.

Cet enroulement shunt est d'ailleurs branché de telle façon qu'il

(1) L'exposé qui suit concernant le fonctionnement du système est rédigé d'après une communication de M. Legouëz, des Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est, à la Société internationale des Electriciens, le 3 décembre 1913.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

produise dans l'induit de la régulatrice, une f. é. m. de sens opposé à la différence de potentiel appliquée aux balais.

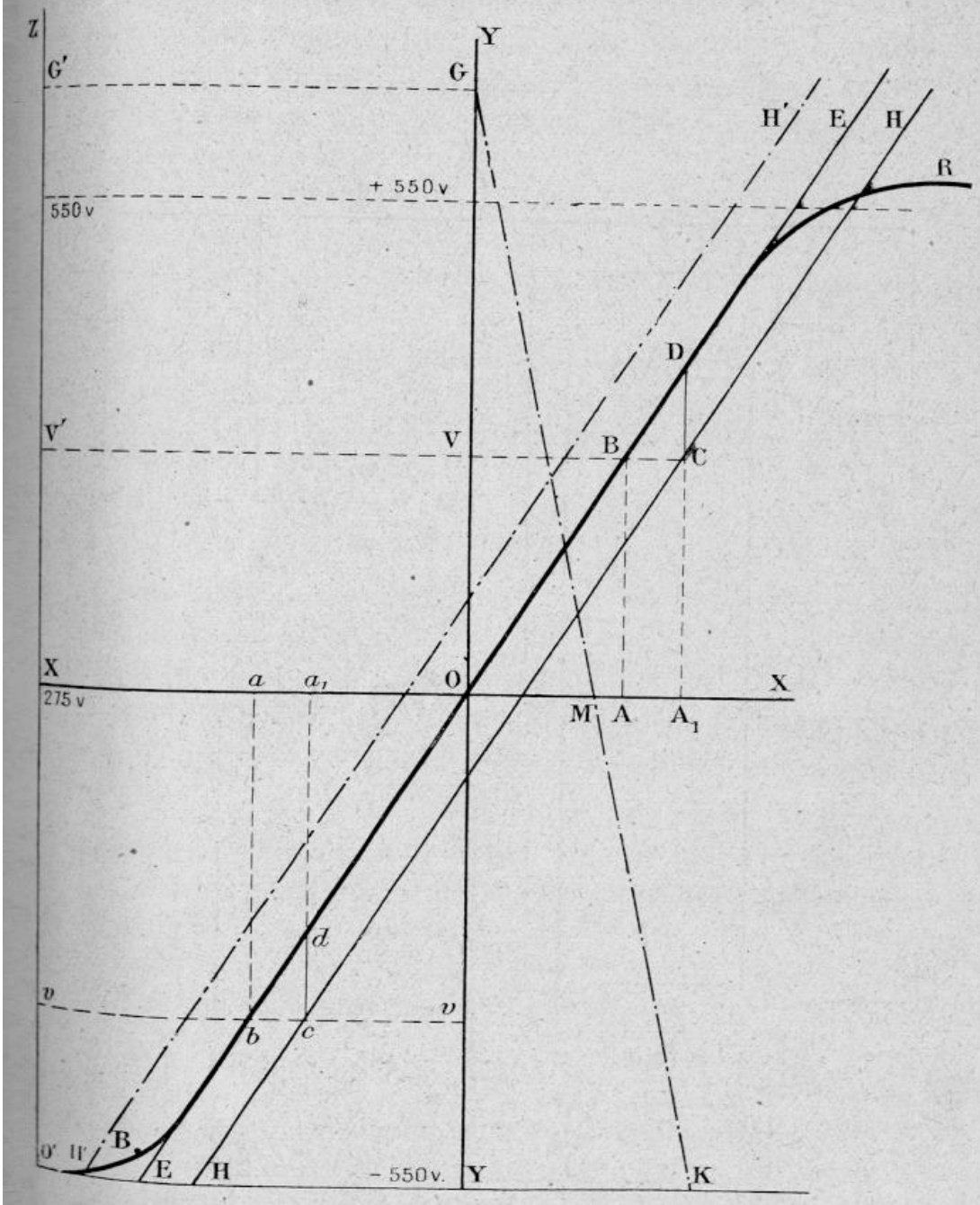


FIG. 419.

Diagramme du fonctionnement de la régulatrice d'un équipement S. T. A. R. au démarrage et au freinage.

Il résulte de cette condition de sens et de la coïncidence des caractéristiques que, quelle que soit la d. d. p. appliquée aux balais de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

régulatrice, *pourvu qu'elle soit inférieure au début de la saturation*, l'enroulement shunt développera dans l'induit, une f. é. m. égale et

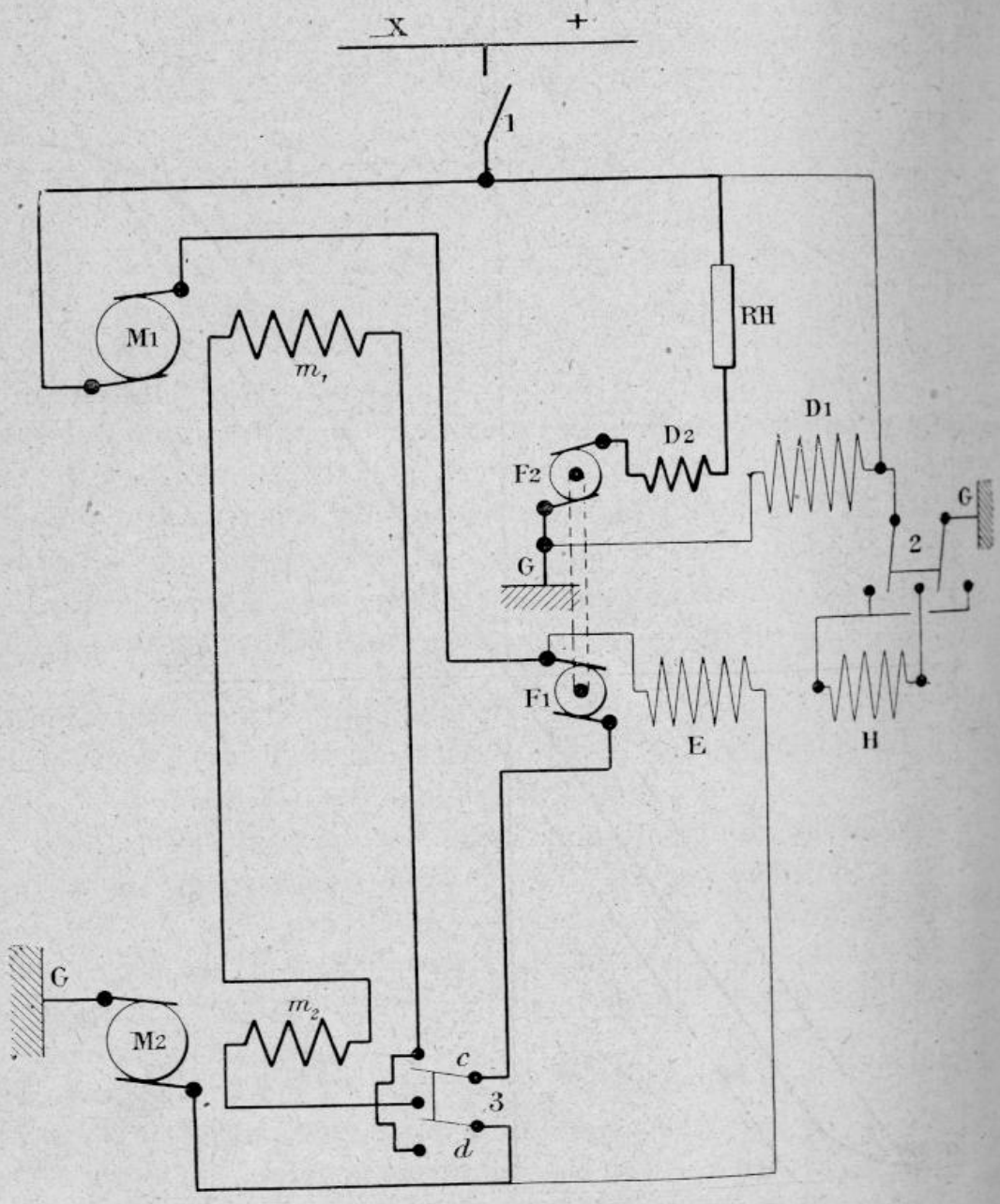


FIG. 420.

Schéma simplifié d'un équipement S. T. A. R., courant continu. Démarrage.

opposée à la d. d. p. appliquée : la machine ne peut donc ni débiter ni recevoir de courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'enroulement indépendant agira différemment, suivant le sens du courant qui l'excite.

Si les ampères-tours sont de même sens que ceux de l'enroulement shunt, la f. é. m. développée par l'ensemble des deux enroulements, sera de sens opposée à la d. d. p. appliquée aux bornes de la régulatrice et plus grande qu'elle : la machine débite alors du courant et fonctionne en générateur.

Si, au contraire, les ampères-tours de l'enroulement indépendant sont de sens contraire à ceux de l'enroulement shunt, les phénomènes sont inverses et la machine absorbe du courant et par suite fonctionne en moteur.

En résumé, la régulatrice établie et utilisée dans les limites indiquées est donc une machine qui, automatiquement, quelle que soit la d. d. p. appliquée à ses bornes, débite ou absorbe un courant constant, dont l'intensité est déterminée par la valeur de l'excitation indépendante.

L'influence de la saturation modifie naturellement la valeur du courant : si la machine travaille en génératrice, l'intensité du courant va en diminuant au fur et à mesure que la tension aux bornes augmente, tandis que l'inverse a lieu si la machine fonctionne en moteur.

Enfin il est évident que, lorsque la régulatrice fonctionne en générateur, la dynamo, avec laquelle elle est accouplée mécaniquement, fonctionne en moteur et inversement.

a) *Démarrage.* — Ceci posé, examinons la période de démarrage.

Le schéma des connexions de l'équipement est représenté sur la figure 420 ci-contre, dans laquelle :

X est la ligne d'alimentation ;
G la terre ;
M_1 M_2 les induits des deux moteurs de traction ;
m_1 m_2 leurs excitations série ;
F_2 la dynamo accouplée mécaniquement à la régulatrice F_1 ;
D_1 D_2 les enroulements d'excitation de cette dynamo ;
E l'enroulement shunt, branché de façon à produire dans F_1, une *f.é.m.* égale et de sens opposé à la tension appliquée, ainsi que nous allons le voir ;
H l'enroulement d'excitation indépendante.

A la mise en marche, on ferme l'interrupteur (1) après avoir placé l'inverseur (2), de manière que les ampères-tours de H soient opposés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à ceux de E. La fermeture de (1) permet le démarrage du groupe F_1 F_2, au moyen du rhéostat RH et provoque en outre l'alimentation de l'enroulement E de la régulatrice ; ses ampères-tours produisent, à ce moment, une f. é. m. opposée à la tension du réseau et qui lui devient sensiblement égale à la vitesse de régime. Cette vitesse atteinte, on ferme l'inverseur (3) dans le sens correspondant à la marche avant des moteurs, par exemple. Dans ces conditions, la régulatrice absorbe un courant dont la valeur, réglée par celle des ampères-tours de H, correspond à l'accélération que l'on veut obtenir.

Les moteurs démarrent, prennent de la vitesse et la tension à leurs bornes augmente. La tension aux bornes de la régulatrice, qui, durant cette première période, fonctionne en moteur et assure la constance du courant, dont la valeur est celle admise pour le démarrage, va en diminuant. A un moment donné, cette tension s'annule, puis elle s'inverse et croît dans ce sens inversé : les ampères-tours produits par E sont alors opposés aux ampères-tours invariables produits par H ; la régulatrice fonctionne en génératrice à courant constant.

Dès que l'influence de la saturation se fait sentir, le courant va en diminuant ; on atteint donc un état d'équilibre pour lequel l'accélération s'annule : les moteurs continuent à tourner à vitesse constante, pour autant, bien entendu, que le profil de la voie ne varie pas.

Le diagramme (fig. 419) permet de suivre la succession des phénomènes :

X X est l'axe des ampères-tours de la régulatrice;
Y Y l'axe des différences de potentiel aux bornes de la régulatrice, ces différences étant portées en dessous ou en dessus de l'axe XX, suivant que la *f. é. m.* développée par l'enroulement shunt est opposée à la tension du réseau ou de même sens;
O'Z l'axe des différences de potentiel aux bornes d'un des moteurs; son échelle est donc double de l'échelle de l'axe XX et O' en est l'origine;
R R la caractéristique en circuit ouvert de la régulatrice;
E E la caractéristique de l'excitation shunt;
H H une parallèle à EE, dont la distance dépend de la valeur des ampères-tours indépendants et de la résistance ohmique de l'induit de la régulatrice.

Au début du démarrage, la régulatrice étant motrice, les ampères-tours de l'enroulement shunt sont de sens inverse à ceux de l'enroulement indépendant et, pour une différence de potentiel telle que Oc aux bornes de la régulatrice, l'intensité du courant est mesurée par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cd ; dans la seconde partie du démarrage, la régulatrice étant génératrice, les ampères-tours shunt et les ampères-tours indépendants sont de même sens et pour une différence de potentiel telle que OV, l'intensité du courant est mesurée par CD.

Dans la première partie du démarrage, la dynamo F_2 fonctionne en générateur et débite du courant dans le réseau ; dans la seconde partie, l'inverse se produit. Dans ces conditions, bien que le courant reste sensiblement constant dans les moteurs de traction, le courant fourni par le réseau varie régulièrement et progressivement d'une valeur sensiblement nulle jusqu'à une valeur double (et même un peu supérieure) de celle du courant constant traversant les moteurs de traction lorsque la tension aux bornes de chacun de ceux-ci est celle du réseau, puis il diminue pour tendre vers zéro dès que l'influence de la saturation se fait sentir.

b) *Freinage et récupération.* — Il s'agit d'absorber l'énergie accumulée dans le véhicule en marche et de la transformer en énergie électrique susceptible d'être récupérée par le réseau.

L'ensemble des moteurs et du survolteur-dévolteur doit donc débiter du courant sur le réseau. Or, la grandeur et le sens du courant qui les traverse dépendent de la grandeur et du sens des ampères-tours de l'excitation indépendante H.

Si nous supposons le véhicule en marche dans le sens obtenu par le démarrage décrit ci-dessus, il faudra donc pour débiter du courant sur le réseau fermer l'inverseur 2 dans la position opposée à celle adoptée pendant le démarrage. Cette manœuvre ne devant se faire qu'après avoir fermé l'inverseur 3 également dans la position opposée à celle adoptée pendant le démarrage, c'est-à-dire dans la position correspondant au fonctionnement des moteurs M_1 et M_2 en générateurs pour le sens de rotation suivant lequel ils tournent.

Toutefois les phénomènes sont plus complexes que lors du démarrage.

En ce qui concerne l'établissement du freinage, le véhicule étant en mouvement, tout courant traversant les moteurs donne lieu à une force électromotrice aux bornes de ceux-ci ; il faut, par conséquent, tenir compte des valeurs relatives de la self-induction des inducteurs des moteurs de traction et de ceux du survolteur-dévolteur.

En d'autres termes, l'action de l'enroulement shunt du survolteur-dévolteur est en retard sur l'action des inducteurs des moteurs et ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut, par conséquent, remplir son rôle défini précédemment à l'étude du fonctionnement de la régulatrice ; le courant débité par les moteurs atteindrait une valeur dangereuse si l'on n'avait recours à des précautions spéciales.

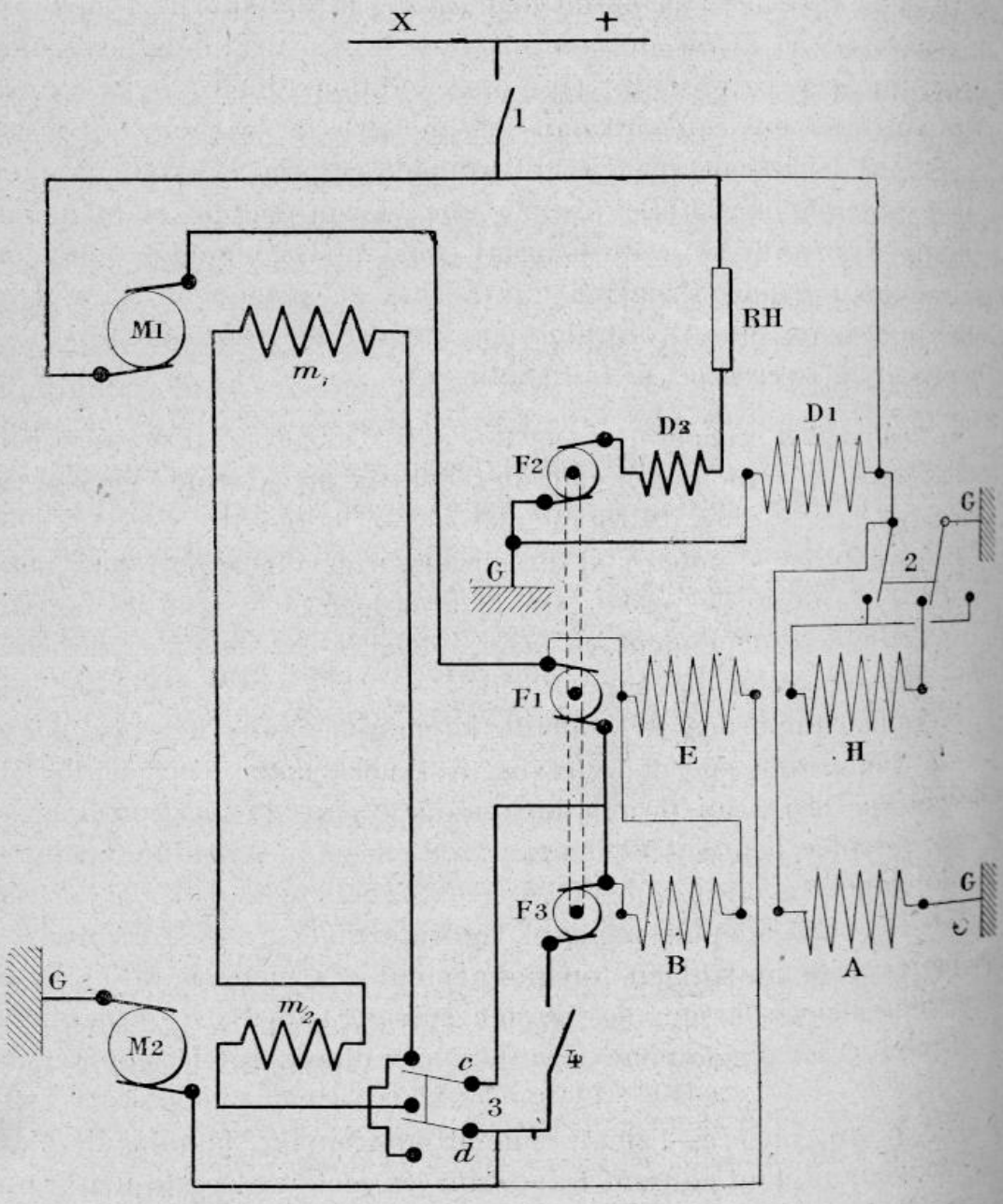


FIG. 421.

Schéma simplifié d'un équipement S. T. A. R., courant continu. Freinage et récupération.

De plus, le freinage doit pouvoir être établi quelle que soit la vitesse des moteurs, si grande soit-elle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En ce qui concerne la période de récupération proprement dite, c'est-à-dire, une fois le régime établi, des précautions spéciales sont encore nécessaires parce qu'on fait usage de machines à excitation série fonctionnant en génératrices. Le fonctionnement de ces machines en génératrices est, comme on le sait, instable.

Pour parer à ces inconvénients, on a eu recours à l'amortissement du circuit inducteur des moteurs de traction.

Cet amortissement est obtenu en shuntant les inducteurs des moteurs, non par une résistance ohmique, mais par l'induit d'une petite machine auxiliaire (F_3) dont l'excitation permet de régler à la valeur désirée le courant dérivé. Cette machine F_3 appelée excitatrice est calée sur l'arbre commun aux machines F_1 et F_2 et tourne donc à vitesse constante.

Les inducteurs de l'excitatrice portent deux enroulements, l'un « A » alimenté par le réseau donne des ampères-tours constants, l'autre « B » branché aux bornes de F_1 donne des ampères-tours variables en grandeur et en sens avec la différence de potentiel aux bornes de F_1, c'est-à-dire avec la vitesse des moteurs. A et B sont concordants lorsque la tension de F_1 est opposée à celle du réseau.

L'excitation résultante de l'excitatrice est figurée en fonction de la tension aux bornes de F_1, par la droite G.M.K. de la figure 419 (dans l'hypothèse d'une excitatrice non saturée).

OM représente les ampères-tours de l'excitation constante A et l'excitation B est déterminée de manière que l'excitation résultante s'annule pour une tension OG aux bornes de F_1 peu supérieure à la tension du réseau.

Il s'ensuit que le courant qui circule dans les inducteurs des moteurs de traction est indépendant du courant principal et ne dépend que de la vitesse des moteurs.

L'excitation diminue lorsque la vitesse augmente, elle s'annule pour une tension aux bornes des moteurs, mesurée par O′G′ (fig. 419), cette tension ne peut donc être atteinte que pour une vitesse infinie des moteurs. Il s'ensuit que, quelle que soit la vitesse des moteurs au moment de l'établissement du freinage, la tension à leurs bornes ne dépassera jamais la valeur O′G′ fixée préalablement. La tension aux bornes de F_1 est par là même également limitée.

L'à-coup de courant produit par l'établissement de la récupération est pratiquement supprimé, grâce, d'une part, à la présence de l'ex-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

citatrice et, d'autre part, à l'établissement du freinage en deux périodes : 1) couplage ; 2) excitation de l'enroulement H.

Quand le régime de récupération est établi, s'il pouvait se produire une augmentation accidentelle de la tension aux bornes des moteurs, il en résulterait une diminution de leur excitation, ce qui assure la stabilisation.

Durant cette période, les phénomènes sont analogues à ceux du démarrage, ils peuvent être suivis sur la figure en substituant la droite H'H' à la droite HH.

Divers degrés de freinage peuvent être obtenus en modifiant simplement la valeur des ampères-tours de l'excitation H.

Lors d'un freinage, poussé jusqu'à l'arrêt, le courant débité dans le réseau ne sera pas constant, pas plus qu'au démarrage.

Après l'établissement du freinage, si la vitesse du véhicule est élevée, F_1 fonctionne d'abord en moteur, c'est-à-dire en dévolteur par rapport aux moteurs, puis en générateur, c'est-à-dire en survolteur. Il en résulte que le courant débité, qui est la résultante du courant constant des moteurs et du courant variable de la machine F_2, ira en diminuant depuis une valeur maxima jusqu'à une valeur sensiblement nulle à l'arrêt des moteurs.

Les équipements S. T. A. R. se prêtent parfaitement au fonctionnement en unités multiples dans un même train.

Résultats des essais effectués à la Compagnie du Métropolitain de Paris. — Les Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est, à Jeumont, ont fourni à la Compagnie du Métropolitain de Paris trois équipements à unités multiples S. T. A. R., permettant la formation d'un train composé de trois motrices et de deux remorques.

Ces équipements construits suivant les principes exposés précédemment comportent essentiellement (abstraction faite des appareils de sécurité habituels) :

Deux moteurs de type normal à excitation série de 175 chevaux chacun ;

Un groupe régulateur ;

Sept contacteurs ;

Quatre relais d'asservissement ;

Un contrôleur à deux cylindres ;

Une caisse de résistances de commande ;

Une résistance de démarrage pour le groupe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le supplément de poids dû à l'emploi d'un équipement S. T. A. R., au lieu d'un équipement Sprague-Thomson, est de 1.400 kilos par motrice. Ce qui fait pour un train normal à trois motrices pesant 150 tonnes en charge $\frac{3 \times 1,4}{150} \times 100 = 2,8$ p. 100 d'augmentation du poids mort.

Les essais effectués sur la ligne N° 3 et ayant pour but la comparaison des consommations respectives d'un train S. T. A. R. et d'un train Sprague-Thomson fonctionnant dans les mêmes conditions ont accusé une économie de 25,16 p. 100 en faveur des équipements S. T. A. R. d'après les indications des wattheures-mètres installés dans les motrices.

Indépendamment de cette économie importante d'énergie électrique, l'emploi des équipements S. T. A. R. a pour effet de réduire dans de grandes proportions l'usure des rails, bandages et sabots de frein. Enfin, il y a lieu de noter, qu'au point de vue du confort des voyageurs, les équipements S. T. A. R. réalisent une amélioration notable par suite de la grande douceur du démarrage et de freinage due à la constance du courant dans les moteurs de traction, pendant ces périodes.

Application du système S. T. A. R. au courant alternatif monophasé. — Les équipements S. T. A. R. peuvent être employés avec intérêt dans le cas d'une ligne alimentée par du courant monophasé.

Dans ce cas, la dynamo F_2 est remplacée par une machine monophasée à collecteur, tandis que les moteurs de traction et le survolteur-dévolteur forment un circuit fermé.

La puissance du groupe est, dans ce cas, doublée comparativement au cas du courant continu.

Outre les avantages dûs à l'économie d'énergie, le système permet de conserver des moteurs de traction à courant continu bien supérieurs aux moteurs similaires à courant monophasé. On n'est donc plus astreint à adopter de faibles périodicités. En outre, la machine commandant le survolteur-dévolteur tournera à vitesse constante et aura une commutation parfaite et un cos φ voisin de l'unité pour toutes charges.

Les Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est ont étudié dans cet ordre d'idées un équipement S. T. A. R. pour la traction monophasée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIV

TRACTION PAR COURANT CONTINU HAUTE TENSION ÉQUIPEMENTS DES MOTRICES

SOMMAIRE. — Introduction. — Généralités. — Systèmes General Electric et Thomson-Houston. — Système Westinghouse. — Système Siemens-Schuckert. — Système Brown-Boveri.

182. **Introduction. Généralités.** — Le développement de la traction à courant continu *est dû largement à l'emploi des systèmes à unités multiples* et, sauf quelques exceptions (construction Brown Boveri), on utilise toujours pour ce mode de traction des équipements appartenant à ces systèmes.

La General Electric Co et la Compagnie Thomson-Houston utilisent leur système Sprague-General Electric ou Sprague-Thomson, le courant de contrôle, au plus sous 600 volts, étant fourni soit par un petit transformateur tournant dit dynamoteur, soit par un groupe moteur générateur.

La Société Westinghouse utilise son système électro-pneumatique avec courant de commande à basse tension fourni, soit par une batterie, soit par un dynamoteur du genre du précédent.

La Société Siemens-Schuckert utilise un système électro-magnétique à contacteurs.

La Société Brown-Boveri, au contraire, conserve la commande par contrôleur traversé par le courant de traction haute tension. Les applications réalisées ainsi n'ont, toutefois, pas dépassé 2.000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce contrôleur présente des dispositions spéciales que nous verrons plus loin.

Nous avons mentionné au début de cet ouvrage (chapitre II, § 10) quelques-unes des principales installations réalisées en courant continu haute tension; nous allons maintenant examiner succinctement quelques applications types.

D'abord, d'une manière générale, les contacteurs, interrupteurs, relais, inverseurs, etc., sont basés sur les mêmes principes que ceux à courant continu à 600 volts, mais leur nombre est plus grand et l'isolement à la masse est naturellement beaucoup plus soigné ; les intervalles de rupture sont plus grands. En outre, dans un circuit, les points de rupture sont multipliés et on y intercale au besoin une résistance en série. En effet, à part l'isolement à la masse, le danger de l'arc de rupture ne dépend que de la tension aux bornes des pièces précédemment en contact.

Les moteurs sont la plupart du temps couplés par deux, en permanence, en série, ainsi que nous l'avons déjà vu, et la régulation se fait par la méthode série-parallèle appliquée aux deux groupes de deux moteurs en série.

Pour la plupart des lignes interurbaines à 1.000 et surtout celles à 1.200 (très nombreuses) ou à 1.500 volts, les traversées des villes se font à demi-tension ; dans ce cas, pour ces derniers parcours, la vitesse maxima est réduite d'environ moitié, ce qui, d'ailleurs, n'offre pas d'inconvénient.

Pour quelques lignes, tel le cas de celle d'Indianapolis-Louisville, par exemple, à 1.200 volts, de la General Electric, comportant des sections à 600 volts, on a voulu conserver la même vitesse maxima sur tout le parcours ; dans ces conditions, il est nécessaire, au passage d'une section 1.200 volts à une section 600 volts, de modifier le couplage des moteurs (qui sont par deux en série sous 1.200 volts et en parallèle sous 600 volts) et des résistances de démarrage. Ceci se fait au moyen d'un commutateur spécial 600/1.200 à deux positions. Mais il faut prendre des précautions pour que le démarrage soit rendu impossible, lorsque ce commutateur n'est pas dans la position convenable, tout au moins au passage de la section 600 volts à celle 1.200 volts.

Ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de le dire (chapitre II), les installations courant continu se développent beaucoup actuelle-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment, aussi bien pour des services de lignes interurbaines que pour des services de grandes lignes, surtout aux Etats-Unis, et l'expérience encourageante acquise sur les réseaux du Butte Anaconda Pacific à 2.400 volts et surtout du Chicago-Miwaukee-Saint-Paul à 3.000 volts, montre que ce mode de traction est parfaitement adéquat aux exigences d'un service de grande traction.

183. **Systèmes General Electric et Thomson-Houston.** — L'énergie employée pour le circuit de contrôle est, ainsi que nous l'avons dit, fournie par un dynamoteur. Cet appareil, dont le schéma est donné figure 422, est ainsi constitué : c'est une dynamo à deux enroulements

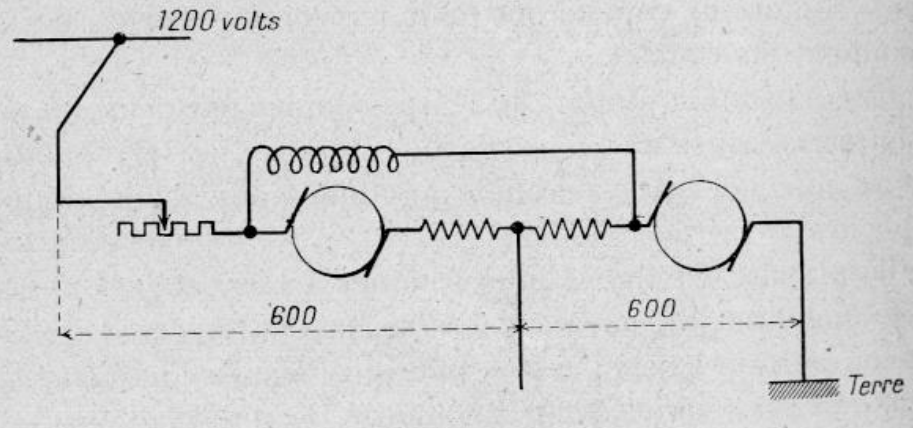


FIG. 422.

Schéma d'un dynamoteur 1.200/500 volts (General Electric Co).

induits indépendants, munis chacun d'un collecteur. Les balais mettent les deux induits en série sous la tension totale. L'appareil est à 3 fils : fil d'alimentation, fil de terre et fil d'utilisation : contrôle, éclairage, compresseur, etc. La puissance d'un tel appareil est généralement comprise entre 5 et 10 kws.

Il y a lieu de signaler, comme particularité, le dispositif employé pour la mise hors-circuit ou en circuit du dynamoteur, suivant qu'on se trouve sur une section à 600 volts ou sur une section à 1.200 volts, ce qui constitue le cas général des applications réalisées par la General Electric.

Les figures 423 et 424 représentent les schémas du dispositif en question pour la marche à 1.200 volts et pour celle à 600 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° *Marche à 1.200 volts.* — Le courant arrivant (fig. 423) au contacteur C, ne peut pas passer par le fil 11, dont le circuit est ouvert automatiquement par un interrupteur S, mais passe à travers une bobine et sa résistance, et de là à la terre G. Le plongeur est attiré, entraîne les contacts, rompt le circuit du fil 11 et ferme celui du dynamoteur.

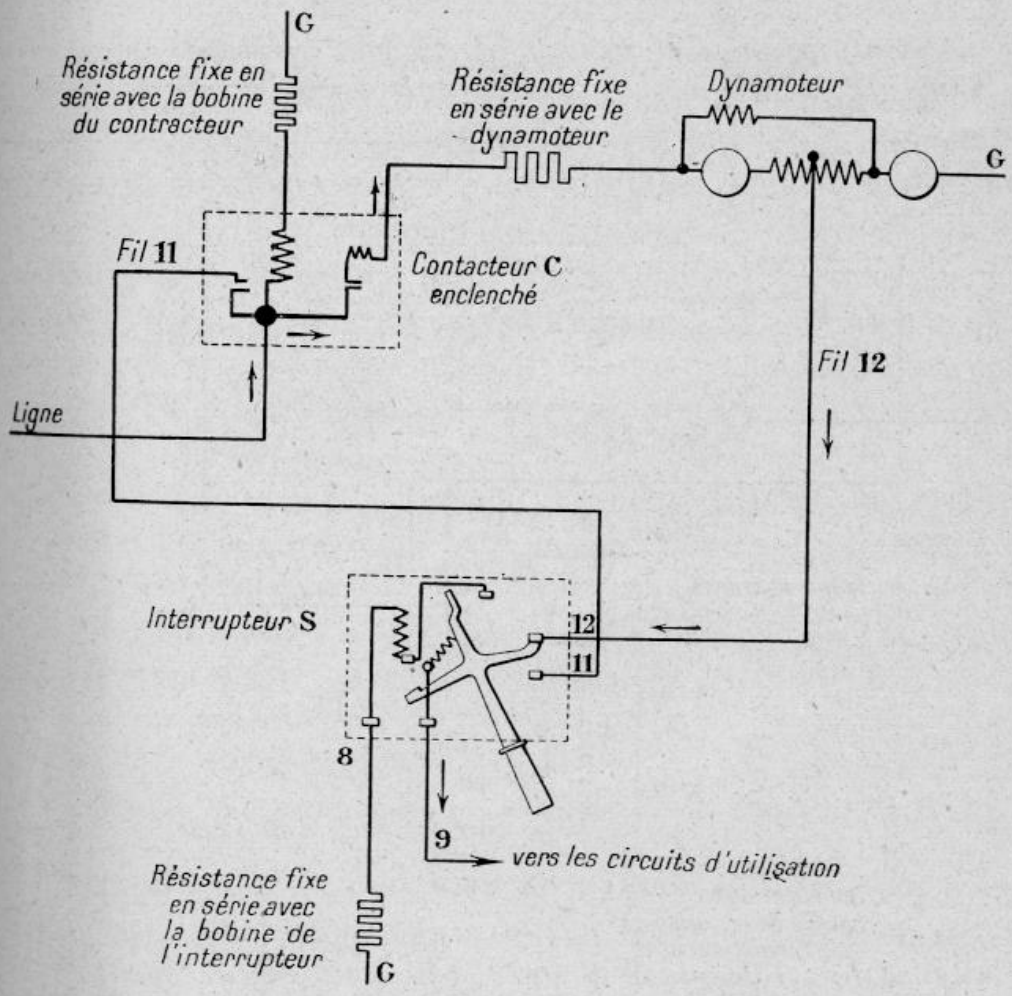


FIG. 423.

Schéma de la marche sous 1.260 volts, le dynamoteur fonctionne.

On obtient alors du courant sous 600 volts qui, par le fil 12, vient à l'interrupteur S et de là par le fil 9 va alimenter les différents circuits d'utilisation (contrôle, compresseur, lumière, chauffage).

2° *Marche sous 600 volts.* — Le train, venant d'une zone alimentée à 1.200 volts, passe d'abord sur une section neutre et franchit cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

section en vitesse. Le contacteur C n'étant plus alimenté, son plongeur retombe, ce qui a pour effet de rompre le circuit du dynamoteur et de rétablir le circuit du fil 11 (fig. 424).

Pour que la marche sous 600 volts devienne maintenant possible, le wattman est obligé de mettre à la position 600 l'interrupteur S.

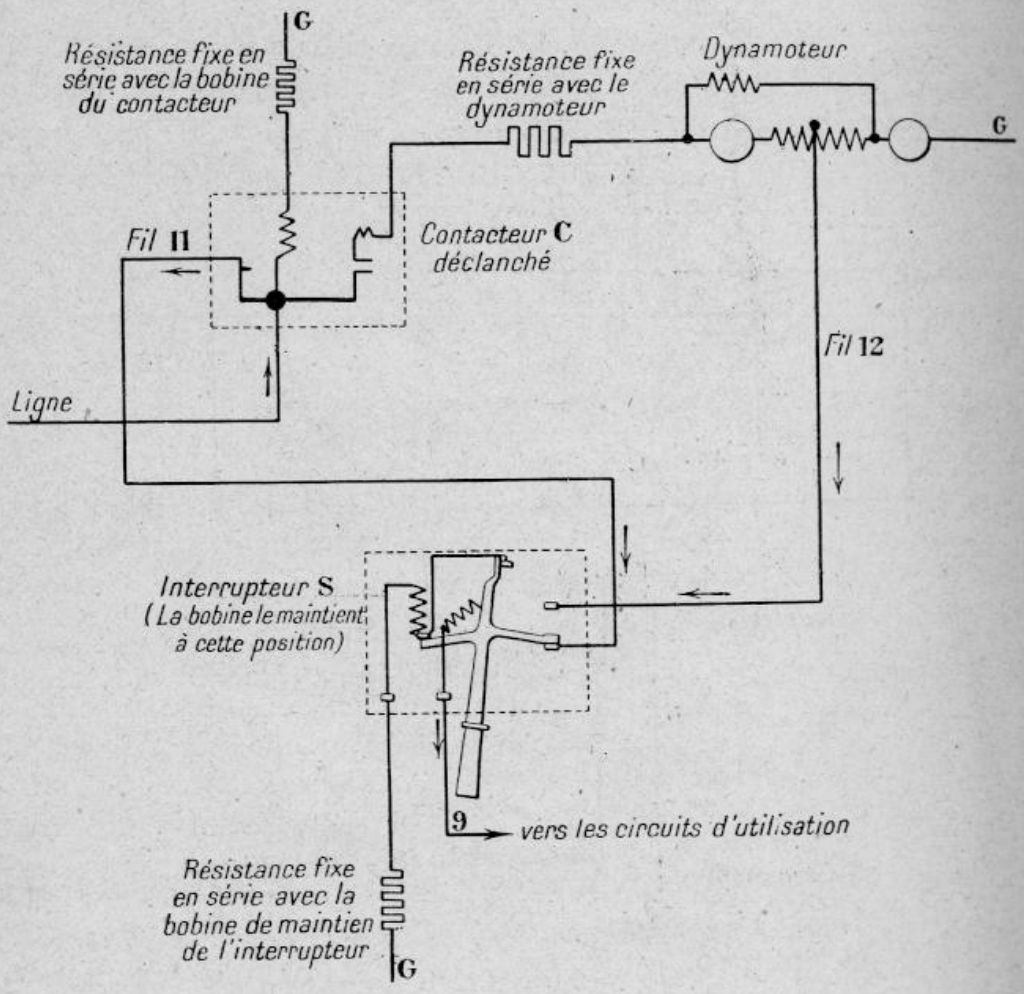


FIG. 424.

Schéma de la marche sous 600 volts, le dynamoteur est arrêté.

Celui-ci est maintenu à cette position grâce à une bobine de maintien faisant partie de l'appareil, et qui se trouve mise en circuit avec une résistance sous les 600 volts de la ligne, dont le courant vient par le fil 11 à l'interrupteur S et de là se dérive d'une part dans la bobine de maintien, dont il vient d'être question, d'autre part dans le fil 9 et de là aux différents circuits d'utilisation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque le train franchit de nouveau une section neutre, l'interrupteur S n'étant plus maintenu par sa bobine à la position 600, reprend de lui-même la position 1.200. Le wattman n'a donc à manœuvrer cet interrupteur qu'au passage de 1.200 à 600 volts, mais n'a pas à y toucher au passage de 600 à 1.200 volts.

Nous devons ici mentionner encore comme étant l'exemple le plus remarquable de traction à courant continu haute tension, la ligne à 3.000 volts du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul de la General Electric. L'équipement des locomotives est du système Sprague General Electric, mais étant donné la haute tension d'alimentation, le courant de contrôle est fourni par un petit groupe moteur-générateur à 125 volts, dont le moteur est alimenté sous 3.000 volts. Nous avons mentionné ce groupe à propos de l'étude de la récupération (§ 142). Nous n'y reviendrons pas autrement.

Nous signalerons encore l'installation en cours de réalisation par la Compagnie Thomson-Houston, relative au prolongement de la Mure à Gap de la ligne de Saint-Georges de Commiers à la Mure, dont la section existante est à 3 fils avec 1.200 volts par pont. Dans la nouvelle section, les fils extrêmes sont à + 1.200 volts et — 1.200 volts, les moteurs par deux en série sont branchés entre ces deux fils donc sous la tension totale 2.400 volts. L'équipement n'a aucun point à la terre. Le courant de contrôle sous 125 volts est fourni par un petit groupe moteur générateur.

184. **Système Westinghouse.** — Le courant de commande des électro-valves est fourni, soit par une batterie, soit par un dynamoteur du genre de celui décrit plus haut.

Le dynamoteur est ici employé pour les lignes à 1.200 et 1.500 volts ; au delà, on a recours à une batterie d'accumulateurs.

La figure 425 (1) représente le schéma d'un tel appareil alimenté sous 1.500 volts. Ce dynamoteur sert en outre à entraîner le compresseur d'air au moyen d'un embrayage automatique commandé par l'air comprimé lui-même. Lorsque la pression tombe, un ressort antagoniste crée la pression de contact nécessaire à l'entraînement du compresseur. Le dynamoteur actionne parfois les ventilateurs pour le

(1) Empruntée, ainsi que la figure suivante, au *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, d'avril 1913 (Communication de M. Gratzmuller).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

refroidissement par l'air forcé des moteurs. La figure 426 est le schéma du changement opéré dans le compresseur pour le passage de la basse à la haute tension ou inversement. Le déplacement du commutateur est encore produit par l'air comprimé grâce à la valve commandée magnétiquement par la tension du réseau. On suppose que les connexions des moteurs ne sont pas changées, la vitesse est alors réduite quand la voiture est sur la basse tension.

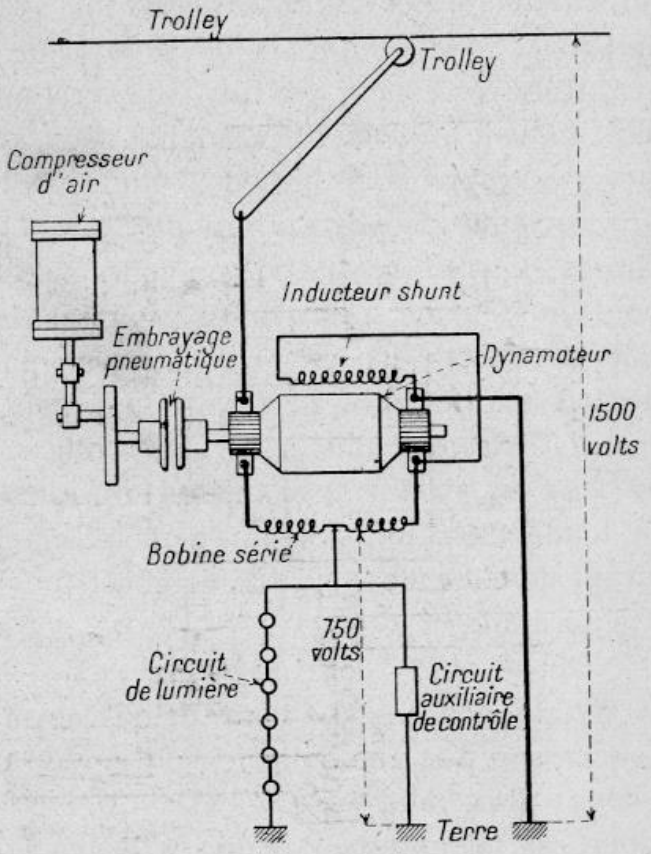


FIG. 425.

Diagramme élémentaire de dynamoteur-compresseur (Westinghouse).

Un exemple remarquable de traction courant continu haute tension est celui réalisé fin 1915, à titre d'essai, par la Société Westinghouse sur une des lignes du réseau du Michigan. La tension d'alimentation était de 5.000 volts qui est la valeur la plus élevée appliquée jusqu'à ce jour en courant continu. Nous avons décrit les moteurs employés dans cet essai au chapitre X (§ 90) et nous allons examiner ici l'équipement qui en comporte quatre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le contrôle série-parallèle est appliqué aux deux groupes de 2 moteurs bipolaires doubles en série, chacun étant alors sous 2.500 volts. Le courant de commande des électro-valves est sous 150 volts et est fourni par une batterie d'accumulateurs, car on ne pouvait utiliser, pour une tension de service de 5.000 volts, le dynamoteur précédem-

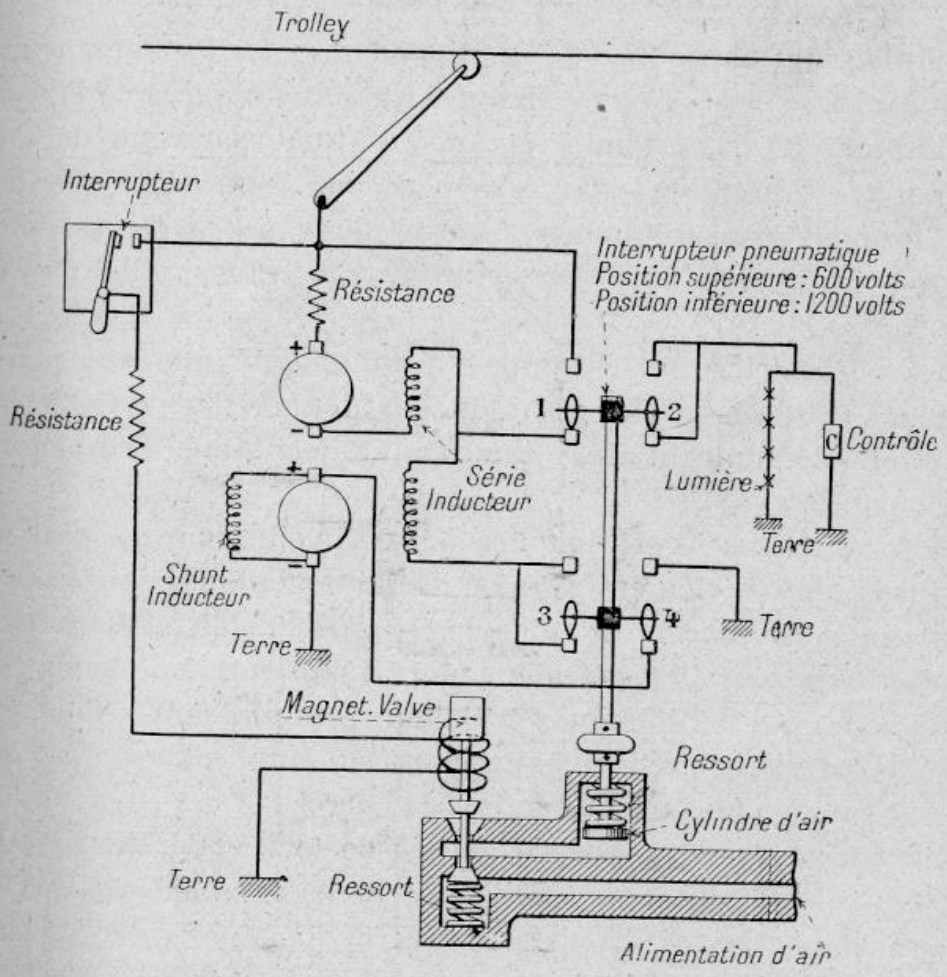


FIG. 426.

Diagramme de passage de la basse à la haute tension ou inversement (Westinghouse).

ment décrit. Cette batterie fournit également le courant des circuits auxiliaires : compresseur, éclairage, etc. Un limiteur de tension à force contre-électro-motrice, comprenant quelques éléments, est connecté en parallèle avec la batterie pendant les périodes de charge pour la protéger contre les surcharges ou vitesses excessives de charge.

L'équipement peut, en outre, fonctionner sur des sections à 600

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

volts. A cet effet, un commutateur connecte en parallèle les quatre moteurs doubles.

Les figures 427-428-429, représentent le schéma simplifié des connexions du circuit principal, le schéma du contrôleur-manipulateur, ainsi que deux tableaux permettant de suivre l'ordre de fermeture des contacteurs dans la marche sous 5.000 volts et dans celle sous 600 volts.

Comme point particulier de l'équipement, outre l'isolement spécialement renforcé, il y a lieu de signaler que les coupures de l'inverseur sont immergées dans l'huile et suivant une remarque déjà faite, l'inversion est produite par croisement des connexions des inducteurs, lesquels sont branchés du côté terre des moteurs, afin de diminuer la tension appliquée entre les bobines inductrices et la masse.

Une automotrice ainsi équipée a fonctionné pendant plusieurs mois (1915-1916) en service normal, sans donner lieu à des incidents particuliers, démontrant ainsi la possibilité technique d'employer une telle tension.

Les locomotives Westinghouse à 3.000 volts courant continu du Milwaukee sont également munies d'équipements à contrôle électro-pneumatique. Le courant de contrôle est sous 80 volts et est fourni par un petit groupe moteur-générateur fournissant en même temps l'énergie aux circuits auxiliaires : ventilateurs des moteurs, compresseurs des freins, lumière, etc. Une batterie est, en outre, placée dans ce circuit pour fournir le courant pendant les arrêts.

Nous avons vu, à propos de l'étude de la récupération (§ 142-*c*), qu'il était fait emploi, pour exciter les moteurs d'essieu d'une petite dynamo actionnée par un des essieux du bogie porteur de chaque demi-locomotive. Ces excitatrices peuvent ainsi alimenter les moteurs des ventilateurs et du compresseur. Ces appareils peuvent ainsi être alimentés indépendamment du courant de ligne, ce qui est important au point de vue de la sécurité de fonctionnement des freins.

185. **Systèmes Siemens-Schuckert.** — La majorité des installations réalisées par cette firme sont sous 1.000 ou 1.200 volts. Nous signalerons toutefois la ligne industrielle de Maizières-Sainte-Marie à 2.000 volts.

Comme exemple de ligne à 1.000 volts, nous mentionnerons, avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

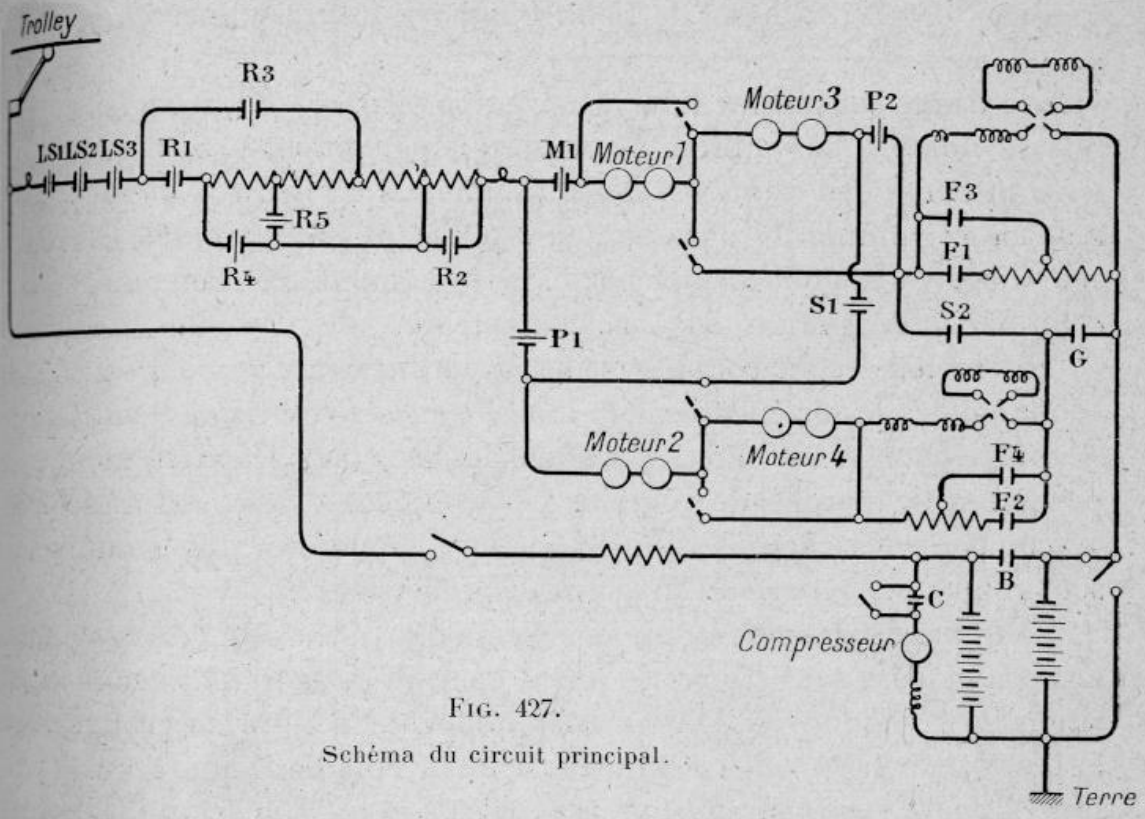


FIG. 427.

Schéma du circuit principal.

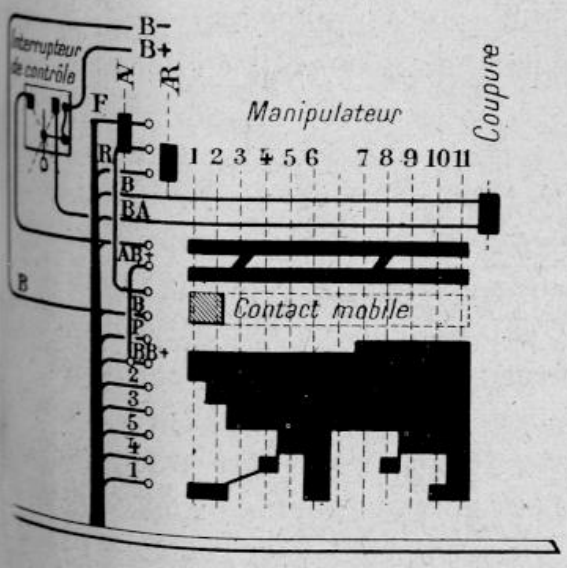


FIG. 428.

Schéma du circuit de contrôle.

Marche sous 5000 volts

Cran	LS1	LS2	LS3	R1	R2	R3	R4	R5	M1	P1	P2	S1	S2	G	B
1	o	o	o	o					o			o	o		o
2	o	o	o	o	o				o			o	o		o
3	o	o	o		o	o			o			o	o		o
4	o	o	o		o	o	o		o			o	o		o
5	o	o	o		o	o		o	o			o	o		o
6	o	o	o	o	o	o	o	o	o			o	o		o
	o	o	o		o	o			o		o	o	o		o
7	o	o	o		o	o			o	o	o			o	o
8	o	o	o		o	o	o		o	o	o			o	o
9	o	o	o		o	o		o	o	o	o			o	o
10	o	o	o	o	o	o		o	o	o	o			o	o
11	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o			o	o

Marche sous 600 volts

Cran	LS1	LS2	LS3	R1	R2	R4	F1	F2	F3	F4	M1	P1	P2	G
1	o	o	o	o	o	o					o	o	o	o
2	o	o	o	o	o	o	o	o			o	o	o	o
3	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o

FIG. 429.

Ordre de fermeture des contacteurs 500 et 600 volts.

Schémas de l'équipement d'une automotrice Westinghouse sous 5.000 et 600 volts, courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quelques détails, la ligne de Bonn-Siegburg-Königswinter en service depuis 1911.

Les trains sont formés par deux automotrices à deux bogies et un certain nombre de voitures de remorque également à bogies. La vitesse maxima des trains est de 40 kilomètres à l'heure. Chaque automotrice est munie de deux moteurs d'une puissance de 85 chevaux sous 1.000 volts, dont un par bogie. Le système de contrôle adopté est celui par unités multiples avec contacteurs.

Les moteurs sont couplés en série parallèle avec une position de shuntage des inducteurs pour la marche en série et deux positions de shuntage pour la marche en parallèle des moteurs ; il existe donc cinq positions de marche de régime. Les coupleurs de commande sont placés dans les cabines de mécaniciens, tandis que les contacteurs sont réunis en batterie et disposés sous la voiture.

La figure 430 (1) représente le schéma des connexions de la voiture. Les contacteurs sont alimentés par le courant de la ligne avec interposition de résistances additionnelles quand la voiture se trouve sous la tension de 1.000 volts. A l'intérieur de la ville de Bonn, les voitures fonctionnent sous une tension de 550 volts et cet abaissement de tension ramène automatiquement la vitesse de marche à celle autorisée dans la ville.

La mise en circuit ou hors circuit des résistances additionnelles pour les services auxiliaires est effectuée par un commutateur. Cet appareil sert également pour modifier le couplage des groupes de lampes qui fonctionnent sous la tension de 1.000 volts en dehors de la ville.

Le commutateur est ramené et maintenu dans sa position normale, qui est celle correspondant à 1.000 volts, par l'action d'un ressort approprié. Quand le train arrive sur la partie alimentée sous 550 volts, le mécanicien ferme l'interrupteur H de la bobine de commutation U ; cette dernière pousse le commutateur, en opposition de l'effort du ressort, dans la position correspondant à 550 volts et dans cette dernière la bobine de verrouillage *s* entre en action. Au passage sur la section neutre, qui se trouve entre les parties de lignes alimentées à 550 volts, et celles alimentées à 1.000 volts, la bobine de verrouillage libère le commutateur G et ce dernier retourne, sous l'action du res-

(1) Empruntée au *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, d'avril 1913.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

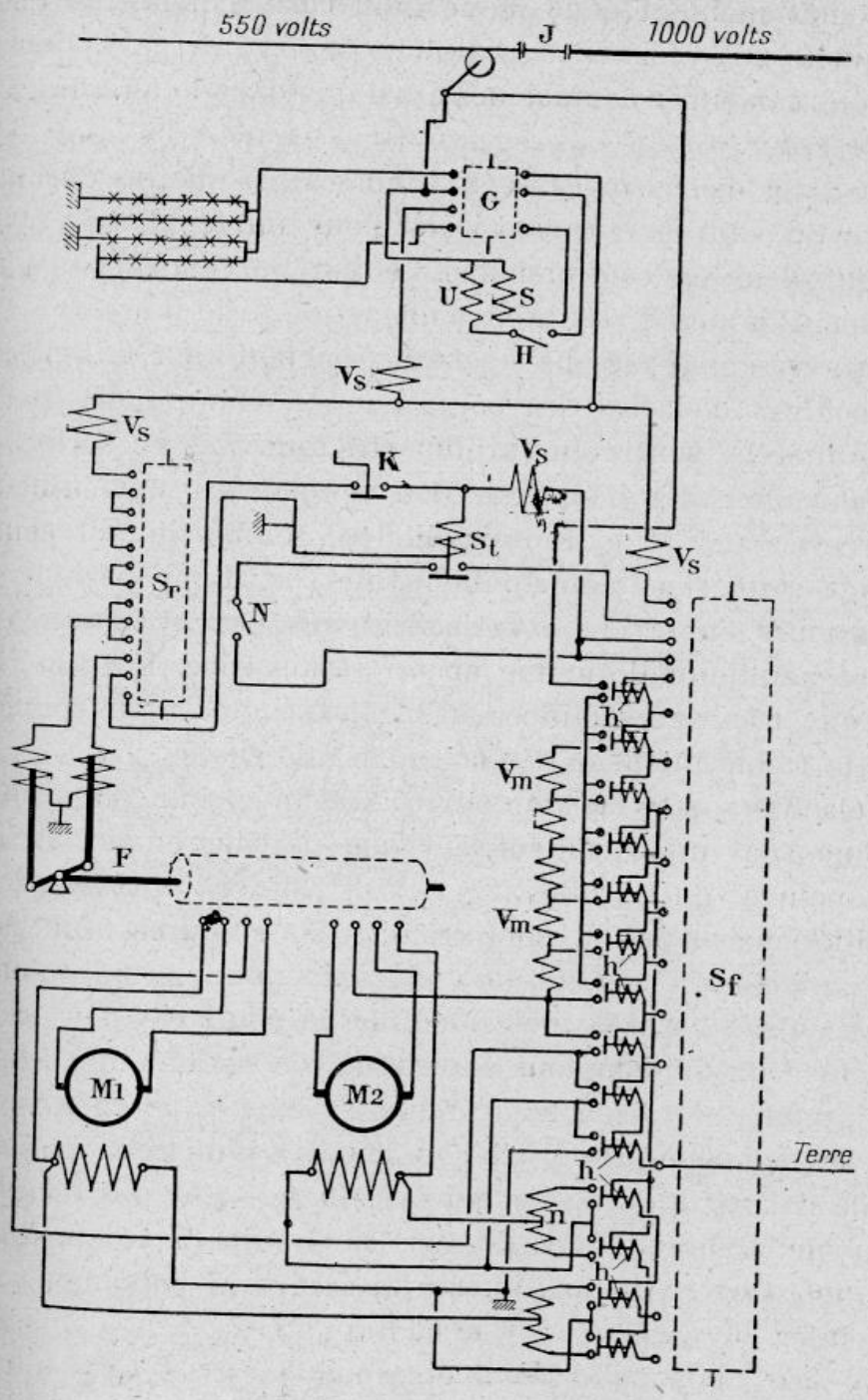


FIG. 430. — Schéma de contrôle des moteurs des voitures de Bonn-Siegburg (Siemens-Schukert).

Sf, cylindre de marche du coupleur; *Sr*, cylindre inverseur du coupleur; K, manivelle de sûreté; G, commutateur de réglage de la tension des circuits auxiliaires; F, commutateur de direction de marche à commande électromagnétique; M_1, M_3, moteurs; H, interrupteur à main; U, électro de commande de G; S, électro de verrouillage de G; J, section isolée de la ligne; *Vm*, résistances de démarrage pour les moteurs M_1 et M_2; *n*, shunts; *h*, contacteurs; *Vs*, résistances additionnelles pour les circuits de commande; *St*, relais du circuit de commande; N, interrupteur de secours.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sort, automatiquement dans la position correspondant à 1.000 volts dans laquelle une résistance additionnelle est intercalée dans le circuit de commande des contacteurs ainsi que dans le circuit du moteur du compresseur.

Les bobines d'électros des contacteurs ainsi que les enroulements du moteur du compresseur sont isolés pour une tension de 1.000 volts.

Le contrôleur de commande du circuit auxiliaire placé dans la cabine du mécanicien est muni d'un cylindre de marche S_f et d'un cylindre inverseur représentés schématiquement sur la figure 430.

Les bobines d'électro des contacteurs *h* commandés par le cylindre de marche sont pour la plupart connectées en série.

Les enroulements d'électros des contacteurs non utilisés sont court-circuités par le cylindre principal, l'intensité du courant de commande reste sensiblement la même car, d'une part, le nombre de contacteurs en série ne varie que très peu et, d'autre part, la résistance additionnelle a une action égalisatrice. De plus, il ne se produit que très peu d'étincelles sur les contacts du coupleur par suite de la faible intensité des courants mis en jeu.

Les électros pour la manœuvre de l'inverseur de direction de marche ne sont mis sous courant que passagèrement au moment de la manœuvre du cylindre inverseur. L'étincelle qui se produit est rendue inoffensive par la mise en série de ruptures multiples.

La manivelle du coupleur du mécanicien est munie d'un dispositif de sécurité. Le mécanicien est obligé d'appuyer sur la poignée pour fermer un interrupteur du circuit de commande des contacteurs. Si, pour une raison quelconque, il lâche la poignée pendant la marche, cette dernière remonte sous l'action d'un ressort et coupe le circuit de commande des contacteurs. Il ne suffit pas d'appuyer de nouveau sur la poignée pour fermer les circuits de commande, mais grâce à un relais S_t il faut revenir au zéro pour pouvoir de nouveau les alimenter.

186. **Système Brown-Boveri.** (Compagnie Electro-Mécanique.) — Ainsi que nous l'avons déjà signalé, cette Société utilise la méthode de contrôle direct par contrôleurs traversés par le courant de traction. Les applications réalisées comprennent des installations de 1.000 à 2.000 volts. Des dispositions particulières doivent être prises pour fournir l'éclairage et alimenter le moteur du compresseur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Elles consistent dans l'emploi d'un transformateur tournant constitué par un moteur et une dynamo génératrice.

Le moteur qui fonctionne sous la tension totale du réseau est muni de deux collecteurs et de deux enroulements induits montés en série ; la dynamo génératrice entraînée par ce moteur fournit une tension aussi basse que l'on désire.

Ce groupe doit tourner à vitesse aussi constante que possible ; le moteur sera par suite shunt. Afin d'éviter l'obligation d'avoir un enroulement shunt en fil trop fin, l'excitation shunt du moteur est prise aux bornes de la dynamo.

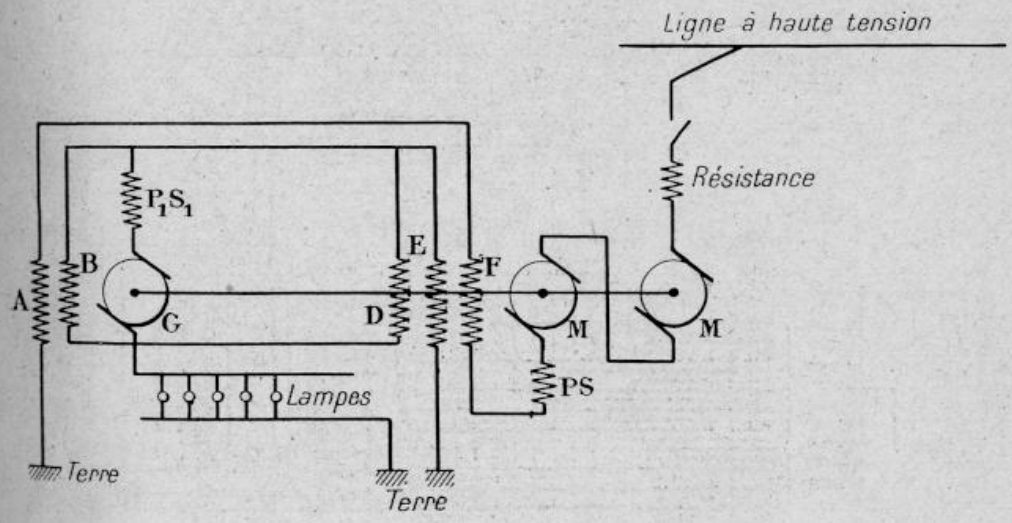


FIG. 431.

Schéma du groupe d'éclairage Brown-Boveri.

Le schéma (fig. 431) représente l'ensemble des connexions du groupe. M est le moteur à deux enroulements induits. Son enroulement shunt est D et il y a, en outre, un enroulement série F pour donner un couple de démarrage au moment où l'enroulement excitateur est sans courant. Afin de neutraliser l'influence sur la vitesse en marche normale de l'enroulement série F, il y a un troisième enroulement en E, qui est un enroulement contre-compound traversé par le courant principal du générateur.

G est la dynamo génératrice d'éclairage donnant, par exemple 110 volts. Elle est à excitation shunt B. On y a ajouté un enroulement compound A traversé par le courant du moteur afin de faciliter son excitation au démarrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ajoutons enfin que les deux machines, moteur et dynamo, sont munies de pôles de commutation P.S., P_1S_1.

L'expérience a montré que de tels groupes, pour une puissance secondaire utile de 1.600 watts, pouvaient être employés avec toute sécurité jusqu'à des tensions de 1.750 volts et pour 3.000 watts jusqu'à 2.000 volts.

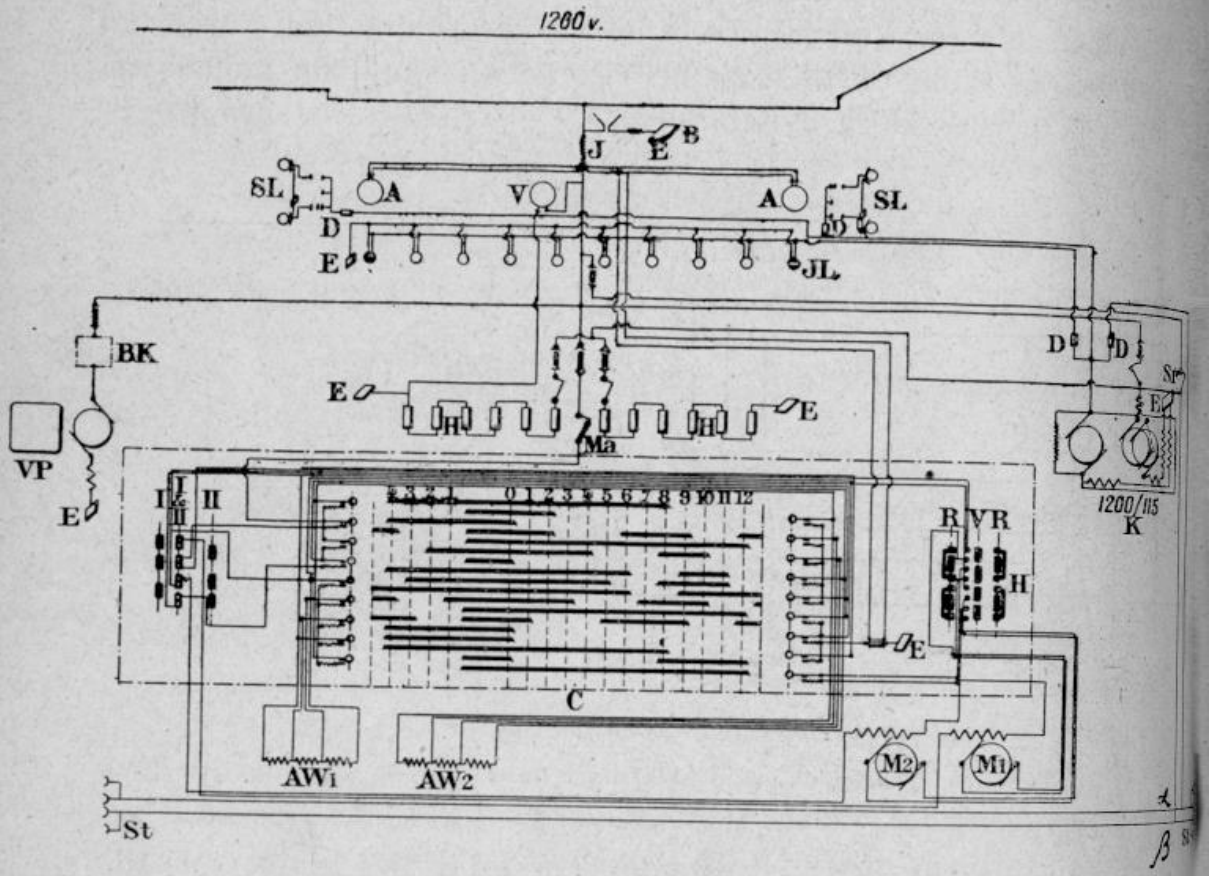


FIG. 432. — Schéma de l'automotrice du chemin de fer électrique Biasca-Acquarossa.

A, ampèremètre ; A*w*, résistance de réglage ; B, parafoudres ; B*k*, contrôleur du moteur VP ; D, Coupe-circuits ; E, mise à la terre ; H, radiateurs ; J, bobine d'induction ; JL, lampe pour éclairer les appareils ; M, moteurs ; M*a*, interrupteur à maxima ; SL, lampe signal ; S*t*, contact à fiche ; V, voltmètre ; VP, pompe à air (Brown-Boveri) ; C, contrôleur central ; K, groupe moteur-générateur, 1.200/115 volts ; H, inverseur ; [illegible] rage ; β, chauffage.

Les contrôleurs employés ne sont pas des contrôleurs de plate-forme, mais sont du type « contrôleur central ». Un tel contrôleur, un par automotrice, est installé dans une cabine centrale et est commandé des plates-formes des extrémités de la voiture au moyen d'une transmission rigide, par arbres et roues d'angle. Au point de vue construction, ce contrôleur est muni de larges séparateurs d'arc

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

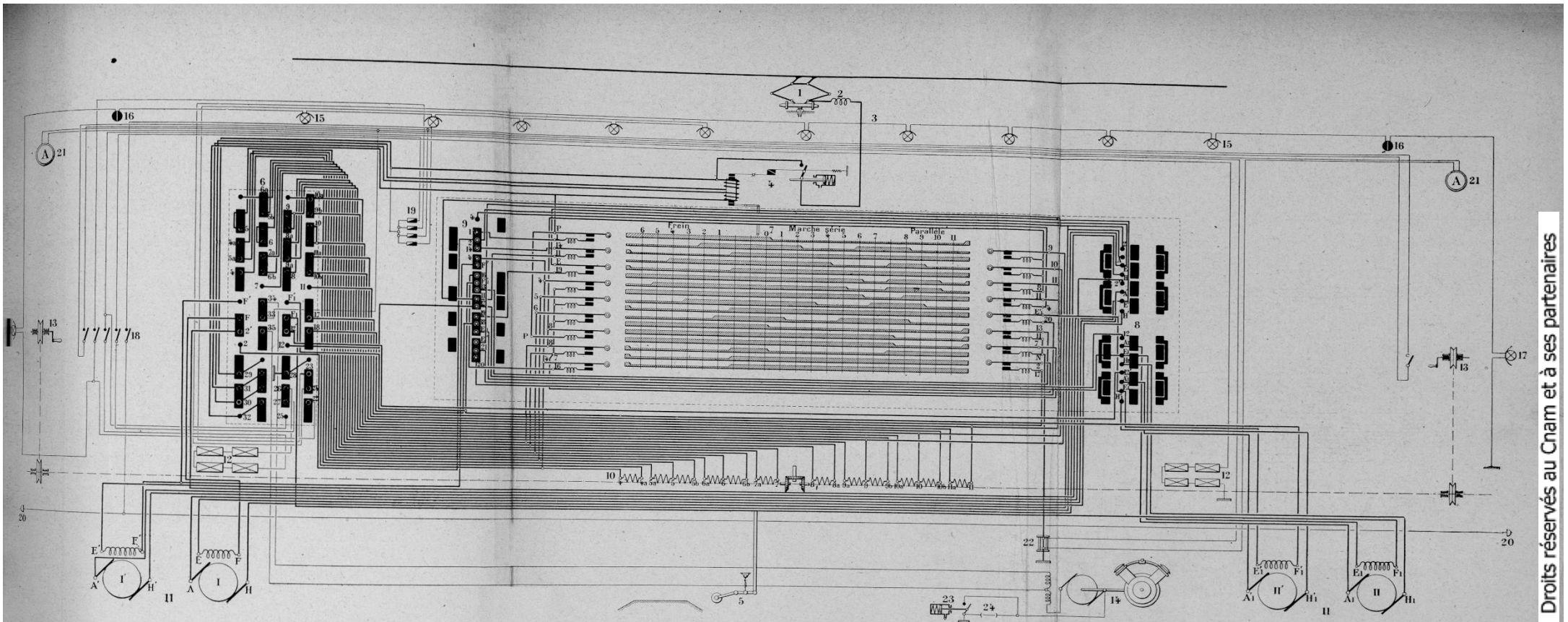


FIG. 433. — Chemins de fer des Basses-Pyrénées. Schéma des connexions pour voiture automotrice avec quatre moteurs à courant continu.

LÉGENDE

1. Pantographe.
2. Bobine de self.
3. Isolateur d'entrée de courant.
4. Disjoncteur automatique à maxima.
5. Dispositif de déclanchement automatique du disjoncteur au passage des deux tronçons de tensions différentes.
6. Commutateur de tension.
7. Régulateur.
8. Inverseur de marche.
9. Cylindre de mise hors circuit des moteurs.
10. Résistances.
11. Moteurs.
12. Radiateurs.
13. Manivelle de commande du régulateur.
14. Groupe moteur-compresseur.
15. Lampe plafonnière.
16. Lampes d'instruments.
17. Lampes de signaux.
18. Interrupteurs.
19. Fusibles.
20. Coupleur.
21. Ampèremètre.
22. Shunt.
23. Régulateur de pression.
24. Sectionneur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

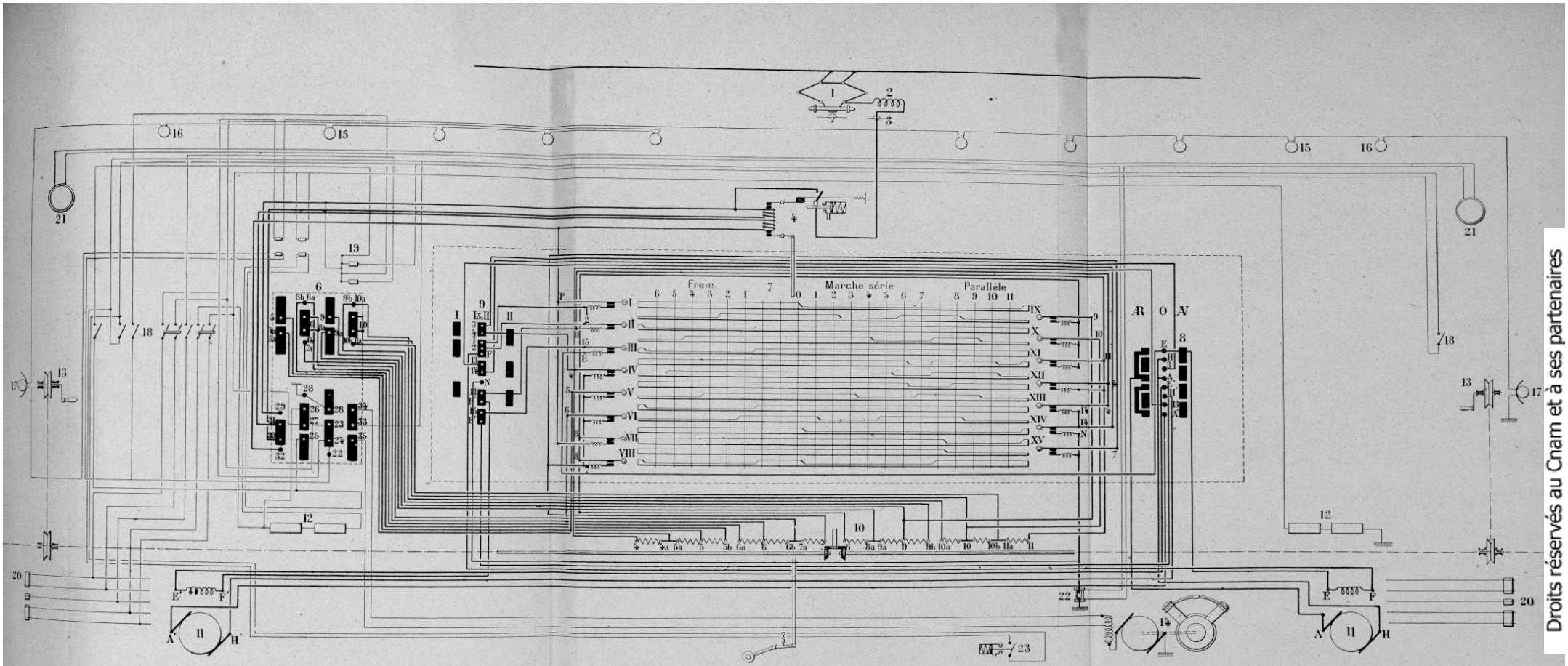


FIG. 434. — Chemins de fer des Basses-Pyrénées. Schéma des connexions pour voiture automotrice avec deux moteurs à courant continu.

LÉGENDE

1. Pantographe.
2. Bobine de self.
3. Isolateur d'entrée de courant.
4. Disjoncteur à maxima.
5. Dispositif de déclanchement automatique du disjoncteur au passage de deux tronçons.
6. Commutateur de tension.
7. Régulateur.
8. Inverseur de marche.
9. Cylindre de mise hors circuit des moteurs.
10. Résistances.
11. Moteurs.
12. Radiateurs.
13. Manivelle de commande du régulateur.
14. Groupe moteur-compresseur.
15. Lampes d'intérieur.
16. Lampes d'instruments.
17. Lampes de signaux.
18. Interrupteurs.
19. Fusibles.
20. Coupleurs.
21. Ampèremètre.
22. Shunt.
23. Régulateur de pression.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de dispositifs de rupture brusque, en outre des bobines de soufflage.

Nous donnons comme exemple (fig. 432) le schéma général des connexions de l'équipement d'une des automotrices de la ligne à 1.200 volts Biasca-Acquarosa, en Suisse, mise en service en 1911. Pour cette ligne, les moteurs sont à 1.200 volts directs. Le groupe d'éclairage est installé sous le châssis de la voiture.

Nous signalerons enfin comme application récente le réseau du chemin de fer des Basses-Pyrénées (chemins de fer Basques) à 1.350 et 600 volts, encore en construction. Les automotrices sont de deux types : automotrices à bogies et 4 moteurs de 67 chevaux sous 675 volts et automotrices à 2 essieux à 2 moteurs de même type ; nous donnons, en planche hors-texte (fig. 433 et 434), les schémas des équipements de ces voitures. Les moteurs, dans tous les cas, sont couplés par deux en permanence en série. Pour les voitures à 4 moteurs, le réglage est série-parallèle pour les 2 groupes de 2 moteurs, et pour celles à 2 moteurs, le contrôle est purement rhéostatique ne donnant par suite qu'une vitesse de régime. Autrement, les dispositions générales sont les mêmes.

Actuellement, seules, les premières voitures de ce dernier type sont en service.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XV

ACCESSOIRES DE LA TRACTION

I. — Éclairage.

SOMMAIRE. — Éclairage des automotrices. — Eclairage des remorques. — Cas de l'alimentation en courant continu haute tension. — Cas de l'alimentation en courants alternatifs.

II. — Chauffage.

Divers modes de chauffage. — Comparaison entre les quantités de chaleurs dégagées par le courant électrique et par la houille. — Divers modes de chauffage électrique. — Conditions d'emploi des deux systèmes. — Appareils employés. — Garanties de construction des chaufferettes. — Consommation d'énergie.

III. — Equipement électrique d'une automotrice.

Dispositions générales. — Causes d'incendie et précautions à prendre pour la câblerie.

I. — Éclairage.

187. **Eclairage des automotrices.** — L'éclairage est naturellement électrique. On utilise en général des lampes de 16 bougies, quelquefois de 10 ou de 25, dans tous les cas, montées en série par 5 pour les réseaux à 500/600 volts sur un circuit pris en dérivation sur le circuit principal et muni d'un interrupteur spécial.

Dans le cas le plus simple, on se contentera de 3 lampes à l'intérieur de la voiture et des deux feux réglementaires à l'extérieur. En général, toutefois, on aura au moins deux circuits d'éclairage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les lampes ont d'abord été à filaments de charbon et construites spécialement en vue de résister aux vibrations qui se produisent pendant la marche. A cet effet, on ancrait le filament soit à la base de la lampe, soit à l'ampoule même, puis on s'est contenté des lampes ordinaires. Enfin, actuellement, on emploie de plus en plus des lampes à filament métallique qui sont avantageuses au point de vue consommation de courant, pouvoir éclairant et résistance mécanique.

Un inconvénient du montage des lampes en série est que l'extinction d'une lampe entraîne celle des quatre autres. On peut y remédier en shuntant la lampe par un électro-aimant, suivant le schéma de la figure 435. En cas de rupture d'une lampe, le courant, dans l'enroulement de l'électro, croît, et l'électro court-circuite la lampe en intercalant dans le circuit une résistance égale. Le dispositif est, toute-

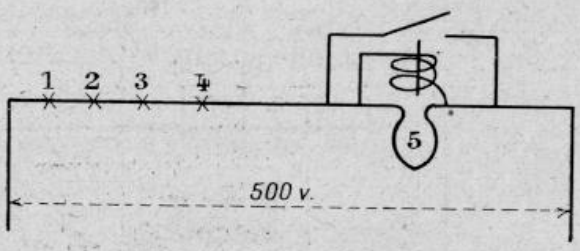


FIG. 435.

fois, bien compliqué et, en définitive, très rarement employé. Comme il y a en général plusieurs circuits indépendants d'éclairage, on n'a guère à craindre l'extinction complète de l'éclairage comme conséquence de l'extinction d'une lampe.

Ces lampes sont naturellement soumises aux variations de tension de la ligne, ce dont on se rend bien compte au moment d'un démarrage. Elles sont en général prévues pour subir des variations de voltage de 12 à 18 volts.

Les voitures sont le plus souvent pourvues d'un éclairage de secours pour le cas où il y a interruption de courant sur la ligne.

Cet éclairage de secours sera, ou constitué par des lampes à pétrole (Compagnies des Tramways de l'Est-Parisien, de Paris et du département de la Seine, de Paris à Arpajon, de Nice, etc.), ou par des lampes à 10 volts, 10 bougies, alimentées par une batterie d'accumulateurs et entrant en action automatiquement en cas de suppression de courant sur le circuit principal. Ce dernier dispositif est, par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exemple, celui de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris, où le circuit d'éclairage de secours comprend 3 lampes de 10 volts, 10 bougies. Il y a, en outre, un inverseur automatique pour marche sur caniveau souterrain, qui donne lieu à ces inversions de polarité. Ce dispositif est breveté. La figure 436 donne le schéma

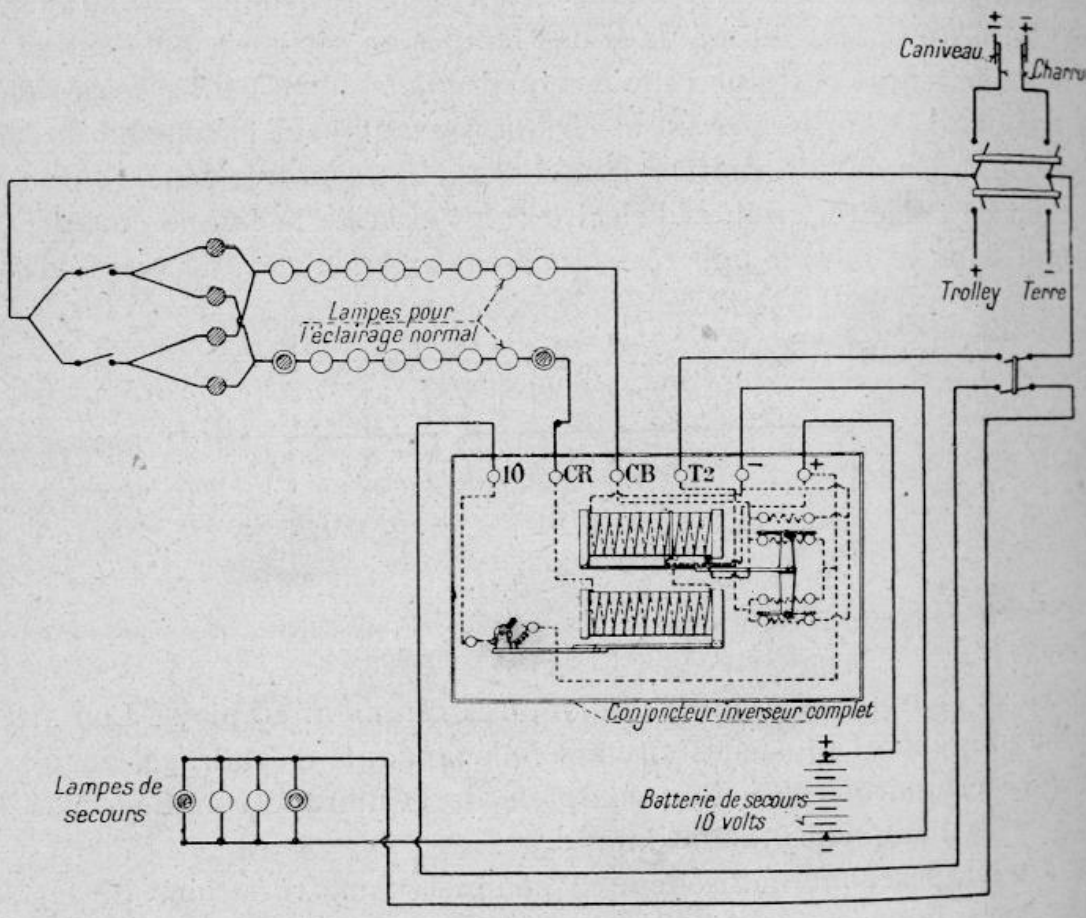


FIG. 436.

Schéma de l'éclairage de secours de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris (breveté S. G. D. G.).

de ce circuit. On voit que la batterie est, pour la charge, montée en série sur le circuit d'éclairage normal ; il est donc de toute nécessité, pour éviter sa décharge intempestive, d'intervertir les connexions aux bornes de la batterie à tout changement de polarité sur le caniveau. C'est dans ce but que l'on a prévu l'inverseur à solénoïdes représenté sur le schéma ci-dessus, et qui assure,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une part, le maintien de la polarité convenable aux bornes de la batterie pendant sa charge et, d'autre part, l'allumage automatique du circuit d'éclairage de secours en cas d'extinction des lampes de l'éclairage normal.

A la Compagnie Parisienne de Tramways, l'éclairage de secours est constitué par une batterie de 6 éléments de 35 ampères-heures, alimentant 6 lampes 10 volts, 10 bougies. L'appareillage ne comprend qu'un conjoncteur-disjoncteur non polarisé, la charge ne s'effectuant que sur les lignes à trolley. Un interrupteur bi-polaire commande la batterie et le circuit principal d'éclairage. Ce dispositif équivaut à enclancher les deux circuits d'éclairage : circuit principal et circuit de secours. La figure 437 donne le schéma de l'éclairage de ces voitures.

A la Compagnie des chemins de fer Nogentais, il est fait emploi d'une batterie de 35 ampères-heures en série avec le circuit d'éclairage normal. La batterie se charge lorsque le circuit est fermé et est mise automatiquement en décharge au moyen d'un dispositif spécial lorsque le circuit principal vient à manquer pour une cause quelconque. La figure 438 donne le schéma de l'éclairage de ces voitures.

188. **Eclairage des remorques.** — On se sert simplement de coupleurs reliant le circuit d'éclairage de la voiture automotrice à celui de la voiture remorquée ; ces coupleurs sont des sortes de boîtes à contacts placées à l'extrémité des voitures et qui sont réunies par des conducteurs souples enfermés dans une gaîne. On peut également munir la voiture d'un petit frotteur spécial.

Dans le cas des unités multiples à plusieurs frotteurs, il faut veiller à ce que le conducteur d'éclairage ne fasse pas pont entre les voitures motrices (fig. 439). A cet effet, on prend la moitié de l'éclairage sur la motrice avant et l'autre moitié sur la motrice de queue (fig. 440).

189. **Cas de l'alimentation en courant continu haute tension.** — Il est évidemment impossible ici de recourir au montage de lampes en série comme il est indiqué ci-dessus dans le cas de l'alimentation à 500/600 volts. On peut employer soit une batterie assurant un éclairage indépendant ou adopter (Westinghouse, General Electric,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

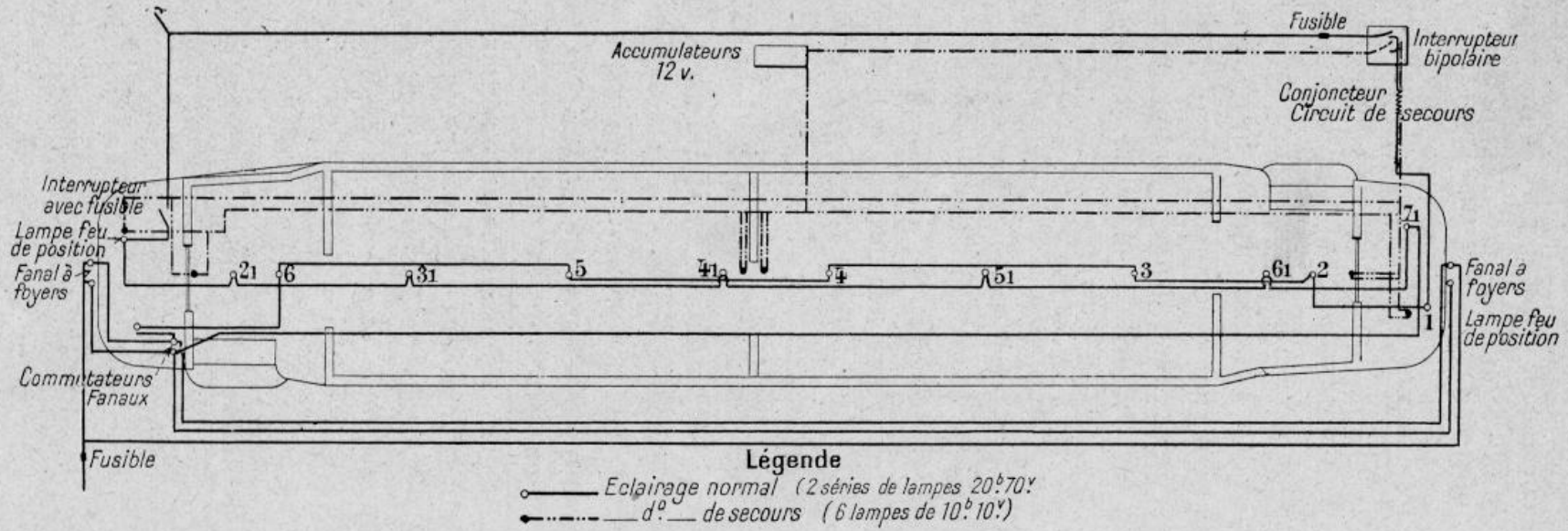


FIG. 437.

Schéma de l'éclairage des voitures de la Compagnie Générale Parisienne de Tramways.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

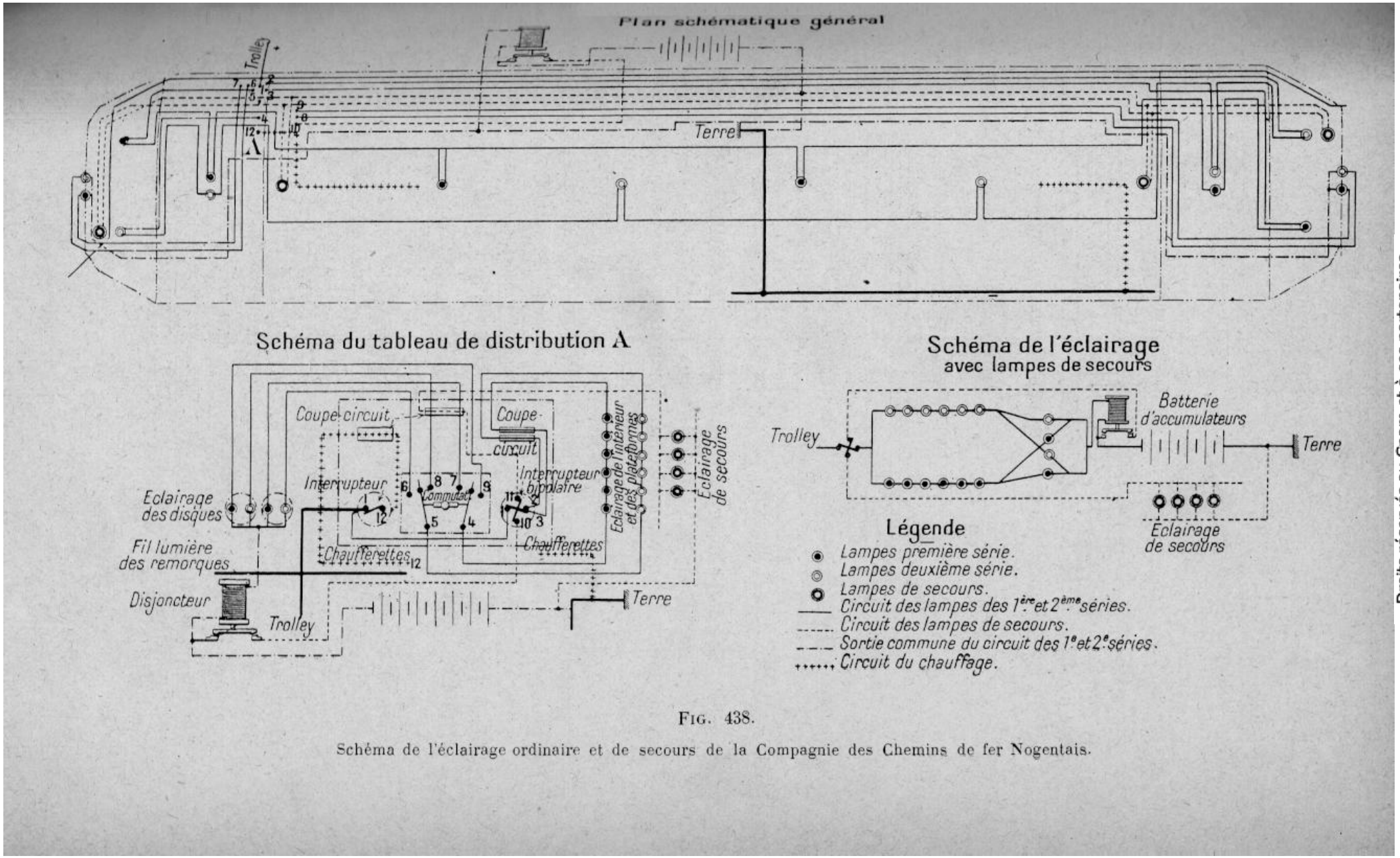


FIG. 438.

Schéma de l'éclairage ordinaire et de secours de la Compagnie des Chemins de fer Nogentais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Thomson-Houston) le dynamoteur dont nous avons parlé au chapitre précédent (§§ 183 et 184) ou un groupe moteur-générateur (Brown-Boveri, § 186).

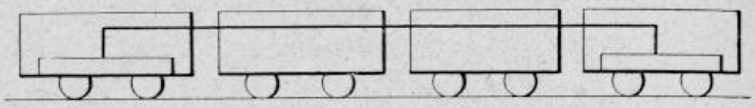


FIG. 439.

Disposition à ne pas suivre.

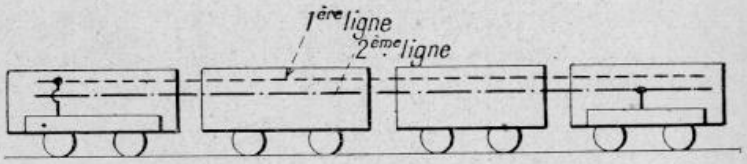


FIG. 440.

Disposition à suivre.

190. **Cas de l'alimentation en courants alternatifs.** — A première vue il suffit de munir le transformateur principal de prises appropriées à 110 volts, par exemple, ou d'employer un petit transformateur spécial. Ce procédé n'est toutefois pas recommandable, car la fréquence du courant d'alimentation est le plus généralement de 15 ou 16 périodes, ce qui donne un éclairage très défectueux. On a alors recours soit au groupe moteur-générateur Brown-Boveri que nous avons examiné plus haut, comme aux locomotives du Simplon, ou au courant du circuit de contrôle, comme aux nouvelles locomotives triphasées italiennes, soit à une batterie spéciale.

II. — Chauffage.

191. **Divers modes de chauffage.** — L'application de l'électricité au chauffage des tramways électriques est relativement récente. Un des premiers essais est celui réalisé au chemin de fer électrique à crémaillère du Salève, en 1894, où on a employé des rhéostats constitués par du fil de fer galvanisé de 1 mm. 5 de diamètre, enroulé en hélice et disposé sur cadres de 82×30×18 centimètres, placés sous les ban-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quettes. La longueur totale du fil était d'environ 500 mètres par voiture et la consommation d'ensemble de 8 à 9 kws.

Le chauffage électrique s'est surtout développé en Amérique.

Au point de vue répartition convenable de la chaleur dans la voiture, entretien, confort, hygiène, propreté, facilité de régulation de la consommation d'énergie (par groupement en série ou en parallèle des résistances), encombrement réduit, etc., ce mode de chauffage est de beaucoup supérieur aux autres qui sont principalement :

Chauffage par briquettes spéciales,
— par poêles,
— par bouillottes à eau chaude ordinaire ou à acétate de soude,
— à l'eau chaude avec ou sans thermo-siphon,
— par la vapeur.

192. **Comparaison entre les quantités de chaleur dégagées par le courant électrique et par la houille.** — L'énergie fournie par une puissance (EI) watts en une seconde est en kilogrammètres $\frac{EI}{9,81}$ et si l'on suppose le rendement des appareils égal à 1, la quantité de chaleur dégagée par seconde en calories (Kg-degré) est

$$C = \frac{EI}{9,81 \times 424}$$

et par heure

$$Q = \frac{3.600 \times EI}{9,81 \times 424} = 0,865\ EI.$$

Si donc EI = 1 kw, Q = 865 calories (Kg. degré).

On voit donc que 1 kilowatt-heure fournira une quantité de chaleur huit à dix fois moins grande que celle que fournit 1 kilogramme de charbon à 6.000, à 8.000 calories. Il faut considérer en outre, pour faire une comparaison de prix, que si le charbon vaut 25 francs la tonne, soit 0 fr. 025 le kilogramme, le kilowatt-heure revient au moins à 0 fr. 10.

Le chauffage électrique ne saurait donc être substitué au chauffage à la houille dans tous les cas. Nous allons voir dans quelles conditions il peut être employé économiquement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

193. **Divers modes de chauffage électrique.** — Les premières applications comportaient le chauffage de l'air ambiant au moyen de radiateurs électriques. On conçoit qu'en raison des causes multiples de refroidissement (ouverture fréquente des portes, étendue de la surface vitrée, étanchéité médiocre des parois), il faille fournir une grande quantité de calories. Il résulte d'essais faits en 1894, par la Compagnie des Tramways électriques d'Atlantic-Avenue, à Brooklyn (Etats-Unis), qu'il faut environ 7 watts par mètre cube à chauffer et par degré centigrade au-dessus de la température extérieure. Cela revient à admettre une consommation d'environ 100 watts par mètre cube ou sensiblement par place pour maintenir une température supérieure de 15 degrés à celle de l'extérieur. Des essais faits en 1902, à Berlin, sur la ligne de Treptow à Behrenstrasse, par la Compagnie A. E. G. et par des froids très vifs, ont donné des résultats analogues. Cela conduit à une consommation d'environ 2.500 watts pour une voiture de tramway de moyenne grandeur, de 25 mètres cubes ou 24 places.

Le chauffage électrique, dans ces conditions, c'est-à-dire par chauffage de l'air (radiateurs) n'est jamais économique. Aussi les conclusions du Congrès de l'Union internationale des tramways en 1900 ne furent pas très favorables à ce mode de chauffage. Bientôt, toutefois, un nouveau mode de chauffage, *chauffage local par chaufferettes*, survint, réduisant considérablement les frais de consommation au dixième environ de ce qu'ils étaient, donnant ainsi un système économique.

Dans ce mode de chauffage par chaufferettes, on se propose de chauffer les pieds des voyageurs au moyen de plaques portées à 70° environ. Il faut observer d'ailleurs que c'est ce mode de chauffage qui procure le plus rapidement une sensation de confort et de bien-être. Pour maintenir une plaque chauffante à la température de 70°, qui paraît être la température la plus convenable, il suffit de 10 watts environ par décimètre carré de chaufferette. En admettant une surface de chauffe de 2 décimètres carrés par place assise, ce qui donne 20 watts par voyageur, la consommation d'une voiture de 25 places est de 500 watts et encore n'est-il pas nécessaire de fournir cette surface à chaque voyageur par une disposition convenable de chaufferettes.

Outre l'économie de consommation, il y a encore une notable économie de premier établissement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

194. **Condition d'emploi des deux systèmes.** — Il ne faut pas cependant conclure de ce qui précède que le mode de chauffage par chaufferettes soit seul applicable en raison de l'économie importante qu'il présente. Il faut aussi considérer le service auquel sont destinées les voitures qu'il s'agit de chauffer. A ce point de vue, deux catégories bien distinctes sont à établir :

1° Voitures parcourant de longues distances sans arrêt ;

2° Voitures à arrêts fréquents avec mouvement continu de voyageurs et ouverture des portes, d'où résulte un renouvellement incessant de l'air de la voiture.

Dans les premières, service interurbain et de chemin de fer, le voyageur s'installe pour un certain temps et se débarrasse du manteau qu'il portait au dehors. L'air du compartiment doit être chauffé.

Dans les secondes, service urbain de tramways, les voyageurs ne restent dans les voitures que pendant un temps assez court et restent couverts ; il suffit de chauffer les pieds pour procurer rapidement toute la sensation désirable de confort.

Dans les pays froids, on pourra avantageusement combiner les deux modes de chauffage.

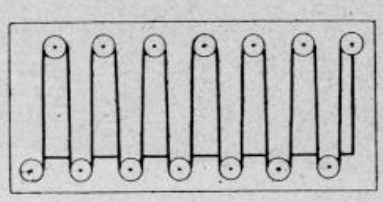


FIG. 441.

195. **Appareils employés.** — 1° *Radiateurs chauffant l'air.* — Ces radiateurs chauffés par le passage du courant, abandonnent leur chaleur par convection et radiation dans l'air ambiant.

Pour éviter l'oxydation, on avait d'abord disposé un fil de maillechort en zigzags dans un lit d'argile, le tout compris entre deux plaques de fonte (appareil Durton, Etats-Unis), mais le dégagement de chaleur est mauvais et le fil finit quelquefois par fondre. On se servit alors de fils nus suspendus à l'air libre, sur isolateurs : American Heater (fig. 441).

Un autre type très répandu est formé de spirales de fil de fer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

galvanisé, enroulés en hélice autour d'un tube de porcelaine (Consolidated Car Heating Co d'Albany (New-York) (fig. 442). Chaque radiateur comprend deux bobines chauffantes de ce type et disposées l'une au-dessus de l'autre ; elles sont de résistance différente. L'ensemble est dans une enveloppe protectrice ajourée l'entourant complètement (fig. 443) où dont une seule face est à grillage (fig. 444-445), suivant

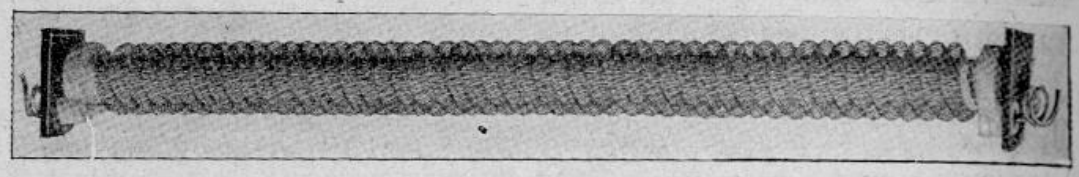


FIG. 442.

Bobine chauffante.

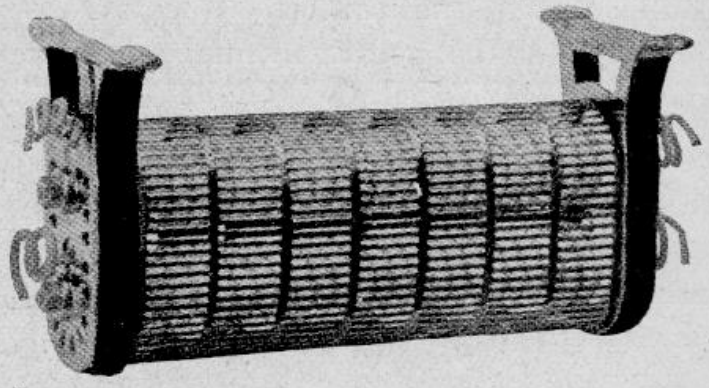


FIG. 443.

Radiateur pour sièges transversaux (vue de face).

le genre de sièges. Ces radiateurs sont installés sous les sièges (fig. 446, installation d'un radiateur de la fig. 444. Le radiateur de la fig. 443 est simplement suspendu sous le siège). Dans un équipement les bobines supérieures sont en série, et les bobines inférieures également en série. L'une ou l'autre série, ou les deux à la fois peuvent être mises en service au moyen d'un interrupteur approprié. Le schéma figure 447 représente un montage avec 8 radiateurs. Les radiateurs de la figure 444 sont entre autres, ceux adoptés pour les tramways Nogentais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

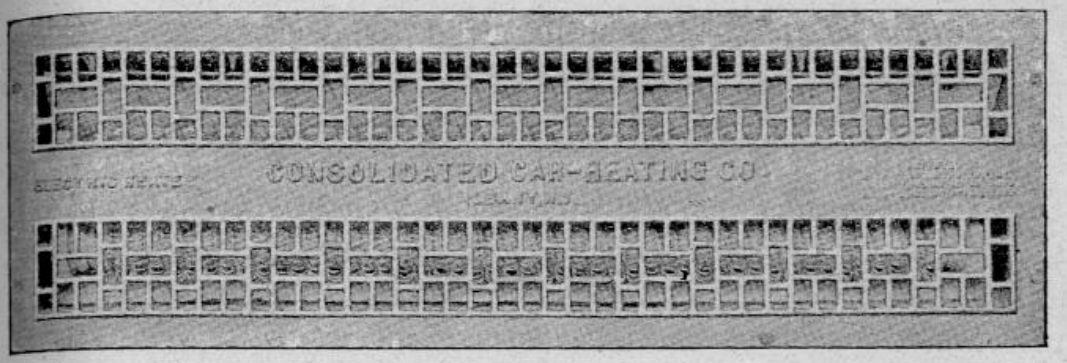


FIG. 444.

Radiateur pour sièges longitudinaux (vue de face).

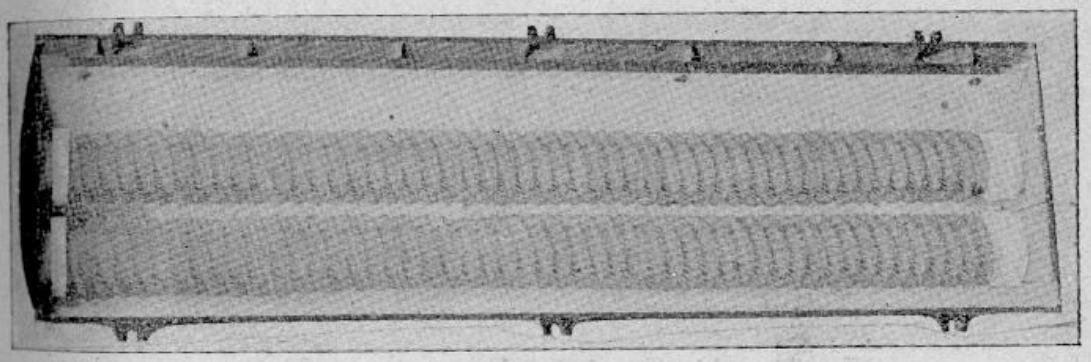


FIG. 445.

Radiateur de la figure 444, plaque de face enlevée.

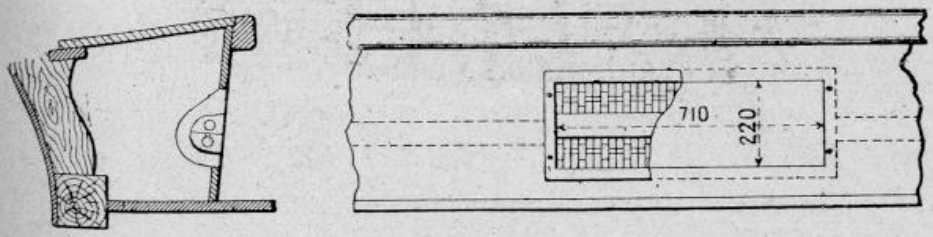


FIG. 446.

Installation sous une banquette d'un radiateur de la figure 444.

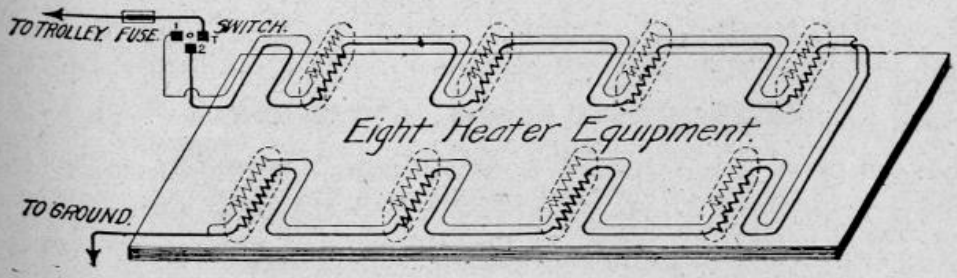


FIG. 447.

Schéma de montage d'une série de 8 radiateurs à deux bobines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° *Chaufferettes.* — On utilise ici la chaleur rayonnée par conduction, ce qui permet de diminuer les longueurs et les sections de fil. Le fil résistant est mis en contact intime avec une surface métallique conductrice de la chaleur dont il est isolé électriquement. On aura par exemple une résistance serrée et comprimée à la presse hydraulique, entre deux couches de micanite, de façon à former un tout. La plaquette chauffante ainsi constituée est serrée avec ou non insertion de plaque d'amiante, entre deux plaques métalliques ; la plaque supérieure est en fer, fonte, ou cuivre, à nervures minces, pour augmenter la surface rayonnante. L'ensemble forme une sorte de boîte plate de un à deux centimètres d'épaisseur, de 14 à 25 centimètres de largeur et de longueur très variable. La figure 448 représente une chaufferette d'un type ordinaire. Ces chaufferettes (Parvillée, Goisot, etc.) sont généralement placées sur le plancher de la voiture, le caillebotis, quand il y en a, étant supprimé dans la partie de leur emplacement afin que le plancher soit nivelé. S'il n'y a pas de caillebotis, on les encastre dans le plancher.

Quand les voitures ont, dans leur plancher, des trappes de visite pour les moteurs et qu'on n'a pas pris de mesures spéciales pour réserver aux chaufferettes des parties fixes dans le plancher, on est obligé de placer ces dernières sur les trappes mobiles elles-mêmes. Dans ce cas, on relie les chaufferettes au plancher fixe au moyen de fils souples et de prises de courant que l'on déconnecte en soulevant la trappe portant la chaufferette.

Dans des voitures à banquettes transversales, on place les chaufferettes dans l'axe de chaque travée (fig. 449), et dans les voitures à banquettes longitudinales on peut mettre une série de chaufferettes devant chaque banquette (fig. 450), ou seulement une série dans l'axe de la voiture (fig. 451) servant à la fois pour les deux rangs de places.

Les chaufferettes sont généralement montées par cinq en série, sous 500 volts.

A titre d'exemples:

Les voitures à banquettes transversales, à plates-formes et à deux essieux de la ligne Paris-Invalides-Versailles (fig. 449), comprennent deux groupes de cinq chaufferettes en série en cuivre jaune estampé; chaque groupe consomme un ampère sous 550 volts, la consommation totale est alors de 1.100 watts. Il y a 36 places assises, d'où 30 watts

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

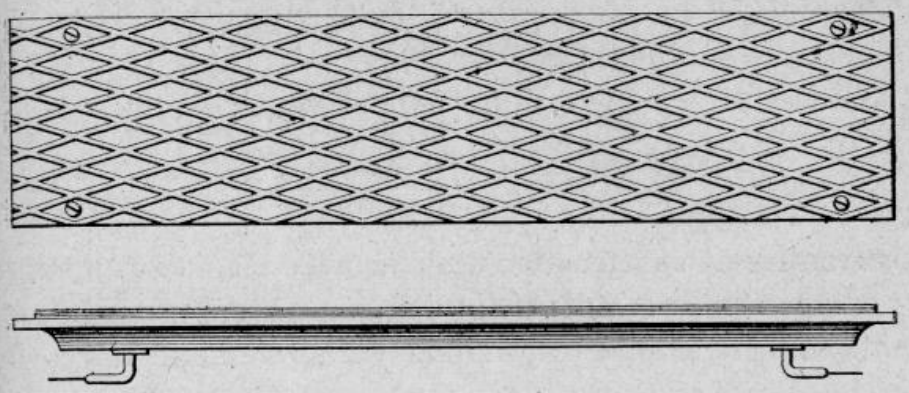


FIG. 448.

Chaufferette électrique.

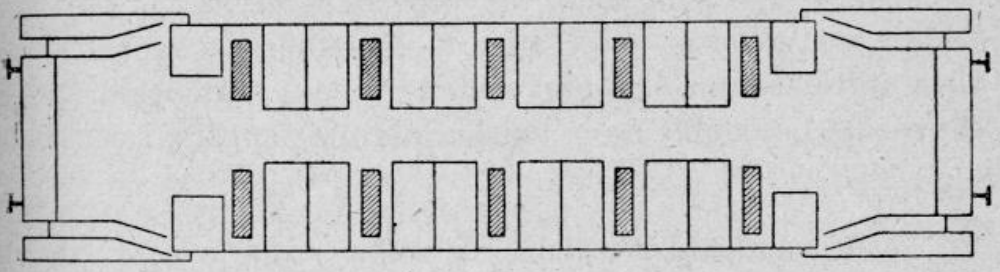


FIG. 449.

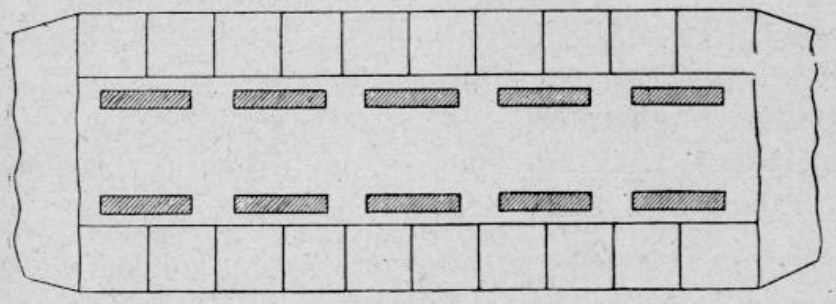


FIG. 450.

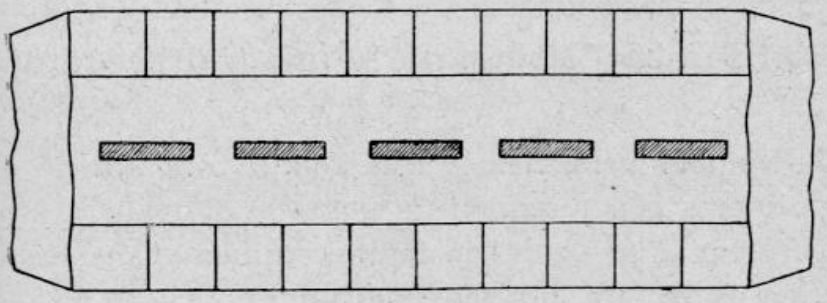


FIG. 451.

Fig. 449 à 451. — Disposition des chaufferettes dans une voiture.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

environ par place. La température des chaufferettes est de 70° pour une température ambiante de 0°.

Les voitures du groupe dit du Châtelet, sont chauffées de la même manière.

196. **Garanties de construction des chaufferettes.** — Les chaufferettes doivent présenter un isolement électrique suffisant entre la résistance chauffante et l'enveloppe. On impose généralement, après une immersion de plusieurs heures dans l'eau, un essai à une tension alternative efficace de 2.000 à 3.000 volts.

Elles doivent présenter une étanchéité parfaite à cause de l'humidité à laquelle elles sont soumises, provenant du lavage des voitures ou de la boue et de la neige apportées par les voyageurs.

Elles doivent enfin être prévues en vue des surtensions possibles sur le réseau. Le double de la tension normale suffit en général.

197. **Consommation d'énergie.** — D'après ce que nous avons vu, on peut en moyenne compter sur les consommations suivantes pour une voiture ordinaire de 25 mètres cubes ou 24 places :

$100 \times 25 = 2.500$ watts pour le mode de chauffage par radiateur, et $20 \times 24 = 480$, soit en chiffres ronds 500 watts pour le mode de chauffage par chaufferettes.

On en déduit, pour une journée de 16 heures, les dépenses suivantes, à raison de 1 kilowatt-heure pour 0 fr. 10.

1er système : $2.500 \times 16 = 40$ kilowatts-heure, soit 4 francs ;

2e système : $500 \times 16 = 8$ kilowatts-heure, soit 0 fr. 80.

III. — Équipement électrique d'une voiture automotrice.

198. **Dispositions générales.** — Une voiture automotrice quelconque comprend le plus généralement un poste de manœuvre à chaque extrémité permettant de marcher indifféremment dans les deux sens sans tourner la voiture aux têtes de ligne.

Dans ce qui suit, nous ne nous occuperons que du cas simple et général d'un équipement ordinaire, type tramway. Les équipements à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

unités multiples ou à haute tension, courant continu ou alternatif, en dérivent, mais leurs dispositions de détail diffèrent trop d'un cas à l'autre pour qu'il soit possible d'en donner un aperçu général.

Le système de prise de courant de beaucoup le plus employé pour les tramways électriques est celui par trolley, archet ou frotteur sur troisième rail. Viennent ensuite le système à caniveau et celui (qui a maintenant disparu) à contacts superficiels, utilisés principalement dans les parcours de villes sur lesquels on n'admet pas le trolley. Le trolley, complètement proscrit à Paris entre autres, dans les débuts de la traction électrique, est maintenant de plus en plus toléré. Il n'est pas douteux que ce système est assez peu esthétique, mais cette critique, quand elle ne forme pas une question primordiale, doit céder devant la supériorité économique du système.

Les tramways à accumulateurs ou à traction mixte accumulateurs et conducteur aérien, en faveur il y a quelques années, ne se développent plus. Certaines lignes utilisant ce système ont été transformées ; d'autres contiuent leur service ; mais il ne s'en crée pas de nouvelles ou du moins qu'exceptionnellement.

Dans tous les cas, l'équipement électrique des voitures comprenant les moteurs, appareils de manœuvre et de sécurité, et la câblerie, est à peu près le même quel que soit le mode de prise de courant. Ces différentes parties de l'équipement ont été décrites ailleurs. Il reste à indiquer comment elles sont disposées et reliées sur les voitures.

La figure 452 représente l'ensemble d'un équipement type d'une voiture à deux moteurs et à deux postes de commande, c'est-à-dire à deux contrôleurs.

Les connexions des touches des cylindres principaux avec le trolley, la terre, les moteurs et les résistances sont les mêmes pour les deux contrôleurs. Les fils joignant les induits aux inverseurs sont simplement croisés de manière que les connexions correspondant à la marche avant pour l'un des postes soient celles de la marche arrière pour l'autre poste.

La figure 453 représente en plan le schéma simplifié d'ensemble des connexions du même équipement de voiture à deux moteurs avec prise de courant par trolley et retour par les rails. Le courant venant du trolley T passe par un disjoncteur automatique D, puis par un interrupteur principal I. Ces deux appareils sont normalement fermés. Ils sont montés en série de telle manière qu'il suffise d'en ou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

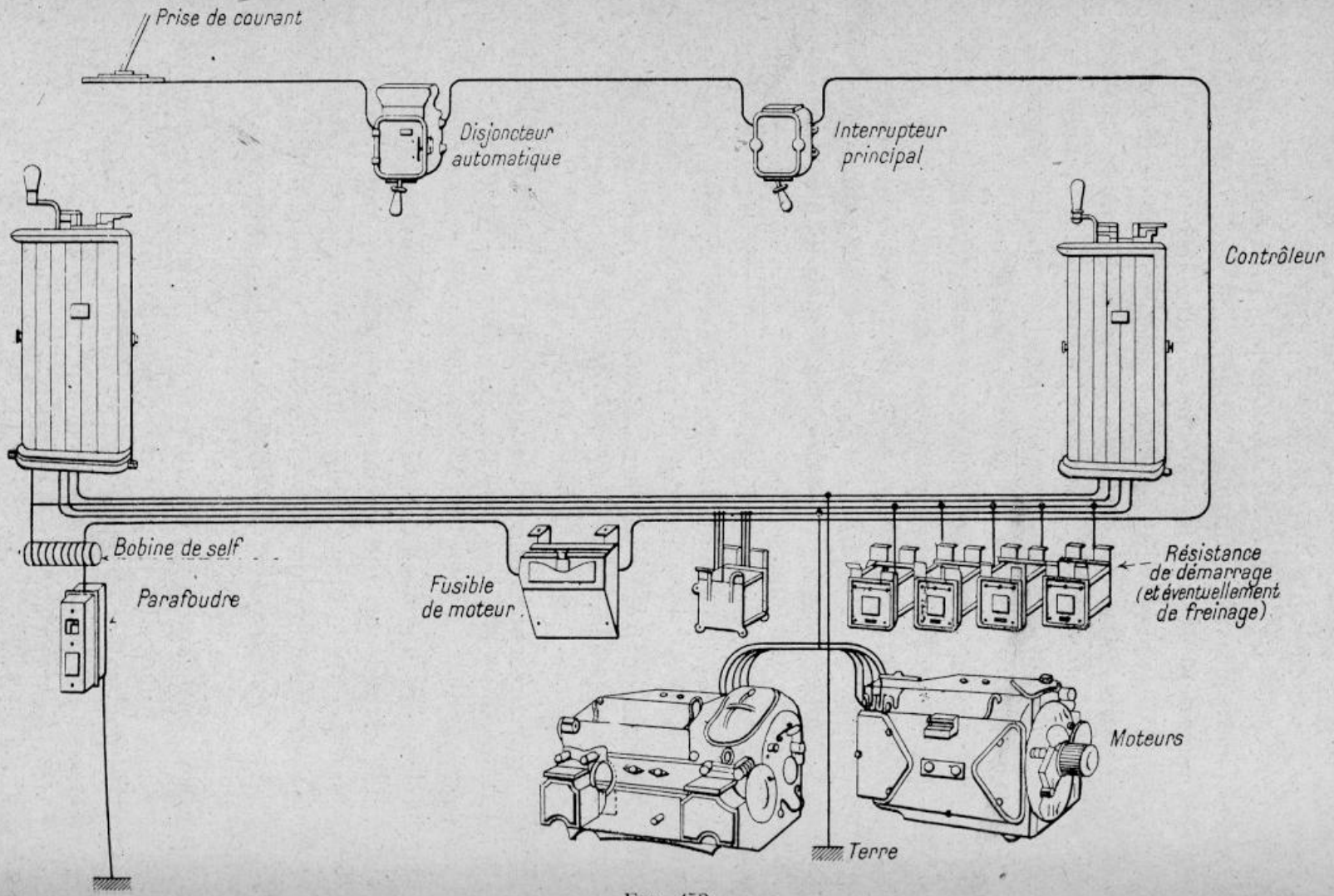


FIG. 452.

Schéma perspectif d'un équipement type à 2 contrôleurs série-parallèle et 2 moteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

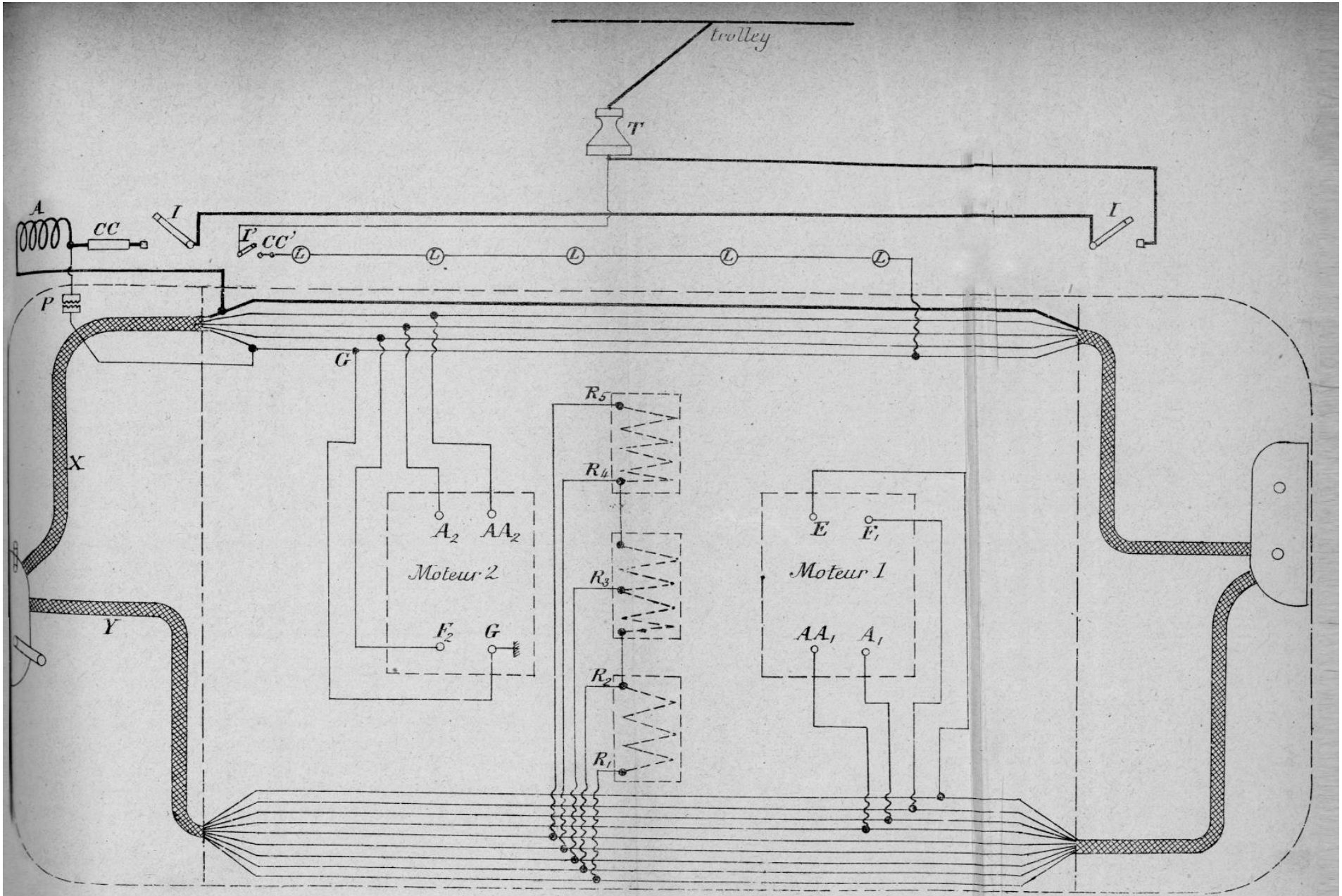


Fig. 453

Schéma simplifié des connexions d'un équipement à 2 moteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'une manière générale, aucun câble ne doit être visible à l'intérieur de la voiture.

L'éclairage normal comprend un ou plusieurs circuits de 5 lampes en série commandées par un interrupteur I′ et protégées par un fusible CC′. En plus, un éclairage de secours est installé ainsi que nous l'avons vu précédemment.

Les résistances sont fixées sous le châssis de la voiture, quelquefois sur le toit, de manière à être refroidies par le mouvement de l'air. Toutes les parties de l'équipement exposées à l'humidité sont recouvertes d'une peinture isolante et hydrofuge.

199. **Causes d'incendie et précautions à prendre pour la câblerie.** — Les causes d'incendie peuvent se ramener :

1° Au défaut d'isolement pouvant amener un échauffement local ; les précautions à prendre seront alors fonction de la tension. Ces précautions sont toutefois indépendantes des intensités et par la même des puissance mises en jeu.

2° Aux effets qui sont la conséquence directe de l'échauffement des différentes parties de l'équipement ; les précautions à prendre seront fonction de l'intensité. Il y a à en tenir compte dans le calcul des sections et du refroidissement par radiation.

3° Aux effets de la puissance à contrôler ; c'est cette cause qui entre en jeu dans un court-circuit franc et l'on en tient compte par des fusibles ou des appareils à déclenchement automatique. Le fonctionnement de ces appareils n'étant toutefois pas instantané, il pourra se produire à l'endroit du court-circuit un débit momentané très important.

Dans le cas de faibles puissances, comme en tramway, il est assez facile d'éviter de graves désordres.

En ce qui concerne l'isolement, on prend des câbles isolés à raison de 1 mégohm par volt, soit 5 à 600 mégohms pour 5 à 600 volts. Comme matériaux isolants, on emploie le bois sec, le bois paraffiné, la fibre, le carton d'amiante, la porcelaine et quelquefois le marbre. En raison des vibrations, il y a lieu de veiller spécialement à l'exécution des attaches de la câblerie en les faisant reposer sur des planches ou dans des rainures en bois.

En ce qui concerne les effets d'échauffement, il suffit, en général,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de calculer les sections des câbles à raison de 1,5 à 2 ampères par mm². Les sections de contact auront au moins cinq fois la section normale.

Enfin, en ce qui concerne les effets de la puissance, lesquels se produisent aux points de rupture du courant sous forme d'étincelles, on enferme ces points dans des chambres à parois infusibles et incombustibles (amiante par exemple) et le soufflage magnétique sera un auxiliaire particulièrement efficace.

Ces précautions ne suffisent plus dans le cas de puissances assez grandes, soit de 1.000 kilowatts. Quelques accidents ont montré que, dans la plupart des cas, le sinistre a été causé par le fonctionnement défectueux d'un des appareils de contrôle, interrupteurs, etc..., où un arc mal soufflé se transformait rapidement en four électrique.

Il y a eu aussi quelques cas dus à ce que la câblerie avait été endommagée par les vibrations.

La première mesure consistera donc à éloigner les uns des autres les points de l'équipement où se font les ruptures des courants principaux. Dans cet ordre d'idées, le remplacement du contrôleur à touches multiples par les interrupteurs séparés ou contacteurs a réalisé un progrès considérable.

Les appareils seront placés dans des cellules à parois isolantes, incombustibles et infusibles (marbre, fibro-ciment, grès).

D'une manière générale, tous les éléments combustibles devront être proscrits autant que faire se peut. En outre, on réduira autant que possible la longueur des gros câbles.

Certains ingénieurs préconisent l'emploi de tubes en fer ou acier dans lesquels on place la canalisation ; c'est une grosse sujétion pour l'entretien des câbles dont la visite est rendue très difficile et ceci demande une plus grande section de cuivre pour un refroidissement égal. Ce dispositif présente toutefois une grande sûreté et semble devoir se développer de plus en plus.

L'emplacement des appareils est assez variable : certaines Compagnies les réunissent dans de grandes cabines sous les yeux des agents (Métropolitain de Paris, Nord-Sud), d'autres les installent (cas de l'emploi des contacteurs) dans des caisses suspendues au châssis entre les bogies (méthode générale aux Etats-Unis).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVI

TRUCKS ET CAISSES DES VOITURES

I. — Trucks.

SOMMAIRE. — Trucks rigides à deux essieux parallèles. — Trucks à grand empattement à deux essieux. — Trucks rigides à trois essieux parallèles. — Trucks rigides à quatre essieux parallèles. — Bogies-trucks. — Bogies-trucks à traction maxima. — Trucks à essieux radiaux. — Essieu-monté et bandages.

II. — Caisses des voitures.

Matériaux employés. — Dispositions intérieures des voitures. — Aspect extérieur de quelques automotrices types. — Nouvelles voitures de tramway américaines. Chasse-corps, Ramasse-corps. — Attelages.

I. — Trucks.

200. **Trucks rigides à deux essieux parallèles.** — Un véhicule à deux essieux comprend toujours un *châssis* généralement métallique, reposant sur les deux essieux par l'intermédiaire de quatre ressorts (fig. 454).

Les deux essieux tournent dans des boîtes à graisse, coulissant elles-mêmes entre deux glissières verticales ou *plaques de garde* fixées au châssis et suspendues comme lui. Les ressorts sont placés entre le châssis et les boîtes à graisse. Le châssis comprend, en général, deux longerons extérieurs, des traverses intermédiaires et deux traverses de bout sur lesquelles sont fixées les pièces d'attelage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour améliorer la suspension des voitures, certains constructeurs interposent entre la caisse et le châssis une seconde suspension formée de caoutchouc ou de ressorts spiraux.

Enfin, dans les applications récentes et pour éviter les réactions plus ou moins atténuées des moteurs, on établit des *châssis à double suspension* sur lesquels vient se placer la caisse (fig. 455).

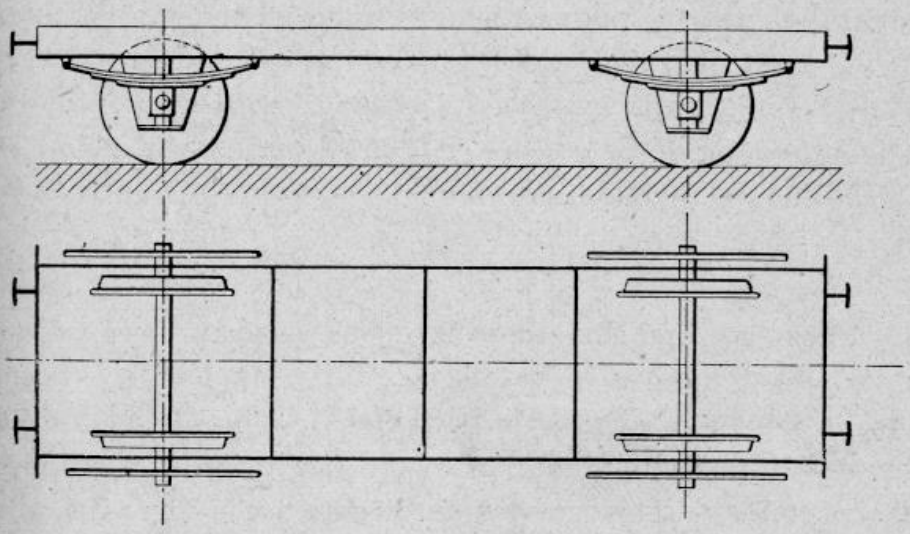


FIG. 454.

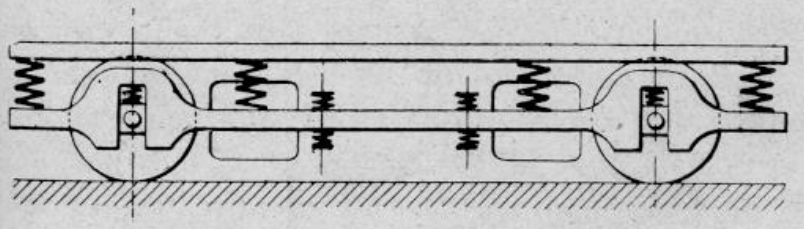


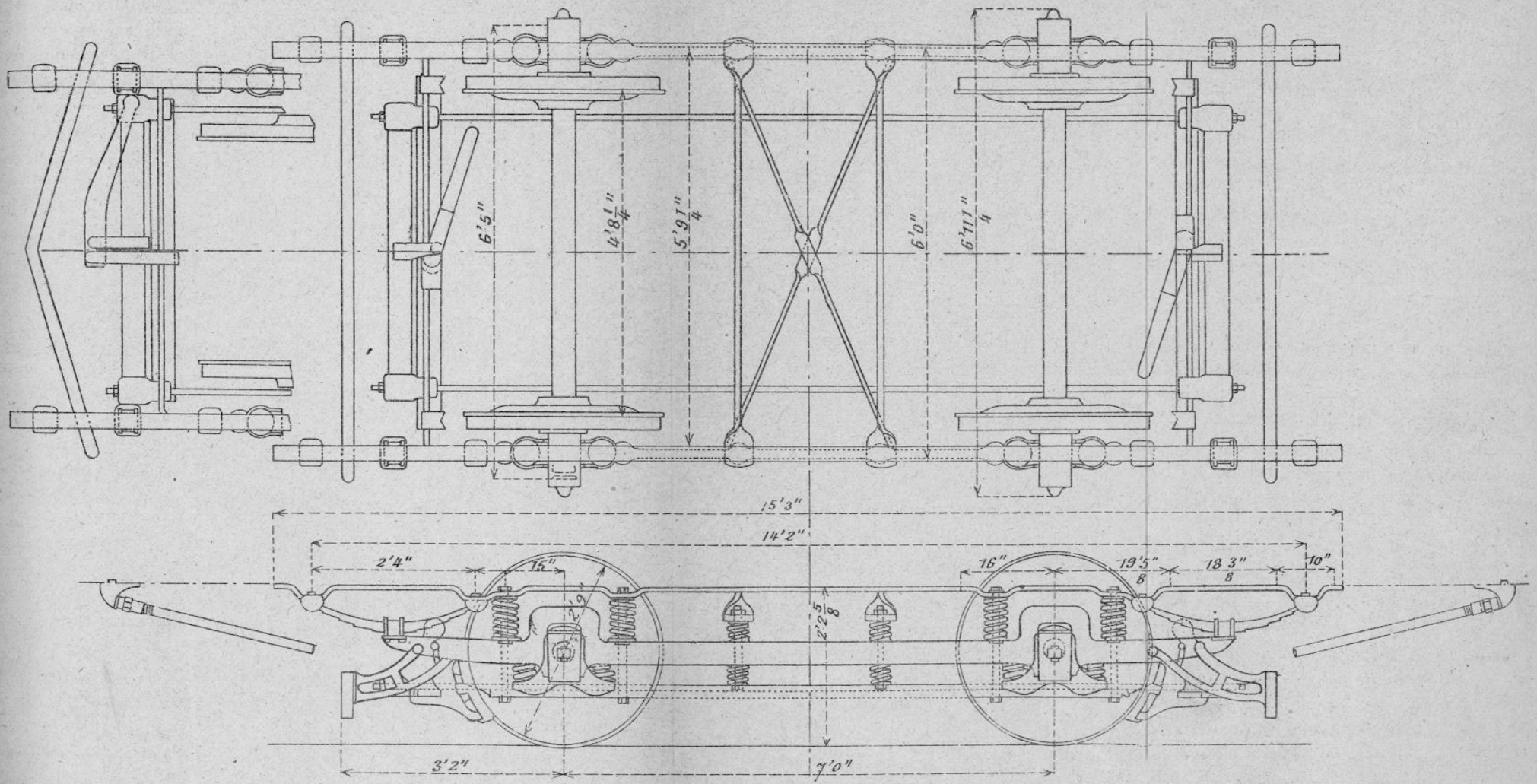
FIG. 455.

Il faut toutefois observer que la multiplicité des ressorts et organes élastiques peut finir par donner lieu à des mouvements de galop assez désagréables aux voyageurs.

Les figures 456-457 donnent le détail d'un truck normal Brill à deux essieux parallèles très employé.

Les valeurs les plus habituelles de l'empattement sont 1 m. 800, 2 mètres, 2 m. 133, 2 m. 440. Elles permettent difficilement l'emploi de caisses longues. Or, les exigences de l'accroissement du trafic con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Nota: Le signe ' indique une dimension en pieds . 1 pied = 304 m/m
Le signe " " pouces . 1 pouce = 25 m/m 4

Fig. 456-457 Truck rigide à 2 essieux type Brill.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 458.

Truck à grand empattement de la Société des Appareils de Levage, pour voiture automotrice à plate-forme centrale de la Compagnie générale des Omnibus de Paris. Châssis en tôle emboutie.

D'axe en axe des essieux. . . .	3m600	Longueur totale du truck. . . .	6m860
Diamètre des roues.	800 m/m.		

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

curremment avec les trucks ordinaires. Pour ces premiers, dont la figure 464 montre la disposition, on laisse un jeu de 3 millimètres entre les plaques de garde et les boîtes à graisse.

La Compagnie des chemins de fer Nogentais emploie aussi des trucks à grand empattement (3 m. 400), dont la disposition représentée sur la figure 465 est assez spéciale. Le truck se compose de deux longerons en acier embouti entretoisés par des fers profilés et munis de boîtes à graisse Isothermos supportant les ressorts à lames. Deux systèmes de traverses oscillantes (fig. 466), suspendues par des biellettes, supportent la caisse par l'intermédiaire de ressorts à boudins. Il n'y a aucun jeu entre les plaques de garde et les boîtes à graisse. Le rayon minimum des courbes est encore de 18 mètres et en ces endroits, le rail est à gorge de 32 millimètres.

D'une manière générale, les trucks à deux essieux parallèles ne permettent guère d'aborder sans difficulté des courbes dont le rayon soit inférieur à cinq fois l'empattement. Or, d'une part, le tracé d'un réseau de tramway dans une ville impose souvent des rayons très faibles et, d'autre part, ainsi que nous l'avons vu plus haut, les nécessités du trafic peuvent imposer des caisses longues. Quand ces conditions seront incompatibles, il y aura lieu de s'adresser soit aux voitures à *trucks à essieux radiaux,* soit aux voitures à *bogies,* que nous étudierons plus loin.

202. **Trucks rigides à trois essieux parallèles.** — Ces véhicules sont peu employés dans les tramways, mais on les trouve en assez grand nombre dans les chemins de fer P.-L.-M. français et en Angleterre. Les Allemands les emploient fréquemment dans la grande traction électrique.

Avec ce système, il est assez difficile d'obtenir une répartition convenable des charges entre les trois essieux.

L'empattement pour une voie normale va jusqu'à 10 m. 500, mais alors l'essieu du milieu est presque toujours prévu en vue de permettre un important déplacement latéral, pour faciliter le passage en courbe. Nous avons signalé des réalisations de ce dispositif à propos des locomotives du Simplon (§ 102).

203. **Trucks rigides à quatre essieux parallèles ou davantage.** — De tels trucks ne se rencontrent guère que dans la construction de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 459 à 463. Truck à grand empattement (3m 600) des automotrices électriques de la Cie Gale des Omnibus de Paris.

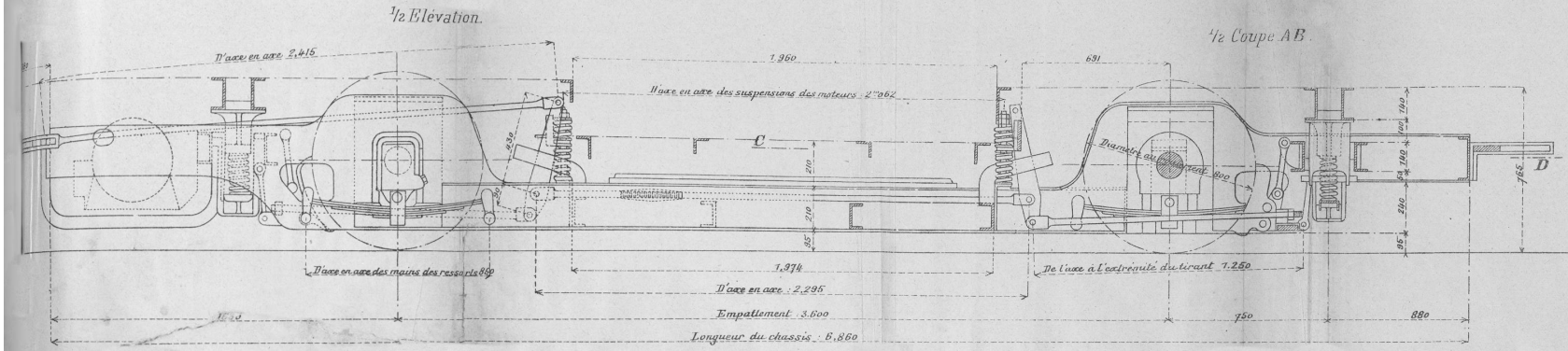
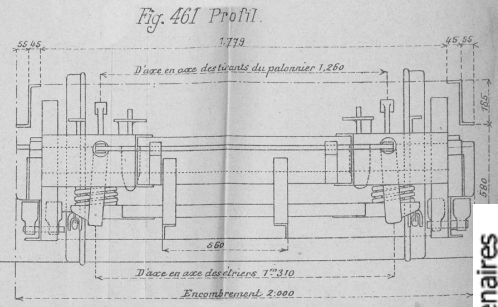
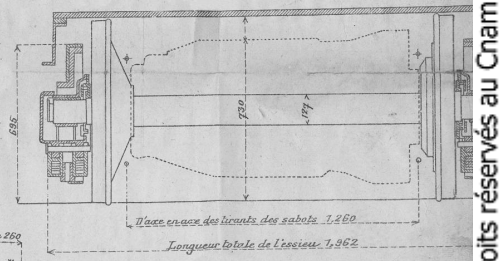


Fig. 459





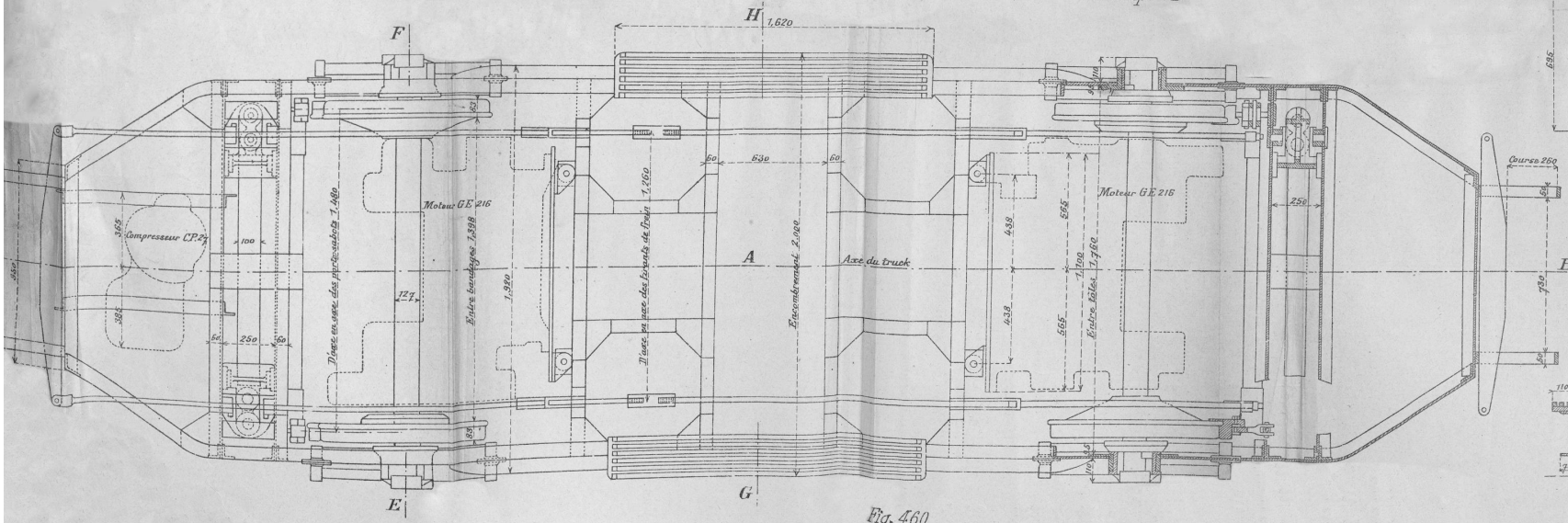
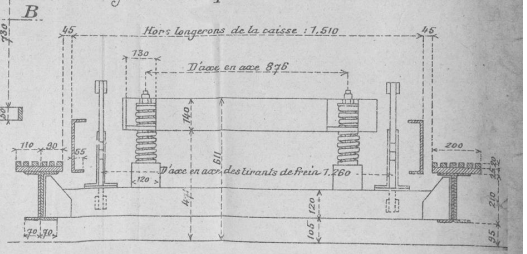


Fig. 460



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

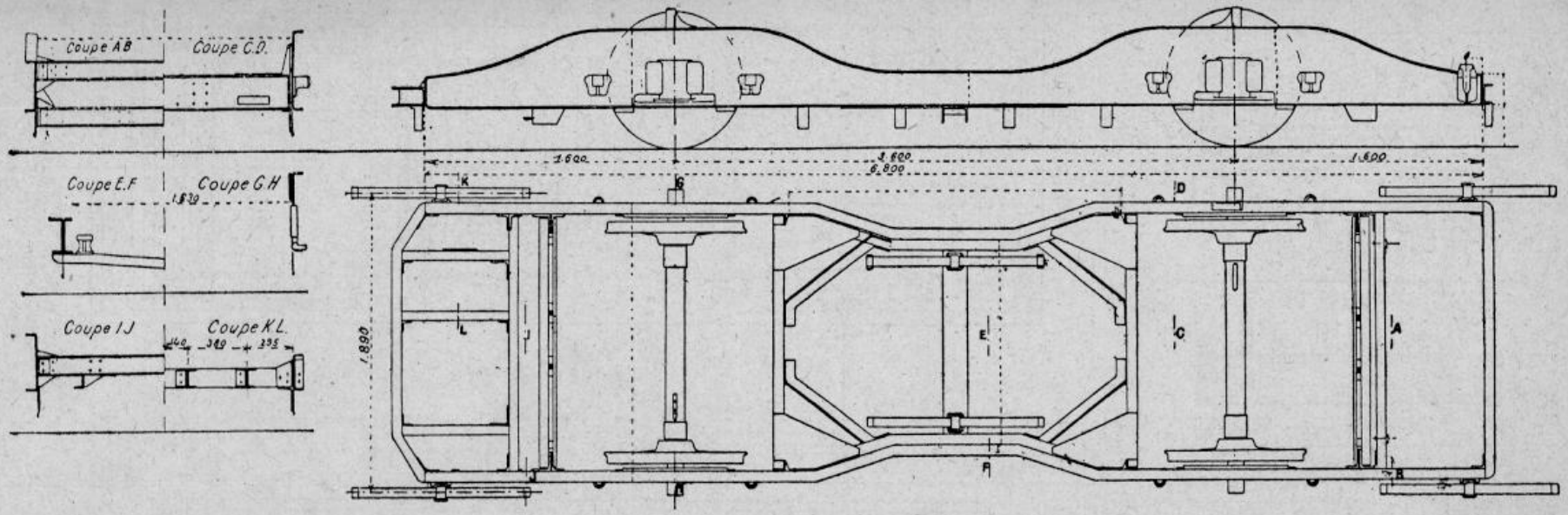


FIG. 464.

Truck à grand empattement de la Compagnie des Tramways de Paris et du département de la Seine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

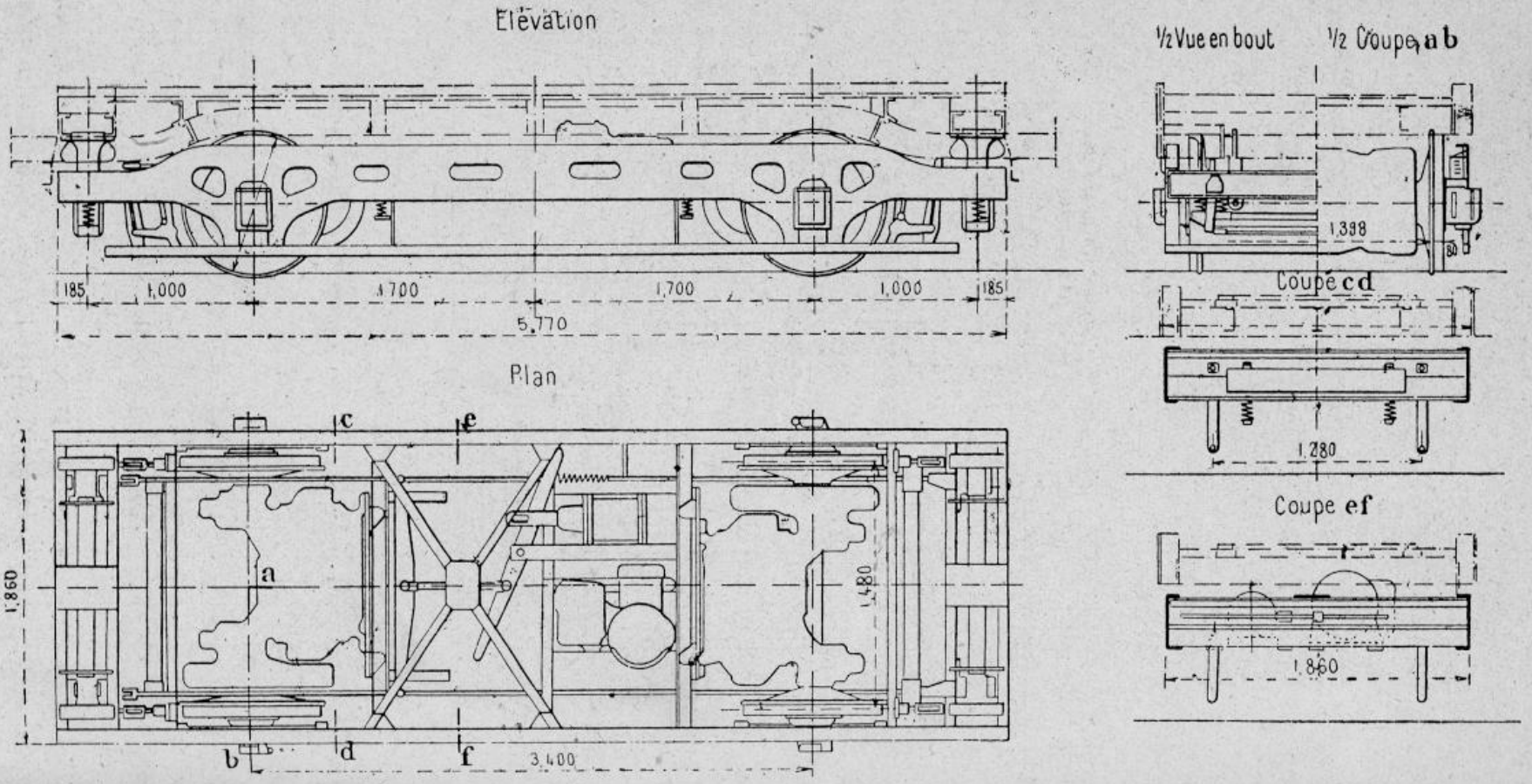


FIG. 465.

Truck à grand empattement de la Compagnie des Chemins de fer Nogentais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

locomotives (Simplon, Giovi, New-York Central, Loetschberg, etc...), lesquelles comprennent en outre généralement, à chaque extrémité, soit un pony-bogie porteur à un essieu, soit un bogie normal, ainsi que nous avons eu l'occasion de le voir à diverses reprises. La même observation que ci-dessus, relativement au passage en courbe, est à faire (Voir § 102, locomotives du Giovi et du Loetschberg en particulier).

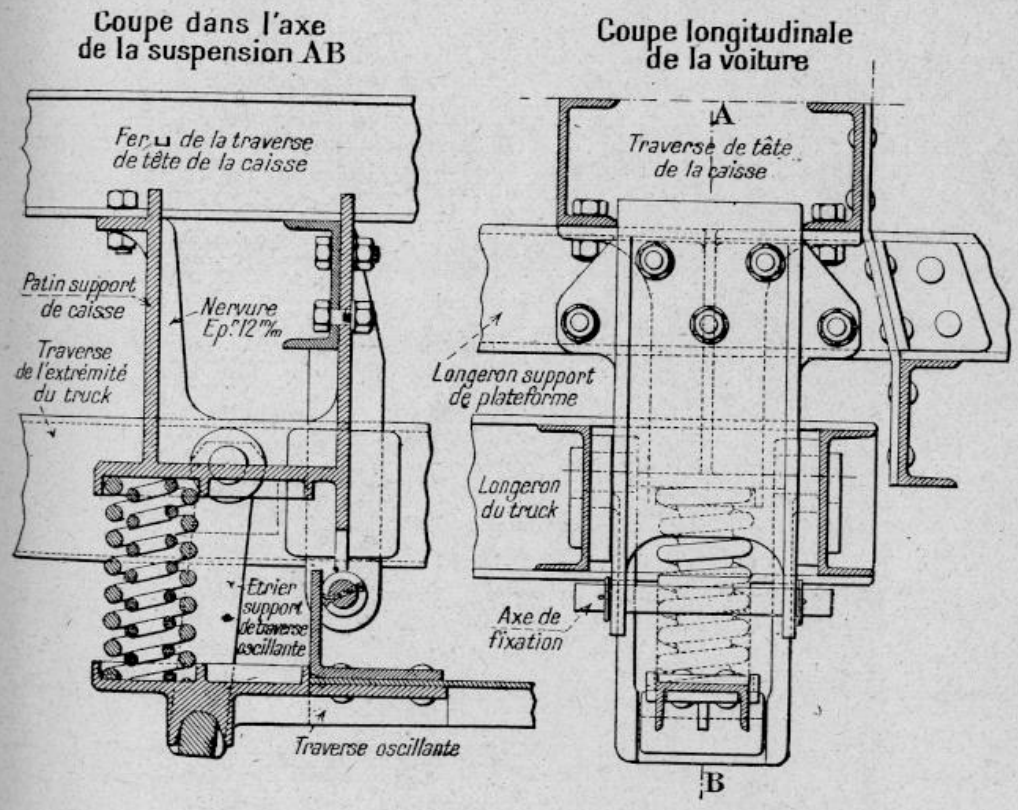


FIG. 466.

Détails de la suspension oscillante du truck de la Compagnie des Chemins de fer Nogentais.

204. **Bogies-trucks.** — Dans tous les cas précédents, la caisse du véhicule était directement montée sur un *ensemble rigide* portant sur les essieux montés par l'intermédiaire de ressorts. Cet ensemble rigide est dit *truck*.

Pour les véhicules dépassant 10 à 12 tonnes, on tend de plus en plus à employer le *bogie-truck* ou simplement *bogie*. La caisse de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voiture est alors portée sur deux de ces trucks ou bogies (fig. 467), qui sont le plus souvent à deux essieux, par l'intermédiaire de deux pivots portés chacun par une pièce transversale médiane du bogie correspondant.

Cette traverse M (fig. 468) dite *traverse danseuse* (swinging bolster) repose par l'intermédiaire de ressorts spiraux ou elliptiques sur une autre traverse placée au-dessous et parallèle à la première.

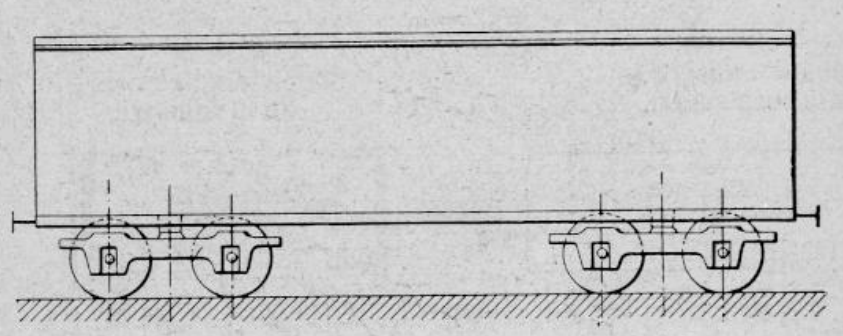


Fig. 467.

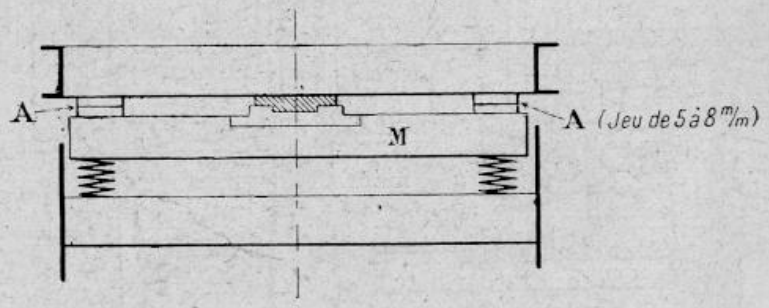


Fig. 468.

Cette traverse inférieure est habituellement suspendue élastiquement aux longerons du bogie (type Brill) ou à deux entretoises (transoms) les reliant rigidement. Ces entretoises sont symétriques par rapport au plan vertical transversal passant par le pivot et forment guides verticaux pour la traverse danseuse, pour son mouvement vertical résultant de la flexion des ressorts spiraux ou elliptiques précités.

La suspension de la traverse inférieure est généralement réalisée en quatre points au moyen de biellettes disposées le plus souvent de manière à offrir une suspension élastique. Les axes de ces biellettes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

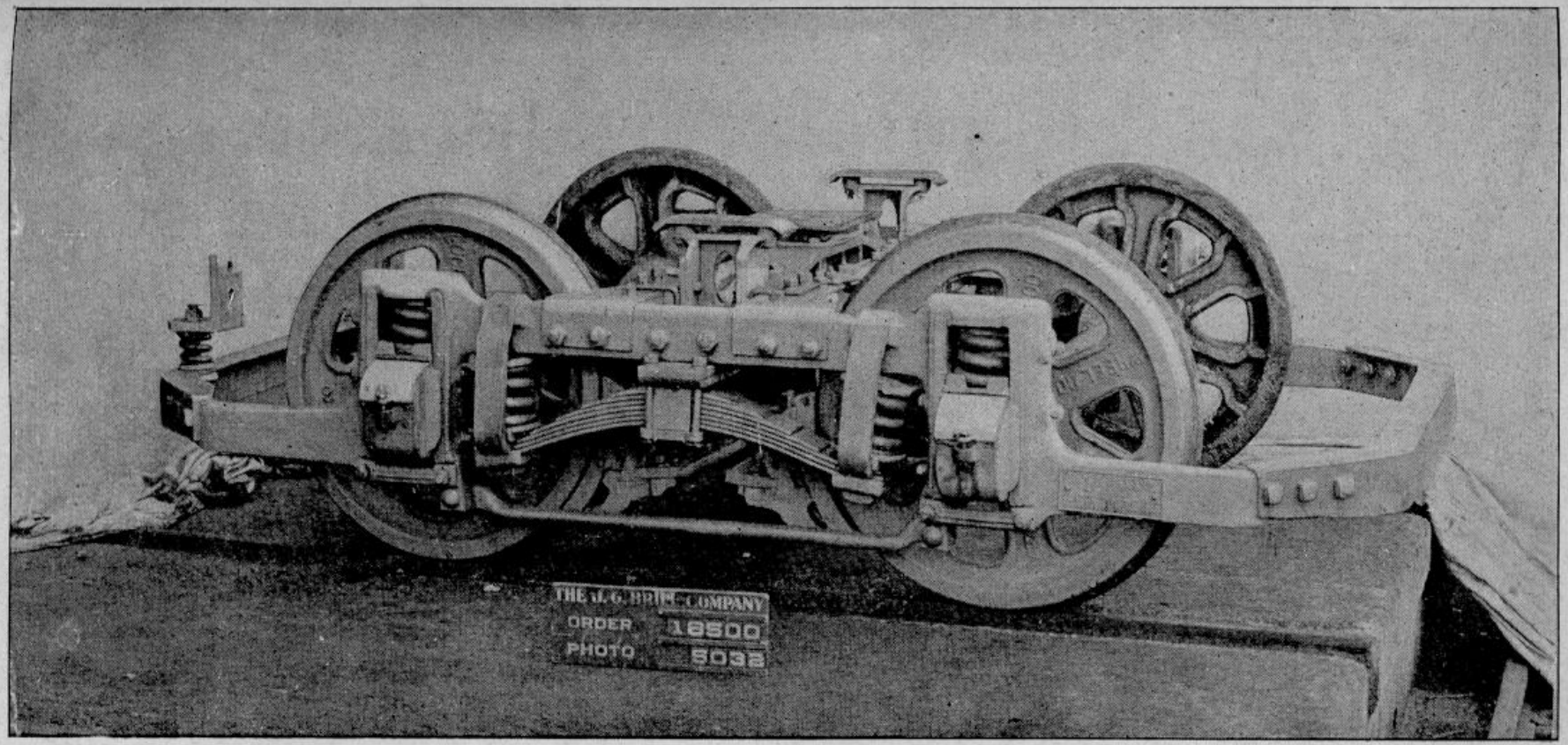


Fig. 469.

Bogie à petit empattement de la Compagnie américaine J.-G. Brill, pour moteurs extérieurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peuvent être verticaux — donc parallèles (Brill) — ou former les arêtes d'une pyramide — donc inclinés — dont le sommet est au-dessus du bogie, dans la direction du pivot.

On voit bien que ce mode de suspension de la traverse inférieure permet un mouvement oscillant transversal à la traverse danseuse (outre son mouvement vertical) et on comprend qu'il favorise beaucoup l'inscription dans les courbes en évitant, ou au moins en réduisant les mouvements de lacets et les chocs qui tendent à se produire à leur entrée. Quelquefois, souvent dans le cas de locomotives, il n'est pas nécessaire de recourir à ce mode de suspension de la traverse inférieure et celle-ci est seulement fixée rigidement aux longerons du bogie. La traverse porteuse du pivot, qui n'est plus à proprement parler danseuse, a seulement alors un mouvement vertical guidé par les mêmes entretoises que précédemment.

Le système de suspension par biellettes inclinées est excellent pour une suspension verticale, mais ne donne pas de résultats aussi bons pour l'amortissement des réactions latérales.

Le pivot du bogie est un *axe de rotation*. Il y a, en plus, pour assurer l'équilibre transversal de la caisse, deux glissières supports, une à chaque extrémité de la traverse danseuse, sur laquelle s'appuie et glisse horizontalement la caisse de la voiture quand les bogies tournent autour de leurs axes dans les passages en courbe. Pour faciliter ce glissement, on laisse entre deux glissières opposées en A (fig. 468), l'une appartenant à la caisse et l'autre à la traverse, un jeu d'environ 8 millimètres.

Les photographies (fig. 469 et 470) représentent deux bogies de la Compagnie Américaine J. G. Brill. On y voit clairement sur chacune d'elles la traverse danseuse avec ses glissières et son mode de suspension, réalisé d'ailleurs différemment sur l'un et l'autre de ces bogies. La première se rapporte à un bogie à petit empattement pour moteurs extérieurs et la seconde à un bogie à grand empattement pour moteurs intérieurs.

La figure 471 représente un bogie-moteur des automotrices de la Compagnie du Métropolitain de Paris et la photographie (fig. 472) un bogie-moteur des automotrices des chemins de fer Nord-Sud.

Nous rappelons en outre ici quelques-uns des trucks et bogies dont nous avons donné antérieurement, en différentes occasions, les dessins ou photographies, notamment la figure 221 représentant le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

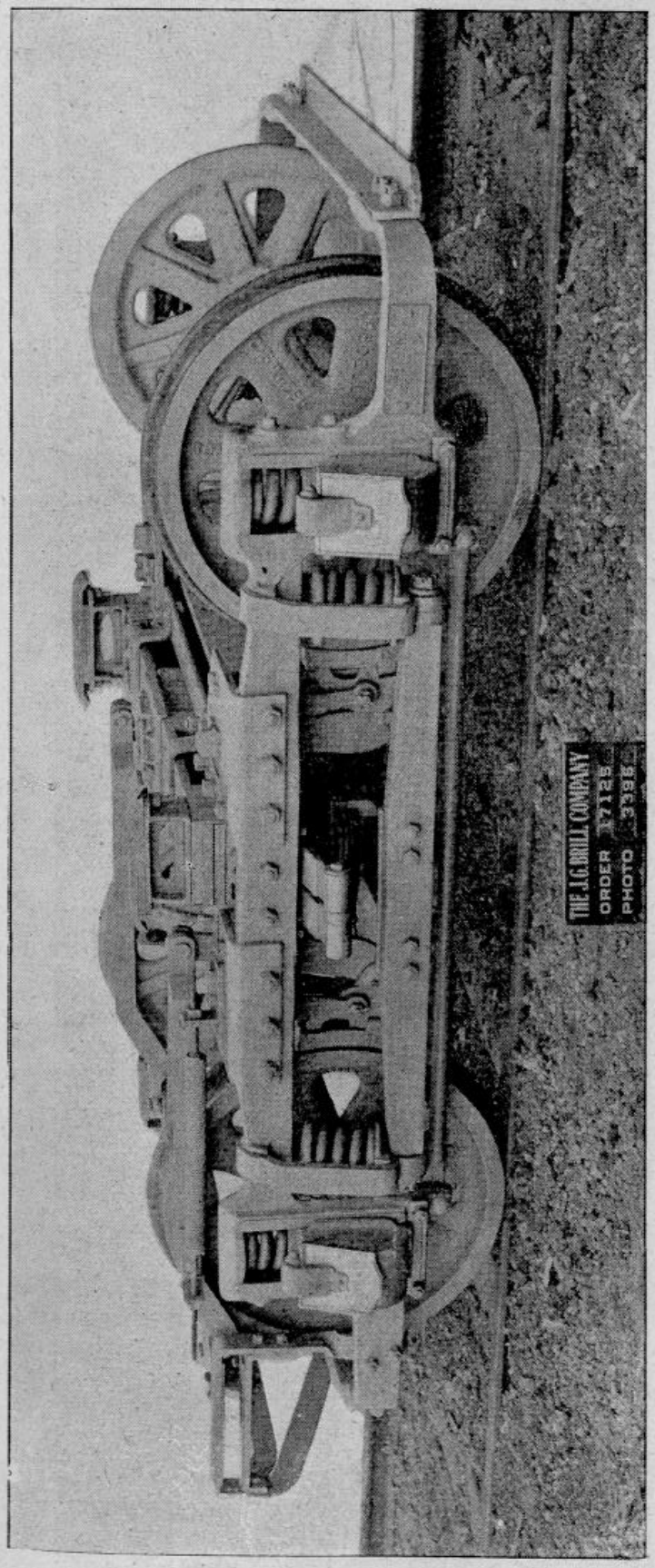


FIG. 470.

Bogie à grand empattement de la Compagnie américaine J.-G. Brill, pour moteurs intérieurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

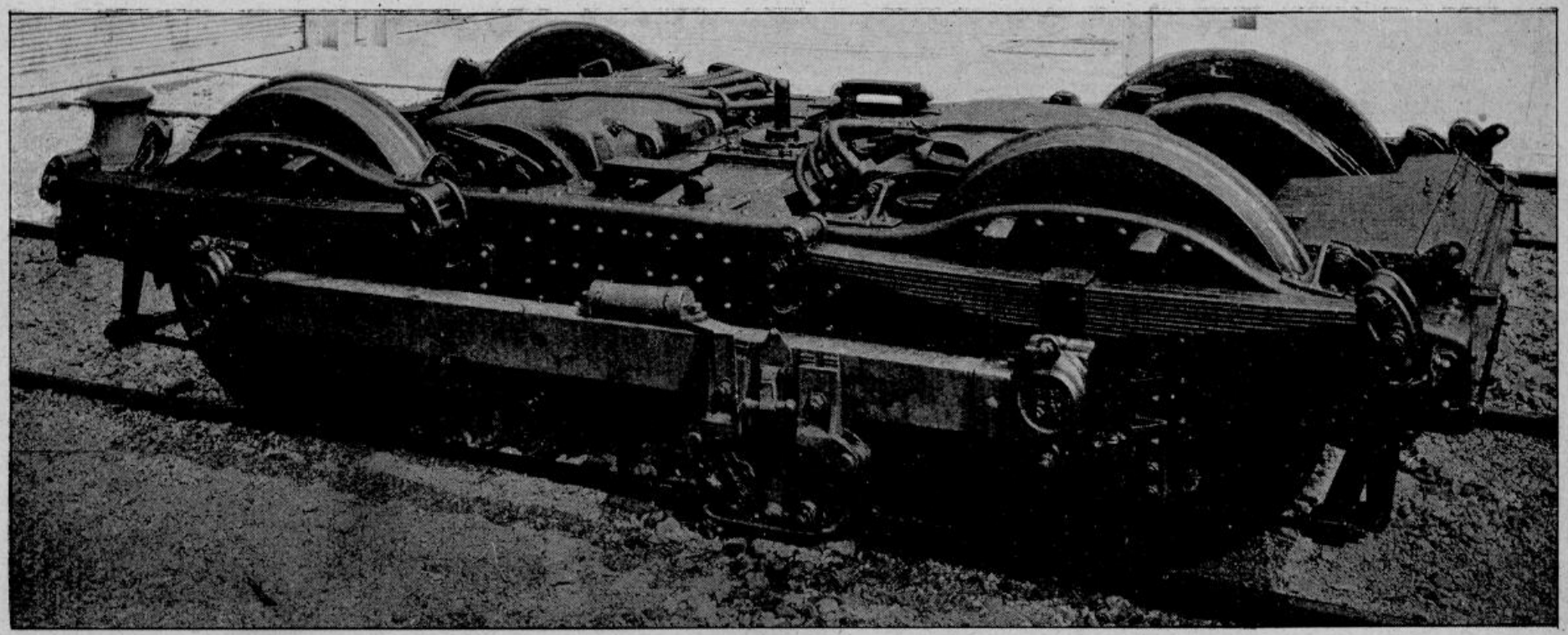


FIG. 472.

Bogie-moteur des automotrices du Chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

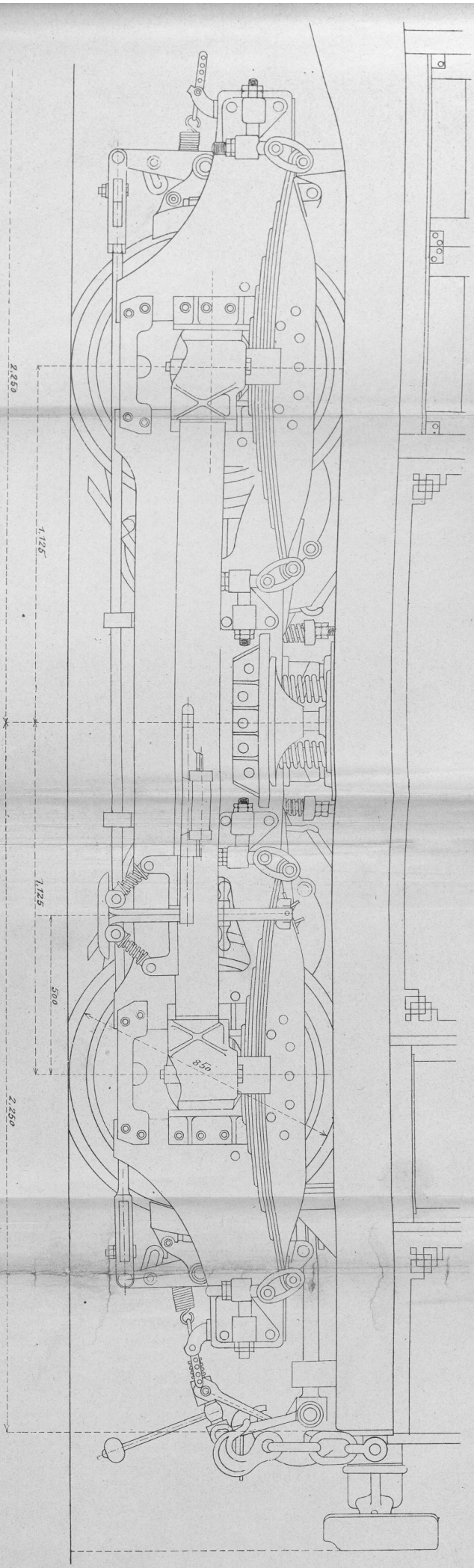


Fig. 47 Bogie moteur Cie du Metropolitain.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

truck des locomotives à moteurs à action directe Brown-Boveri, de la ligne Paris-Invalides-Versailles, la figure 225 le bogie-moteur des locomotives Westinghouse du New-York-Haven, la figure 231 le bogie des locomotives Thomson-Houston du Paris-Orléans, les figures 246-249-250 le truck et le bogie-moteur des locomotives à engrenages du Milwaukee, de la General Electric, etc...

Le bogie-truck comprend quelquefois *trois essieux-moteurs* parallèles, dans le cas du matériel lourd.

Dans le cas des bogies à deux essieux, les charges se répartissent d'elles-mêmes, mais avec trois essieux il n'en est pas ainsi et il y a lieu d'employer des balanciers égalisateurs de suspension, suivant le schéma de la figure 473.

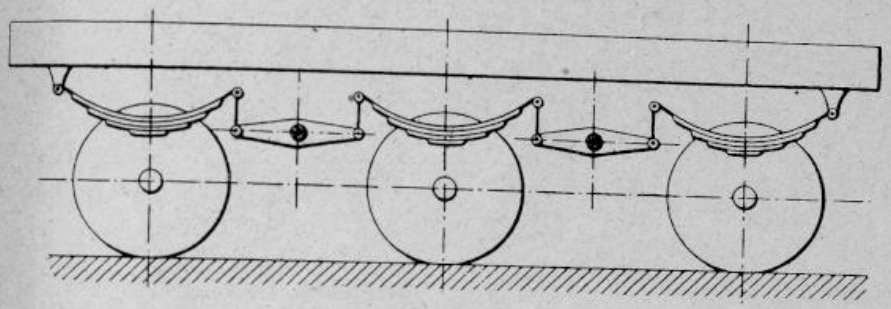


FIG. 473.

A titre d'exemple, la photographie (fig. 474) représente un truck à trois essieux équipé avec moteurs triphasés Siemens-Schuckert et qui a été employé dans les essais de traction à grande vitesse de Berlin-Zossen. On y voit, outre l'emplacement du pivot dans l'axe du bogie, quatre glissières-supports également réparties sur une circonférence concentrique à cet axe qui remplissent le même rôle que les deux glissières-supports des extrémités de la traverse danseuse du bogie à deux essieux : assurer la stabilité transversale de la caisse. Mais elles assurent, en outre, la stabilité longitudinale du bogie-truck qui serait instable s'il n'était chargé qu'en son milieu.

Les nouvelles automotrices électriques de banlieue de l'Ouest-Etat (ligne Paris-Invalides-Versailles) sont à bogie à trois essieux dont deux moteurs. Nous donnons plus loin un schéma montrant l'ensemble de ces voitures.

Le *truck-rigide* est très employé pour les tramways, il l'est à peu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

près universellement pour les locomotives, mais assez rarement dans le cas d'automotrices pour lignes de chemins de fer où on emploie

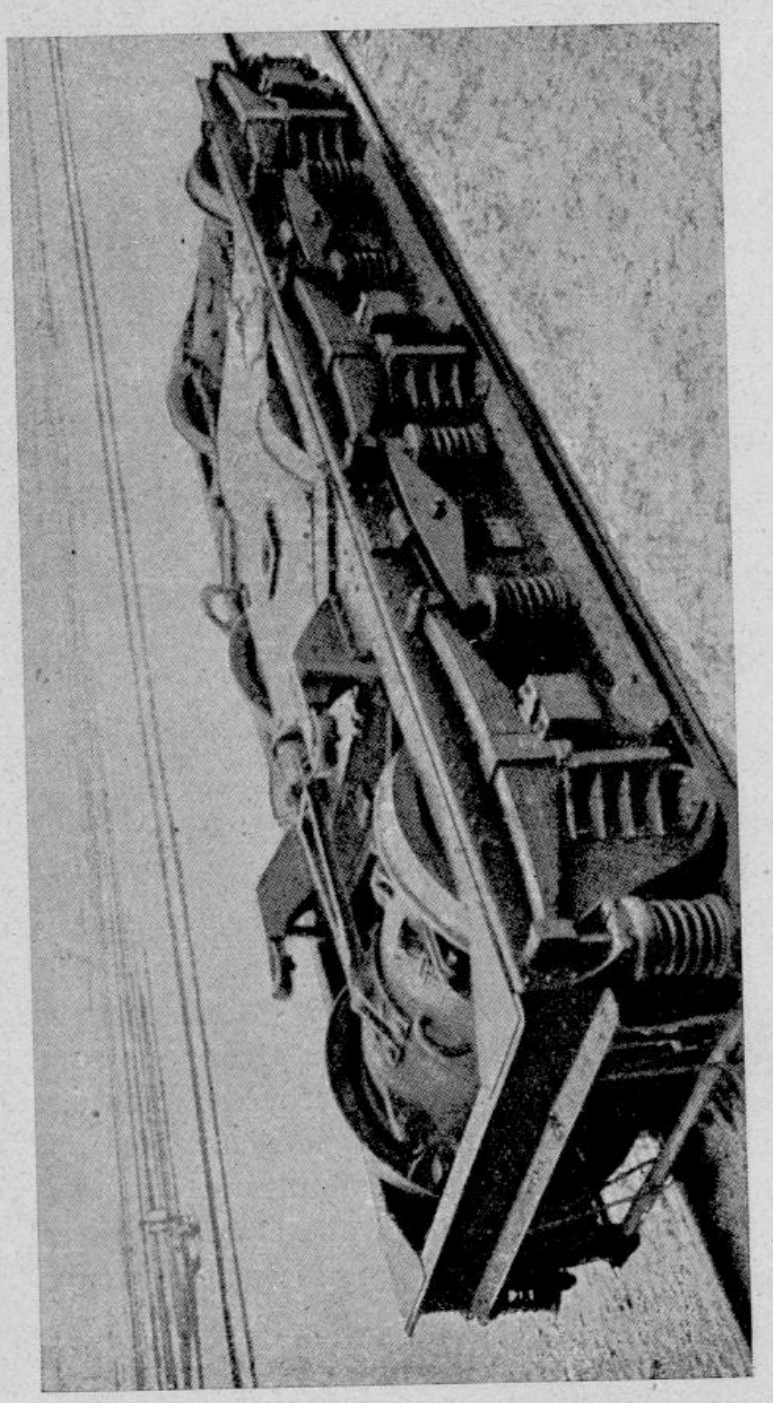


Fig. 474.
Bogie-truck à 3 essieux Siemens-Schückert (Essais Berlin-Zossen).

plutôt le *bogie-truck*. Le chemin de fer Métropolitain, à Paris, est probablement le seul exemple de traction de ce genre où il est fait emploi de voitures montées sur trucks rigides, mais ce type disparaît

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et les nouvelles voitures sont montées sur deux bogies à deux essieux. Les automotrices à truck rigide ne sont d'ailleurs plus qu'exceptionnellement en service.

On se rend facilement compte des avantages du bogie : répartition parfaite et automatique des charges sur les essieux, inscription facile dans les courbes, suspension commode à établir et toujours satisfaisante, entretien simplifié par la possibilité de remplacement des bogies, inertie transversale réduite au minimum.

Les empattements des bogies varient généralement dans les limites suivantes :

	2 essieux	3 essieux
Voie de 0m60.	0m,80 à 1m,20	» »
— 1m ».	1m,20 à 2m, »	» »
— 1m44	1m,60 à 2m,70	2m,40 à 3m,50

205. **Bogies-trucks à traction maxima.** — Ce sont des bogies à roues inégales. Cette construction permet d'obtenir une adhérence suffisante avec un seul essieu moteur, duquel on doit en outre rapprocher le pivot-support pour augmenter sa charge. Ce système permet de répartir sur les essieux moteurs de 60 à 80 p. 100, suivant le type de bogie, du poids total de la voiture.

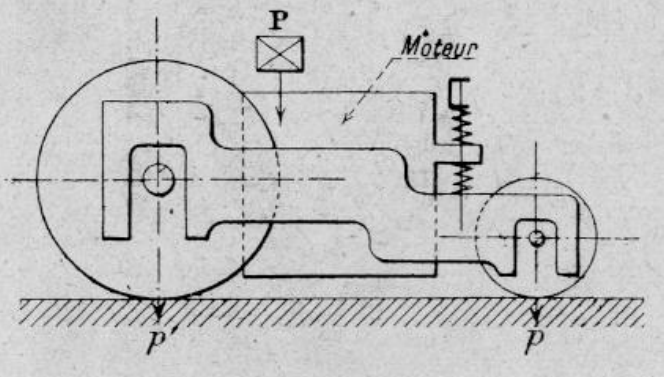


Fig. 475.

Bogie truck à traction maxima.

La figure 475 représente schématiquement un tel bogie et la photographie (fig. 476) montre un bogie Brill de ce genre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

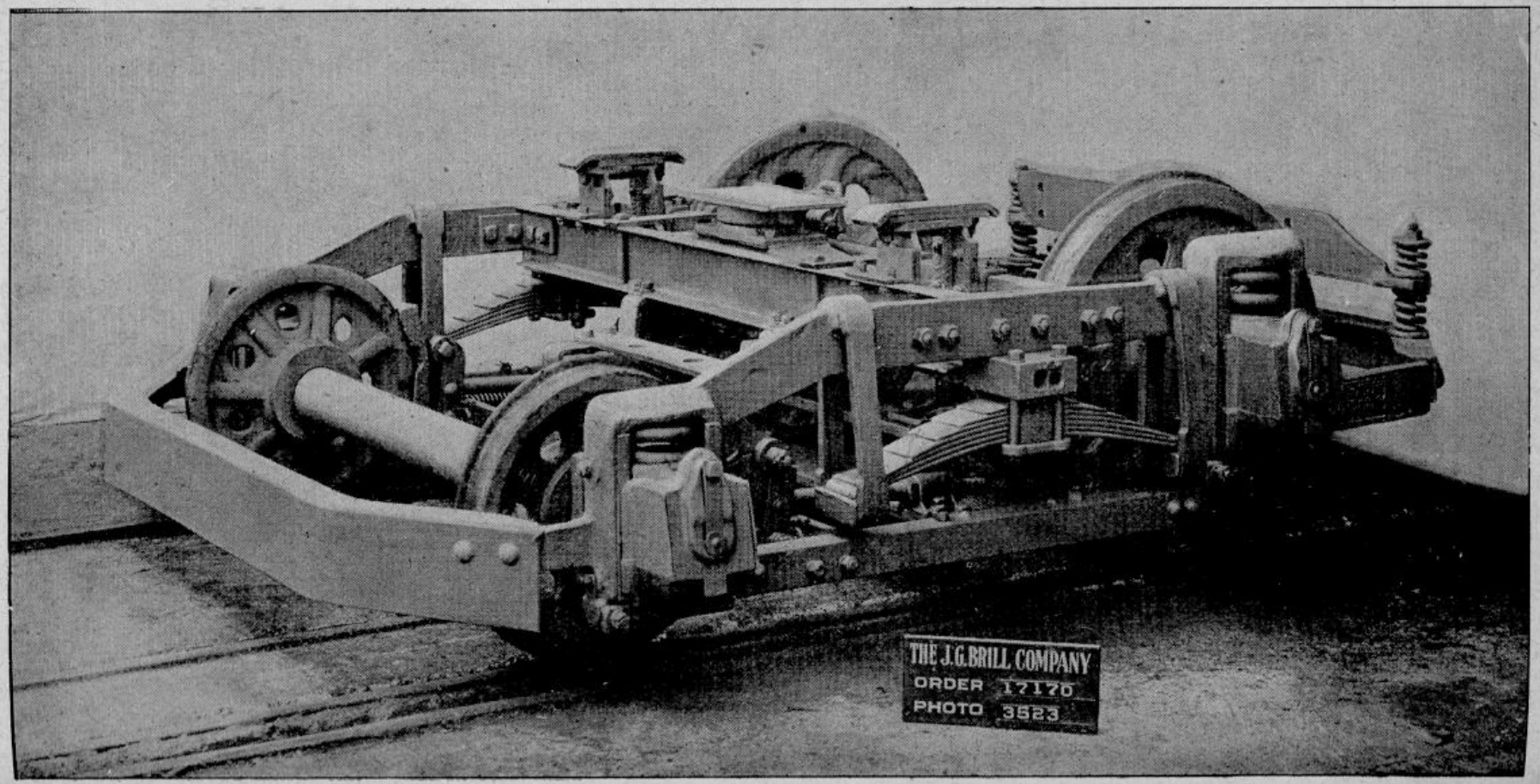


FIG. 476.

Bogie Brill maximum traction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

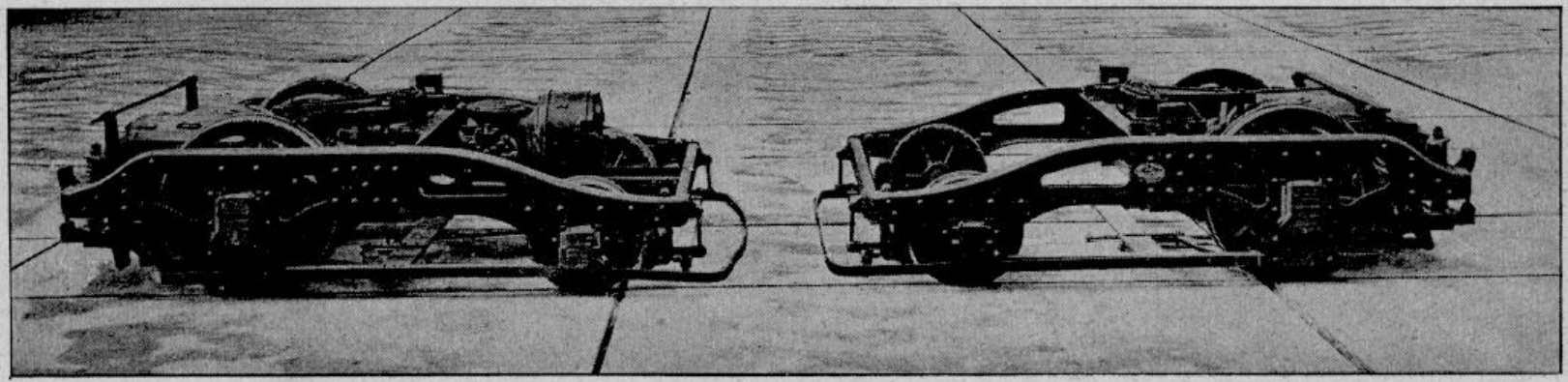


FIG 477.

Bogies maximum traction à galets, montés sur traverse oscillante et châssis en tôle emboutie de la Société des Appareils de Levage, pour voiture automotrice à plate-forme centrale de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris.

Diamètre des roues motrices. . . . 800 m/m. | Diamètre des roues pilotes. . . . . 500 m/m. | Empattement. . . . 1m,510

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les figures 477 à 480 représentent un bogie maximum traction du type de ceux construits par la Société de Construction et de Location d'Appareils de Levage pour les nouvelles automotrices à bogies de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris. Avec ce bogie particulier, l'adhérence est de 64 à 66 p. 100, suivant la charge de la voiture. Son empattement est 1 m. 510. La Compagnie des Tramways de l'Est-Parisien emploie uniquement pour ses automotrices des bogies maximum traction dérivés du type Brill et donnant une adhérence de 72 à 73 p. 100.

206. **Trucks à essieux radiaux.** — Ce genre de trucks a pour but d'éviter l'emploi de bogies sur des voitures de longueur assez restreinte et aussi d'éviter les empattements trop réduits nuisant à la stabilité longitudinale du véhicule, moyens qui seraient nécessaires dans le cas de passage en courbes de petits rayons.

Un truck à essieux radiaux joue en somme le rôle d'un ensemble de deux bogies à un seul essieu chacun.

Le truck lui-même est rigide, mais des dispositions sont prises afin de permettre aux essieux de se placer suivant le rayon quand la voiture franchit une courbe tout en restant parallèles entre eux et perpendiculaires à la voie en alignement droit. Dans de telles conditions, la position des essieux est fonction du tracé de la voie et il en résulte que les entrées en courbe sont facilitées, d'où une moindre usure des boudins des bandages et des rails. L'adoption de grands empattements est de plus possible, d'où amélioration de la stabilité longitudinale de la voiture, tout en permettant l'emploi de caisses de plus grandes capacités.

Enfin, dans certains cas, un tel truck pourra remplacer une paire de bogies, d'où prix moins élevé.

Une difficulté dans la réalisation du truck à essieux radiaux est de faire en sorte que les essieux reviennent à leur position normale quand une courbe est franchie, or c'est là une condition essentielle.

De nombreux types de trucks à essieux radiaux ont été essayés avec plus ou moins d'insuccès. Nous donnerons seulement le dernier modèle de la Compagnie J.-G. Brill, dont quelques exemplaires ont été mis en service sur le réseau des Tramways de Nancy.

La figure 481 représente un demi-truck Brill à essieux radiaux de ce genre et la photographie 482 en montre l'aspect.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 478. Elévation.

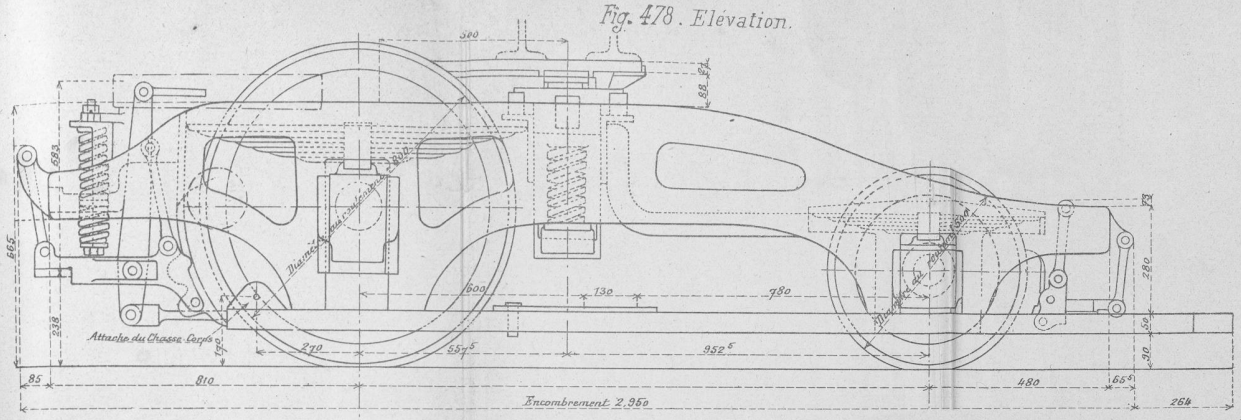
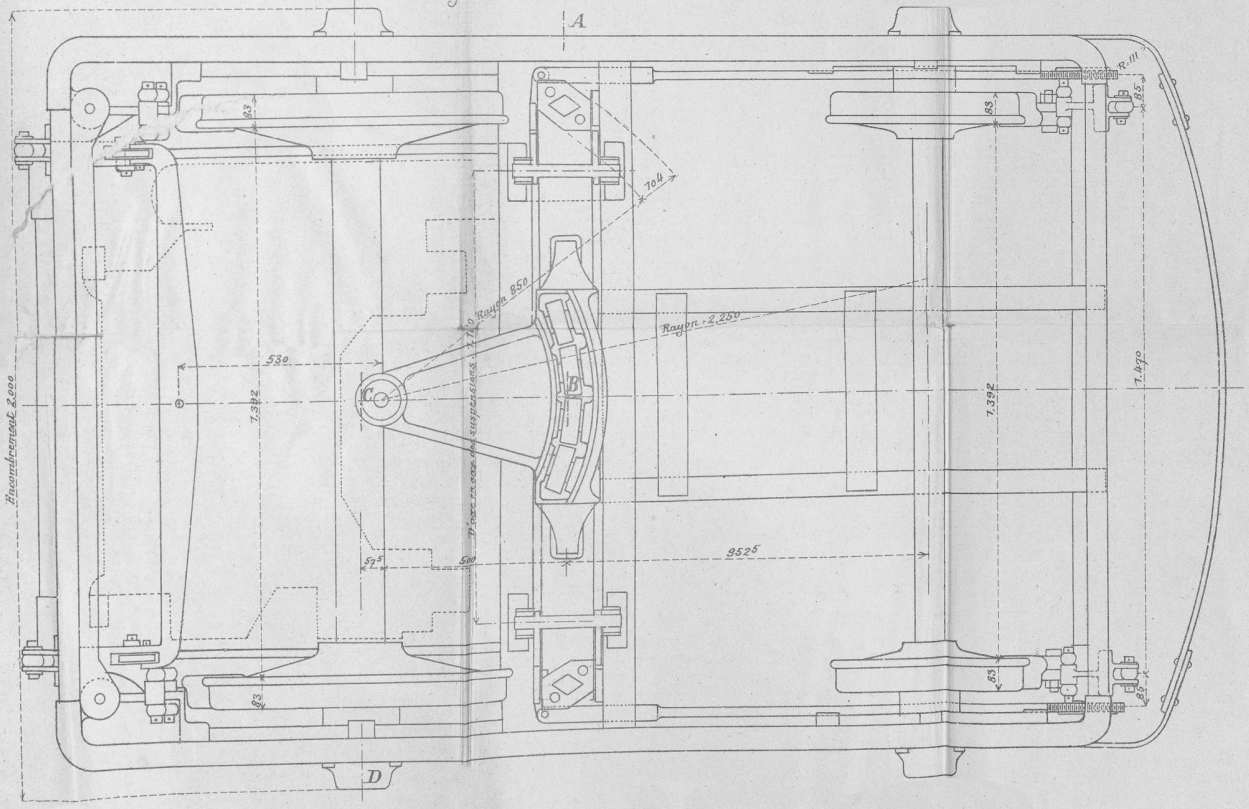


Fig. 479 Vue en Plan



½ Coupe par AB. ½ Coupe par CD.

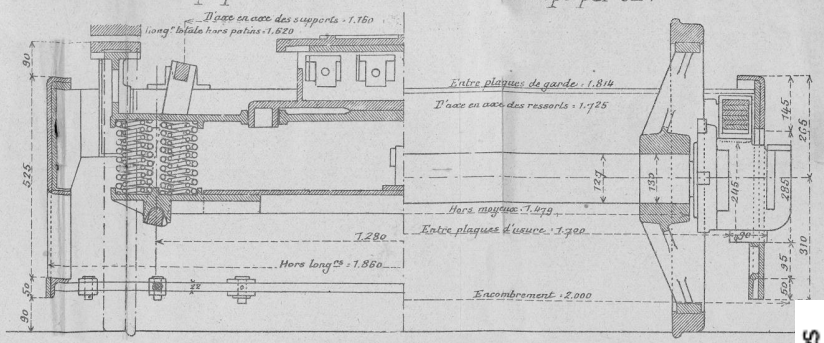


Fig. 480

Fig. 478 à 480. Bogie maximum traction des automotrices électriques de la Cie Gale des Omnibus de Paris.

Ensemble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 481.

Truck Brill à essieux radiaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

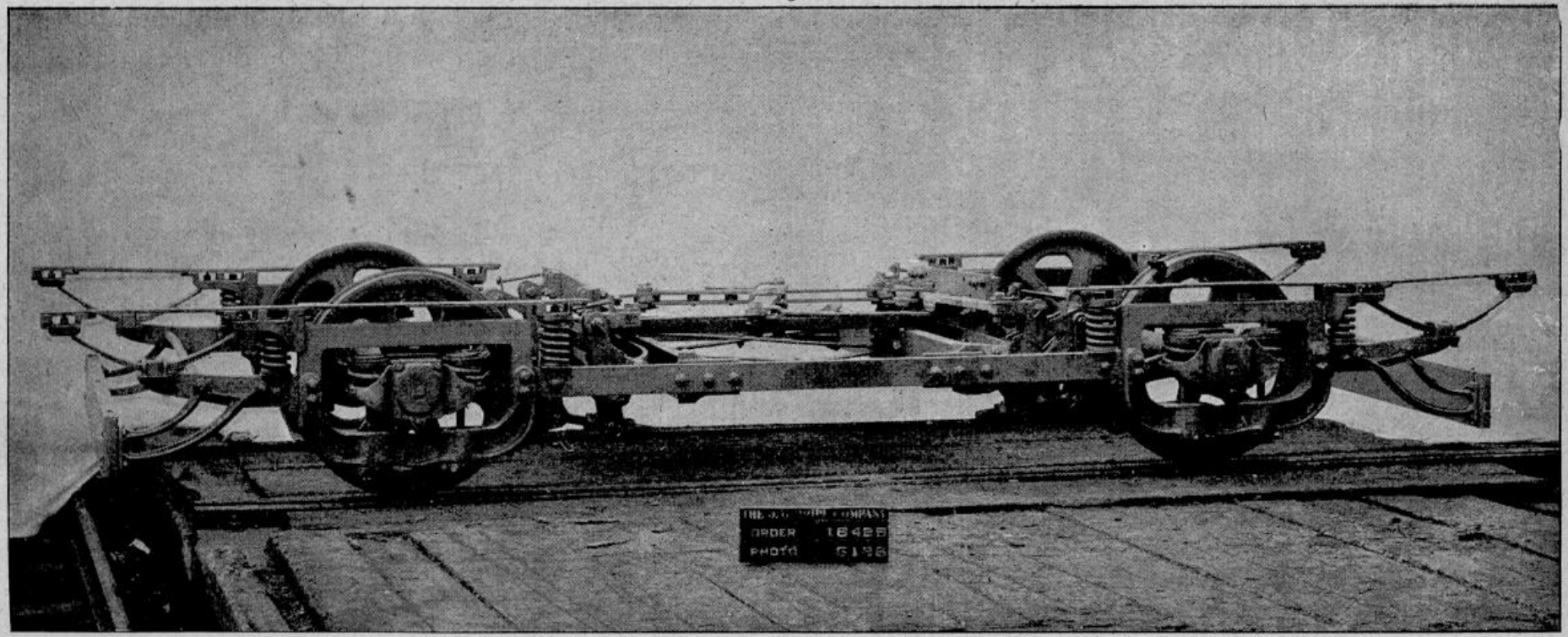


FIG. 482.

Truck Brill à essieux radiaux (Compagnie des Tramways suburbains de Nancy).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le principe de ce truck est le suivant : la charge est non plus portée par lui, mais suspendue au-dessous de l'essieu. Les bielles de suspension formant articulation (swing links) prennent appui sur des ressorts spiraux et sont par deux, encadrant une boîte à graisse.

Le point d'appui est hémisphérique, ainsi que le montrent les figures 1 et 2 de la figure 481, qui figurent la suspension dans sa position normale et dans sa position extrême.

Chaque bielle porte deux axes sur lesquels appuie la charge. A ces axes correspondent deux rainures du bâti. En alignement droit, la charge repose par les rainures précédentes sur les deux axes de chaque bielle. En courbe ou au passage d'une forte déviation de la voie, ces axes sortent de leur logement et par suite de la dissymétrie des efforts, ils se produit une réaction très puissante qui tend à ramener les axes dans leurs rainures. Dès que ce résultat est atteint, les bielles et par suite les essieux sont ramenés dans leurs positions normales.

D'autres points à considérer pour la construction de ce genre de trucks et qui demandent une étude assez délicate sont le montage du moteur et surtout le mécanisme des freins.

207. **Essieu-monté et bandages.** — On nomme essieu monté l'ensemble d'un essieu et de ses roues avec lesquelles il forme un ensemble solidaire (fig. 483).

L'essieu se compose d'un corps cylindrique, le plus généralement en acier Martin-Siémens avec deux *épaulements* AA′ pour maintenir l'écartement des roues. A la suite se trouve la *portée de calage*, la *fusée* et la *patère de fusée*.

La portée est introduite à force dans le moyeu, qui est toujours en fer ou en acier, maintenant en acier coulé, jamais en fonte, les règlements européens l'interdisent.

Le diamètre de cette portée est de un ou deux dixièmes de millimètre plus grand que celui d'alésage du moyeu, afin de réaliser un certain serrage. On emploie à cet effet des presses pouvant donner de 40 à 100 tonnes d'effort.

Dans certaines locomotives électriques, la fusée est à l'intérieur au lieu d'être à l'extérieur, afin de faciliter l'accouplement des roues (fig. 484).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La roue est constituée par le *corps de roue* et le *bandage*. Ce dernier est simplement calé à force ou boulonné, ou encore agrafé sur

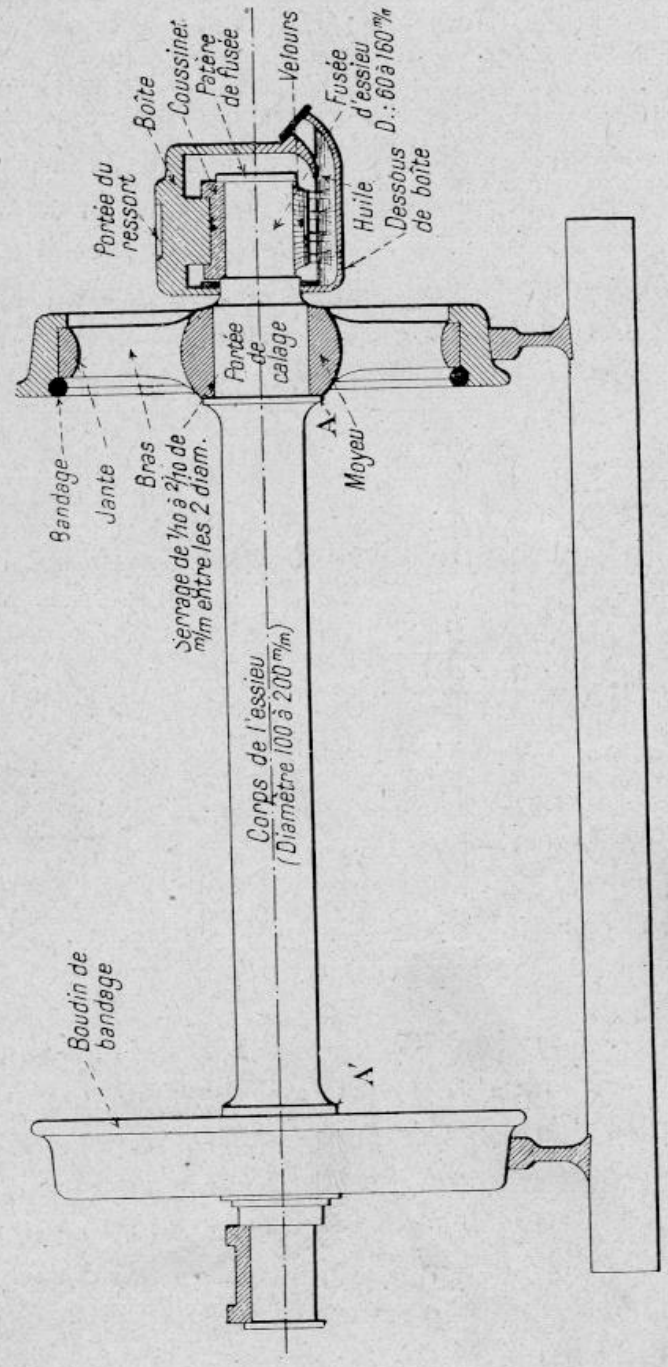


Fig. 483.
Essieu monté.

le corps. Dans le bandage dit agrafé, on sertit dans une rainure une barre d'acier qui le fixe d'une façon parfaite sur le corps de roue (fig. 485).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le diamètre d'une roue est en général, compris entre 750 et 950 millimètres. Le poids d'un essieu monté varie entre 400 et 600 kilogrammes.

Le profit des bandages varie quelque peu dans ses cotes de détail d'une Compagnie à l'autre. Nous donnons à titre d'exemple (fig. 486-487-488) différents profils employés par la Compagnie Générale des Omnibus de Paris. Ces profils sont à grande largeur, de façon que dans les mouvements de lacet toute la largeur de la table reste intéressée par le bandage. Ce dispositif a été établi pour permettre une usure horizontale de la table de roulement. C'est pour la même raison que cette Compagnie tourne tous ses bandages cylindriquement.

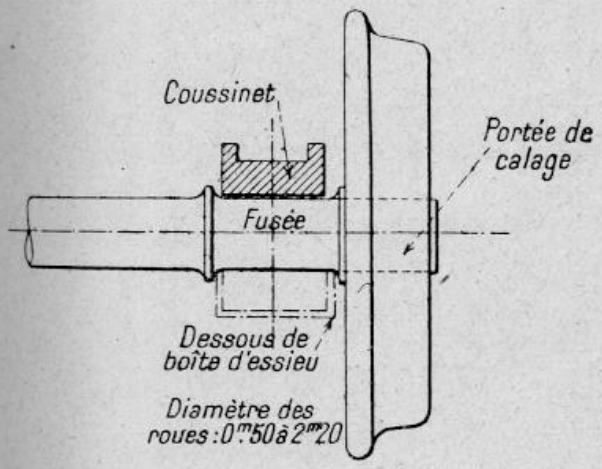


FIG. 484.

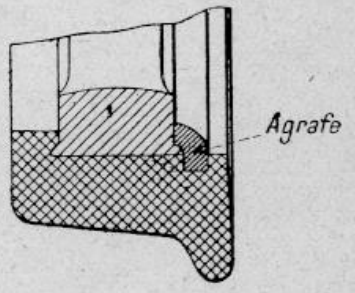


FIG. 485.

L'acier de ces bandages offre une résistance de 80 kilogrammes par millimètre carré, mais la Compagnie cherche un métal offrant une plus grande résistance. Ces roues à bandages font de 80.000 à 100.000 kilomètres de parcours, suivant le type de voiture.

La figure 489 représente le profil du bandage employé par la Compagnie des chemins de fer Nogentais. Les bandages sont encore tournés cylindriquement. La résistance du métal est la même que précédemment.

La figure 490 montre le profil du bandage employé par la Compagnie des Tramways de Nice et du littoral et établi par le Creusot. La résistance du métal est aussi de 80 kilogrammes, et les bandages assurent un parcours d'environ 90.000 kilomètres. Ces bandages

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

étaient ici, jusqu'alors, tournés coniquement à 3/59, soit environ 1/20,

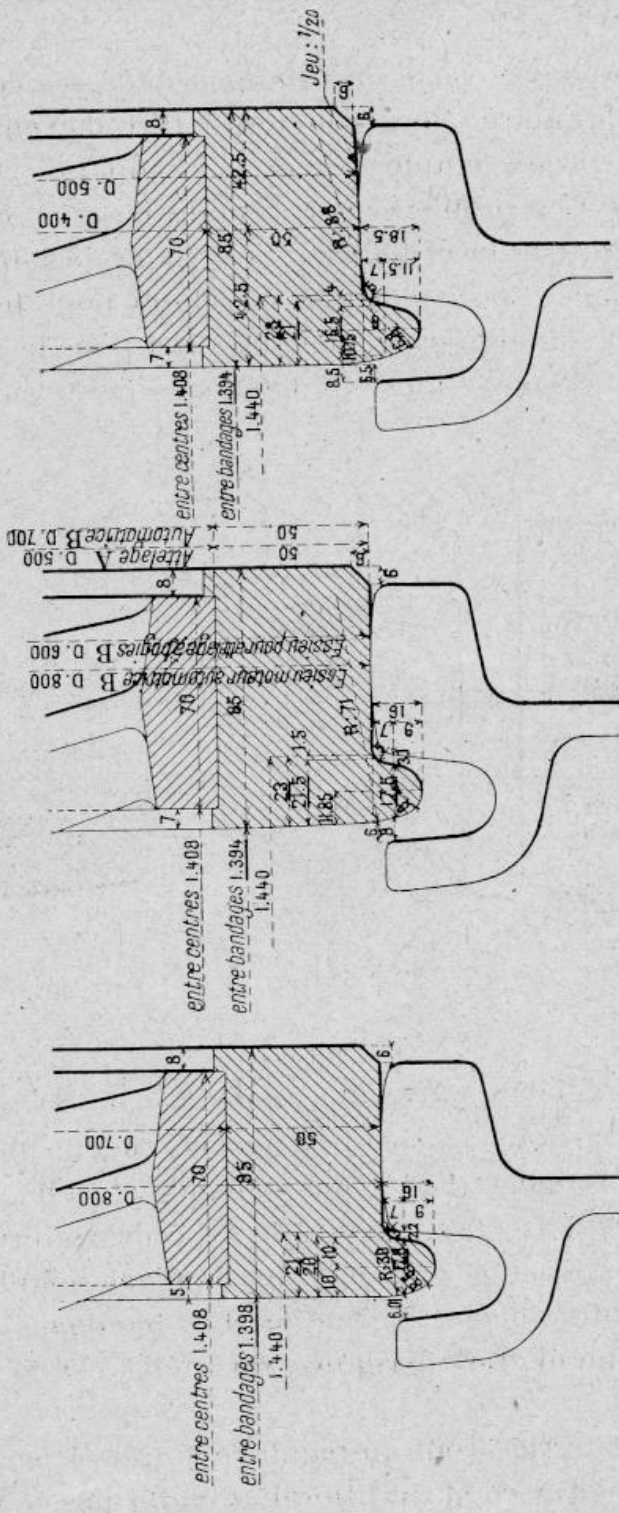


FIG. 488.

FIG. 487.

FIG. 486

FIG. 486 à 488. — Profil des bandages de la Compagnie Générale des Omnibus.
(Type G : 2 essieux à grand empattement ; type B : 2 bogies maximum traction ; type A : attelage à bogies.)

mais, actuellement, cette Compagnie commence à les tourner cylindriquement pour les mêmes raisons que celles données plus haut.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — Caisses des voitures.

208. **Matériaux employés.** — On cherche de plus en plus à n'employer que des matériaux incombustibles. Certains constructeurs préconisent l'emploi de matériaux bons conducteurs, tels que fer et acier, soit pour la construction des cabines d'appareils seules (Métropolitain de Paris), soit pour l'ensemble de la construction (subway

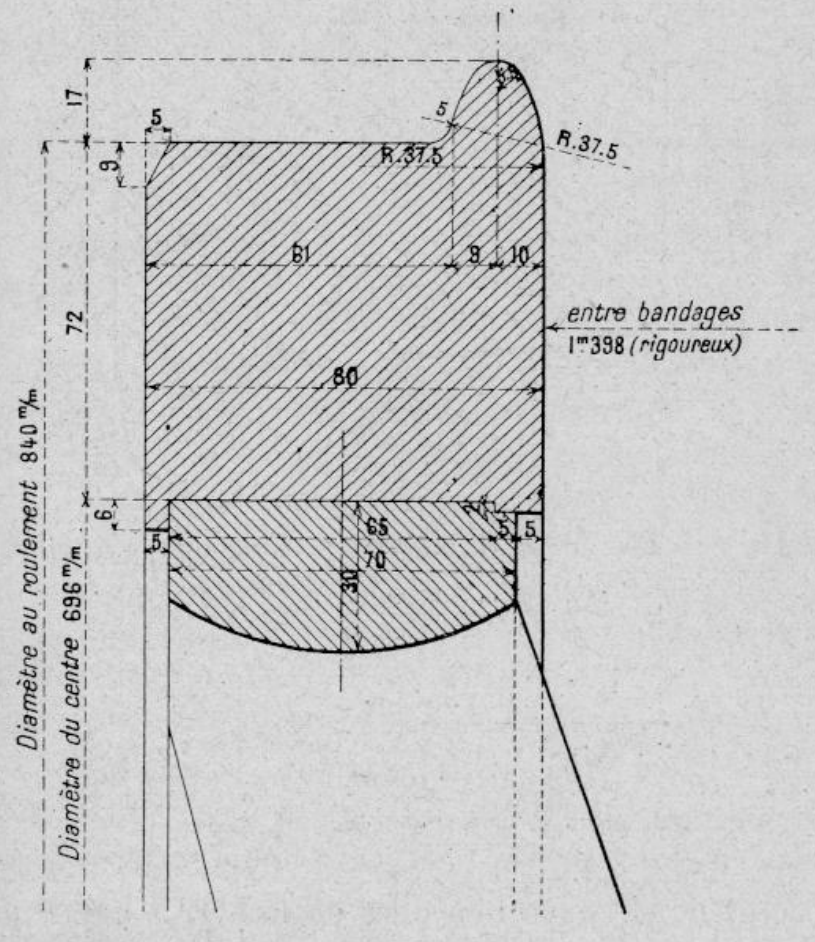


FIG. 489.

Profil des bandages de la Compagnie des Chemins de fer Nogentais.

de New-York, Hudson Tunnel, Chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris, etc...), d'autres proscrivent le métal pour employer des bois plus ou moins ignifugés; tels sont la plupart des constructeurs de chemins de fer anglais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a d'abord cherché à rendre les bois incombustibles par une couche de peinture contenant des sels ignifuges empêchant l'action de l'air (solution à 25 p. 100 de sels ammoniacaux à 60°), mais le temps détruit rapidement l'effet de ces enduits. On a alors fait l'injection à cœur : le procédé consiste à faire dégager la sève par séchage dans des étuves à circulation méthodique ; la température

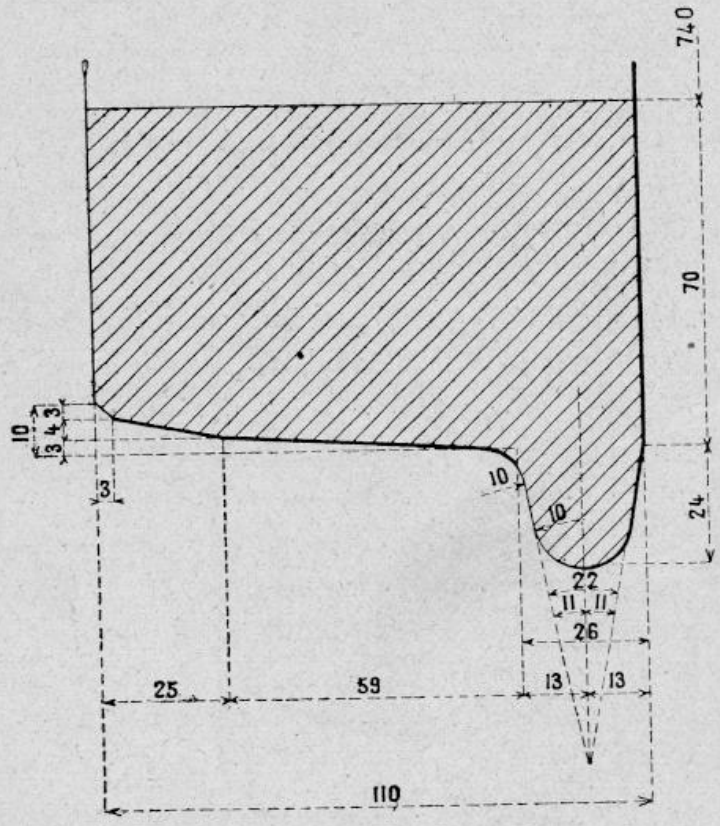


FIG. 490.

Profil des bandages de la Compagnie des Tramways de Nice.

varie de 50 à 70° et l'opération dure de 10 à 12 jours. Puis on substitue à la sève une solution appropriée injectée sous pression en autoclave à la température de 30 à 50° et sous une pression de 6 à 10 kilogrammes. Les meilleures solutions paraissent être au borate d'ammoniaque et au tungstate de soude.

Malheureusement, mieux le bois est ignifugé, plus il perd ses qualités isolantes, plus il devient hygrométrique et par conséquent meilleur conducteur de l'électricité; sa texture même se modifie; les vis ne tiennent plus aussi bien; quant à sa durée, on en est encore, vu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le peu d'ancienneté des premières applications, réduit à des conjectures, mais il semble que l'ignifugeage l'aura notablement réduite.

On emploie encore, comme matériaux incombustibles, le fibrociment formé d'amiante et de ciment, et le xylolithe, qui est un ciment magnésien avec de la fibre d'amiante et de la sciure de bois.

La tendance actuelle, pour les chemins de fer souterrains, est d'employer des caisses entièrement métalliques, le plancher lui-même étant fait d'une matière absolument incombustible, ciment à base de carborandum (nouvelles voitures du Métropolitain de Paris, voitures du Nord-Sud, voitures du tunnel de l'Hudson à New-York, nouvelles voitures de l'Interborough Rapid Transit Co de New-York.

209. **Dispositions intérieures des voitures.** — En tramway, les voitures sont généralement pourvues de deux entrées ou sorties pour voyageurs, une à chaque extrémité. Les deux extrémités servent simultanément ou chacune à son tour, suivant le sens de marche.

Dans les métropolitains aériens et souterrains des Etats-Unis, on adopte généralement deux portes, pour le passage des voyageurs, une à chaque plate-forme d'extrémité. Les portes aux deux extrémités voisines de deux voitures adjacentes sont manœuvrées par un employé dont le poste est à une extrémité, et qui, pour la manœuvre, se trouve à cheval sur les plates-formes voisines des deux voitures. Le mécanisme de commande consiste généralement en un système de leviers. Les portes sont généralement glissantes et rentrent dans la double épaisseur des parois. Sur l'Elevated de New-York (Manhattan Elevated Ry), les portes sur les plates-formes sont tournantes.

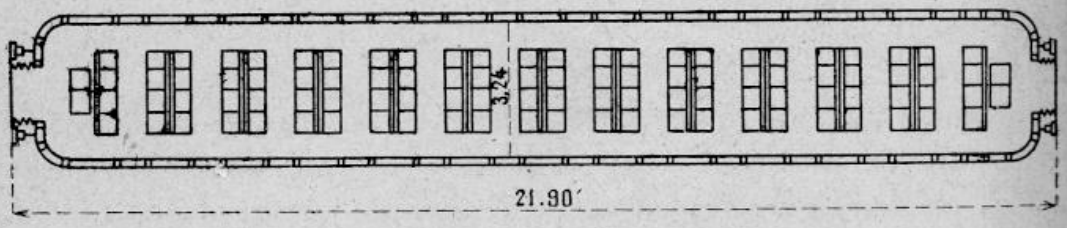
Ce type de voitures à commande simultanée des portes se retrouve à Londres.

Le fait d'avoir des portes servant aussi bien pour l'entrée des voyageurs que pour leur sortie est très défavorable aux mouvements rapides d'entrée et de sortie des voyageurs (on a essayé, mais sans aucun succès, de réserver une porte pour l'entrée et une pour la sortie), d'où encombrements et retards, et a conduit à l'adoption, à New-York, de voitures à trois portes, deux aux plates-formes d'extrémité et une double au milieu. Les premières sont destinées aux voyageurs qui entrent et la médiane à ceux qui sortent. Cette disposition se rencontre aussi au Metropolitain District Railway de Londres, installé d'ailleurs par des ingénieurs américains. A Paris, au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Métropolitain et au Nord-Sud, il y a également trois portes prévues dans ce but, mais, en fait, celui-ci est loin d'être atteint.

Dans les voitures, type 1909, de l'Interborough Rapid Transit Co de New-York, voitures entièrement métalliques, les portes extrêmes glissantes sont manœuvrées par un système de leviers, comme il est indiqué plus haut ; quant aux portes du milieu, elles sont manœuvrées automatiquement par un dispositif actionné par le piston d'un cylindre à air comprimé placé sous la banquette, à côté de la porte. La commande se fait au moyen de valves à portée de l'employé qui manœuvre les autres portes. Ces portes médianes comportent un système de contacts électriques faisant partie d'un circuit allant de l'arrière du train à l'avant et à la terre. A l'arrière, il reçoit le courant du troisième rail et à l'avant, dans la cabine du wattman, il comprend une lampe qui ne peut être allumée que lorsque le circuit est



Remorque, 100 places assises.

Fig. 491. — Illinois Central Railway (États-Unis).

fermé, ce qui exige que toutes les portes soient fermées ; c'est le signal au wattman.

Afin d'éviter des accidents à la fermeture des portes médianes, le montant des portes est garni d'une sorte de tube en tôle d'acier mince formant coussin. Une légère pression sur ce tube suffit pour qu'une soupape d'échappement sur le cylindre de commande soit actionnée, et que, par suite, le mouvement de la porte s'arrête immédiatement.

Nous donnons (fig. 491) un exemple intéressant de voiture américaine pour un *service suburbain,* celui de l'*Illinois Central Railway,* remarquable à divers points de vue. Ces voitures sont prévues pour 100 places assises, et sont munies de portes multiples à la façon de voitures à voyageurs à compartiments séparés de nos trains à vapeur. Toutes les portes sont commandées simultanément par un conducteur qui peut, à volonté, ou faire déclancher seulement les pènes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 492 à 496. — Voitures de Métropolitains. Dispositions des caisses en plan.

Automotrice, 48 places assises.

Remorque, 52 places assises.

Fig. 492. — London Underground Railway.

Remorque, 44 places assises.

Automotrice, 52 places assises.

Fig. 494. — New-York Interborug Railway.

Fig. 493. — Chemin de fer élevé de Berlin.

Automotrice, 26 places assises.

Remorque, 37 places assises.

Fig. 495. — Métropolitain de Paris.

Automotrice, 31 places assises.

Fig. 496. — Nord-Sud de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de fermeture, ou ouvrir complètement les portes. Enfin, celles-ci sont glissantes le long des parois. Les banquettes sont transversales et occupent seulement la partie médiane de la voiture qui comprend deux couloirs longitudinaux latéraux.

On trouve encore des voitures à portes multiples sur la nouvelle ligne de Hambourg-Blankenese des Chemins de fer de l'Etat Prussien. Toutefois, les portes sont tournantes.

Quant à la disposition des banquettes dans les voitures de métropolitain (Subway Elevated) des Etats-Unis, on trouve, en général, des banquettes transversales vers la partie médiane et longitudinales aux extrémités, avec couloir central.

A Londres, on retrouve cette disposition et aussi celle des banquettes longitudinales seulement. Cette dernière disposition est aussi celle du chemin de fer aérien de Berlin.

A Paris, elles sont transversales avec emplacements réservés pour les personnes debout.

Les figures 492 à 496 représentent en plan les dispositions intérieures de voitures type métropolitain: « du Métropolitain District Railway » de Londres (London Underground Ry), du « New-York Interborough Railway », du chemin de fer aérien de Berlin, du Métropolitain et du chemin de fer Nord-Sud de Paris, avec l'indication du nombre de places assises.

Les figures 497 et 498 représentent les dispositions en plan et en élévation des nouvelles automotrices de l'Ouest-Etat (Paris-Invalides-Versailles), type à bogies à 2 essieux comportant un bogie-moteur et un bogie-porteur et type à 2 bogies à 3 essieux, comportant deux essieux-moteurs à chaque bogie, ce qui a pour effet de diminuer le poids par essieu-moteur. Ces voitures à grande capacité sont, en outre, munies de l'attelage central automatique Boirault.

Nous donnons enfin (fig. 499 à 504) (1) les dispositions intérieures des automotrices des principaux réseaux parisiens, figures qui montrent bien la diversité du matériel employé et, figure 505, les dispositions des automotrices de la Compagnie des Tramways de Nice et du littoral, employées en particulier sur la ligne Menton-Sospel.

Nous terminerons cette étude, forcément incomplète, puisque li-

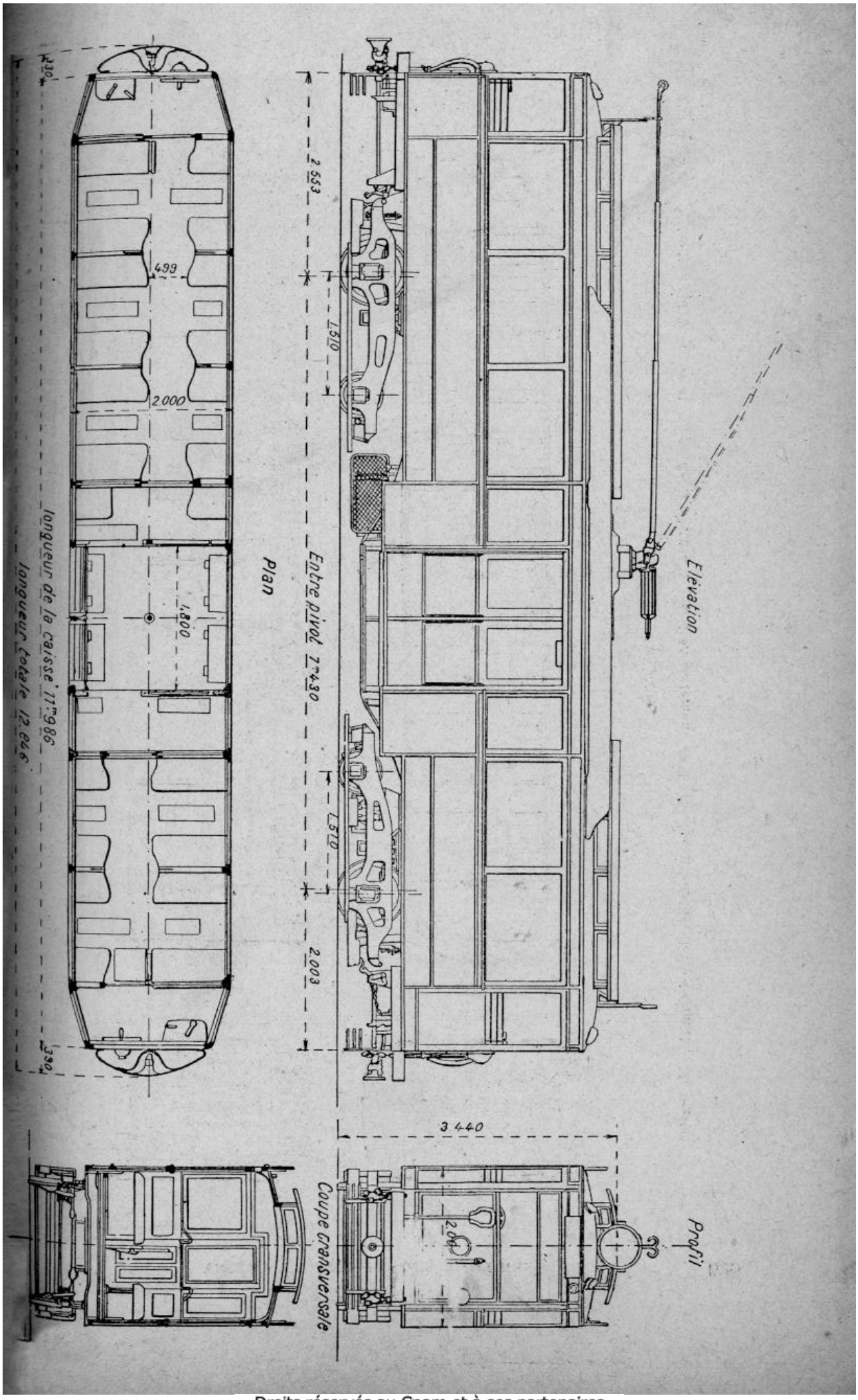
(1) Empruntées à l'*Industrie des Tramways et Chemins de fer*. Octobre et novembre 1913.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Élévation, plan, profil et coupe de la voiture à grand empattement de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris.

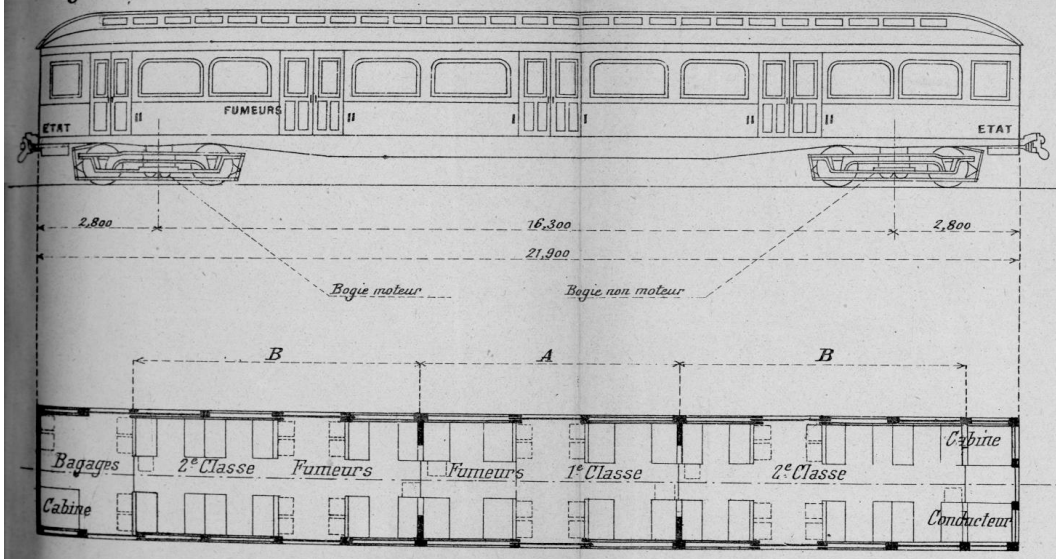
FIG. 499.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

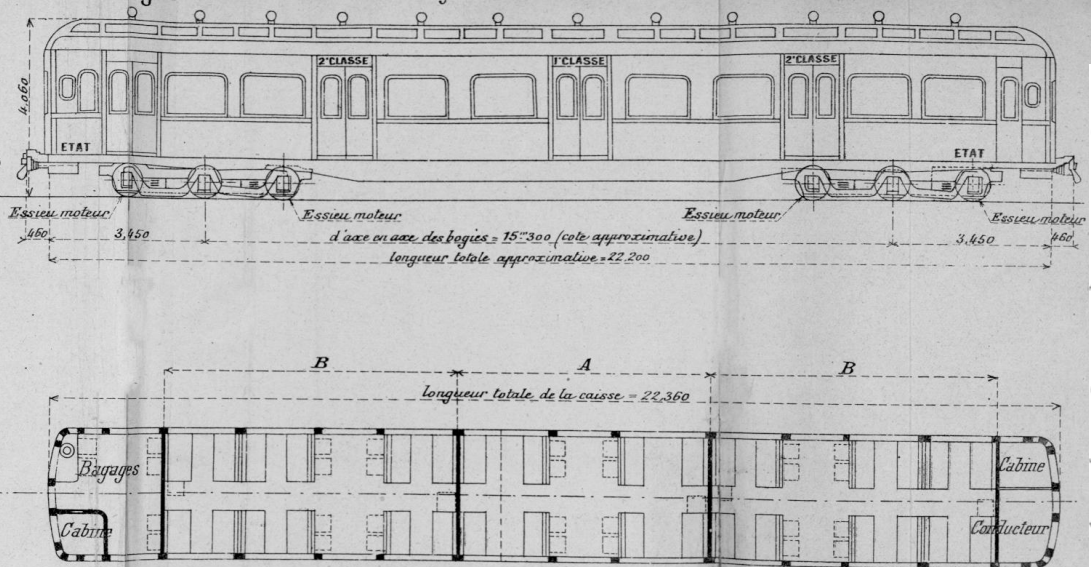
Fig 497 Voiture motrice sur bogies à 2 essieux, un bogie moteur et un bogie porteur - Ouest-Etat.



Nombre de places assises

A	16 places	64 Places	100 places.
B	48 d°		
A	10 places	36 Strapontins	
B	26 d°		

Fig. 498 Voiture motrice sur bogies à 3 essieux dont deux moteurs - Ouest-Etat.



Nombre de places assises.

A	16 places	64 Places	100 places
B	48 d°		
A	10 places	36 Strapontins	
B	26 d°		

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

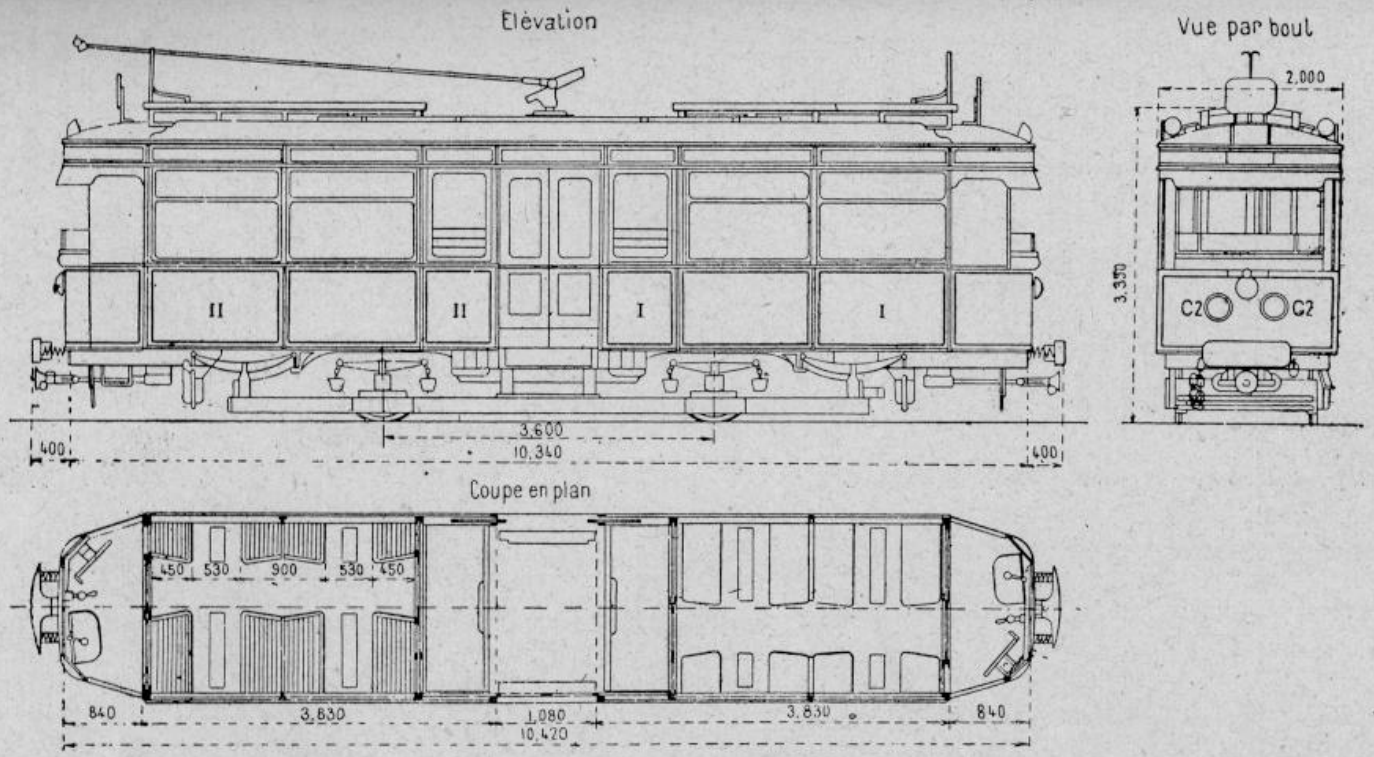


FIG. 501.

Élévation et plan de la voiture motrice à grand empattement de la Compagnie des Tramways de Paris et du Département de la Seine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 502.

Plan de la nouvelle motrice de la Compagnie Générale Parisienne de Tramways.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

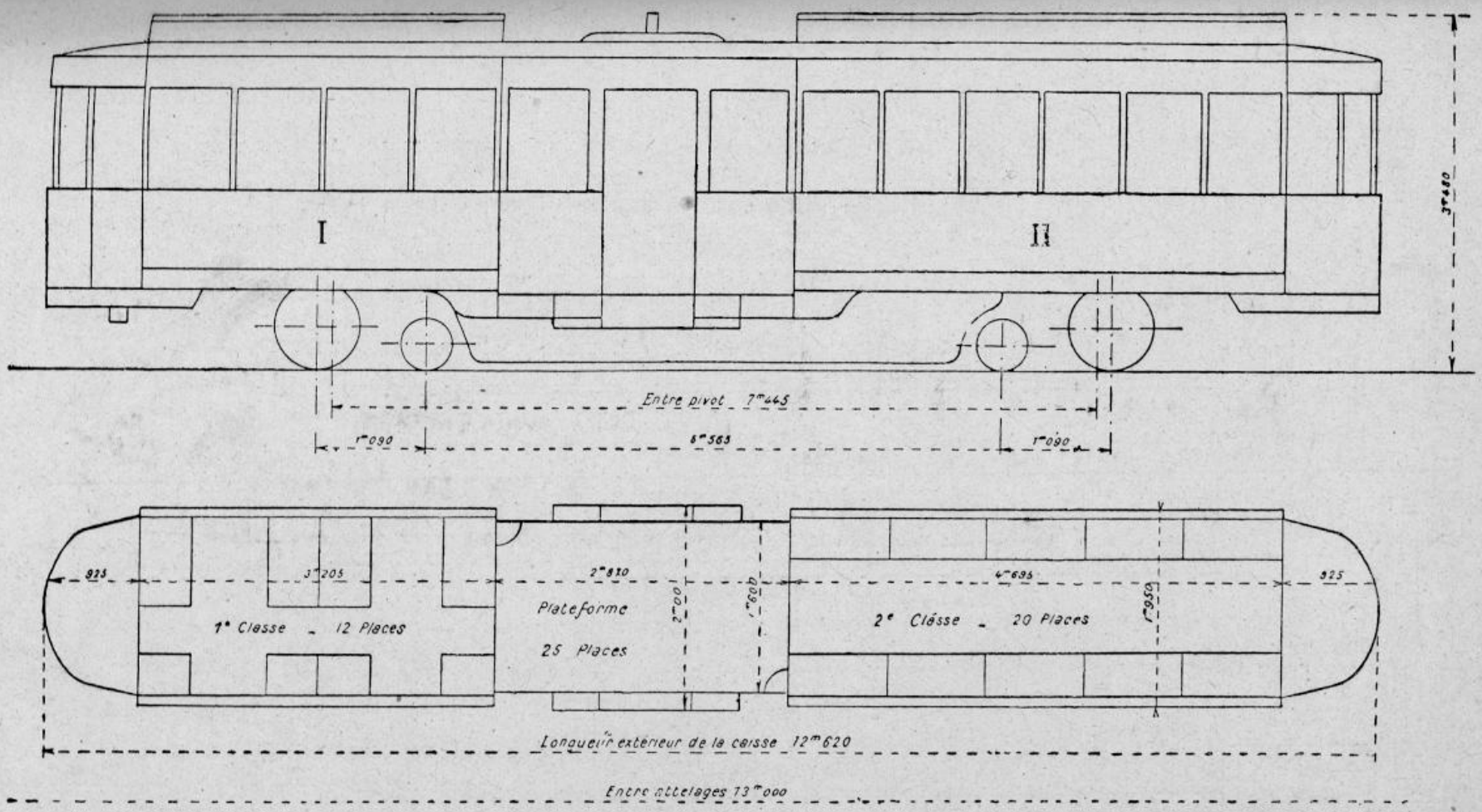


FIG. 503.

Élévation et plan de la voiture automotrice type E, de la Compagnie de l'Est-Parisien.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

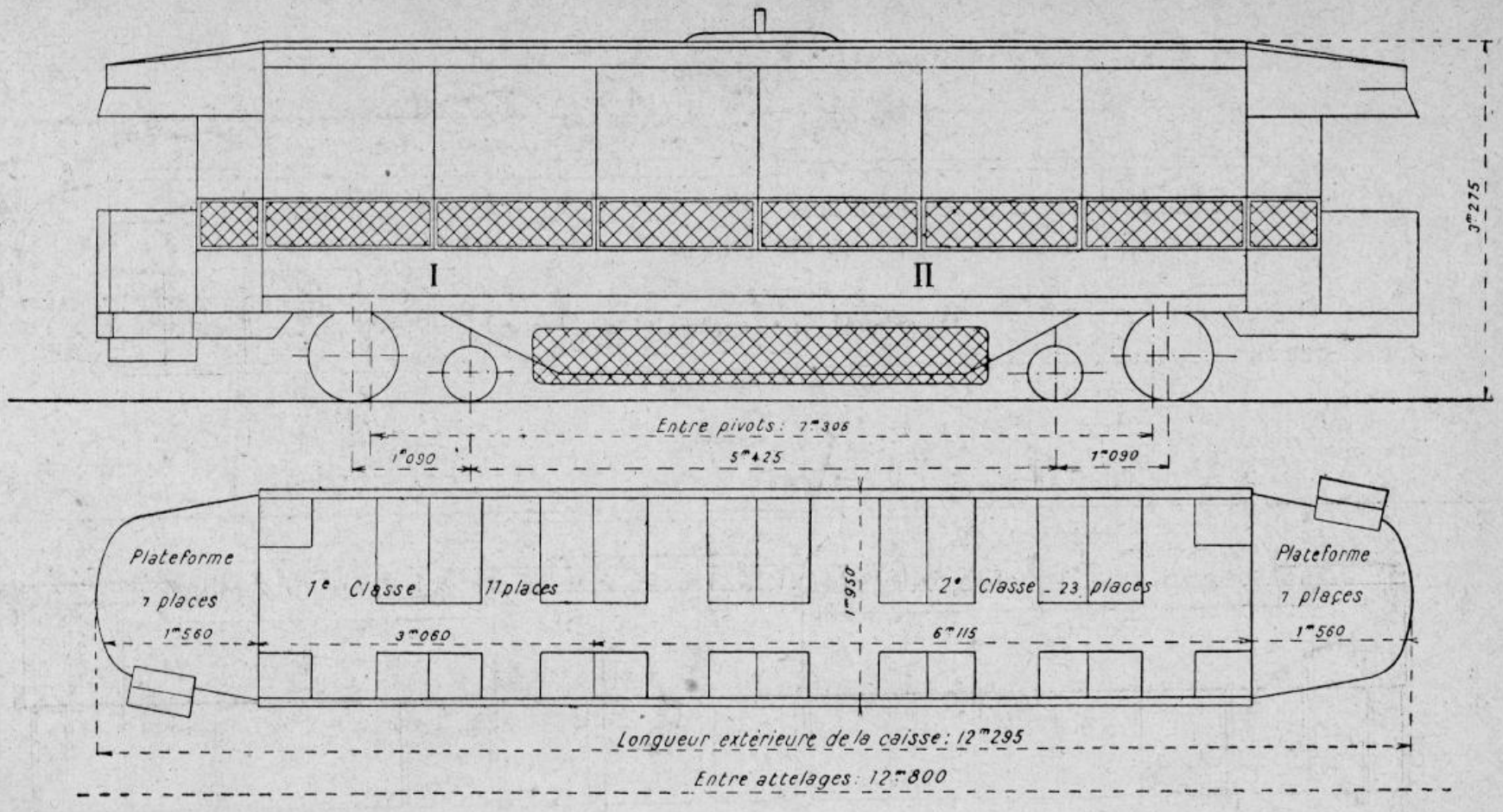


FIG. 504.

Élévation et plan de la voiture automotrice type 500 de la Compagnie de l'Est-Parisien.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

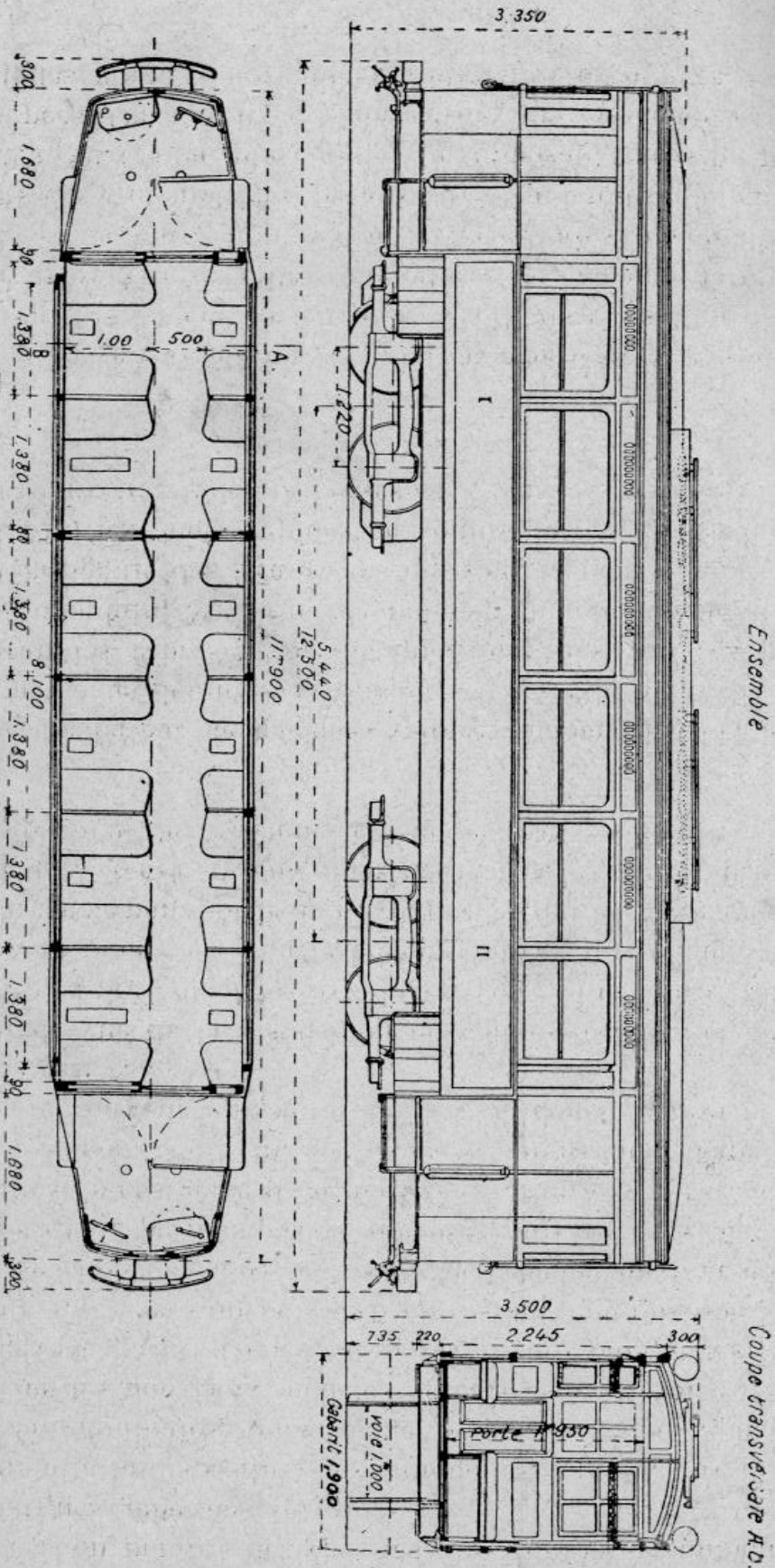


Fig. 505.

Élévation, plan et coupe de la voiture à bogies de la Compagnie des Tramways de Nice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mitée à un certain nombre de types les plus connus d'automotrices, par les remarques générales suivantes :

Relativement à la disposition des banquettes, on peut dire que les banquettes longitudinales, d'un usage presque exclusif autrefois, semblent, dans les nouveaux modèles de caisses, en France tout au moins, en grande partie délaissées en faveur des banquettes transversales, plus appréciées du public. Il en résulte toutefois une légère diminution de capacité, dans le cas où la largeur maxima admise pour les caisses ne permet pas de disposer plus de trois places de front, ce qui est le cas général en matière de tramway, où le gabarit extérieur est souvent de 1 m. 900. Nous ajoutons que, d'après les règlements, une largeur minimum de 0 m. 45 doit être prévue pour chaque place assise.

Au point de vue de la disposition des plates-formes, les plates-formes centrales présentent les avantages d'être plus confortables et de diminuer de moitié environ le chemin moyen que chaque voyageur doit parcourir pour sortir de la voiture, ce qui accélère sensiblement le service, et est surtout appréciable sur les lignes urbaines à grand mouvement de voyageurs et à arrêts très fréquents.

210. **Aspect extérieur de quelques voitures automotrices types.** — Pour terminer, nous donnons en planches hors-texte (fig. 506 à 511) des photographies représentant quelques-unes des voitures précédentes : Métropolitain, Nord-Sud de Paris, Compagnie Générale des Omnibus, Compagnie des Tramways de Nice, et nous avons ajouté (fig. 512-513-514) les photographies de voitures types américaines, à truck à 2 essieux parallèles, à bogies et à truck à essieux radiaux Brill.

210 *bis*. — **Nouvelles voitures de tramway américaines.** — Jusque dans ces dernières années, la tendance aux Etats-Unis était d'avoir, même pour un service de ville, des voitures de capacité de plus en plus grande et de plus en plus lourdes; c'est ainsi qu'on utilisait couramment des automotrices pesant 30 à 40 tonnes donnant un poids de 450 à 650 kgs par place assise en supposant toutes les places assises occupées. On a fini par s'apercevoir que les dépenses d'entretien de telles voitures devenaient tout à fait excessives, surtout

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans ces dernières années. On s'est alors rapproché de la pratique européenne de voitures beaucoup plus légères.

Depuis trois ou quatre ans, on voit en effet se développer aux Etats-Unis l'emploi de tramways dits « Leight safety car », pesant en charge, toutes les places assises occupées — 35 places — et en ordre de marche environ 6 tonnes, soit un poids d'environ 175 kgs par place assise. Ces voitures sont à banquettes transversales à deux places, avec couloir central. Elles sont montées sur truck type Brill à deux essieux. Un point remarquable est que le wattman fait en même temps fonction de receveur. Un seul employé leur est ainsi affecté. Les voyageurs paient en entrant. La réception de l'argent se fait au moyen d'une sorte de tirelire qui enregistre en même temps le nombre de voyageurs (appareil Johnson): cette disposition exige évidemment, pour que le service soit rapide, que les voyageurs aient exactement préparé d'avance le montant de leur transport, qui est d'ailleurs uniforme.

Ces véhicules sont équipés avec un frein pneumatique direct et de sécurité.

Ils sont munis de portes sur les plates-bandes avant et arrière, qui normalement sont fermées. Leur ouverture et leur fermeture sont obtenues pneumatiquement par la canalisation des freins et leur commande est réalisée par la manœuvre d'une manette sur laquelle agit le wattman. Les voyageurs ne peuvent ouvrir eux-mêmes les portes, sauf en cas d'accident, le wattman mettant alors la manette de commande à fond de course (position de secours) qui met alors l'air à l'échappement. Enfin le mouvement des voyageurs, entrée et sortie, se fait par la même porte qui est celle de la plate-forme où se trouve à ce moment le wattman, la porte de l'autre plate-forme demeurant fermée. Il y a évidemment deux postes de commande.

Les conditions d'exploitation avec ces voitures sont, on le voit, tout à fait nouvelles.

Ces véhicules ont en ce moment un grand succès aux Etats-Unis.

211. **Chasse-corps. Ramasse-corps.** — Sur la plupart des réseaux, notamment à Paris, les automotrices sont équipées avec un chasse-corps ou un ramasse-corps.

Un grand nombre de systèmes ont été proposés et appliqués. Aucun d'eux ne donne une sécurité absolue, cependant la sécurité relative qu'ils donnent est suffisante pour justifier l'emploi de l'un ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'autre. Ils dérivent tous de deux principes initiaux différents : suivant l'un, on se propose de repousser le corps au dehors de la voie (chasse-corps), suivant l'autre, on se propose de ramasser la victime pour pouvoir la porter sur une certaine longueur (ramasse-corps), l'arrêt de la voiture ne pouvant évidemment pas être instantané. Les systèmes ramasse-corps semblent être ceux qui donnent lieu aux plus nombreuses applications.

Nous allons indiquer quelques dispositifs employés sur les réseaux parisiens.

Chasse-corps de M. Mariage, directeur de la Compagnie Générale des Omnibus. — Cet appareil automatique se compose :

1° D'une partie mobile constituée par des planches en bois, articulées autour des axes D supportés par les longerons du truck. La planche avant est inclinée ; elle peut être recouverte d'un matelas ou rembourrage ; sa partie inférieure est garnie de ressorts épousant la forme de la chaussée quand le chasse-corps est tombé.

2° L'un système de leviers permettant de relever ou d'abaisser le chasse-corps. Ce système comprend un arbre F pouvant tourner librement dans les parties L, fixés à la caisse. Sur cet arbre sont claveté :

a) A chaque extrémité, une manivelle H commandant les bielles I portant les attaches J fixées à l'avant du chasse-corps.

b) Une manivelle G commandée par une chaîne reliée à une pièce X portant un encliquetage. La pièce X est maintenue par un support E dans lequel elle coulisse.

La partie mobile tend normalement à être dans la position baissée entraînant avec elle le système de leviers. Dès que la pièce X est libre, le chasse-corps s'abaisse.

3° L'appareil de manœuvre comprend un arbre N porté sur la plate-forme par les supports P formant paliers; sur cet arbre est monté un levier à deux bras V relié et maintenu dans la position horizontale par l'action d'un ressort I ; ce bras porte un encliquetage qui se met en prise avec celui de la pièce X.

Si l'on veut remonter le chasse-corps, on tire sur la poignée P ; le plan incliné de la pièce X vient contre le plan incliné du levier V,

(1) Cette description est empruntée ainsi que la substance des notes qui suivent sur ce sujet à l'*Industrie des Tramways et Chemins de fer*. Octobre et novembre 1913.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

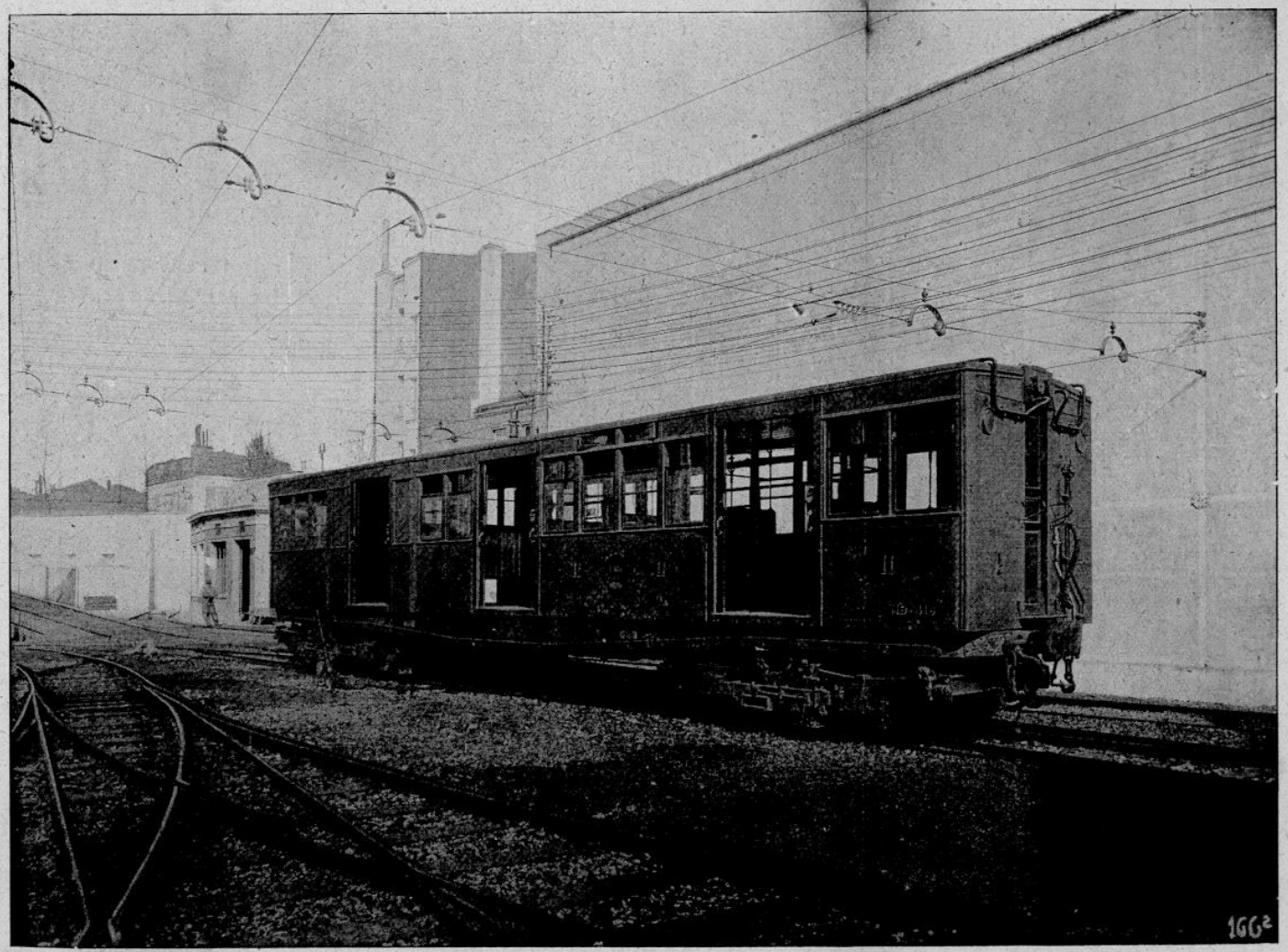


FIG. 506.

Automotrice à bogies du Métropolitain de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

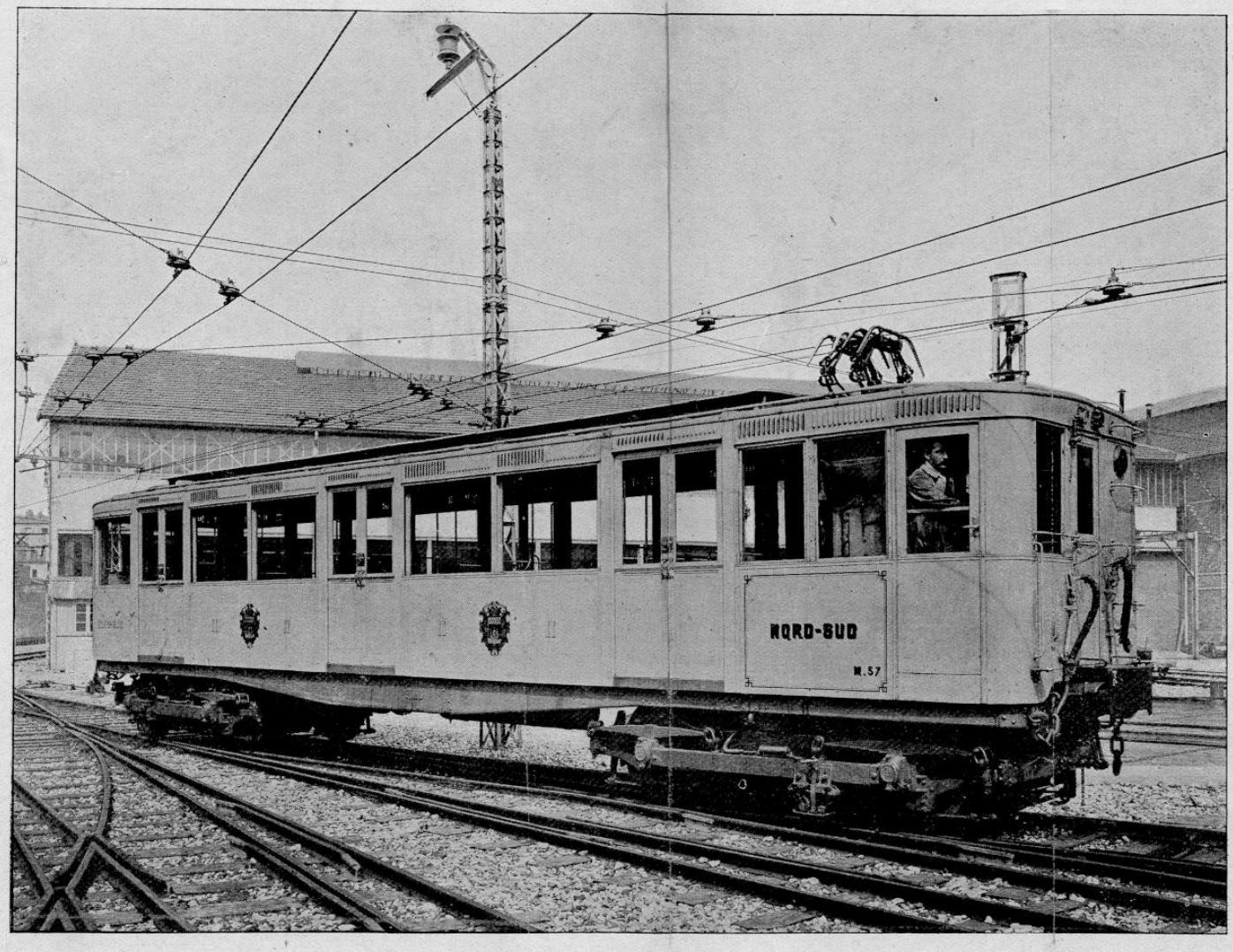


Fig. 507.

Automotrice à bogies du Chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

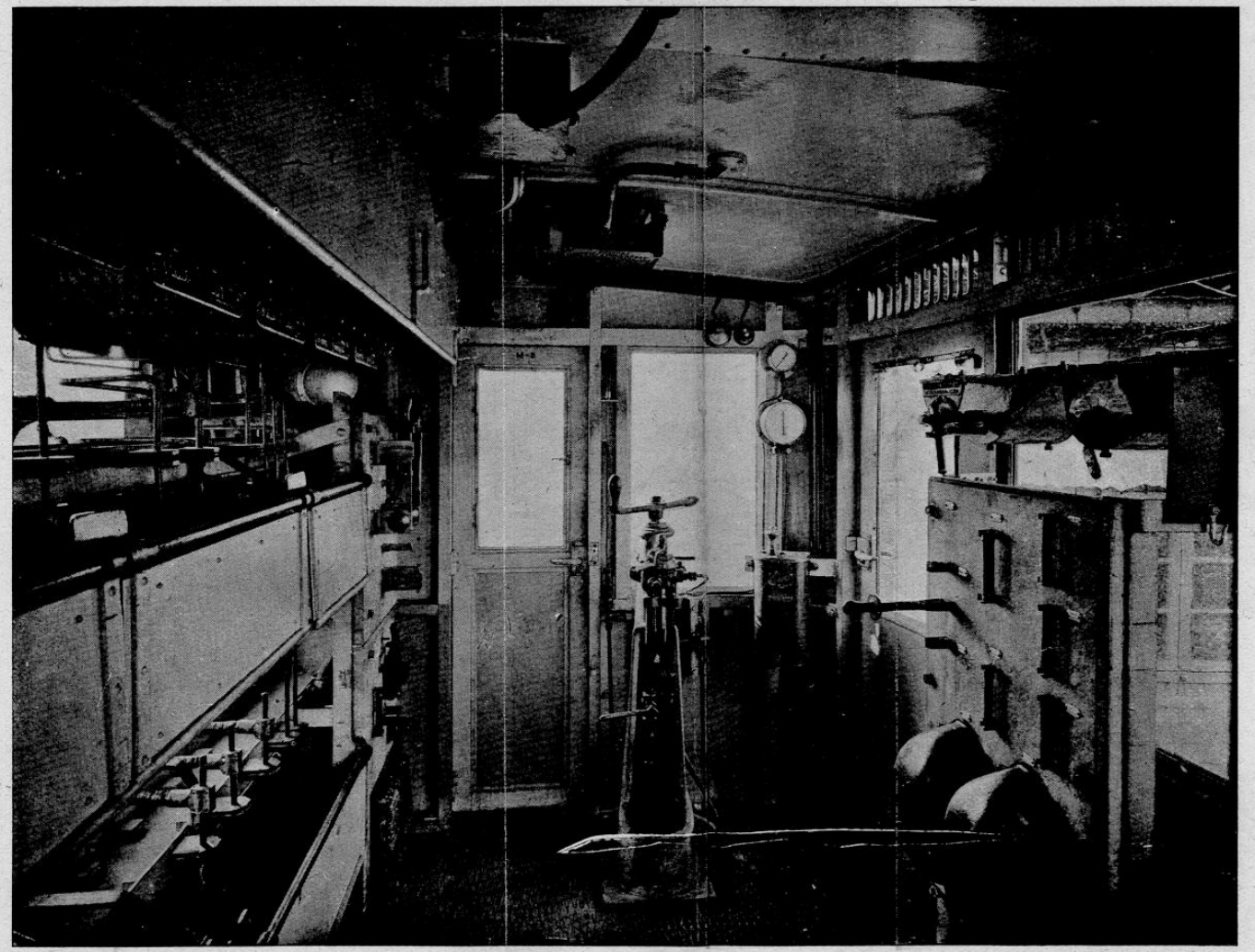


Fig. 508.

Cabine de wattman des automotrices du Chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

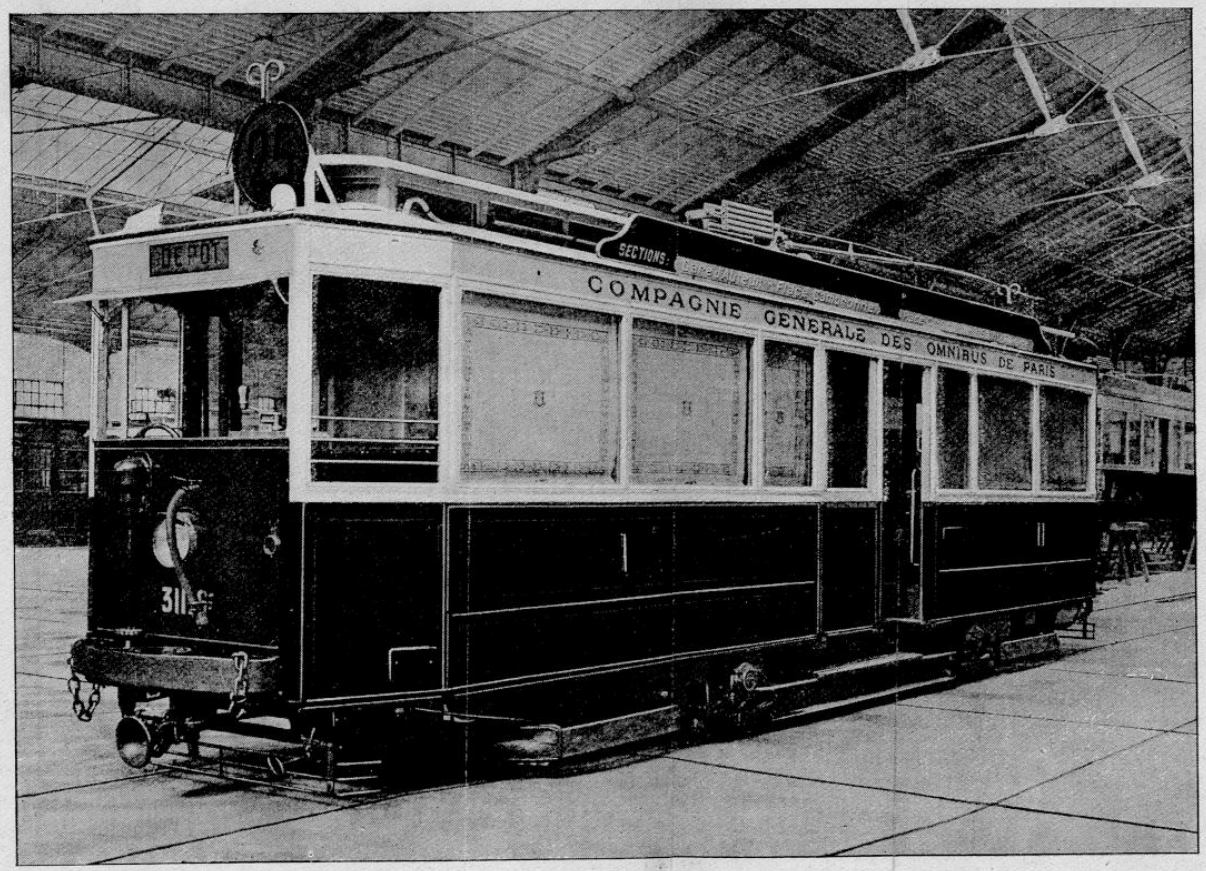


FIG. 509.

Automotrice à truck rigide à grand empattement et à plate-forme centrale de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

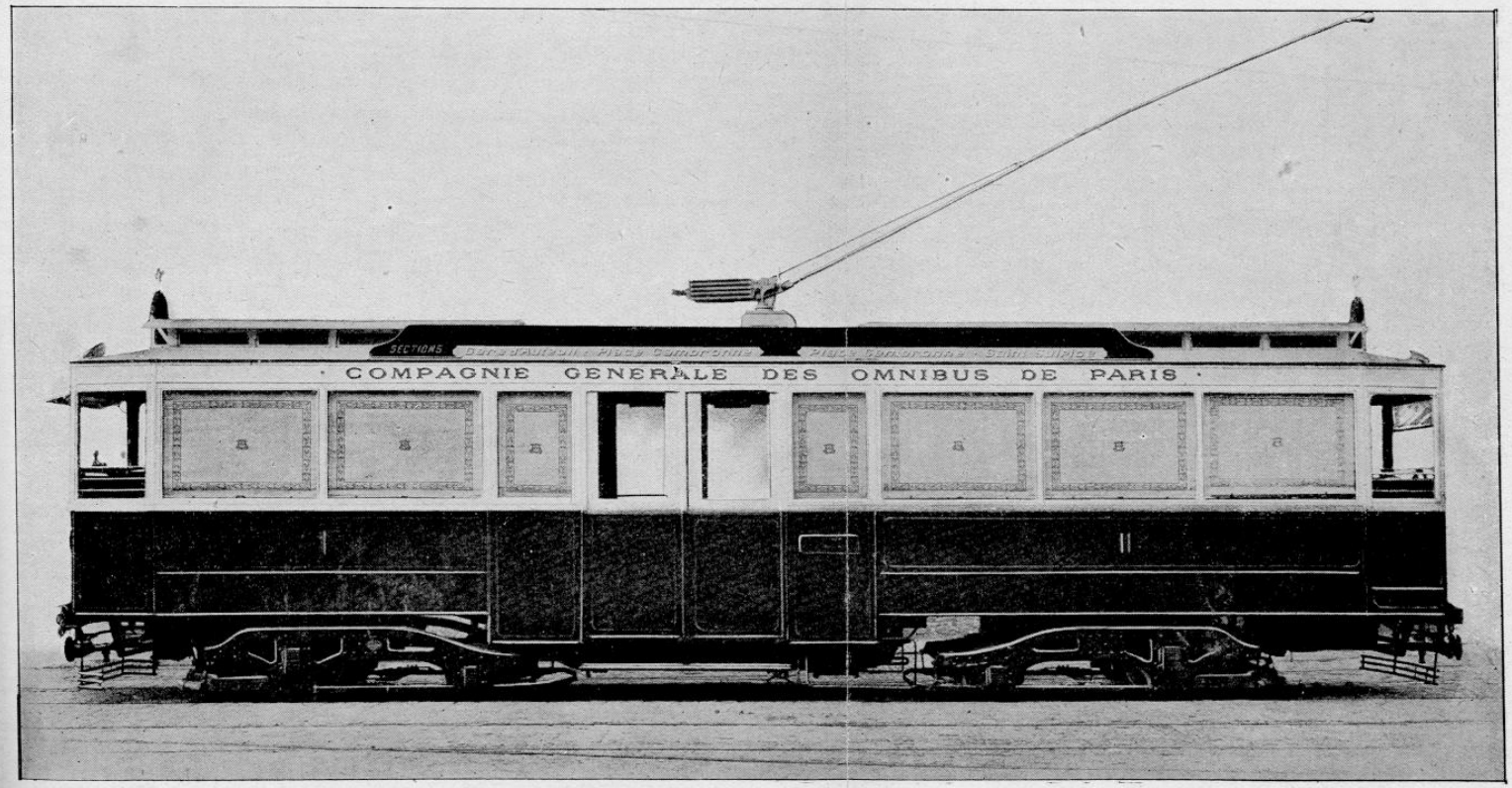


FIG. 510.

Automotrice à bogies et à plate-forme centrale de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

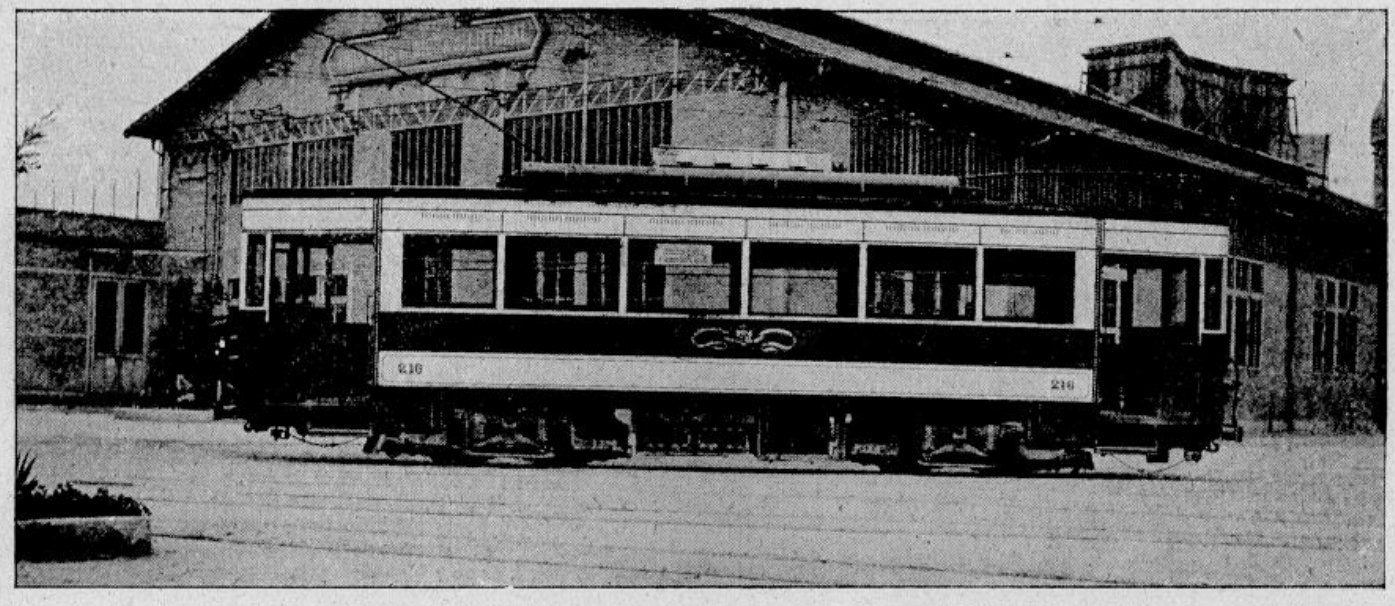


Fig. 511.

Automotrice à bogies de la Compagnie des Tramways de Nice et du Littoral (Menton-Sospel).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

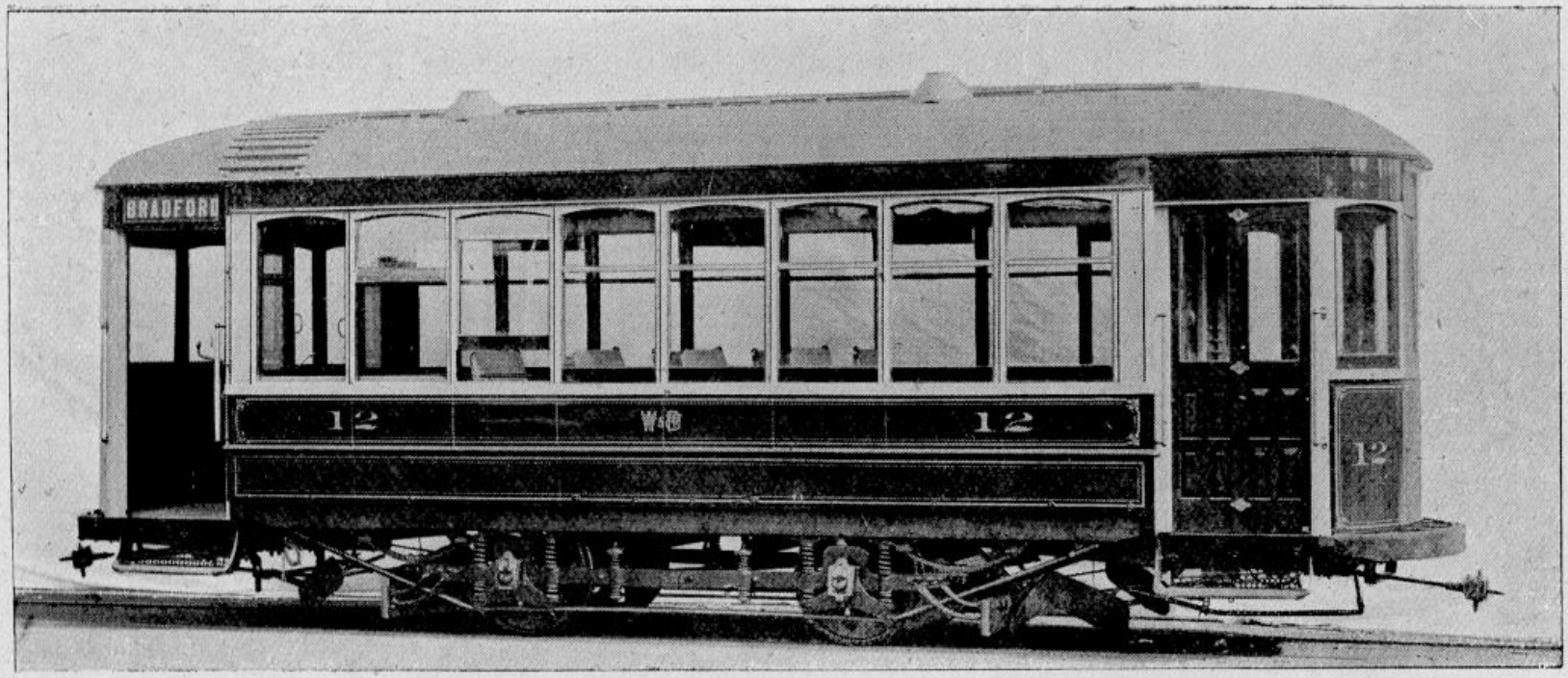


Fig. 512.

Tramway urbain américain à truc rigide à deux essieux type J.-G. Brill.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

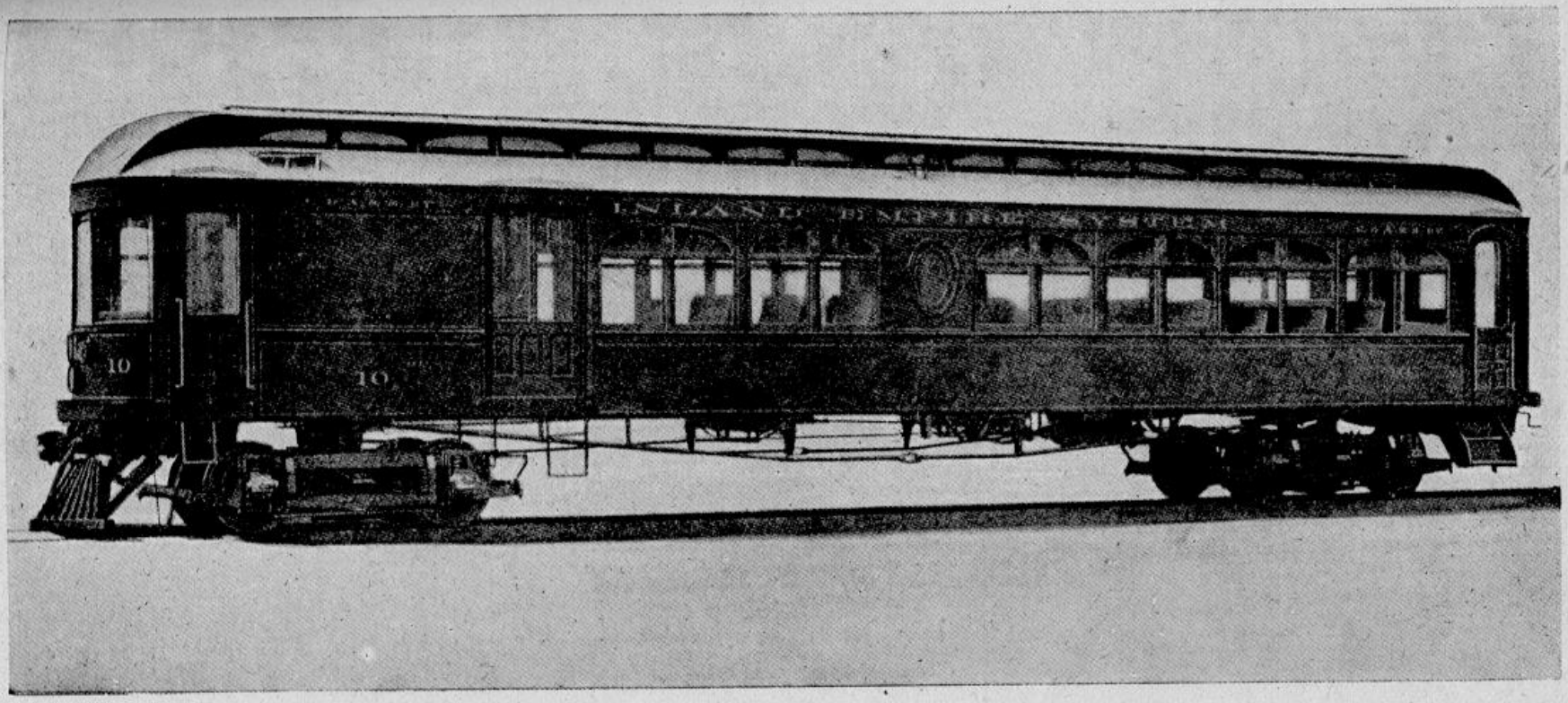


Fig. 513.

Voiture automotrice américaine pour service interurbain, montée sur bogies Brill.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

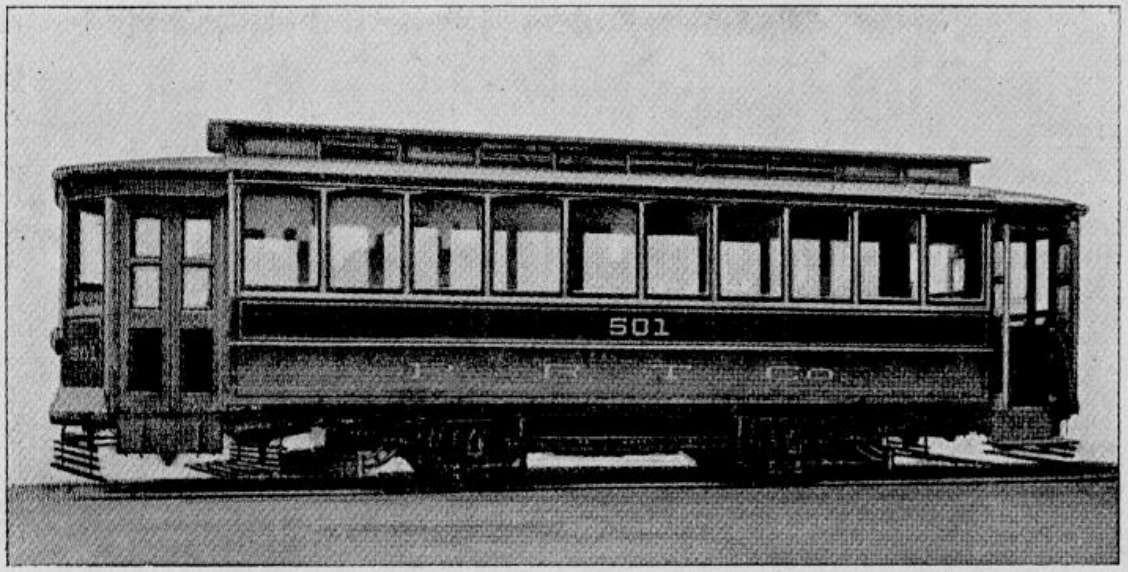


FIG. 514.

Tramway de Philadelphie monté sur truck Brill à essieux radiaux. Empattement environ 3m,30.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce dernier est soulevé, puis rappelé par le ressort U, la pièce X et le levier V s'enclanchent et l'appareil reste dans la position levée.

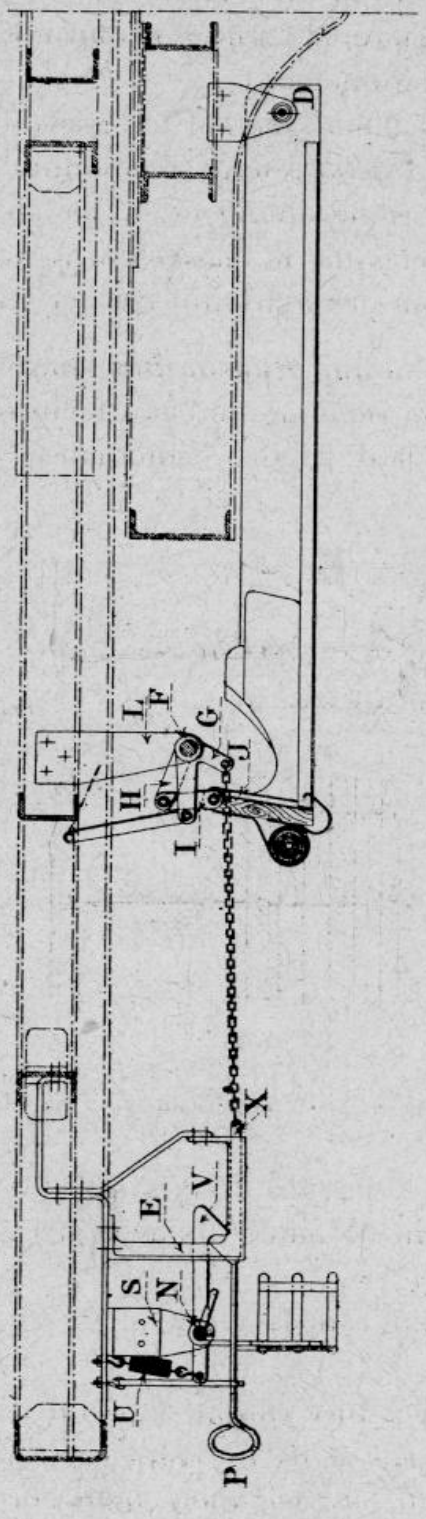


FIG. 515.
Détail du chasse-corps type A. Mariage, de la Compagnie Générale des Omnibus de Paris.

La manœuvre automatique est assurée de la façon suivante: l'ar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bre N porte un cadre métallique qui existe sur toute la largeur de la voiture et qui est muni d'une came placée juste sous le levier V.

Tout obstacle placé sur la voie et rencontré par la voiture fait tourner le cadre vers l'arrière, la came rencontre le levier V et l'appareil se déclanche automatiquement.

Dans son mouvement d'abaissement le chasse-corps met en outre en communication avec l'atmosphère la conduite générale du frein à air; le train est ainsi freiné quand le chasse-corps tombe.

La voiture étant symétrique, le chasse-corps à extension automatique est monté à chacune des extrémités de la voiture.

Ramasse-corps automatique Hudson-Bowring. — Cet appareil en usage, en particulier, à la Compagnie des Chemins de fer Nogentais, se compose (fig. 516) de deux parties principales :

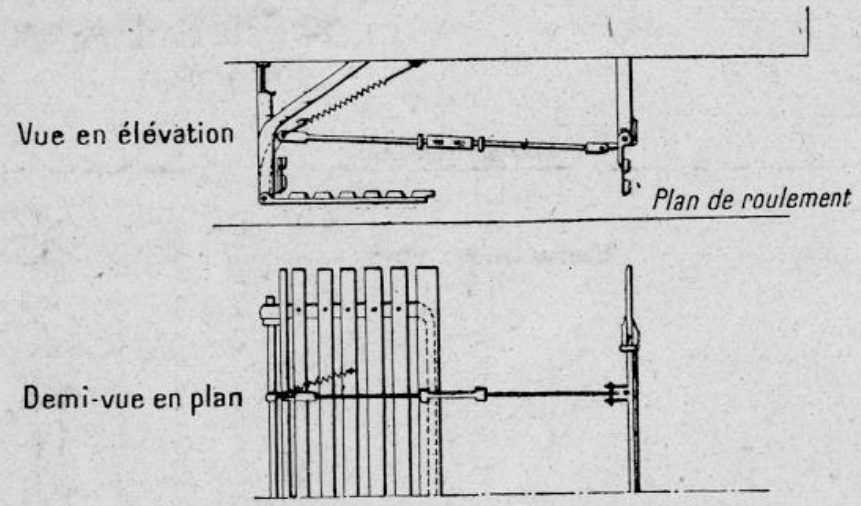


FIG. 516.

Détail du ramasse-corps Hudson-Bowring de la Compagnie des Chemins de fer Nogentais.

Un volet mobile fixé à l'avant de la voiture.

Un ramasse-corps fait de lattes montées sur un cadre en fer fixé en avant des roues.

Ces deux parties sont reliées entre elles par des leviers et des tringles.

Le fonctionnement est fort simple : quand le volet rencontre un corps étranger sur la voie, il oscille vers l'intérieur, sous l'effort, et provoque immédiatement le déclanchement du ramasse-corps qui tombe sur le sol et recueille le corps.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

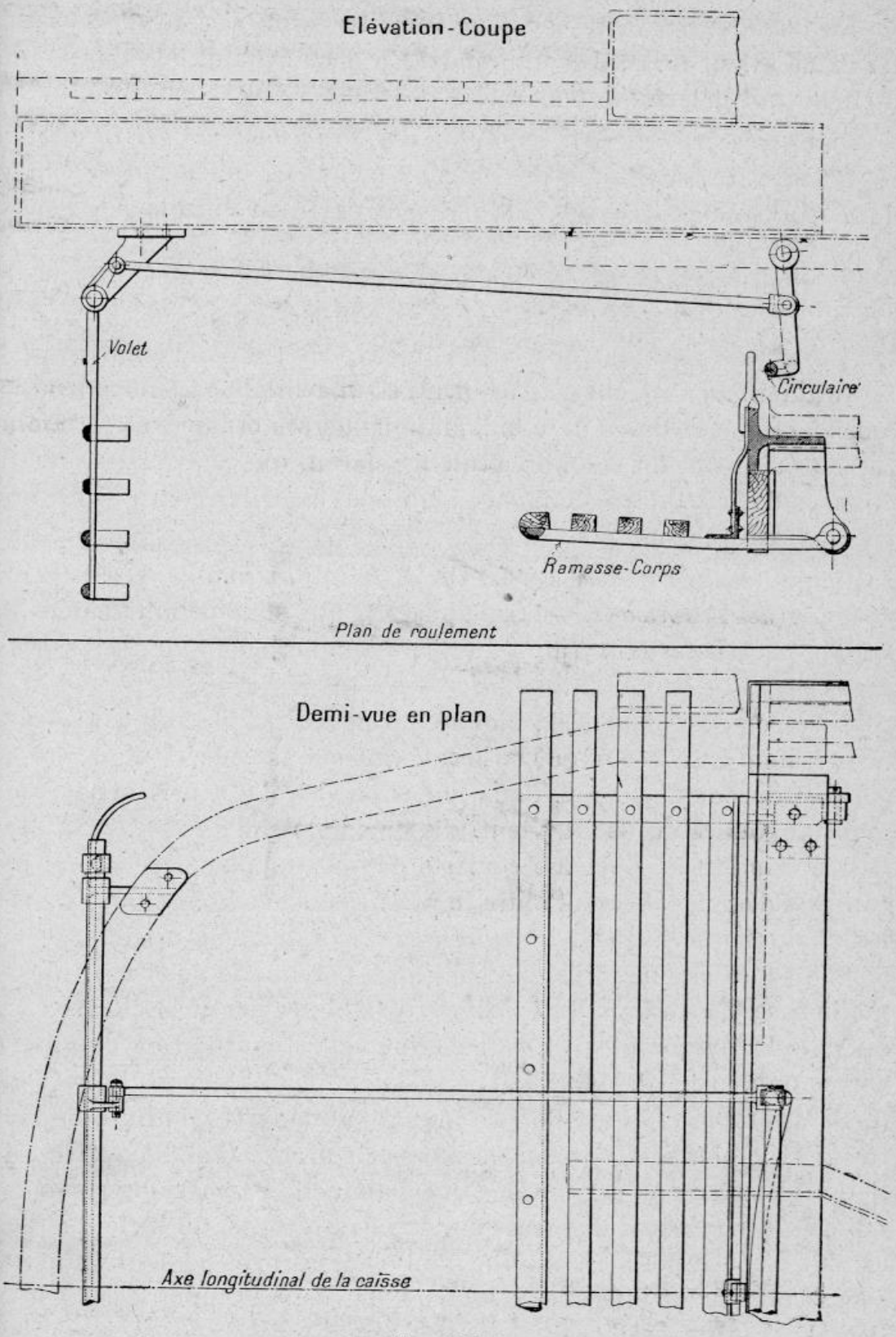


FIG. 517.

Détail du ramasse-corps de la Compagnie de l'Est-Parisien.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En outre, le ramasse-corps agit sur les sablières, étant relié par un câble à leur arbre de commande. En déclanchant, il actionne une biellette qui détermine l'ouverture des sablières.

Ramasse-corps de la Compagnie des Tramways de l'Est-Parisien. — Cet appareil participe des mêmes principes que le précédent et est encore manœuvré automatiquement par un volet placé à l'avant de la voiture.

La figure 517 en montre la disposition.

Cet appareil n'agit toutefois sur aucun des organes de la voiture, la Compagnie estimant que la manœuvre des freins et sablières, par le wattman, au moment de l'accident, est machinale et pour ainsi dire réflexe, et que la manœuvre automatique de ces organes serait moins rapide outre qu'elle compliquerait l'appareil, qui a d'autant plus de chances de fonctionner dans les conditions pour lesquelles il est prévu, qu'il est plus simple.

Chasse-corps-ramasse-corps Ayral, de la Compagnie Générale Parisienne de Tramways. — Cet appareil, qui était primitivement un simple chasse-corps Ayral, a été, par la suite, doublé d'un ramasse-corps.

Il se compose d'un volet mobile qui peut se déplacer par l'effet de la pression d'un corps qui se trouverait sur la voie et d'un chasse-corps proprement dit qui, dans le cas où le volet a pris un déplacement angulaire suffisant, vient glisser sur le sol.

L'originalité du système consiste dans la suppression de tout mécanisme d'enclenchement entre le volet et le chasse-corps. A cet effet, les chaînes qui suspendent le chasse-corps ont leur maillon de tête porté par un crochet à double courbure. Lorsque le volet est armé, le maillon se trouve dans la courbure à faible rayon et le chasse-corps est relevé; lorsque le volet s'est incliné, entraînant l'arbre du chasse-corps dans son déplacement angulaire par l'intermédiaire d'une bielle appropriée, le maillon de tête glisse dans la courbure à grand rayon et le chasse-corps touche alors le sol.

Le chasse-corps est muni d'une banquette ramasse-corps mobile autour de ses points d'attache sur le chasse-corps, de sorte que l'ensemble se compose en réalité d'un chasse-corps et d'un ramasse-corps constituant ainsi deux organes de sécurité superposés. En cas de raté du ramasse-corps, le chasse-corps fonctionne encore et empêche la victime de passer sous les roues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La Compagnie a adopté ce système à deux degrés, parce qu'elle estime qu'un ramasse-corps seul est susceptible de plus de ratés qu'un chasse-corps proprement dit.

En fonctionnant, le chasse-corps agit sur le frein à air et sur les sablières.

212. **Attelages.** — Les types d'attelage employés sont assez nombreux en matière de tramway et chemin de fer d'intérêt local. Nous mentionnerons surtout l'attelage Cloos à tulipe employé par plusieurs Compagnies de tramways, à Paris, l'attelage à tampon central avec deux tendeurs, l'attelage genre Brill avec ressort de choc et de traction en fil rond, enfin l'attelage automatique Boirault, qui paraît être l'un des meilleurs, sinon le meilleur, lorsqu'on veut faire un service de remorque accéléré et qui offre en outre toute sécurité pour le personnel chargé de procéder à l'attelage des voitures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVII

TRACTION PAR AUTOMOTRICES INDÉPENDANTES

SOMMAIRE. — De l'emploi des automotrices indépendantes en général.

I. — **Traction par accumulateurs.**

A. — Tramways.

Remarques générales sur l'emploi des accumulateurs. — Lignes à traction uniquement par accumulateurs. — Lignes à traction mixte par accumulateurs et trolley (ou caniveau). — Installation des éléments dans les voitures. — Régulation de la vitesse des voitures. — Exemples de tramways urbains à accumulateurs.

B. — Automotrices sur voies ferrées.

Développement de la traction par accumulateurs en Allemagne.

II. — **Automotrices thermo-électriques.**

A. — Emploi du moteur a explosion.

Dispositions générales employées. — Automotrices à transmission électrique. — Automotrices à transmission mixte et à récupération. — Système Pieper. — Comparaison entre les deux systèmes. — Consommation de combustible dans les automotrices pétroléo-électriques.

B. — Emploi du moteur a combustion interne.

Automotrices de l'Etat suédois. — Automotrices des chemins de fer saxons et prussiens.

C. — Remarques générales sur l'emploi des voitures thermo-électriques. — Applications.

213. **De l'emploi des automotrices indépendantes en général.** — L'avantage que présente l'emploi des voitures automotrices indépendantes réside essentiellement, quel que soit leur système de propulsion: vapeur, accumulateurs, ou pétroléo-électrique, dans la possi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bilité de former des trains de poids plus réduits et par suite de réaliser une fréquence des trains plus grande que dans le cas de locomotives à vapeur. A cet accroissement de fréquence correspond, en général, un accroissement de trafic et par conséquent de recettes permettant, si les dépenses de conduite, de combustible et d'entretien ne sont pas trop élevées, de rémunérer les dépenses de premier établissement de certaines lignes secondaires ou locales qui, exploitées par locomotives à vapeur, ne pourraient donner le même résultat.

Cette application des automotrices indépendantes pourrait même avantageusement s'étendre à certaines lignes principales des grands réseaux et permettrait d'accroître la vitesse commerciale des trains de long parcours en supprimant les arrêts aux gares secondaires et en desservant ces gares par des automotrices indépendantes faisant la navette entre les gares principales. Ce mode d'exploitation, séparant le trafic général du trafic local, permettrait de satisfaire aux exigences, souvent en opposition à l'heure actuelle, de ces deux trafics et d'augmenter la rapidité et la fréquence des communications, lesquelles, rapidité et fréquence, sont réclamées impérieusement par les voyageurs.

A ce propos, il y a lieu de remarquer que l'automotrice à accumulateurs et l'automotrice pétroléo-électrique à transmission électrique, qui ne comporte aucune liaison mécanique permanente entre le moteur thermique et les essieux, peuvent être intercalées dans un train à vapeur à la façon d'une voiture de remorque ordinaire. Arrivée à un certain endroit du parcours, la voiture de l'un ou l'autre système peut être débranchée, mise en route et continuer ensuite par ses propres moyens dans une direction différente de celle du train à vapeur. On pourrait ainsi sans transbordement et sans locomotive en attente aux points de bifurcation, former facilement des trains directs pour plusieurs directions.

Il nous semble qu'à l'heure actuelle, la traction par automotrices indépendantes, surtout du système pétroléo-électrique, doive s'imposer comme une nécessité, soit dans les conditions d'emploi ci-dessus indiquées pour venir en aide au trafic sur les grandes lignes, soit pour se substituer à la traction à vapeur sur les lignes secondaires ou d'intérêt local, ne serait-ce, dans ces derniers cas, qu'en vue d'économiser le charbon, en dehors de toute autre question de confort, de conduite plus facile, d'accroissement des vitesses moyennes par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'amélioration des démarrages, de réduction des frais d'entretien, etc....

Nous allons examiner successivement les deux systèmes d'automotrices indépendantes en usage, celui par accumulateurs et celui par groupes électrogènes type pétroléo-électrique.

Pour le premier système, on trouve des applications aux voitures type tramway et aux voitures type automotrice du service chemin de fer à voie étroite ou normale, qui constitue la classe d'applications la plus importante et à laquelle se rapportent les considérations générales précédentes.

Pour le second système, on ne trouve guère d'applications qu'aux voitures type automotrice.

I. — Traction par accumulateurs.

A. — Tramways

214. **Remarques générales sur l'emploi des accumulateurs en traction.** — En traction en général, et plus particulièrement en matière de tramway, le régime de fonctionnement des accumulateurs est très défavorable à cause des variations mêmes de ce régime et de l'importance du débit que ces appareils ont à fournir fréquemment et pendant des temps très courts, comme aux démarrages. En ce qui concerne cette dernière circonstance, il est bien connu que plus la décharge d'un accumulateur est rapide, c'est-à-dire plus on utilise rapidement son énergie potentielle, plus il se fatigue vite. A ce propos, il n'est pas inutile de rappeler que la capacité en ampère-heures ou en watts-heures d'un accumulateur, qui mesure l'énergie que peut restituer cet accumulateur, est essentiellement variable suivant son *régime de décharge*. Ainsi pour prendre un exemple, afin d'illustrer ce fait, une batterie sera caractérisée par les capacités suivantes:

CAPACITÉ en ampères-heures.	DURÉE DE LA DÉCHARGE en heures.	INTENSITÉ MAXIMA en ampères à la décharge.
100	1	100
120	2	60
150	3	50
166	5	33,2
200	10	20

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les valeurs données dans cet exemple satisfont à la formule simple $C = It$, définissant la capacité d'un élément, I étant l'intensité du courant débité et t la durée de la décharge. Les valeurs de l'intensité sont alors des valeurs maxima qui correspondraient à un *accumulateur parfait*. En pratique toutefois, la loi définissant la capacité d'un accumulateur est plus complexe et est représentée par la formule de Peukert :

$$C = I^n t$$

dans laquelle l'intensité du courant débité I entre avec un certain exposant n appelé constante de Peukert. En général, n varie entre 1,2 et 1,5 pour un accumulateur au plomb ; $n = 1$ pour l'accumulateur parfait.

Le rendement d'un accumulateur atteint 90 à 92 p. 100 en quantité et 75 à 80 p. 100 en énergie, suivant les régimes de charge et de décharge.

Il est d'autant plus grand que régime de charge est plus bas.

La charge d'un accumulateur s'effectue à raison de 2,5 à 2,6 volts par élément. Par suite, avec une tension moyenne de 550 volts, on pourra opérer la charge d'une batterie d'environ 210 éléments.

Quant à la décharge, au début de cette période, la d. d. p. par élément est d'environ 2 à 2,1 volts, mais cette d. d. p. baisse assez rapidement et il convient en général d'arrêter la décharge quand elle atteint les valeurs suivantes, dépendant du régime de décharge :

1,70 volts pour	une décharge en	une heure ;
1,80	—	cinq heures ;
1,85	—	dix heures.

Enfin, on peut compter en moyenne, sur un débit de 2 à 2,5 ampères (maximum), par kilogramme d'élément au plomb, soit par suite, sur une puissance massique d'environ 4 watts. Ces chiffres moyens se rapportent au kilogramme de bac complet, bac proprement dit, élément liquide, connexions, etc. Pour un régime momentané, on peut doubler ces quantités.

On peut ainsi facilement prédéterminer, connaissant la puissance nécessaire à développer aux jantes des roues motrices pour assurer la propulsion d'un véhicule, le poids de la batterie qu'il y a lieu de prévoir. On arrive d'ailleurs rapidement à des poids considérables et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

inadmissibles dès qu'il s'agit de franchir des rampes un peu importantes, soit 2 p. 100. D'ailleurs, le fait qu'un accumulateur se fatigue d'autant plus vite que le régime de décharge est plus rapide s'ajoute à ce résultat pour exclure l'emploi des accumulateurs sur les lignes accidentées. D'autre part, il ne faut pas trop compter sur l'effet de la récupération de l'énergie dans les descentes en faisant travailler les moteurs en générateurs pour charger la batterie, car cette circonstance n'est réellement intéressante que dans le cas de pentes importantes ; mais alors il faut observer que dans l'ascension de ces rampes, les accumulateurs fourniront un fort débit, ce qui leur sera très préjudiciable.

Enfin, et d'une manière générale, il ne faut pas perdre de vue que l'emploi d'accumulateurs conduit au transport d'un supplément de poids, d'où augmentation de la puissance des moteurs nécessaires et souvent renforcement des voies.

En résumé, et dans l'ensemble, la traction par accumulateurs n'est pas économique, ni au point de vue coût du matériel roulant, ni comme exploitation — la voiture à accumulateurs consomme, toutes choses égales d'ailleurs, une quantité d'énergie 70 à 80 p. 100 plus grande qu'une voiture à alimentation directe, — ni comme entretien, parce que les éléments s'usent rapidement, et que leurs recharges fréquentes exigent un personnel exercé tout en occasionnant une perte de temps considérable.

L'emploi des accumulateurs en tramway ne paraît, en définitive, admissible, que dans les cas spéciaux où le trolley et le caniveau sont absolument proscrits, le trolley pour raison d'esthétique, le caniveau pour raison de dépenses de premier établissement trop élevées.

Les lignes à accumulateurs peuvent d'ailleurs être purement à accumulateurs ou mixtes accumulateurs et trolley ou caniveau.

Ajoutons enfin qu'en Europe, on emploie généralement des accumulateurs au plomb, tandis qu'en Amérique la faveur est aux accumulateurs alcalins fer-nickel.

215. **Lignes à traction uniquement par accumulateurs.** — Pour de telles lignes, il faut des stations de charge (lesquelles sont en général aux terminus) et nécessairement un matériel de rechange important en tant que batterie. En outre, les opérations de recharge conduisent à des arrêts naturellement prolongés, ce qui est fâcheux. D'autre part

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les opérations de recharge doivent, la plupart du temps, être effectuées assez rapidement pour éviter d'avoir un nombre exagéré de batteries de rechange, et cela constitue une nouvelle circonstance défavorable.

Ce système de traction est, en somme, très défectueux et ne convient guère que dans des cas très particuliers. Une amélioration est réalisée dans le mode de traction mixte que nous allons examiner.

216. **Lignes à traction mixte par accumulateurs et trolley (ou caniveau).** — Lorsqu'une partie de la ligne peut être équipée en fil aérien, il est préférable, au lieu d'effectuer la recharge des accumulateurs aux stations de charge, de prendre le courant nécessaire à cet usage en cours de route. La batterie se trouve à cet effet intercalée entre le fil aérien et les rails par l'intermédiaire d'un interrupteur qui permet de l'isoler, au besoin, lorsque sa charge est complète.

La charge s'effectue ainsi sous la tension même d'alimentation des moteurs pendant le parcours équipé en ligne aérienne ou plus généralement en alimentation extérieure. Pendant le parcours non équipé de cette façon, les moteurs recevant le courant de la batterie, se trouvent alimentés sous une différence de potentiel moindre. Pour un même effort à développer, la vitesse est donc plus faible dans le second cas que dans le premier. Si, par exemple, la tension d'alimentation du trolley est de 550 volts, on devra compter, pour une batterie ordinaire de 210 éléments, sur une tension d'environ $210 \times 1{,}8 = 380$ volts en moyenne pendant la marche avec accumulateurs seuls. La réduction relative de vitesse sera ainsi approximativement dans le rapport $\frac{550 - 380}{550}$, soit environ 30 p. 100.

Cet écart de tension exige des précautions spéciales pour l'éclairage. On dispose les lampes de telle manière que dans un circuit de 5 lampes en série, une d'elles puisse être mise en court-circuit pendant la marche avec accumulateurs seuls.

Avec ce mode d'alimentation des batteries, il est assez difficile de se rendre compte de leur état de charge. On peut, cependant, à cet effet, employer un compteur de quantité, mais ce procédé est en lui-même d'une application délicate et, de plus, l'installation d'un compteur sur une voiture, présente des difficultés à cause des trépidations qui détériorent les appareils ou faussent leurs indications.

On peut dire que la difficulté de se rendre compte de l'état de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

charge de la batterie est un écueil sérieux de la traction par accumulateurs.

L'emploi de la traction mixte par accumulateurs et conducteur présente un autre inconvénient qui provient de ce que la tension d'alimentation au conducteur aérien est essentiellement variable, à cause des pertes en ligne dépendant de la position et du nombre des voitures en circulation. Il en résulte que le régime de charge de la batterie est également très variable.

Les figures 518 et 519 représentent les schémas simplifiés pour un équipement à accumulateurs et trolley et pour un équipement à accumulateurs, trolley et caniveau.

217. **Installation des éléments dans les voitures.** — Les batteries sont généralement placées dans des caisses suspendues sous les voitures.

Cette disposition est préférable à celle qui consiste à placer les accumulateurs sous les banquettes, à cause des émanations acides qui incommodent les voyageurs. Si cette dernière disposition doit néanmoins être adoptée, on doit prévoir une aération constante et très efficace de l'endroit où la batterie est logée ; néanmoins, cet arrangement est incommode et, de plus, dangereux, la stagnation des mélanges gazeux pouvant amener une explosion à la moindre étincelle.

Les éléments sont montés dans des bacs en ébonite et groupés en compartiments qui n'en contiennent, en général, pas plus de 30 ou 40, en vue de faciliter leur manutention et leur isolement.

218. **Régulation de la vitesse des voitures.** — Si la ligne est à parcours très régulier, on peut laisser toute la batterie en série et on fera usage d'un contrôleur série-parallèle avec un équipement à deux moteurs ou deux groupes de deux moteurs.

Sur les voitures à moteur unique ou à moteurs accouplés mécaniquement, ou bien, quand, avec deux moteurs indépendants, la ligne est à profil très dur, on peut sectionner la batterie en 2, 3 ou 4 sections et réaliser ainsi des modes de régulation de la vitesse par variation même de la tension de la source.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

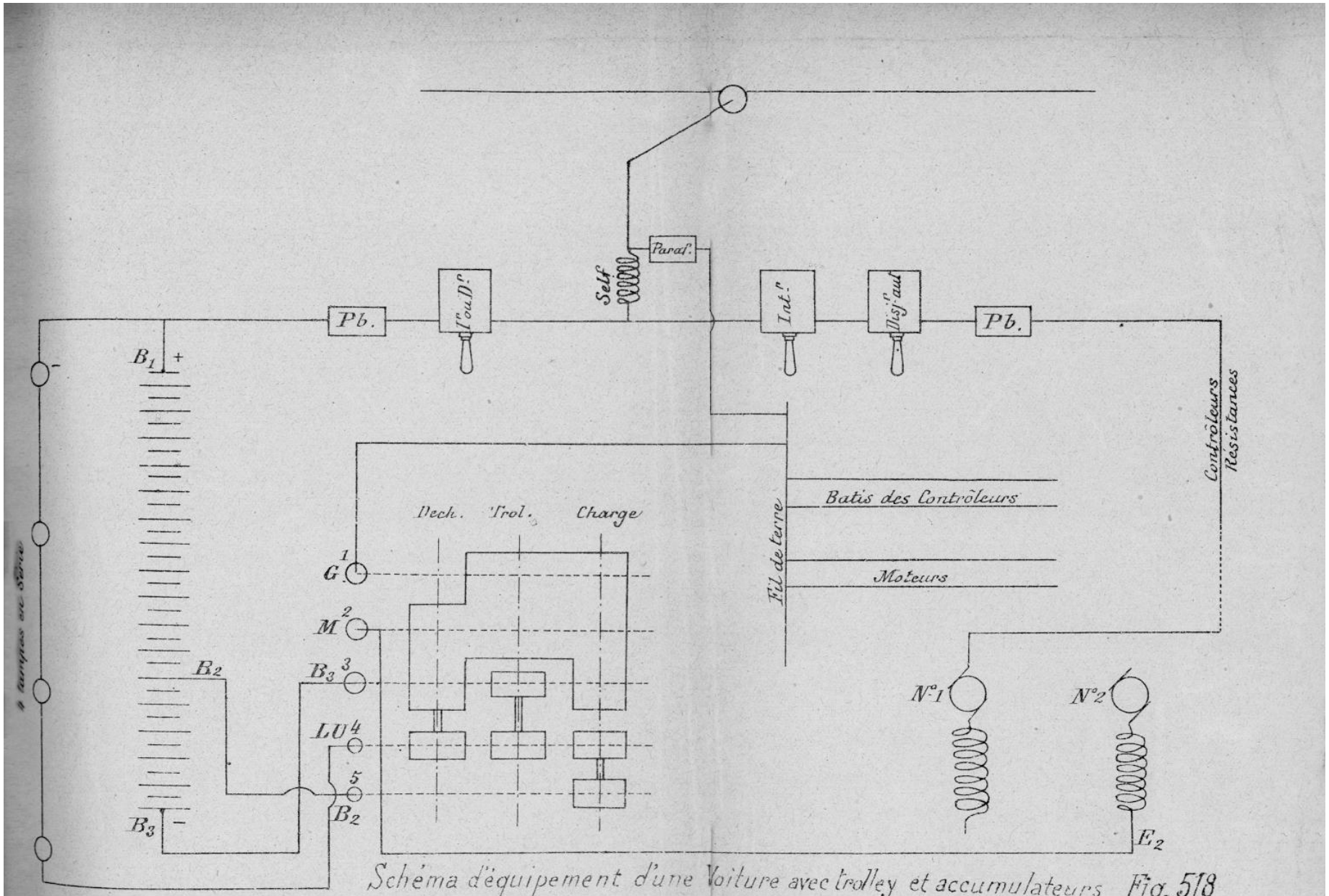


Schéma d'équipement d'une Voiture avec trolley et accumulateurs Fig. 518

La batterie est toujours séparée de la terre sauf quand elle est en charge.
L'éclairage est pris sur toute la batterie sauf pendant la charge où l'on ne prend qu'une portion de la batterie.
Les deux commutateurs ont leurs bornes semblables réunies. La Manette ne peut se sortir qu'a zéro.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

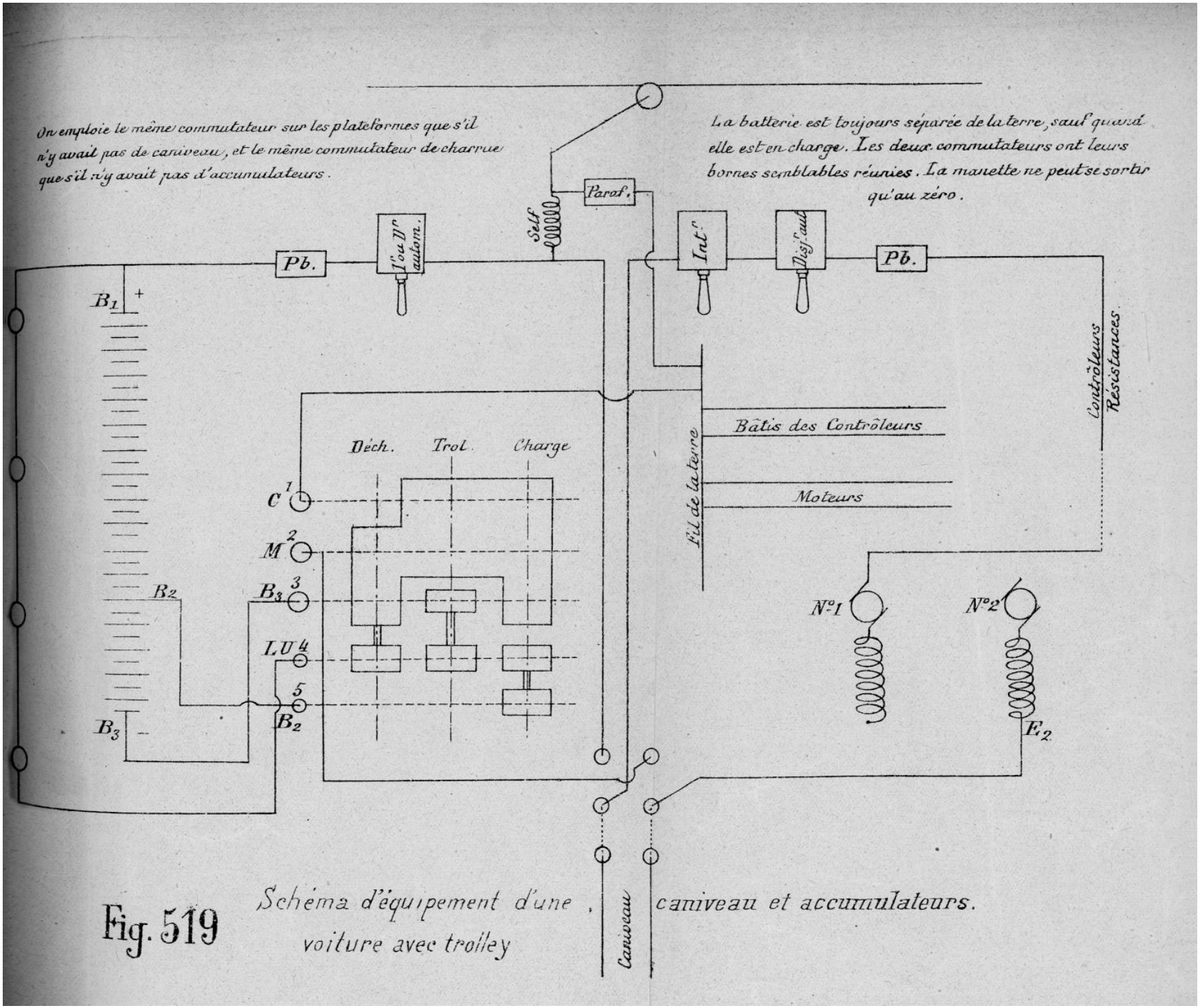


Fig. 519 Schéma d'équipement d'une voiture avec trolley, caniveau et accumulateurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

219. **Exemples de tramways urbains à accumulateurs.** — Plusieurs lignes à traction mixte ont été exploitées à Paris : trolley dans les parties suburbaines et accumulateurs en ville. Quelques lignes étaient uniquement à accumulateurs. Aucune d'elle ne subsiste d'ailleurs actuellement. A titre de renseignements, nous donnerons, toutefois, les caractéristiques principales des anciennes lignes de Paris-Saint-Denis (Opéra-Saint-Denis et Madeleine-Saint-Denis) qui étaient exclusivement à accumulateurs :

Les voitures étaient à truck rigide à deux essieux-moteurs avec caisses d'accumulateurs sous le châssis et aux extrémités.

Un parcours aller et retour comprenait un développement d'environ 18 kilomètres.

La capacité totale des accumulateurs était de 50 ampères-heures, et la batterie comprenait 180 éléments dont le poids total était de 4.500 kilogrammes.

Les voitures pesaient, en charge, environ 14.500 kilogrammes et étaient équipées avec deux moteurs Walker de 35 chevaux, donnant une vitesse moyenne de 11 à 12 kilomètres à l'heure.

La consommation d'énergie était en moyenne d'environ 120 watts-heure par tonne-kilomètre pour un parcours complet aller et retour.

Enfin, la durée moyenne des accumulateurs était d'environ 18.000 kms pour les plaques positives, et 32.000 kms pour les plaques négatives.

Les batteries étaient enlevées pour être rechargées à chaque voyage aller et retour.

Nous mentionnerons, comme installations récentes, les suivantes, réalisées aux Etats-Unis : à New-York, les tramways de la 3e Avenue et ceux de la 110e Rue. Ces voitures sont de 6 tonnes à 26 places assises, et sont mues par deux moteurs fonctionnant avec un courant de 30 ampères sous 125 volts, attaquant les essieux au moyen de chaînes silencieuses. La Compagnie qui a fourni les accumulateurs (Gould Storage Battery Co), assume à forfait l'entretien complet des batteries. A New-Jersey, on trouve des voitures du même genre. Leurs batteries sont suffisantes pour assurer, sans recharge, un parcours de 240 kilomètres. Les moteurs, au nombre de deux, sont de 50 chevaux sous 110 volts et attaquent encore les essieux par l'intermédiaire de chaînes. Enfin à Washington également, des voitures à accumulateurs sont en service. Elles sont toutefois plus lourdes, elles pèsent 13,5 tonnes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

B. — Automotrices sur voies ferrées.

220. Développement de la traction par accumulateurs en Allemagne. — Si les résultats de la traction par accumulateurs, appliquée aux tramways, ne sont guère satisfaisants, il semble que ce mode de traction, traction purement par accumulateurs, d'application relativement récente sur les voies ferrées à grande traction, a donné et donne, en Allemagne, des résultats très encourageants. Ce système paraît, en effet, s'y développer avec succès.

Dès 1896, la Compagnie *Siemens-Schuckert* mettait en service, à titre expérimental, sur les chemins de fer Platz, de l'Etat bavarois, entre Ludwigshafen et Neuestadt, des automotrices à accumulateurs dont les moteurs étaient de 40 à 50 chevaux environ, tournant à 750 et 840 tours à la minute. La vitesse était de 50 kilomètres à l'heure, en palier. Les accumulateurs étaient du type *Tudor* et comprenaient 124 éléments à 7 plaques ; capacité : 200 ampères-heures.

La question demeura stationnaire jusqu'à la fin de 1908, lorsque le Gouvernement prussien décida de faire des essais de véhicules à accumulateurs pour un service suburbain autour de Mayence (Mayence-Oppenheim-Russelheim-Ingelheim) avec un parcours total d'environ 45 à 50 kilomètres, et une vitesse variant entre 32 et 48 kilomètres à l'heure environ.

Les véhicules de cette ligne sont équipés par la Société *Siemens-Schuckert* et ressemblent extérieurement aux wagons à voyageurs des chemins de fer à vapeur. Ils sont divisés en six compartiments à 10 places assises, chaque. Les accumulateurs sont sous les banquettes et sont de la « Accumulatoren Fabrik Hagen ». La batterie entière comprend 180 éléments ; sa capacité est de 230 ampères-heures avec un régime de décharge de 100 ampères. Avec une seule charge on effectue un parcours de 58 kilomètres à la vitesse de 38 kilomètres à l'heure. Chaque élément complet pèse 50 kilogrammes et comprend quatre plaques positives. Les plaques sont de 310 × 300 millimètres et leur épaisseur est de 8 millimètres pour les positives, et 6 millimètres pour les négatives. La batterie complète pèse environ 10 tonnes et fournit 68,5 kilowatts-heure en une seule décharge. Leur capacité est donc de 6,85 watts-heure par kilogramme. La durée d'une plaque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

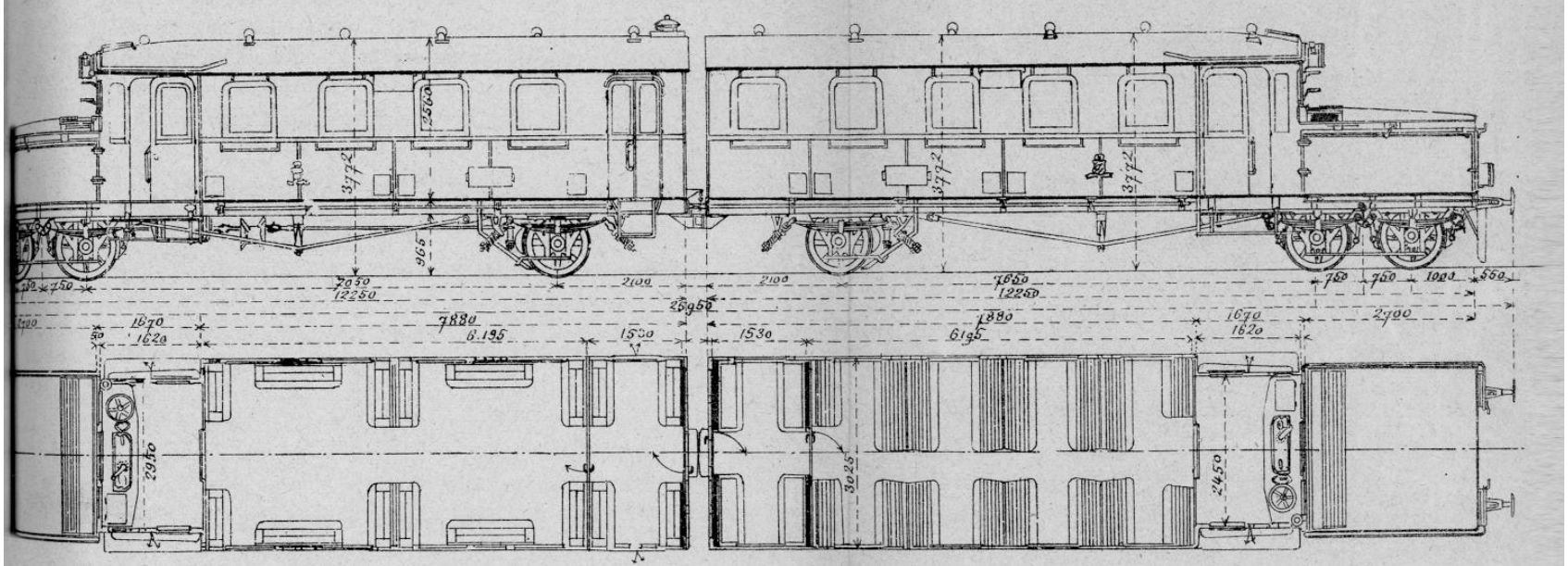


Fig. 520 *Automotrices à accumulateurs de la Felben-Guilleaume-Lahmeyerwerke*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

positive est estimée correspondre à 100.000 voitures-kilomètre et celle d'une négative à 60.000.

La voiture toute équipée pèse 35 tonnes et comprend deux moteurs de 25 chevaux pesant au total 2,4 tonnes. Les moteurs sont prévus pour le contrôle série-parallèle.

D'autres véhicules, pour le même service, ont été équipés par la Compagnie *Felten-Guilleaume-Lahmeyer,* avec accumulateurs de la « Akumulatoren Fabrik A. G. de Berlin ». Les premiers essais officiels ont eu lieu sur la ligne Mayence-Gangesheim-Münster. La longueur totale du parcours était d'environ 44 kilomètres.

Une unité complète se compose en réalité de deux automotrices électriques dont l'ensemble est représenté sur la figure 520.

L'équipement électrique pour une automotrice double formant un train comprend une batterie de 168 éléments en deux compartiments spéciaux, chacun contenant 84 éléments, et situés chacun à une extrémité du train, en avant de la cabine du wattman et sur une sorte de truck porteur à deux essieux. Les roues de ces deux essieux peuvent être freinées. La batterie envoie son courant à deux moteurs-série à pôles supplémentaires de 80 chevaux chacun sous 300 volts (au régime horaire) attaquant par engrenages les deux essieux du milieu du train. La capacité de la batterie complète est de 368 ampères-heure avec un courant de décharge de 184 ampères. Le voltage total obtenu est de 310 volts. Une distance de 100 kilomètres, sur une voie peu accidentée mais avec des arrêts qui peuvent être même assez fréquents, peut être couverte avec une seule charge, soit avec une dépense d'énergie de 114.000 watts-heure environ, et la vitesse maxima possible en palier est de 58 kilomètres-heure. Le poids total du train à pleine charge est de 62 tonnes et comprend 100 places assises.

Une autre automotrice double du même type a été équipée par l'*Allgemeine Electricitäts Gesellshaft de Berlin,* avec des accumulateurs de la Compagnie des Accumulateurs de Hagen. Cette Compagnie a entrepris de s'occuper complètement de l'entretien des accumulateurs, moyennant une redevance de 7,5 pfennigs par voiture-kilomètre, la main-d'œuvre étant fournie par le Gouvernement prussien et les matériaux envoyés à pied-d'œuvre par la Compagnie des Accumulateurs. Si la Compagnie devait fournir la main-d'œuvre, la redevance serait portée à 9 pfennigs par voiture-kilomètre.

Dans le cas ci-dessus, la régulation de la vitesse est effectuée au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moyen d'un contrôleur série-parallèle. Il y a un contrôleur à chaque extrémité de l'automotrice double.

Signalons enfin que l'administration allemande a mis en service, à titre expérimental, une automotrice à accumulateurs munie de moteurs shunt. Le but de l'emploi des moteurs shunt est de permettre de réaliser la récupération de l'énergie dans les descentes en faisant fonctionner les moteurs comme dynamos génératrices pour alimenter les batteries.

Les batteries sont identiques à celles employées sur les automotrices munies de moteurs-série des chemins de fer prussiens ; elles comportent donc 168 éléments au total ; la propulsion est assurée au moyen de deux moteurs shunt à pôles de commutation. Ces moteurs sont montés d'une façon permanente en série avec la batterie ; le réglage de leur vitesse de marche s'effectue en agissant sur l'excitation et permet de modifier la vitesse entre des limites dans le rapport de 1 à 2,5. Sur les lignes qui comportent de nombreuses descentes assez accentuées, de 1,6 p. 100 par exemple, on peut réaliser une récupération d'énergie importante ; d'après les essais effectués jusqu'ici, la dépense totale d'énergie sur ces lignes est de 20 p. 100 approximativement plus grande pour les automotrices munies de moteurs-série que pour les automotrices pourvues de moteurs shunt.

En palier, la vitesse moyenne est de 60 kilomètres à l'heure ; sur les descentes de 1,25 p. 100, à la vitesse de 30 kilomètres à l'heure, on récupère un courant de 150 ampères environ, avec une tension de 370 volts aux bornes de la batterie.

II. — **Automotrices thermo-électriques.**

221. **Introduction.** — Ces automotrices utilisent un groupe électrogène comme générateur d'électricité.

Leur origine remonte à la locomotive Heilmann, essayée sur le réseau des chemins de fer de l'Ouest, en 1893-1894, et qui comprenait un groupe électrogène à vapeur, ainsi que nous l'avons vu antérieurement. L'énergie électrique produite alimentait les huit moteurs d'essieu et la régulation de la vitesse était obtenue par application de la méthode Ward-Léonard.

Ce système de traction, comportant sur le véhicule même son

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usine génératrice, fut très discuté à l'époque de son apparition, et il a fallu le développement de l'automobile et les perfectionnements apportés dans la construction des moteurs à explosion pour que ce système à transmission électrique revint en faveur, sous la forme de la voiture pétroléo-électrique. Comme toutefois le pétrole n'est pas le seul combustible employé avec le moteur à explosion — on emploie, en effet, la gazoline ou essence de pétrole et le benzol — et qu'en outre le moteur à combustion interne type Diesel commence à être employé, nous conserverons pour cette classe d'applications le nom général de système thermo-électrique.

A. — Emploi du moteur a explosion

222. **Dispositions générales employées.** — Les dispositifs adoptés pour les automotrices à moteur à explosion sont nécessités par l'emploi de ce type de moteur (1).

Le moteur à explosion ne pouvant démarrer en charge, il faut employer des organes permettant d'effectuer sa mise en marche à vide. De plus, le moteur à explosion étant un moteur à couple sensiblement constant qui doit, pour être économique, fonctionner au-dessous de la vitesse correspondant au maximum de puissance et, pour éviter tout calage, fonctionner au voisinage de cette vitesse, il s'ensuit qu'il est indispensable d'interposer entre le moteur et les essieux à commander des organes permettant de faire varier la vitesse de la voiture, tout en laissant sensiblement constante la vitesse du moteur.

De là trois dispositifs de transmission du couple moteur:

1° Un dispositif mécanique, comportant entre le moteur et les essieux, une transmission à embrayage et changement de vitesse à engrenages (dispositif employé pour les automobiles) ;

2° Un dispositif électrique, comportant l'emploi d'une dynamo-génératrice et de moteurs électriques d'essieu ;

---

(1) Ce qui suit est extrait d'une communication faite à la Société internationale des Electriciens, par M. Damoiseau, et insérée dans le bulletin de cette société de mai 1913. On trouvera également des renseignements très détaillés sur cette question dans les comptes rendus du XVII° Congrès international de tramways et de chemins de fer d'intérêt local, tenu à Christiania en juillet 1912.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° Une disposition mixte comportant une transmission mécanique et une transmission électrique.

Comme d'autre part, le moteur à explosion peut fonctionner soit à puissance constante, soit à puissance variable (par variation d'admission de gaz) et que la puissance nécessaire à la propulsion de la voiture est variable, il s'ensuit que deux procédés peuvent être envisagés.:

1° Un procédé dans lequel le moteur fournit à chaque instant la puissance nécessaire. C'est le procédé le plus généralement appliqué;

2° Un procédé dans lequel il est fait emploi d'accumulateurs, le moteur fonctionnant à puissance sensiblement constante. Les accumulateurs emmagasinent l'excès de la puissance du moteur ou restituent leur énergie potentielle pour aider le moteur, suivant le cas.

On voit ainsi que, théoriquement tout au moins, un assez grand nombre de systèmes d'automotrices sont possibles.

Pratiquement, les différents types de voitures qui ont été mises en service industriel appartiennent à l'une ou l'autre des deux catégories suivantes :

a) Automotrices à transmission électrique et sans accumulateurs, ce qui est le cas général ;

b) Automotrices à transmission mixte ; cette catégorie est la seule comportant l'emploi d'accumulateurs d'énergie.

Nous allons passer sommairement en revue les principales applications réalisées.

223. **Automotrices à transmission élastique.** — D'une manière générale, la régulation de la vitesse est obtenue par application de la méthode Ward-Léonard comme dans le cas de la locomotive Heilmann. Le moteur à explosion entraîne par attaque directe une dynamo génératrice à voltage variable à auto-excitation ou à excitation séparée, suivant le cas, et le courant produit alimente les moteurs d'essieu. On dispose en plus du contrôle série-parallèle pour compléter la régulation de la vitesse.

1° *Automotrices de la Société anonyme de locomotion électrique.* — En 1904-1905, la Société anonyme de locomotion électrique, propriétaire pour la France des brevets Heilmann, relatifs à la traction, a construit, pour démontrer la valeur pratique du système, une voi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ture pétroléo-électrique à voie de un mètre, dont le groupe électrogène, suspendu, par l'intermédiaire de faux longerons au châssis de la voiture, était placé entre les deux bogies et au-dessous du plancher de la voiture.

La figure 521 donne le schéma de cette automotrice.

Le moteur à gazoline à six cylindres verticaux de 140/160, tournant à 700 tours à la minute, était accouplé directement à une génératrice à excitation indépendante et à l'excitatrice de cette génératrice. Cette excitatrice était compound et à 110 volts.

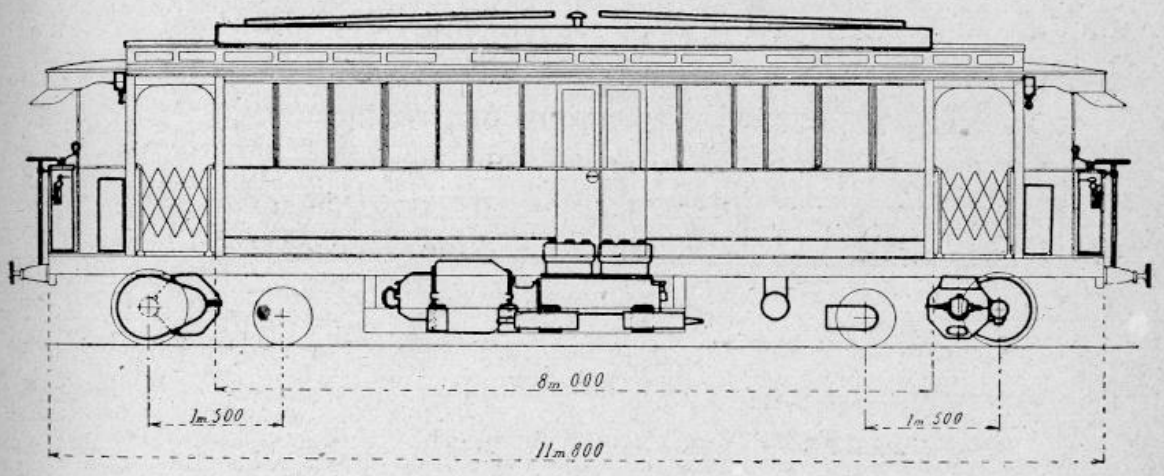


FIG. 521.

Automotrice de la Société anonyme de locomotion électrique.

Un régulateur à force centrifuge, qui agissait sur l'admission des gaz, limitait la vitesse du moteur à 700 tours à la minute, vitesse que le mécanicien pouvait d'ailleurs réduire, des postes de manœuvre, en agissant, par l'intermédiaire d'un renvoi par câble, sur l'admission des gaz.

2° *Automotrices Westinghouse du North Eastern Ry.* — Vers la même époque, des essais de voitures pétroléo-électrique furent effectués par la Société anglaise Westinghouse sur le North Eastern Railway. Le groupe électrogène était installé dans l'une des deux cabines situées aux extrémités de la voiture. La figure 522 montre l'aspect de cette automotrice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le moteur à pétrole, d'une puissance de 80 chevaux, à quatre cylindres horizontaux de 216/254, actionnait, à la vitesse de 420 à 480 tours à la minute, une génératrice de 55 kilowatts, compound à potentiel variable de 300 à 550 volts, avec excitatrice indépendante shunt entraînée par courroie. Cette excitatrice assurait également la charge d'une batterie servant à l'éclairage et au démarrage du moteur à pétrole.

Les deux moteurs d'essieu, d'une puissance unitaire de 55 chevaux, étaient montés sur le bogie placé au-dessous du groupe électrogène. Un contrôleur permettait leur couplage en série-parallèle.

Le moteur à pétrole ayant été préalablement mis en marche au moyen de la batterie d'accumulateurs et ayant atteint sa vitesse de

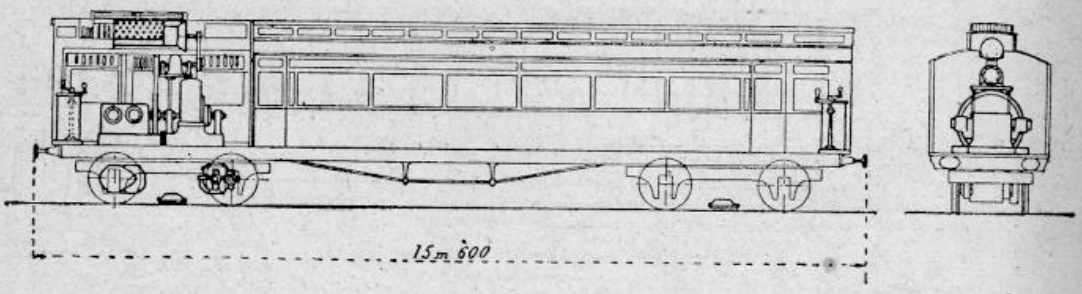


FIG. 522.

Automotrice du " North Eastern Railway ".

régime, on réglait l'excitation de la dynamo pour obtenir 400 volts. On fermait alors son circuit sur les deux moteurs couplés d'abord en série, puis en parallèle, et on augmentait progressivement l'excitation de la dynamo, de manière à obtenir 550 volts.

3° *Automotrices du réseau d'Arad-Osanad.* — Les deux automotrices précédentes n'étaient, en réalité, que des voitures d'essais. La première exploitation, par automotrices pétroléo-électriques, date de 1905-1906 et a été entreprise sur le réseau hongrois d'Arad-Osanad à voie normale et d'un développement d'environ 400 kilomètres.

Ce réseau constitue, d'ailleurs encore, la principale application du système pétroléo-électrique en Europe tout au moins.

Les automotrices sont du système de Dion-Bouton (40 et 70 chevaux) et du système Westinghouse (60 et 90 chevaux), les automotrices de 40 chevaux étant d'ailleurs appelées à disparaître ; à fin 1912, il y avait en service 36 automotrices pétroléo-électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le groupe électrogène des voitures de Dion-Bouton comprend une dynamo compound à 500 volts. Les moteurs d'essieu, au nombre de deux, sont couplés en série-parallèle ; en outre les 4 pôles de chaque moteur sont groupés par deux en série et les deux groupes sont couplés soit en série, soit en parallèle.

Au premier cran du contrôleur : les deux moteurs et les deux groupes d'inducteurs de chaque moteur sont couplés en série.

Au deuxième cran : les deux moteurs sont en série et les deux groupes d'inducteurs de chaque moteur sont en parallèle.

Au troisième cran : les deux moteurs et les deux groupes d'inducteurs de chaque moteur sont en parallèle.

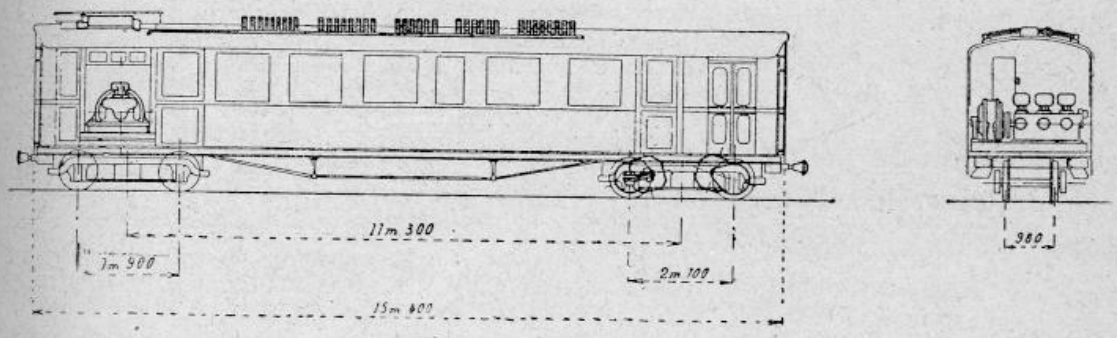


FIG. 523.
Automotrice de la Société anonyme Westinghouse du Havre, chemins de fer de Karlstadt-Munkflers.

Pour passer d'un cran à l'autre, le mécanicien manœuvre d'abord un papillon étrangleur de réglage du débit du carburateur, de façon à réduire la vitesse du moteur à essence, puis il met le contrôleur dans la position appropriée à la marche désirée et enfin il ramène le papillon de réglage dans sa position initiale correspondant à la vitesse de régime. Cette manœuvre a pour but d'éviter de couper le courant par le contrôleur.

4° *Automotrices Westinghouse.* — Les automotrices en service en Europe ont, en grande partie, été équipées par la Société Westinghouse. Elles sont de deux types : l'une comportant un moteur de 60 chevaux, l'autre un moteur de 90 chevaux.

Ces voitures sont toutes conçues suivant le même principe. La figure 523 montre l'aspect de l'une d'elles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le moteur à cylindres verticaux de 140 millimètres d'alésage et de 160 millimètres de course, est accouplé, au moyen d'un manchon élastique, à une génératrice à courant continu à excitation shunt. La tension de la génératrice est réglable depuis 300 jusqu'à 550 volts par variations de l'excitation de la génératrice et de la vitesse du moteur à explosion. Cette génératrice alimente les deux moteurs actionnant deux essieux de la voiture.

Le groupe électrogène est généralement installé dans une cabine de conduite et transversalement à la voiture.

Le moteur et la génératrice sont montés sur un châssis en fers profilés. Pour atténuer les vibrations produites par le moteur à explosion, un bloc de bois et une plaque élastique sont interposés entre le châssis du groupe électrogène et le châssis de la voiture.

Chaque poste de conduite est pourvu des appareils suivants :

Un contrôleur spécial à deux manettes permettant le couplage en série ou en parallèle des moteurs, le réglage de l'excitation de la génératrice, le réglage de la vitesse du moteur à explosion et la marche de la voiture dans les deux sens ;

Les appareils de mesure : ampèremètre, voltmètre ; un disjoncteur, etc. ;

Les appareils de commande des freins à main et à air.

Le frein à air est généralement alimenté par un compresseur mû électriquement et comportant un régulateur automatique de pression.

Les réservoirs d'eau et d'essence sont installés dans la cabine renfermant le moteur à explosion. Le réservoir d'essence est à double enveloppe et son remplissage se fait de l'extérieur.

Le radiateur et le silencieux sont placés sur le toit de la voiture.

Le moteur à explosion, à soupapes commandées, à circulation d'eau et à allumage par magnéto haute tension, comporte un dispositif de décompression facilitant le démarrage à la main par manivelle. Un régulateur à force centrifuge, agissant sur l'arrivée d'air au carburateur, limite la vitesse du moteur à environ 1.000 tours.

Le mécanicien démarre la voiture et règle sa vitesse en manœuvrant le contrôleur. Il fait les couplages série ou parallèle des moteurs et fait varier l'excitation de la génératrice. Pour faire varier l'admission d'air au carburateur et faire varier ainsi la vitesse du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur à pétrole, le mécanicien fait tourner une partie de la manette formant bouton et agit ainsi, par l'intermédiaire d'un câble, sur le régulateur du moteur. Cette commande est donc indépendante de celle de l'excitation de la génératrice et du couplage. Si le bouton est abandonné, le moteur à pétrole ralentit, la dynamo se désamorce et la voiture s'arrête. Ce dispositif prévient ainsi toute défaillance du mécanicien.

Les deux moteurs sont d'abord couplés en série avec excitation maximum de la génératrice, la tension de celle-ci se réglant par la vitesse du groupe.

Les deux moteurs sont ensuite couplés en parallèle, le groupe tournant à sa vitesse maximum et l'excitation étant réduite au début, puis progressivement augmentée.

Sur certaines voitures, il est installé un voltmètre-ampèremètre Ferrié qui permet au mécanicien, par observation du point de croisement des deux aiguilles, de maintenir aussi constante que possible la puissance fournie par le groupe.

Le chauffage de la voiture est obtenu par une circulation de l'eau de refroidissement du moteur.

L'éclairage est généralement assuré par de l'acétylène, ce gaz étant dissous sous pression dans l'acétone contenue dans une bouteille.

Ces automotrices système Westinghouse, dont les dimensions et dispositions en tant que caisse sont variables suivant les lignes exploitées, peuvent remorquer une ou deux voitures.

5° *Automotrices de Bergmann Electricitäts-Unternehmungen Aktien-Gesellschaft.* — Depuis plusieurs années, les chemins de fer de l'Etat prussien s'efforcent de développer l'emploi d'automotrices. Nous avons précédemment mentionné l'emploi, sur ces chemins de fer des automotrices à accumulateurs. En 1907 furent faits des essais d'automotrices pétroléo-électriques dont les résultats furent suffisamment satisfaisants pour que cette administration puisse élaborer un projet d'automotrices pétroléo-électriques dont elle confia l'exécution à deux sociétés allemandes de constructions électriques : A. E. G. et Bergmann. Du fait de ce programme unique, les voitures construites par ces deux sociétés présentent de nombreux points communs.

Les voitures équipées par la Société Bergmann comprennent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chacune un groupe électrogène reposant sur un châssis suspendu élastiquement et s'appuyant directement sur les deux essieux d'un des deux bogies de la voiture ; l'autre bogie recevant les deux moteurs électriques qui sont alimentés par le groupe électrogène (fig. 524).

Cette installation et cette suspension élastique du groupe électrogène sur un bogie facilitent le remplacement rapide du groupe et évitent la transmission à la caisse de la voiture des vibrations engendrées par le moteur à explosion.

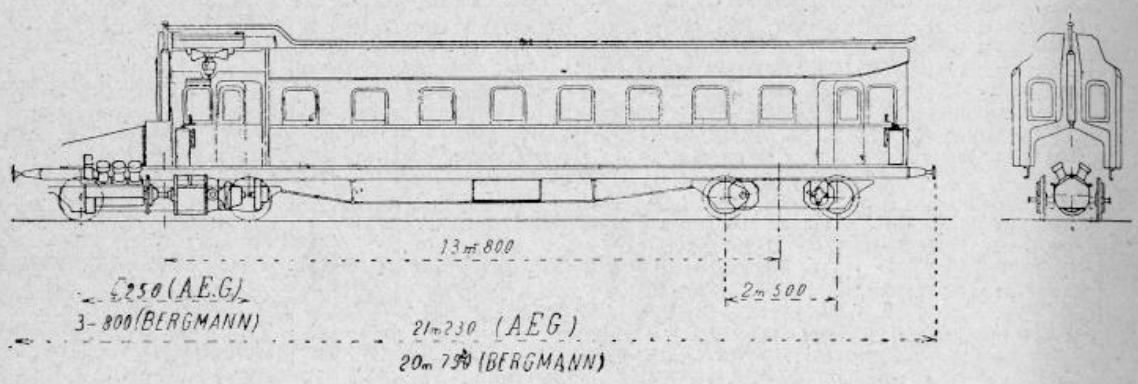


FIG. 524.

Automotrices de l'État prussien (A. E. G. Bergmann).

D'autre part, la caisse de la voiture est en retrait de la traverse d'attelage de façon à dégager complètement le moteur qui est alors recouvert d'un capot amovible. Cette disposition, qui dérive de celle usitée sur les automobiles, présente l'avantage de supprimer tout échauffement et toute odeur à l'intérieur de la voiture et réduit au minimum les dangers d'incendie.

Le moteur à benzol, à six cylindres de 170 millimètres d'alésage et 180 millimètres de course, disposés en V, les deux groupes de trois cylindres faisant un angle de 60°, développe une puissance d'environ 100 chevaux et tourne à 700 tours.

Le régulateur à force centrifuge agit sur l'admission des gaz et est muni d'un dispositif qui, sous la dépendance de la manette du contrôleur, ralentit automatiquement au tiers de sa valeur la vitesse du moteur lorsque celui-ci fonctionne à vide.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le silencieux est placé verticalement devant la paroi frontale de la caisse.

L'allumage électro-magnétique à rupteurs est assuré par une batterie d'accumulateurs qui est nécessitée par d'autres usages.

Le graissage s'effectue sous pression.

L'eau servant au refroidissement du moteur est mise en circulation par une pompe rotative.

Le radiateur est placé sur le toit de la voiture. Un ventilateur mû électriquement souffle sur le radiateur, de façon à réaliser un refroidissement indépendant de la vitesse de la voiture.

Le chauffage de la voiture est obtenu par une circulation de l'eau de refroidissement.

La mise en marche du moteur se fait au moyen de l'air comprimé ; trois cylindres fonctionnant comme moteurs à air comprimé à deux temps, pendant que les trois autres aspirent l'air carburé. De sorte que, pendant le démarrage, le moteur a un fonctionnement mixte : à air comprimé et à combustible liquide. L'air comprimé est pris aux réservoirs du frein à air.

Le compresseur d'air est actionné par le moteur à benzol.

Le moteur pèse 2.500 kilogrammes.

Le combustible liquide repose dans un réservoir sous un gaz inerte, azote ou acide carbonique, sous pression, qui peut être pris d'une bouteille. Le réservoir qui, par raison d'étanchéité, ne possède d'ouvertures que sur sa face supérieure est placé au point le plus bas des conduites.

La génératrice à courant continu et à potentiel variable par variation de l'excitation est directement accouplée au moteur. Elle est à pôles de commutation et à enroulement de compensation et développe une puissance permanente de 66 kilowatts à la tension de 300 volts et à la vitesse de 700 tours. Elle est à auto-excitation.

Comme le réglage de la vitesse de la voiture s'obtient exclusivement par réglage de l'excitation de la génératrice, et que l'éclairage électrique de la voiture, les appareils avertisseurs acoustiques électriques, l'allumage électromagnétique du moteur et enfin l'excitation de l'interrupteur automatique principal exigent une tension constante du courant qui les alimente, il s'ensuit la nécessité d'employer une batterie d'accumulateurs.

Au moyen d'un dispositif spécial, cette génératrice à potentiel

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

variable peut donner du courant au circuit auxiliaire et peut charger la batterie.

Le principe de ce dispositif est le suivant :

L'excitation shunt de cette génératrice est assurée à la façon ordinaire par un enroulement d'excitation branché aux deux bornes de la génératrice, mais avec cette différence qu'une partie de cet enroulement est connectée d'une façon permanente à la batterie d'accumulateurs et, que dans l'autre partie, est insérée, en série, une résistance de réglage.

Au premier cran du contrôleur, la partie connectée à la batterie est seule en circuit et est alimentée par cette batterie. Cette partie de l'enroulement est prévue de manière que le groupe, ayant atteint progressivement sa vitesse de régime de 700 tours, l'excitation soit suffisante pour démarrer la voiture..

Au deuxième cran et suivants, la seconde partie de l'enroulement shunt est mise en circuit avec la résistance de réglage en série, la seconde partie de cet enroulement restant en circuit et connectée à la batterie. Il en résulte une excitation produite, d'une part par le courant circulant, sous l'action de la tension de la génératrice, dans l'ensemble des deux parties de l'enroulement shunt et, d'autre part, par le courant supplémentaire, débité par la batterie, dans la partie de l'enroulement qui lui est reliée.

En enlevant progressivement la résistance de réglage, la tension de la génératrice augmentera, et le courant débité par la batterie diminuera, s'annulera, puis enfin changera de sens : la batterie sera alors chargée par la génératrice.

Les deux moteurs électriques à excitation série et à pôles de commutation développent chacun une puissance unihoraire de 85 chevaux.

La voiture possède à chaque extrémité un poste de conduite comportant un contrôleur, les appareils de manœuvre des freins à main et à air comprimé, ainsi que les appareils de mesure et de sécurité

Le contrôleur est à deux manettes permettant, l'une de changer le sens de marche et l'autre de régler la vitesse de la voiture. Cette dernière manette est pourvue d'un dispositif dit à bouton de pression, tel que si le mécanicien abandonne cette manette, lorsqu'elle se trouve sur l'un des crans de marche, le courant total est coupé et le frein à air est mis en action.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les caractéristiques de la voiture sont les suivantes:

Longueur hors tampons	$20^{m},750$
Distance d'axe en axe des deux bogies	$13^{m},800$
Empattement du bogie supportant le groupe électrogène . .	$3^{m},800$
Empattement du bogie recevant les moteurs électriques . .	$2^{m},500$
Longueur de la caisse	$16^{m},500$

La voiture comprend deux compartiments, celui près du groupe électrogène est un compartiment de 4e classe contenant 22 places assises et 28 places debout; l'autre est un compartiment de 3e classe contenant 50 places assises.

Cette voiture de 100 places pèse 47 tonnes et atteint en palier la vitesse de 70 kilomètres à l'heure.

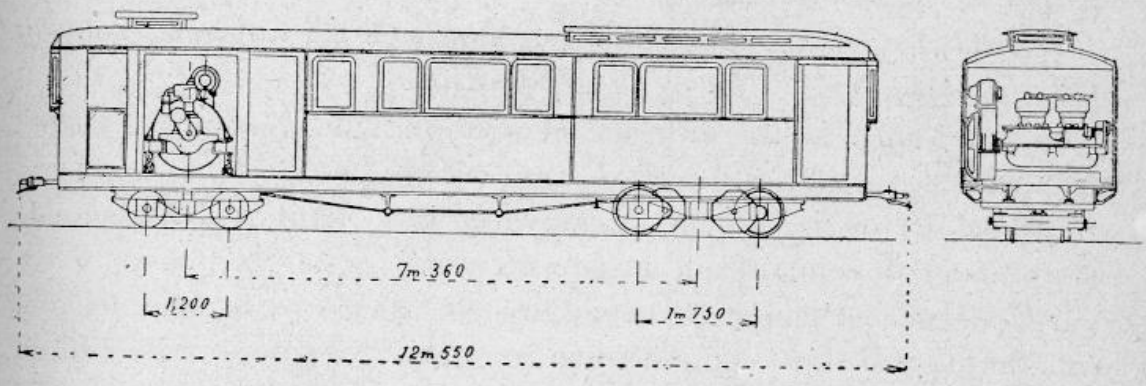


FIG. 525.

Automotrice de l'A. E. G., Chemins de fer de l'Est allemand.

Le moteur à benzol a été construit par la Gasmotoren-Fabrik Deutz, l'équipement électrique par la Bergmann Elektricitäts- Unternehmugen Aktien-Gesellschaft.

6° *Automotrices de l'Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft (A.E.G).* — Les automotrices de l'Allgemeine Elektricitâts - Gesellschaft (A. E. G.), destinées aux Chemins de fer de l'Etat prussien, comportent les mêmes dispositions générales que celles des automotrices Bergmann.

Le groupe électrogène est supporté par un bogie et les deux moteurs électriques sont placés sur l'autre bogie. La caisse est en retrait et le moteur à benzol est recouvert d'un capot amovible.

La voiture possède deux postes de conduite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le moteur à benzol, à quatre cylindres verticaux de 196 millimètres d'alésage et de 260 millimètres de course, à soupapes commandées, à carburateur à pulvérisation, à allumage par magnéto haute tension et à refroidissement par circulation d'eau, est muni d'un régulateur à force centrifuge qui limite sa vitesse à 700 tours. A cette vitesse le moteur développe 120 chevaux. Un dispositif spécial sous la dépendance du contrôleur réduit automatiquement la vitesse à 250 tours lorsque le moteur fonctionne à vide.

La mise en marche du moteur s'effectue par l'air comprimé.

Le moteur actionne, par un accouplement élastique, la génératrice.

Cette génératrice à courant continu, à pôles de commutation, à excitation séparée, fournit à la tension de 300 volts une puissance normale de 66 kilowatts.

L'excitatrice, compound, d'une puissance de 2,5 kilowatts sous 70 volts, est calée sur l'arbre de la génératrice.

La puissance unihoraire de chaque moteur électrique est de 82 chevaux.

Le réglage de la vitesse de la voiture s'obtient par réglage de l'excitation indépendante de la génératrice.

L'éclairage électrique de la voiture est assuré par l'excitatrice et la batterie qui sont couplées en parallèle lorsque la vitesse du groupe électrogène est de 700 tours. Aux vitesses inférieures à cette valeur (lorsque le groupe fonctionne à vide), l'excitatrice est automatiquement mise hors circuit au moyen d'un disjoncteur et l'éclairage est assuré par la batterie. La figure 526 donne le schéma des connexions de l'équipement électrique de cette voiture.

Cette voiture, dont la caisse a 16,495 mètres de longueur, comprend un compartiment de 3e classe, un de 4e classe et contient 95 places.

En ordre de marche, cette voiture pèse 55 tonnes et marche à 65 kilomètres en palier.

La voiture a été mise en service en octobre 1911.

Le moteur à benzol a été construit par la Neue Automobil Gesellschaft, l'équipement électrique par la Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft.

La Société A. E. G. a construit, pour les lignes secondaires, un autre type de voiture pétroléo-électrique d'une puissance de 55 che-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

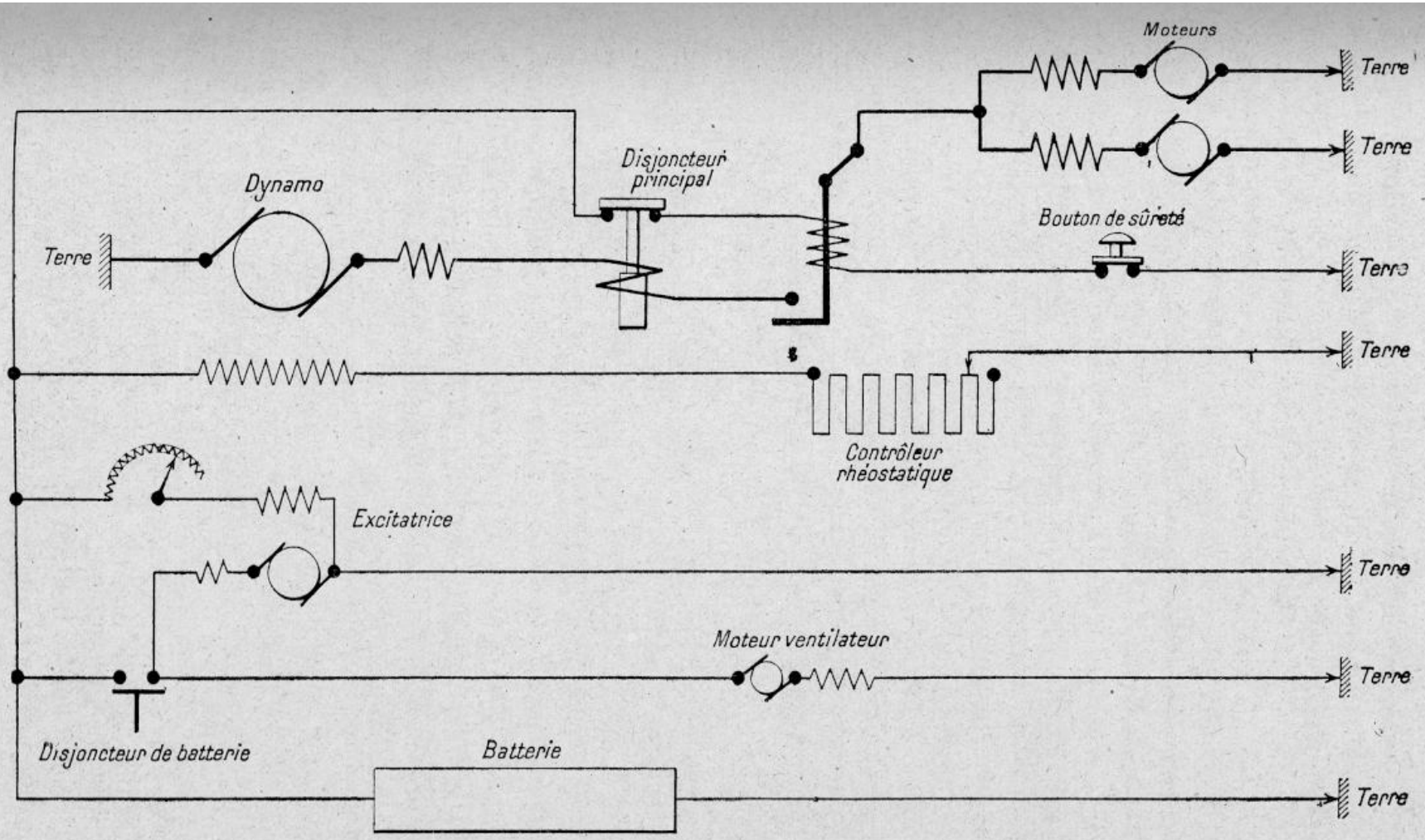


FIG. 526.

Automotrice benzo-électrique A. E. G. de l'Etat prussien, schéma des connexions pour voiture de 120 HP.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vaux qui a été récemment mis en service sur le réseau des Chemins de fer de l'Etat allemand à Konigsberg, en Prusse orientale.

Le groupe électrogène est placé dans l'une des deux cabines de conduite, mais repose par l'intermédiaire de ressorts sur le châssis du bogie situé au-dessous. Par ce procédé, les vibrations du moteur ne se transmettent pas à la caisse de la voiture.

Les deux moteurs électriques sont montés sur l'autre bogie.

Le moteur à benzol à quatre cylindres verticaux, à refroidissement par circulation d'eau, à graissage sous pression, à allumage par magnéto haute tension, à régulateur à force centrifuge, développe 55 à 58 chevaux.

Le radiateur est placé sur le toit.

Les réservoirs d'eau et de benzol sont installés dans la cabine.

Le moteur à benzol actionne au moyen d'un accouplement élastique la génératrice qui est à courant continu, à pôles de commutation et à excitation indépendante.

L'excitatrice est actionnée par le moteur à benzol, au moyen d'une courroie.

La régulation de la voiture s'obtient par le réglage de l'excitation de la génératrice.

Cette voiture contient 12 places assises de 2e classe, 15 places assises de 3e classe et fournit en palier, avec deux remorques, une vitesse d'au moins 30 kilomètres à l'heure.

7° *Automotrices de la General Electric Co.* — Les automotrices de le General Electric Co, qui sont assez répandues aux Etats-Unis, comprennent toutes le même type d'équipement pétroléo-électrique et pour toutes l'emplacement relatif des organes constituant l'équipement est le même.

L'automotrice système General Electric Co ne possède qu'une seule cabine de conduite dont l'avant est en forme d'ogive pour diminuer la résistance au vent. Cette cabine contient un groupe moteur principal et un groupe moteur auxiliaire. Les deux moteurs électriques sont montés sur le bogie avant placé sous la cabine de conduite (fig. 527).

Le groupe principal, placé dans l'axe longitudinal de la voiture, est constitué par un moteur à gazoline actionnant à un bout une génératrice et à l'autre bout un compresseur d'air.

Le groupe auxiliaire, placé sur le côté parallèlement à l'axe longi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tudinal de la voiture, comprend un moteur à gazoline actionnant une génératrice et un compresseur d'air.

Le moteur à explosion du groupe principal, à huit cylindres de 203 millimètres d'alésage et 254 millimètres de course disposés en V, à circulation d'eau par thermo-siphon, à soupapes commandées, à allumage par deux magnétos basse tension et rupteurs magnétiques, à graissage sous pression, est muni d'un papillon servant au réglage de sa vitesse. La vitesse normale de ce moteur est de 550 tours.

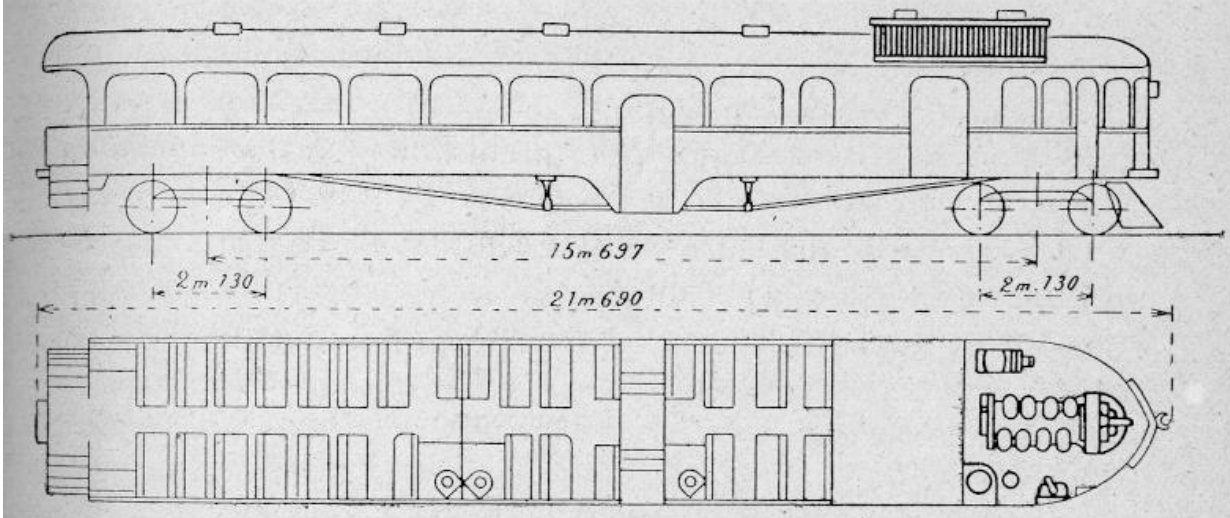


FIG. 527.

Automotrice de la " General Electric Cy ".

La génératrice principale, directement calée sur l'arbre de ce moteur, est du type à huit pôles, à courant continu 600 volts, à pôles de commutation, et peut fournir une puissance de 100 kilowatts. Sa culasse est boulonnée sur le bâti du moteur. Un plateau-palier soutient l'extrémité de l'arbre.

Le compresseur d'air principal, directement calé sur l'arbre du moteur, comporte un cylindre de 120 millimètres d'alésage et 101 mill. 6 de course. Ce compresseur est muni d'un régulateur automatique de pression.

Le démarrage du moteur principal s'effectue au moyen de l'air comprimé contenu dans des réservoirs placés sous la voiture et qui sont alimentés par le compresseur de ce groupe principal ou par le compresseur du groupe auxiliaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme le voltage de la génératrice varie, pour les besoins de la traction, de 200 à 800 volts, il est nécessaire, pour assurer l'éclairage électrique de la voiture et fournir la charge d'air initiale au démarrage du moteur principal, d'employer un groupe auxiliaire.

Le moteur auxiliaire comprend trois cylindres verticaux, celui du milieu étant utilisé comme compresseur d'air. Les cylindres moteurs ont 120 millimètres d'alésage et 152 millimètres de course. Le cylindre du compresseur a 133 millimètres d'alésage et 152 millimètres de course. Ce cylindre peut fournir de l'air comprimé à la pression de 6 kilogrammes.

Un régulateur à force centrifuge maintient constante la vitesse du moteur qui est de 600 tours. Ce moteur est mis en marche par l'air comprimé. Les systèmes de refroidissement et d'allumage sont ceux du moteur principal.

La génératrice auxiliaire dont la tension est de 125 volts et la puissance de 1 kilow. 5 est directement calée sur l'arbre du moteur.

Les deux moteurs électriques, à pôles de commutation, du type GE-205, établis pour la tension de 600 volts, peuvent développer chacun une puissance unihoraire de 100 chevaux.

Le démarrage de la voiture et le réglage de sa vitesse s'obtiennent au moyen du contrôleur qui permet d'effectuer les couplages série et parallèle des moteurs et de faire varier l'excitation de la génératrice principale.

Le contrôleur comporte trois manettes. Une première manette pour le changement de marche de la voiture, une deuxième pour le couplage série parallèle des moteurs et le réglage de l'excitation de la génératrice, une troisième pour le démarrage par l'air comprimé du moteur et le réglage de l'admission des gaz. Cette dernière manette est disposée de telle façon qu'en faisant pression sur un levier qui lui est relié, l'air comprimé peut, par l'intermédiaire d'une soupape placée sous le contrôleur, être envoyé au moteur et en même temps l'admission des gaz peut être ouverte. Un dispositif d'enclenchement est prévu pour que l'admission des gaz soit ouverte seulement au moment favorable pour assurer le fonctionnement du moteur. Le moteur démarré, le levier peut être abandonné, supprimant complètement l'air comprimé, et l'admission est ouverte en grand. Il n'est pas possible d'admettre à nouveau l'air comprimé dans le moteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sans revenir à la position initiale de la manette qui correspond à la fermeture de l'admission des gaz.

Le radiateur est installé sur le toit de la voiture.

Le réservoir à gazoline est placé sous la voiture. Une pompe mue par le moteur aspire la gazoline. Une pompe à main remplace celle-ci lorsque le moteur est arrêté.

Un poêle à eau chaude, chauffé au charbon, assure le chauffage de la voiture. Ce poêle peut être relié avec la circulation d'eau de refroidissement du moteur pour prévenir la gelée de l'eau et par suite les ruptures de cylindres, quand la voiture est remisée la nuit.

Ces voitures, construites entièrement en métal et qui, suivant les types, contiennent 60 à 100 places, pèsent 40 à 50 tonnes, dont 6 tonnes pour les deux bogies et 15 tonnes pour l'ensemble de l'équipement pétroléo-électrique. Les moteurs développent à la jante des roues, au démarrage et à faible vitesse, un effort de traction d'environ 5.500 kilogrammes. En palier la vitesse est d'environ 90 kilomètres à l'heure.

7° *Automotrices de la British Thomson-Houston Company.* — La Compagnie anglaise de chemins de fer du Great Western Railway a mis en service en 1912 une voiture automotrice à deux essieux dont l'équipement électrique a été construit par la British Thomson-Houston Co.

La voiture comprend une cabine située à chaque extrémité et un compartiment à voyageurs.

Le moteur à pétrole, d'une puissance de 40 chevaux, actionne une dynamo qui alimente deux moteurs électriques commandant chacun un essieu.

Le groupe moteur génératrice est placé dans une des cabines de conduite.

Cette voiture contient 44 places assises et pèse 14 tonnes.

224. **Automotrices pétroléo-électriques à transmission mixte et à récupération, système Pieper, dit à électro-tamponnage** (fig. 528). — Dans les automotrices de ce système, le moteur à explosion commande directement les essieux au moyen de cardans et d'engrenages d'angle.

Une dynamo shunt, calée sur l'arbre du moteur, est connectée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à une batterie d'accumulateurs. Cette dynamo peut fonctionner en génératrice ou en réceptrice par réglage de son excitation.

Lorsque la puissance du moteur est insuffisante, la batterie fournit automatiquement l'énergie supplémentaire à la dynamo qui fonctionne en réceptrice. Lorsque la puissance du moteur est en excès ou lorsque l'énergie cinétique de la voiture est motrice (lors des ralentissements ou dans les pentes), la dynamo fonctionne automatiquement en génératrice et la batterie récupère.

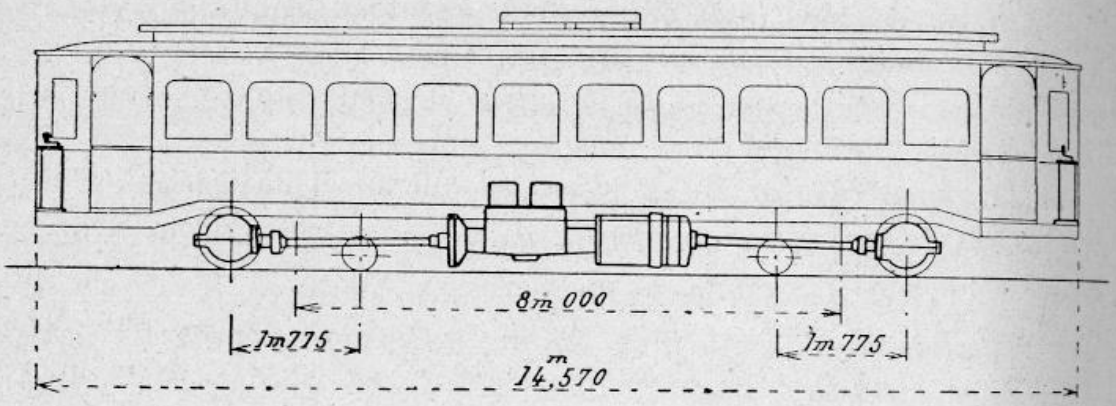


FIG. 528.

Automotrices système Pieper.

L'admission des gaz du moteur est sous la dépendance d'un régulateur automatique consistant en un solénoïde différentiel à deux enroulements. L'un de ces enroulements en dérivation sur la batterie est traversé par un courant de sens invariable, l'autre enroulement en série sur le circuit de la batterie et de la dynamo est traversé par un courant de sens variable. L'action de cet enroulement série s'ajoute à celle de l'enroulement dérivation ou s'en retranche de façon à réduire ou augmenter l'admission des gaz suivant que la batterie est en charge ou en décharge.

Un embrayage électromagnétique est interposé entre le groupe moteur et les essieux.

Le moteur à explosion est établi pour pouvoir tourner dans les deux sens. Ce renversement de marche s'opère au moyen d'un électro-aimant commandé de l'un ou l'autre des contrôleurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le type de contrôleur employé pour la conduite de la voiture est à deux manettes, l'une servant à démarrer le groupe moteur dans l'un ou l'autre sens, l'autre manette servant à embrayer, à régler la vitesse et à freiner progressivement.

Pour effectuer la mise en marche de la voiture, le mécanicien, au moyen de la manette du contrôleur, actionne l'électro-aimant du changement de marche du moteur et démarre le moteur à explosion en envoyant le courant de la batterie dans la dynamo excitée au maximum. Le groupe moteur étant mis en marche, le mécanicien, au moyen de l'autre manette du contrôleur, envoie progressivement le courant de la batterie dans les embrayages électromagnétiques, démarre progressivement la voiture et augmente ensuite sa vitesse en diminuant progressivement l'excitation de la dynamo.

La voiture étant ainsi mise en vitesse, sa régulation s'effectue ensuite automatiquement.

Lorsque la voiture arrive sur une rampe, l'effort résistant à la jante des roues augmentant, le couple résistant correspondant devient supérieur au couple du moteur à explosion, la vitesse du moteur diminue, la tension de la dynamo baisse et devient inférieure à celle de la batterie. La batterie se décharge dans la dynamo qui fonctionne alors en réceptrice et produit un couple moteur qui s'ajoute à celui du moteur pour équilibrer le couple résistant de la voiture. Le couple du moteur est d'ailleurs maximum, puisque l'admission des gaz, qui est régie par le courant de décharge, est également maximum.

Réciproquement, quand la voiture arrive sur une pente, si le couple résistant est inférieur au couple du moteur, la vitesse du moteur tend à s'accroître, la tension de la dynamo devient supérieure à celle de la batterie, la dynamo fonctionne en génératrice et charge la batterie. Du fait de ce courant de charge traversant le régulateur, l'admission des gaz est réduite au minimum et le couple du moteur est sensiblement nul.

A chaque profil de la ligne correspond ainsi un régime d'équilibre automatique entre les trois couples: couple résistant de la voiture, couple du moteur à explosion et couple moteur (ou résistant) de la dynamo.

Pour ralentir ou accélérer à volonté la vitesse de la voiture, il suffit de rompre cet équilibre. Pour ralentir, il convient d'augmenter le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couple résistant, ce que le mécanicien obtient en augmentant l'excitation de la dynamo qui devient génératrice et charge la batterie. Ce courant de charge diminue l'admission des gaz et par suite le couple moteur. La chute de puissance vive de la voiture est ainsi récupérée par la batterie.

Pour accélérer, il faut augmenter le couple moteur, c'est-à-dire diminuer l'excitation.

A l'arrêt de la voiture, le groupe moteur est débrayé. Il peut soit être arrêté, soit tourner à faible vitesse pour recharger la batterie.

Il résulte de cet examen que le moteur à explosion, de par sa liaison invariable avec les essieux de la voiture, tourne à vitesse variable, et, du fait de son régulateur automatique, fonctionne à admission variable. Dans les rampes, notamment, il fonctionne à vitesse réduite et pleine admission, alors qu'en palier, il fonctionne à vitesse maximum avec admission étranglée. Le moteur à explosion doit donc être prévu, en tant que dimensions, de façon que le travail total fourni à ces régimes variables corresponde au travail total à développer aller et retour sur la ligne considérée, augmenté des pertes d'énergie dans la dynamo et la batterie.

Ce système d'automotrice, qui nécessite l'emploi d'accumulateurs, présente l'avantage d'une récupération d'énergie dans les ralentissements et descentes.

Les voitures automotrices du système Pieper en service en France (Compagnie des chemins de fer de Grande Banlieue, ligne de Saint-Germain à Poissy) comportent les dispositions suivantes :

Le groupe moteur avec ses deux embrayages est monté sur deux faux longerons suspendus élastiquement au châssis de la voiture, entre les deux bogies, au-dessous du compartiment à bagages. Ce groupe commande l'essieu extrême de chaque bogie par l'intermédiaire d'un cardan et d'un engrenage d'angle.

Le moteur à quatre cylindres verticaux de 155 millimètres d'alésage et 200 millimètres de course, sans soupapes, à tiroirs cylindriques, à refroidissement par circulation d'eau, possède un changement de marche et fonctionne au benzol.

Le silencieux, le radiateur et le réservoir à combustible sont installés sur le toit.

La voiture comporte deux postes de conduite pourvus chacun d'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

contrôleur et des appareils de commande du frein à main et du frein à air comprimé. Ces freins ne servent qu'à bloquer les roues.

Le chauffage est assuré par la circulation de l'eau de refroidissement.

L'éclairage électrique est branché sur la batterie.

Les caractéristiques de la voiture sont les suivantes :

Distance d'axe en axe des bogies.	8m,
Empattement de chaque bogie	1m,775
Longueur de la caisse.	14m,570

Cette voiture comprend deux compartiments, l'un de 1re classe et l'autre de 2e classe, situés de part et d'autre du compartiment à bagages qui est placé au centre de la voiture. Deux plates-formes à entrées latérales sont comprises entre ces deux compartiments à voyageurs et les deux postes de conduite.

Cette voiture contient 33 places assises (12 en 1re classe, 21 en 2e classe) et 16 places debout, pèse 21 tonnes 7, et peut remorquer deux voitures de 10 tonnes sur la ligne de Poissy à Saint-Germain, qui présente une rampe de 50 millimètres sur une longueur de 500 mètres. Sur cette ligne particulière, la consommation de benzol a été de 25 gr. 9 par tonne-kilomètre.

225. **Comparaison entre les systèmes à transmission électrique et le système à électro-tamponnage.** — Les principes de ces deux systèmes décrits précédemment sont très différents, et il est facile d'apercevoir, au moins théoriquement, les avantages et les inconvénients de chacun d'eux (1).

Le principe des automotrices Pieper est particulièrement ingénieux et séduisant.

Nous avons vu que lorsque le moteur pouvait fournir la puissance nécessaire au maintien d'une vitesse convenable de la voiture il n'y avait qu'accidentellement transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, et que la puissance mécanique fournie par le moteur était transmise aussi directement que possible aux essieux. En principe, le rendement doit être bon.

En outre, la batterie d'accumulateurs vient au secours du moteur

(1) D'après M. Le Verrier, ingénieur des Ponts-et-Chaussées. Journal *Les Chemins de fer d'intérêt local et des Tramways*, du 31 octobre 1912.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans les parties difficiles du tracé, et la puissance normale du moteur peut être théoriquement assez réduite et calculée d'après la puissance moyenne à fournir, au lieu de l'être d'après la puissance maxima nécessaire au moment le plus défavorable du parcours.

Enfin, lorsque, dans les pentes du profil, la gravité communique à la voiture une vitesse supérieure à celle qui est momentanément nécessaire, l'énergie disponible, au lieu d'être absorbée inutilement par des freins, est emmagasinée dans la batterie d'accumulateurs qui la restitue ultérieurement au rendement près du système.

Il en est de même lorsque les conditions du service imposent un ralentissement de la vitesse du train.

Il y a là, théoriquement, une cause d'économie qui devrait se traduire par une économie de combustible.

L'électro-tamponnage du moteur procure en outre une grande élasticité de puissance et rend les démarrages et arrêts souples, progressifs et rapides.

En revanche, le système a l'inconvénient d'être assez compliqué. Le mécanisme nécessite un réglage soigné ; la batterie d'accumulateurs doit être établie en tenant compte du profil et des conditions d'exploitation de la ligne.

Une automotrice, construite pour circuler sur une ligne déterminée, ne saurait être utilisée sur une autre ligne sans subir au préalable un nouveau réglage, et souvent même un remaniement de la batterie.

La batterie d'accumulateurs est un organisme délicat et qui exige un entretien suivi, bien que, dans ce système, les batteries travaillent dans d'assez bonnes conditions au point de vue de leur conservation.

Il faut noter également cette circonstance défavorable que le moteur attaque les essieux sans interposition de changement de vitesse et travaille à des vitesses variables, ce qui est peu avantageux au point de vue du rendement.

La vitesse du groupe électrogène est, elle aussi, invariablement liée à celle de la voiture, ce qui ne permet pas de faire travailler la dynamo au maximum de sa charge sur les sections difficiles du parcours.

Le système d'automotrice à transmission électrique, genre Westinghouse, ne présente pas ces mêmes inconvénients. La double

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

transformation d'énergie mécanique en énergie électrique, et de cette énergie électrique en énergie mécanique correspond bien à un rendement assez faible, mais le réglage combiné du groupe électrogène et des moteurs assure beaucoup de souplesse au mécanisme, et permet de faire travailler le moteur à explosion dans d'assez bonnes conditions de rendement pour des vitesses variables de la voiture.

Les organes sont moins compliqués que ceux des voitures Pieper ; le réglage du mécanisme est moins délicat, et les voitures peuvent circuler indifféremment sur des lignes à profils assez différents, sans avoir à subir au préalable des modifications.

Au point de vue de l'adhérence, il est possible d'utiliser le poids total de la voiture, et même, par simple adjonction, de moteurs supplémentaires, de rendre moteurs les essieux des voitures remorquées ; cette faculté peut avoir des avantages pour faciliter le franchissement des fortes rampes.

Les inconvénients inhérents à l'emploi d'une batterie d'accumulateurs sont supprimés, et l'entretien du matériel semble devoir être moindre.

En revanche, ces voitures à capacité égale ont un poids mort un peu plus élevé que celui des voitures Pieper (par exemple 24 tonnes au lieu de 21 tonnes pour le type comportant environ 50 places assises).

Pour le même service rendu, la consommation de combustible semble donc devoir être plus élevée. La puissance du moteur doit être calculée en tenant compte des éventualités les plus défavorables du parcours à effectuer. Il n'y a pas de récupération d'où, théoriquement, consommation plus importante de combustible. Les démarrages et les arrêts sont moins progressifs et moins rapides ; enfin, la vitesse est plus réduite dans les rampes que pour les automotrices du système Pieper.

Si l'on quitte le domaine de la théorie pour revenir à celui de la pratique, on constate que ces deux systèmes paraissent donner, jusqu'à présent, sur les lignes où ils ont été mis en service, des résultats également satisfaisants.

Pour un même nombre de places offertes, et pour des services analogues, les automotrices des deux systèmes sont à peu près du même prix.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les dépenses d'exploitation et d'entretien, ainsi que la consommation de combustible ne semblent pas très différentes. Du moins si les différences que la théorie fait prévoir, existent réellement, elles sont assez peu importantes pour qu'il soit difficile de les mettre en évidence autrement qu'en instituant une comparaison entre deux automotrices de chacun de ces systèmes assurant, pendant un certain temps, le service d'une même ligne dans des conditions identiques.

En attendant, il paraît difficile de présenter des arguments décisifs d'ordre général, pour imposer le choix d'un de ces systèmes de préférence à l'autre.

Les explications données ci-dessus permettent tout au plus de penser que le système Pieper se recommande pour des lignes à profil assez accidenté, où les pentes et rampes, sans être excessives, se succèdent d'une manière à peu près régulière, et dont le service comporte des arrêts et ralentissements fréquents. Inversement, les automotrices genre Westinghouse paraissent mieux adaptées à un service comportant peu d'arrêts et de ralentissements, et exécuté sur des lignes à profil peu accidenté ne comportant que de courtes déclivités, peu accentuées, mais qui peuvent cependant être assez nombreuses.

226. **Consommation de combustible des automotrices pétroléo-électriques.** — La consommation de combustible varie naturellement dans des limites étendues suivant le poids des trains, le profil de la ligne, le nombre des arrêts et des ralentissements et même des conditions atmosphériques.

Pour des voitures utilisant le benzol, et pour des trains moyens pesant, en ordre de marche, 25 à 30 tonnes, il semble qu'on puisse espérer ne pas dépasser, par train-kilomètre, une consommation d'environ 500 grammes de benzol pour un profil en palier avec arrêts et ralentissements peu nombreux, et 90 grammes pour un profil accidenté avec arrêts et ralentissements fréquents.

B. — Emploi du moteur a combustion interne type Diesel

227. **Automotrices de l'Etat suédois.** — Les automotrices thermo-électriques, mises en service en 1912 sur le réseau de l'Etat suédois, sont tout particulièrement intéressantes, étant donné que ce sont les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

premières voitures équipées avec moteur Diesel, qui circulent sur des voies ferrées. Ce type de moteur a été employé en vue de réduire la dépense de combustible considérée comme trop onéreuse, lors d'essais entrepris précédemment avec le moteur à explosion.

Ces automotrices à moteur à combustion interne, fonctionnent suivant le principe des automotrices pétroléo-électriques à transmission électrique. Chaque automotrice comprend un moteur Diesel d'une puissance de 75 chevaux à la vitesse de 700 tours, accouplé à une génératrice de 50 kilowatts, à courant continu, alimentant les deux moteurs électriques d'une puissance unitaire de 30 chevaux. Le groupe électrogène est placé transversalement dans l'une des deux cabines de conduite.

Le moteur Diesel, à six cylindres verticaux à refroidissement par circulation d'eau, comporte un cylindre supplémentaire fournissant l'air comprimé nécessaire au démarrage du moteur et à l'injection du pétrole. Ce moteur, qui est muni d'un régulateur de vitesse, actionne une pompe à huile assurant le graissage du moteur et un compresseur fournissant l'air comprimé nécessaire au freinage de la voiture.

Le silencieux, placé sous la voiture, est prolongé par un tuyau aboutissant au toit.

Le radiateur est situé sur le toit.

La circulation de l'eau de refroidissement s'obtient au moyen d'une pompe à engrenages commandée par le moteur.

Les réservoirs de combustibles sont installés dans la cabine contenant le groupe, et le réservoir d'eau est situé dans le compartiment à bagages.

Les approvisionnements de combustible et d'eau se font à l'aide d'une pompe à main placée dans la cabine.

La consommation de combustible serait, à la puissance de 75 chevaux, de 180 grammes d'huile par cheval-heure.

Aux essais, et avec différents poids remorqués sur différents trajets, la consommation par tonne-kilomètre a varié de 5,70 à 8,70 grammes. La vitesse moyenne était comprise entre 35 et 50 kilomètres à l'heure.

Les trains peuvent être composés soit d'une automotrice seule, soit d'une automotrice avec une ou deux remorques. Les poids des trains correspondants sont de 26,5 tonnes, 40 tonnes et 60 tonnes.

La génératrice, à potentiel variable depuis 0 jusqu'au maximum

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 440 volts, par variation de la vitesse du moteur à combustion, est accouplée au moteur par un accouplement à bandes de cuir et repose, ainsi que le moteur, sur un bâti.

Chaque cabine de conduite renferme les appareils nécessaires à la mise en marche et au freinage de la voiture : contrôleur à deux manettes, wattmètre, robinet de frein, sifflet à air, etc.

Une batterie d'accumulateurs de 23 éléments et de 200 ampères-heure, reliée automatiquement à la génératrice lors de la marche à vide de celle-ci (aux arrêts et dans les pentes), assure l'éclairage de la voiture ainsi que la commande des appareils auxiliaires utilisés pour la manœuvre.

Le réglage de la vitesse du moteur à combustion est obtenu au moyen d'un petit moteur électrique qui est sous la dépendance du contrôleur.

Le démarrage de la voiture s'effectue de la façon suivante :

Le moteur à combustion étant préalablement démarré au moyen de l'air comprimé, et la manette de changement de marche étant mise sur le cran approprié au sens de marche, le mécanicien appuie sur le bouton poussoir de la seconde manette du contrôleur, de façon à fermer, par l'intermédiaire de l'interrupteur principal, le circuit de la génératrice sur les deux moteurs de traction couplés en parallèle, puis déplace progressivement la manette depuis la position de repos, pour laquelle le moteur tourne à 350 tours, jusqu'à la position de pleine marche qui correspond à la vitesse de 700 tours. Pendant cette manœuvre, la vitesse du moteur est progressivement augmentée par l'intermédiaire du petit moteur de régulation, et le démarrage de la voiture s'effectue sans perte d'énergie, puisqu'il n'existe pas de résistances de démarrage.

Lorsque la vitesse de régime du moteur est atteinte, la régulation de la vitesse de la voiture s'effectue automatiquement. La caractéristique de voltage en charge de la génératrice a été rendue, dans certaines limites, aussi voisine que possible d'une hyperbole équilatère, afin de permettre au groupe moteur-générateur de fonctionner à puissance sensiblement constante à la vitesse normale de 700 tours à la minute.

A signaler le dispositif prévu pour assurer le maximum de sécurité d'exploitation, la voiture étant conduite par un seul mécanicien : sur le toit de la voiture et de chaque côté, est disposé un bâton en bois

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui maintient un mécanisme à ressort dans une certaine position. Si la voiture dépasse un signal, alors que celui-ci est à l'arrêt, l'un des bâtons, rencontrant un bras fixé au signal, déclanche le mécanisme qui coupe le courant dans les moteurs et met en action le frein à air qui arrête le train.

Un frein de secours placé dans le compartiment à voyageurs permet également d'actionner, en cas de danger, le mécanisme précité.

Ces automotrices du type à trois essieux, dont deux moteurs, à chauffage par circulation de l'eau de refroidissement, comprenant et dans l'ordre suivant : une cabine de conduite (contenant le groupe), un fourgon à bagages, un compartiment à voyageurs de 39 places assises, une plate-forme d'accès et une cabine de conduite, ont un poids unitaire de 26 tonnes et sont construites pour la vitesse maximum de 60 kilomètres.

L'équipement électrique a été construit par l'Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget.

228. **Automotrices des chemins de fer saxons et prussiens.** — Dans ces automotrices mises en service en 1918, le moteur Diesel actionne au moyen d'un accouplement mécanique, une dynamo à excitation séparée.

La caisse repose sur deux bogies dont l'un à trois essieux, supporte le groupe électrogène et l'autre à deux essieux comprend les moteurs de traction. La voiture comporte deux cabines de commande.

La figure 529 (1) représente en plan le bogie du groupe électrogène. On est arrivé à réduire à une valeur négligeable les trépidations par l'emploi de deux châssis distincts reposant sur les essieux par l'intermédiaire d'organes élastiques. Le groupe électrogène est boulonné au châssis intérieur *b* lequel repose par l'intermédiaire de solides ressorts à lames sur les boîtes d'essieux intérieures des deux essieux extrêmes. L'essieu central ne supporte pas le poids du groupe. Le châssis extérieur *c* repose sur les boîtes d'essieux extérieures des trois essieux par l'intermédiaire de ressorts à lames et de ressorts à boudins en acier de section carrée. Il comprend l'entretoise *d* avec le pivot sphérique *e*, ainsi que les glissières *f*, qui supportent le poids de la caisse de la voiture. Le pivot sphérique est maintenu

(1) Empruntée, ainsi que la figure suivante et les renseignements qui l'accompagne à la *Revue générale d'électricité*, du 7 décembre 1918.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par deux ressorts à lames transversaux ; les glissières *f*, sont supportées par des ressorts à boudins en fer plat. La pression par essieu est sensiblement la même pour les trois essieux.

Les deux moteurs de traction, actionnent les essieux du bogie à deux essieux par l'intermédiaire d'une commande par engrenages, faux-essieu et bielles. Ils sont ainsi complètement suspendus. Ils ont, en outre, une carcasse commune et sont par suite jumelés.

Le moteur Diesel est d'une puissance de 200 chevaux. Il est à six cylindres de 260/300, disposés en deux groupes de trois en V. La mise en marche du moteur s'effectue par l'air comprimé, puis au

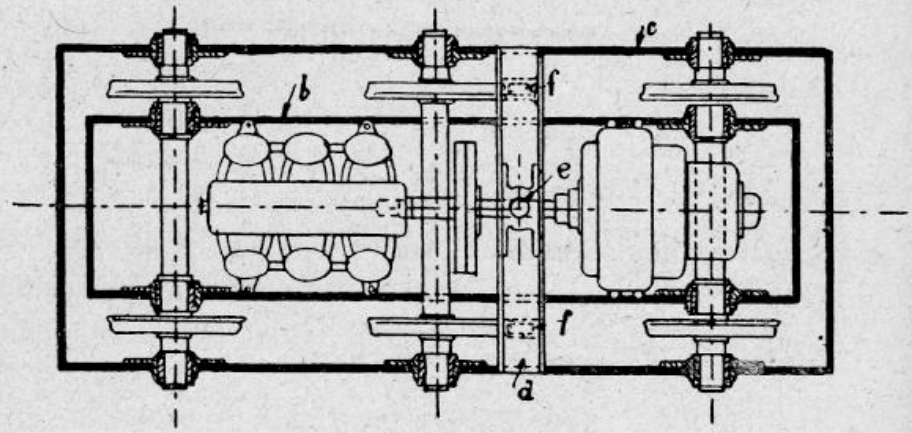


FIG. 529.

Vue en plan du bogie à trois essieux.

moyen de gazoline et après un échauffement suffisant (lorsque l'eau de réfrigération a atteint 45°), on remplace la gazoline par de l'huile lourde.

La dynamo-génératrice est d'une puissance horaire de 100 kilowatts sous 300 volts. Son excitatrice est de 7,5 kilowatts sous 70 volts. Cette excitatrice alimente en outre le moteur d'un ventilateur et fournit le courant de charge d'une batterie de 35 éléments et d'une capacité de 95 ampères-heures.

Les moteurs sont d'une puissance horaire de 180 chevaux et sont connectés en permanenece en parallèle avec câble d'équilibre, suivant le schéma simplifié de la figure 530.

Le contrôleur a douze crans. Sur les six premiers crans on augmente progressivement la valeur du courant d'excitation de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dynamo, qui passe de zéro à sa valeur normale et sur les six derniers crans on shunte progressivement les inducteurs des moteurs au moyen de résistances réglables, ce qui a pour effet de réduire l'excitation des moteurs et, par suite d'augmenter la vitesse.

L'automotrice pèse, à vide, 64 tonnes et a 80 places assises. Sur une rampe de 5 p. 1.000, une automotrice a pu remorquer une charge de 47 tonnes (automotrice non comprise) à la vitesse de 40 kilomètres à l'heure. Pour un parcours horizontal et avec une vitesse moyenne de 50 kilomètres à l'heure, on peut compter sur une consommation d'environ 5,5 grammes d'huile lourde par tonne-kilomètre.

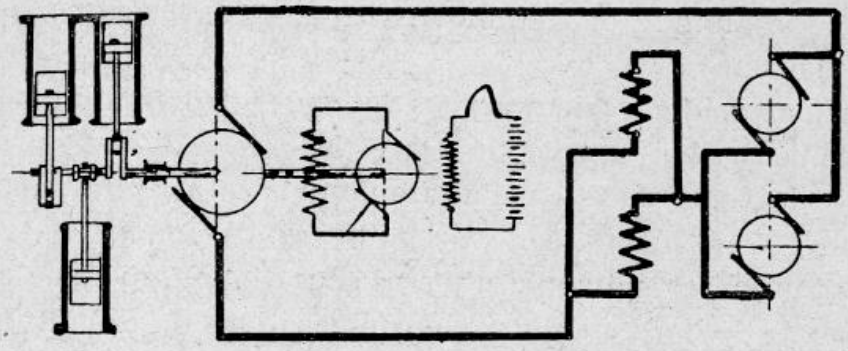


FIG. 530.

Schéma du montage Ward-Léonard, des automotrices des Chemins de fer saxons et prussiens.

Aux essais, le moteur a donné 200 chevaux à la vitesse de 440 tours à la minute avec une consommation par cheval-vapeur effectif de 240 grammes.

C. — REMARQUES GÉNÉRALES SUR LES VOITURES THERMO-ÉLECTRIQUES : PÉTROLÉO-ÉLECTRIQUES ET A MOTEUR DIESEL

229. — Ce mode de traction paraît actuellement se développer beaucoup. Il présente, en effet, de nombreux avantages.

Du fait de l'emploi du moteur à explosion ou de celui à combustion interne, la mise en route de la voiture est immédiate et les approvisionnements pour de longs parcours n'occupent qu'un volume réduit. Les démarrages sont rapides comme pour tout véhicule à traction électrique et, par suite, la vitesse commerciale est augmentée par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rapport à celle des automotrices à vapeur. La conduite de la voiture est facile et sa commande est d'une grande souplesse en raison de son mode de régulation.

Si les temps d'arrêt sont assez longs, on peut facilement arrêter le moteur, évitant ainsi une consommation inutile de combustible.

Ces automotrices peuvent, en outre, au moyen de dispositifs simples, être accouplées pour fonctionner en unités multiples, ce qui constitue un avantage précieux.

L'emploi de ces automotrices paraît tout indiqué sur les lignes à trains légers avec horaires à départs peu fréquents et à arrêts assez peu rapprochés les uns des autres. Sur une ligne à service peu chargé, soit à raison de 1, 2, 3 ou 4 trains par jour dans chaque direction, le succès économique de l'automotrice pétroléo-électrique paraît devoir être certain.

Il n'est pas douteux que pour ces véhicules, le coût du combustible et celui de l'entretien seront plus élevés que le coût de l'énergie électrique et celui de l'entretien d'une automotrice à trolley, par cheval effectif, mais les dépenses de premier établissement sont considérablement moindres, puisqu'il n'y a ni sous-station, ni ligne aérienne, ni système de feeders, ni connexions électriques du circuit de retour.

Cependant, le système thermo-électrique ne saurait supplanter le système à trolley qui devient incontestablement le plus économique là où le trafic est chargé.

D'ailleurs il y a lieu de noter qu'un réseau peut facilement comporter l'emploi des deux sortes de véhicules, car les automotrices thermo-électriques peuvent fonctionner, par le trolley sur des parties de voie équipées en trolley, et, sur d'autres, par leurs propres moyens: le groupe électrogène. Un réseau comportant des lignes diversement chargées, pourra donc avantageusement comprendre l'utilisation des deux systèmes : le système à trolley sur les lignes très chargées et le système thermo-électrique sur celles peu chargées.

En ce qui concerne l'emploi des groupes électrogènes à moteur Diesel, les applications sont encore trop récentes et trop restreintes pour qu'on puisse en tirer une conclusion certaine. Toutefois, les résultats acquis sur les deux lignes que nous avons mentionnées, semblent très encourageants, et il apparaît que le groupe électrogène à moteur Diesel a réalisé un nouveau progrès notable dans le domaine de la traction sur voies ferrées par automotrices indépendantes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

230. **Applications.** — Outre celles mentionnées au cours des descriptions précédentes, nous citerons les suivantes en Europe :

Système Westinghouse : les lignes de Dinard-Saint-Brieuc (Ille-et-Vilaine), de Caen à la mer (Calvados), des mines de Carvin, des chemins de fer vicinaux du Luxembourg, de l'Etat hongrois, d'Oosterstroomstram-Mij (Hollande), etc.

Système Pieper : les chemins de fer vicinaux belges, la ligne de Rhode à Waterloo.

Aux Etats-Unis, beaucoup de Compagnies de chemins de fer emploient, pour des services spéciaux (services d'inspection, de manœuvres, de transports d'équipes d'ouvriers, etc.), des automotrices pétroléo-électriques : chemins de fer de l'Illinois Central, de l'Erié, du Pennsylvania, de la Delaware et Hudson, du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul (ce dernier ne possédait pas moins de 100 voitures pétroléo-électriques pour ses services d'inspection, en 1912), du Minneapolis-Saint-Paul-Rochester et Dubuque Electric Traction Co (les voitures de ce réseau circulent en trolley dans les villes), etc. A New-York, le service de la 3e Avenue comporte des automotrices pétroléo-électriques. Ces voitures sont, la plupart, de la General Electric Co, de la Strang Gaz Electric Co, de la Mac-Keen Co.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVIII

MATÉRIELS SPÉCIAUX

SOMMAIRE

I. — **Trottoir roulant.**

Principe et description.

II. — **Automotrices monorails.**

Introduction. — Systèmes monorails divers. — Monorail à gyroscope Brennan.

III. — **Systèmes funiculaire et à crémaillère.**

Introduction. — Traction funiculaire. — Systèmes de crémaillères. — Pièces d'entrée de crémaillère. — Poussée longitudinale dans les systèmes à crémaillère. — Avantages de la traction électrique pour les systèmes à crémaillère. — Mécanismes de locomoteurs. — Freinage des locomotives. — Exemples de chemins de fer à crémaillère.

IV. — **Traction électrique dans les mines.**

Divers modes de traction. — Locomotives à trolley. — Résistance au roulement. — Locomotives à tambour à câble prise de courant. — Locomotives à cabestan. — Locomotives à accumulateurs.

V. — **Traction électrique sur les canaux.**

Remorquage par bateaux automoteurs. — Touage. — Halage.

VI. — **Traction électrique sans rails sur routes.**

Généralités. — Systèmes principaux.

I. — Trottoir roulant.

231. **Principe et Description.** — On trouve un exemple tout à fait typique du mode *d'alimentation à potentiel variable à la source* dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'application faite au *trottoir roulant de l'Exposition de 1900,* application que nous avons déjà signalée à l'occasion de la régulation de la vitesse des voitures (chapitre V).

Ce trottoir roulant comprenait, en réalité deux chemins mobiles parallèles A et B (fig. 531) se déplaçant, le premier à la vitesse de 4 à 5 kilomètres à l'heure, le second à une vitesse sensiblement double, de telle sorte que la vitesse relative du premier chemin par rapport au trottoir fixe C qui le longeait était de 4 à 5 kilomètres à l'heure, et celle du deuxième chemin par rapport au premier était également de 4 à 5 kilomètres à l'heure.

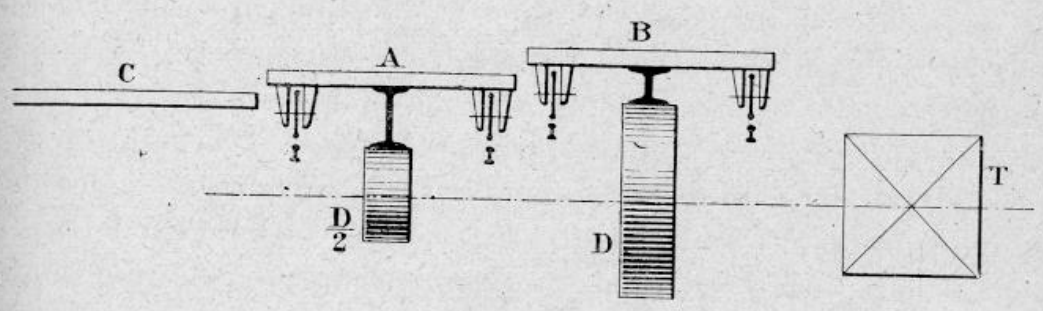


FIG. 531.

Chacun de ces chemins était constitué par une file de wagonnets roulant sur deux rails et étudiés pour que, dans les courbes, le chemin restât continu (ceci obtenu au moyen d'attelages à rotule).

Le tracé de la plate-forme formait une boucle complète.

Le problème consistait donc à mettre en vitesse et ensuite à faire marcher à une vitesse constante les deux chemins ; on pensa alors à employer des treuils disposés à une certaine distance les uns des autres et actionnés électriquement.

Au point de vue mécanique, le problème fût résolu au moyen de la simple adhérence ; à cet effet, sous chaque wagonnet, on installa une poutre longitudinale dite poutre axiale qui était entraînée par une série de rouleaux actionnés par des treuils électriques T.

Chaque treuil mettait en action deux rouleaux de diamètres D et $\frac{D}{2}$ calés sur le même arbre, et chaque rouleau, dont l'adhérence était réglée par un système de ressorts, pouvait entraîner, à la vitesse de 4 à 5 kilomètres à l'heure, le chemin mobile correspondant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le nombre des treuils électriques était de 180, et leur espacement était de 24 mètres.

Au point de vue électrique, le problème consistait à mettre en action, d'un seul point, 180 moteurs de 5 chevaux, répartis le long d'un circuit fermé de 4 kilomètres de longueur environ.

Il était évidemment nécessaire d'employer de l'énergie à potentiel variable pour produire la mise en vitesse, si l'on ne voulait pas à avoir à absorber, dans un rhéostat, une quantité considérable d'énergie : de plus, l'éloignement des moteurs ne permettait pas facilement les combinaisons diverses (série parallèle, etc...) ordinaires de la régulation de la marche des voitures.

Comme le courant dont on disposait était du triphasé 5.000 volts 25 périodes, on employa ce courant à faire tourner à vitesse constante un moteur asynchrone de 850 chevaux qui actionnait à son tour une génératrice à courant continu, laquelle recevait son courant d'excitation d'un petit groupe moteur asynchrone générateur courant continu de 30 kilowatts. En faisant varier l'excitation, on obtenait donc, aux bornes de la génératrice principale, du courant continu à tension variable, qui était envoyé aux moteurs des treuils ; ces moteurs étaient d'ailleurs à excitation série.

Le schéma général simplifié des connexions est représenté sur la figure 532.

Ici, la génératrice tournant à vitesse constante, il suffisait d'augmenter son excitation pour faire croître la tension à ses bornes et par suite le débit sur le réseau des moteurs. On pouvait donc ainsi augmenter le couple des treuils à un instant déterminé.

Suivant une remarque déjà faite à propos de l'étude de la régulation de la vitesse des voitures par la méthode Ward-Léonard, au moment de la mise en vitesse, la génératrice aura à fournir une faible tension et un fort débit, d'où la nécessité d'avoir une machine à faible réaction d'induit.

L'à-coup à l'usine centrale est évidemment réduit au minimum par ce système.

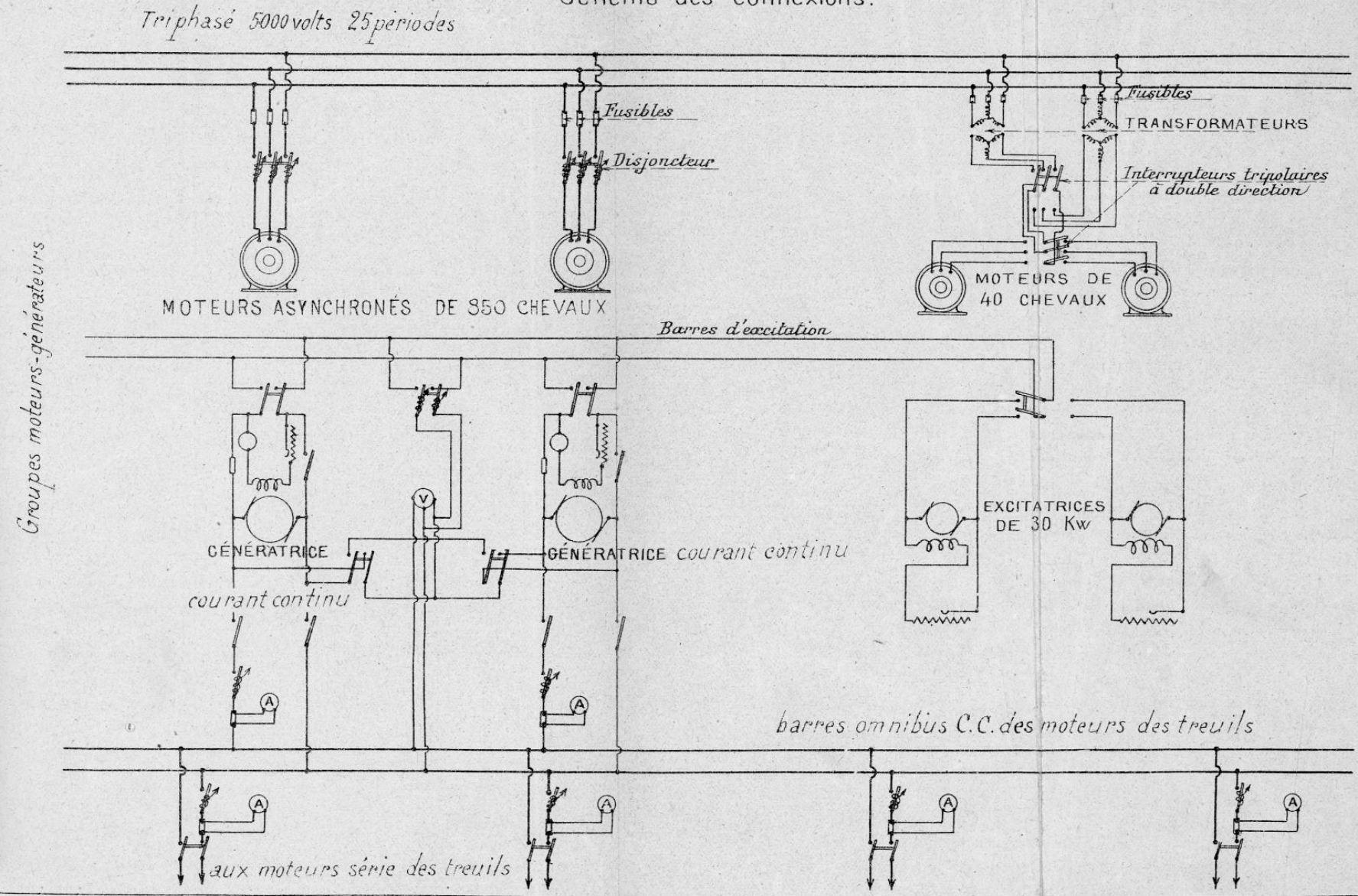
En résumé, génératrice à tension variable et à vitesse constante couples moteurs variant dans le même sens que l'excitation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig 522. TROTTOIR ROULANT ELECTRIQUE DE L'EXPOSITION DE 1900

SOUS-STATION DE TRANSFORMATION

Schéma des connexions.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — Automotrices monorails.

232. **Introduction.** — Un des éléments importants du prix de revient d'une ligne à grande vitesse est la dépense de construction de la plate-forme : voie, traverses, ballast ; car les divers éléments de l'infrastructure et de la superstructure doivent être établis très solidement pour résister aux efforts de toute nature que le passage de trains rapides leur fait subir.

Dans le but de réduire ces dépenses de premier établissement et en même temps, accessoirement, de réduire la résistance au roulement du véhicule, on a proposé l'emploi de *monorails,* dont l'idée paraît être due à l'ingénieur anglais Robinson Palmer, en 1826.

Dans ce système, le centre de gravité de la charge roulante est reporté normalement dans le plan vertical du rail porteur, au-dessous ou au-dessus du plan de roulement, suivant la position dudit rail par rapport au véhicule ; exceptionnellement, il est en dehors de ce plan.

Le champ d'application le plus vaste de ces monorails semble réservé aux voies industrielles ou agricoles, aux voies à faible trafic, aux réseaux secondaires des colonies et là où le relief du terrain est très tourmenté. Dans ce dernier cas, notamment, les travaux de terrassement sont en effet très diminués, le monorail pouvant suivre de beaucoup plus près la configuration du terrain, rampe ou pente et courbes de faible rayon.

Dans le même ordre d'idées, il y a lieu de citer une catégorie spéciale de système de transport comportant une voie funiculaire aérienne (le plus souvent un simple câble) sur lequel roulent de petits chariots ; c'est le « *telpherage* » assez employé dans les régions montagneuses de l'Ouest des Etats-Unis. Nous ne ferons, toutefois, que mentionner pour mémoire ce système.

233. **Systèmes monorails divers.** — Les systèmes monorails, assez nombreux d'ailleurs, peuvent se diviser en trois groupes suivant la position du centre de gravité par rapport au support (1).

(1) D'après le *Génie civil* du 27 février 1915, d'où nous avons également extrait quelques-uns des schémas qui suivent se rapportant aux principaux systèmes monorails.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a) Le premier groupe a pour prototype le *système Lartigue* (fig. 533), réalisé en Algérie et en Irlande, et qui a été l'un des premiers construits. Le véhicule, qui est automoteur, est à califourchon sur la voie. Le premier appareil était à vapeur et comportait deux chaudières. La vitesse maxima était de 45 kilomètres à l'heure. Dans ce groupe, le centre de gravité est reporté au-dessus de la roue porteuse, et deux galets assurent la direction et l'équilibre du train. A ce type appartiennent les systèmes Leroy-Stone, Decauville, Meigs, Behr, et les monorails bicycles américains Boynton et Tunis.

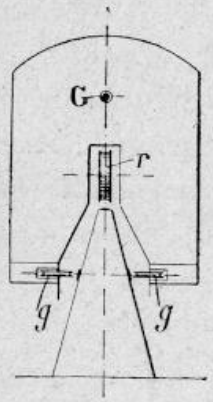


FIG. 533.
Systèmes Lartigue et Behr.

Dans *le monorail Behr,* qui a été présenté à l'Exposition de Bruxelles, en 1897, et qui correspond encore au schéma précédent, dans son ensemble, le guidage était assuré au moyen de quatre galets de guidage au lieu de deux. Les moteurs électriques étaient montés dans le véhicule au niveau du rail porteur et attaquaient les essieux-moteurs au moyen de chaînes Galle. Ils étaient au nombre de quatre et leur puissance individuelle était de 150 chevaux à 600 tours à la minute sous 600 volts. La prise de courant était constituée par un frotteur sur rail au-dessous de la caisse, à sa partie la plus étroite. La vitesse maxima possible était de 155 kilomètres à l'heure.

Le monorail du type Lartigue-Behr a reçu une application assez récente à l'Exposition maritime de Gênes (1), en 1914, où fut installé, par MM. Bellani et Benazzoli et Cie, de Milan, un monorail reliant la Piazza di Francia où se trouvait l'Exposition, au môle Giano origine du port de Gênes. La longueur de la ligne était d'environ 2.200 mètres. Les figures 534 à 536 représentent différentes coupes du locomoteur employé, et la figure 537 les vues en élévation et en plan de la poutre support du rail de roulement et des rails de guidage. La section transversale de cette poutre est semblable à celle d'un rail Vignole et est représentée sur la coupe transversale du locomoteur.

(1) Voir pour plus de détails sur cette installation le numéro précité du *Génie civil*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Coupe AB. Vue du mécanisme, la paroi enlevée.

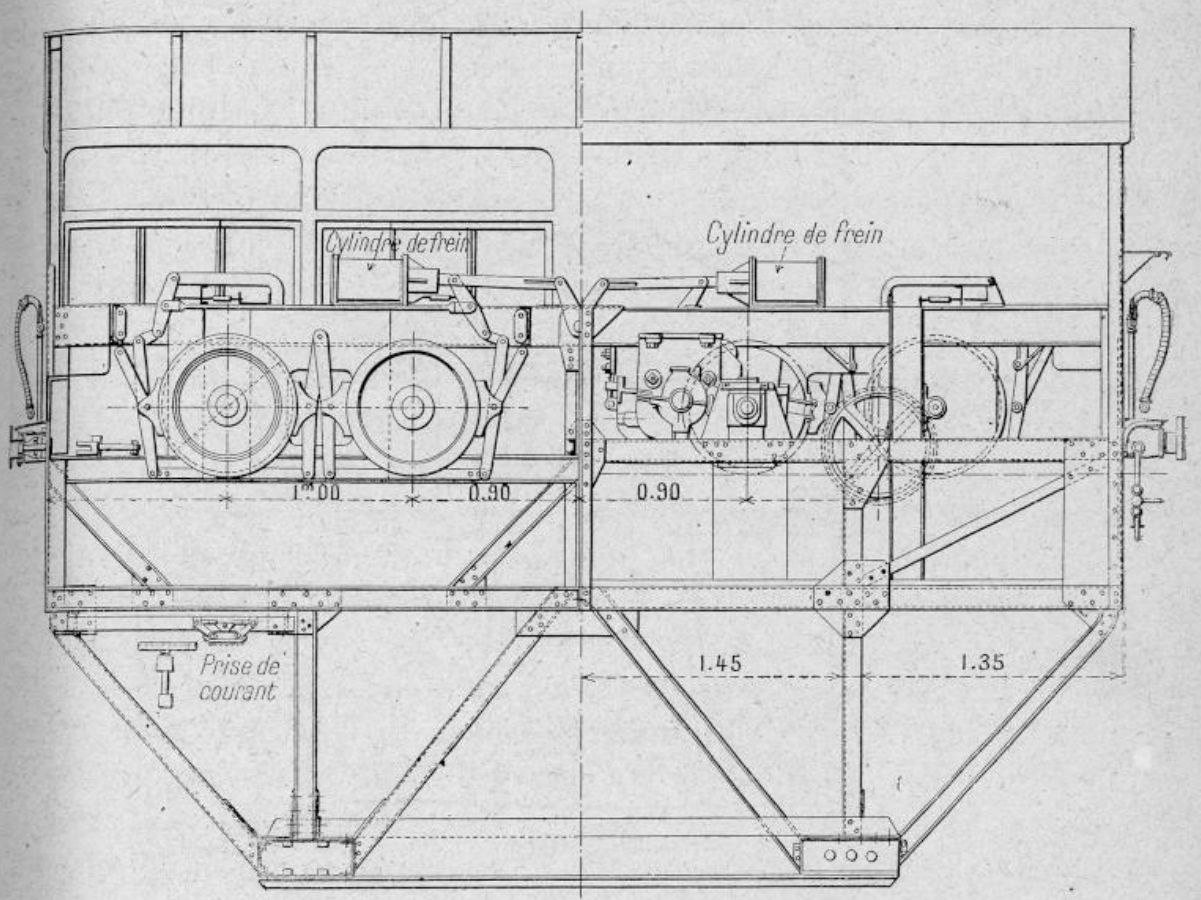
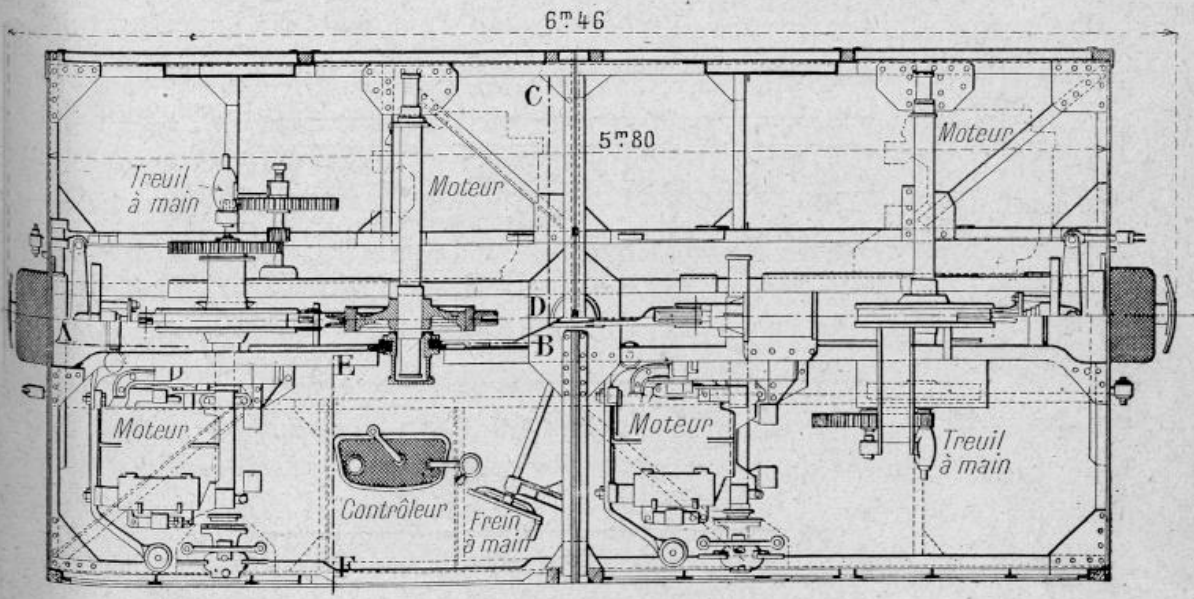


FIG. 534.



Plan du mécanisme.

FIG. 535.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

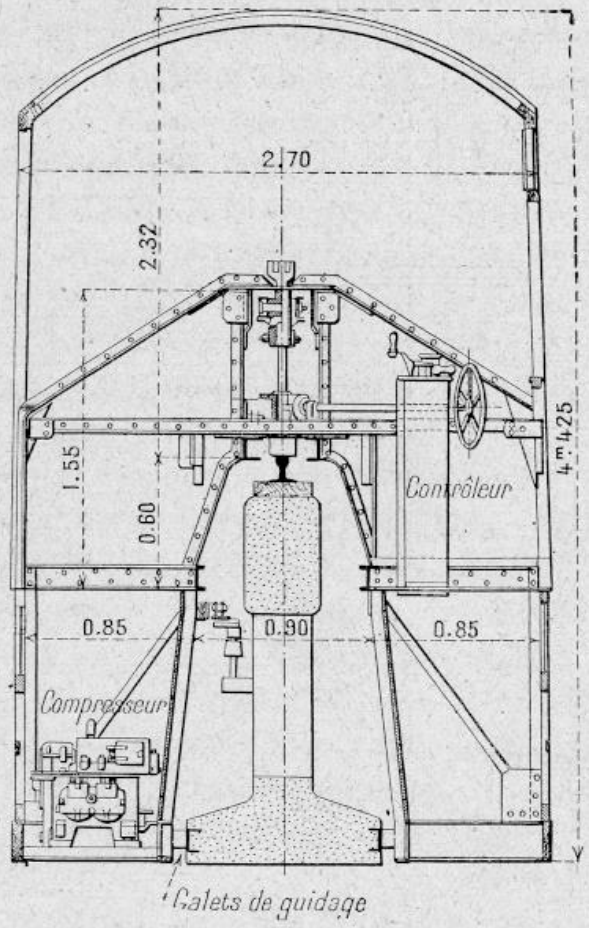


FIG. 536.

FIG. 534 à 536. — Élévation, coupe longitudinale, coupe transversale et plan de la locomotive électrique du chemin de fer monorail de Gênes.

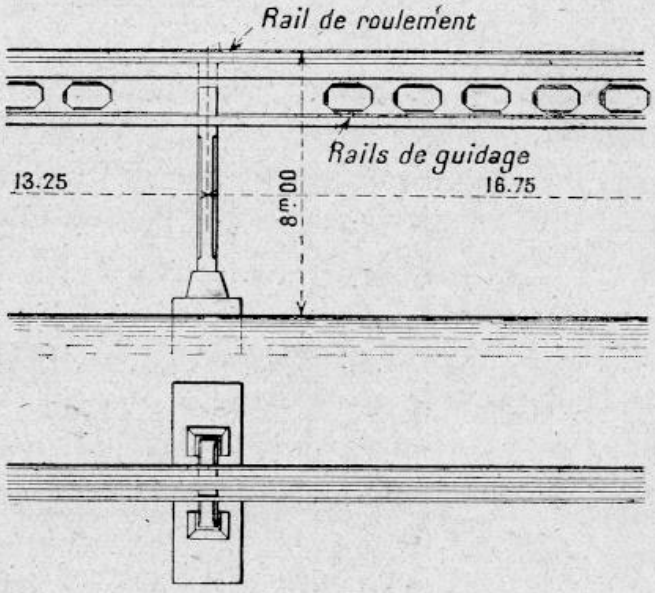


FIG. 537.

Élévation et plan de la poutre de roulement et de guidage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les galets horizontaux de guidage sont montés sur des axes verticaux, dont les paliers sont réunis au véhicule par l'intermédiaire de dispositifs à ressorts, de sorte que le guidage latéral du train présente une certaine élasticité, sans que le véhicule soit tout à fait libre comme dans le système Langen que nous verrons plus loin.

Le locomoteur de Gênes est porté par quatre roues, toutes motrices, chacune étant actionnée au moyen d'engrenages par un moteur électrique de 40 chevaux sous 500 volts à 560 tours à la minute. Le réglage de la vitesse se fait par un contrôleur série-parallèle avec dispositif de freinage d'urgence par mise en court-circuit des moteurs.

Le locomoteur pèse, avec 4 tonnes de lest, environ 17.500 kilogrammes, et un train normal comprend, en plus de la locomotive, quatre voitures pesant, à vide, 9.550 kilogrammes, la locomotive est placée au milieu du train. La vitesse est de 20 à 30 kilomètres à l'heure. Enfin, le train est équipé avec le frein Westinghouse automatique à air comprimé.

Nous ajouterons que trois projets de chemins de fer de ce système sont à l'étude : ce sont les chemins de fer de Milan à Milanio (10 kilomètres) de Rome à la mer (25 kilomètres) et de Venise à Mestre (10 kilomètres).

Le *bicycle américain Boynton* est assez différent des précédents. Il est bien monorail quant à la voie de roulement, mais comprend, en plus, une ligne aérienne de guidage (fig. 538) contre laquelle roulent deux galets. Le véhicule se trouvant ainsi maintenu, suit deux lignes dans son plan médian : un rail de roulement et un rail aérien de guidage.

Une première ligne de ce genre a été établie en 1893 à Belport (Long Island), près New-York.

Une ligne plus nouvelle de ce genre (monorail H. H. Tunis) a été réalisée en 1909-1910, sur une ligne d'environ 5 kilomètres, dans City-Island, près New-York. Ce dernier est du même type que celui établi en 1907 à l'Exposition de Jamestown.

Dans le monorail Tunis, l'ensemble de l'appareil de guidage comprend deux sortes de trucks (trolley-trucks) montés sur le toit du véhicule et portant quatre petites roues à axes verticaux roulant horizontalement contre le rail-guide aérien, celui-ci servant en outre de conducteurs pour l'amenée de courant.

Le véhicule est porté sur deux sortes de bogies à deux essieux et à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

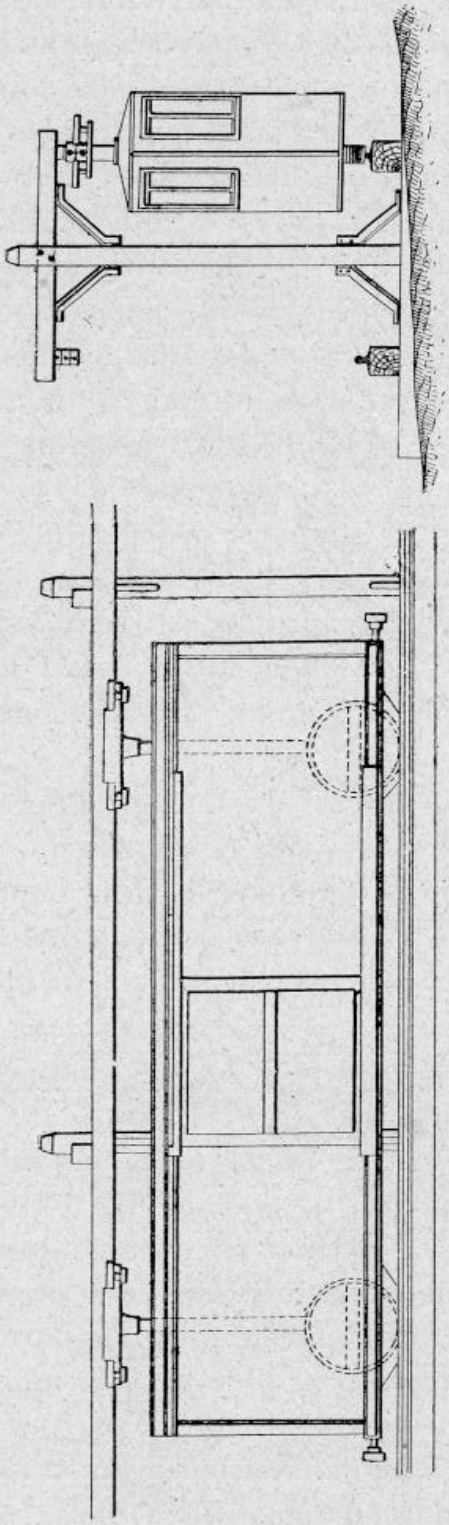


Fig. 538.

Chemin de fer bicycle Boynton.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux roues. Sur les essieux (fig. 539) sont montés les induits de deux moteurs tétrapolaires de 25 chevaux. Les induits sont en réalité calés sur un manchon entourant l'arbre. Le contrôle est série-parallèle.

Le véhicule pèse 15 tonnes et est prévu pour 50 places assises.

Un déraillement s'est produit en juillet 1910, dû à ce que la ligne aérienne qui était trop légèrement construite, céda sous l'effet de la pression horizontale des roues guides, joint à ce que la voie était elle-même très légèrement établie sur des traverses posées simplement sur le sol.

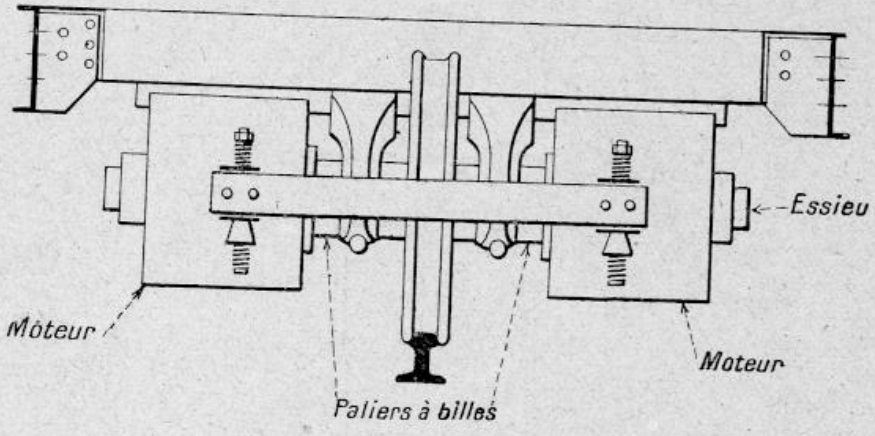


FIG. 539.

Monorail Tunis.

On se rend compte facilement que dans un tel système, les efforts horizontaux qui s'exercent sur le (ou les rails) de guidage aérien sont très considérables, notamment dans les passages en courbe.

b) dans le deuxième groupe, le centre de gravité n'est pas placé dans le plan vertical du rail porteur, de sorte que le véhicule à tendance à basculer. Il est maintenu dans sa position de service par des galets de butée. A ce groupe appartiennent le système qui était présenté à l'Exposition de Chicago, par l'ingénieur américain Cook (fig. 540) et celui de M. Dietrich (fig. 541).

c) Dans le troisième groupe, le centre de gravité est au-dessous des roues porteuses et, comme dans le premier groupe, dans leur plan, de sorte que le véhicule est normalement en équilibre. Il est en réalité suspendu. A ce groupe appartiennent d'abord les systèmes Enos

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 542) et Perlay-Hale (fig. 543) dans lesquels le véhicule est guidé par des galets qui empêchent toute inclinaison. Dans le système Mähl (fig. 544), le véhicule est encore guidé par des galets supérieurs, mais

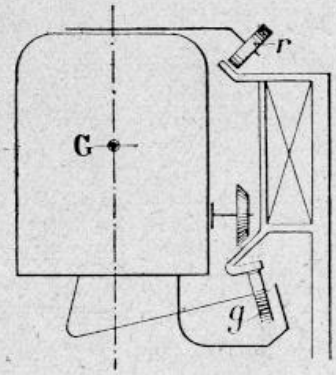


Fig. 540.
Système Cook.

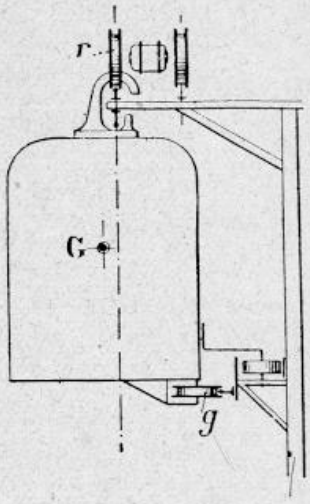


Fig. 541.
Système Dietrich.

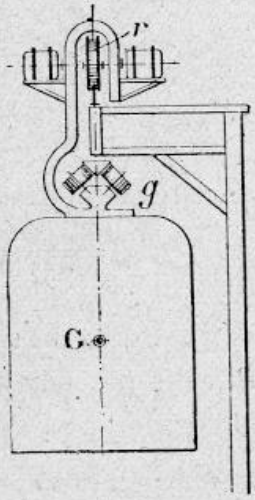


Fig. 542.
Système Enos.

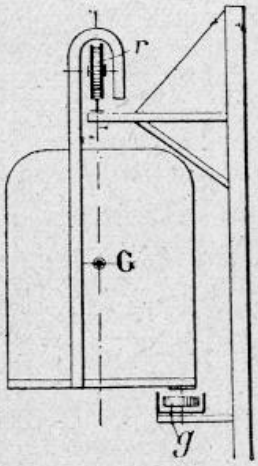


Fig. 543.
Système Perlay-Hale.

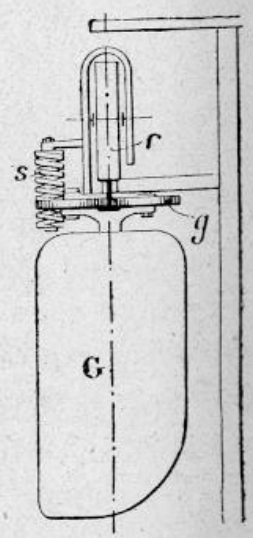


Fig. 544.
Système Mähl

il est lié à l'appareil moteur par un ressort *s* qui lui permet de prendre une certaine inclinaison dans les courbes, sous l'action de la force centrifuge, ce qui a pour effet de diminuer les réactions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le système Langen (fig. 545), le véhicule ne comporte pas de galets de guidage, de sorte qu'il peut prendre une certaine inclinaison, dans les courbes par exemple. Toutefois, dans une première application de ce système faite à titre d'essai en 1893, sur un circuit fermé, on avait suspendu le wagon à deux roues parallèles, entre lesquelles se trouvait la tige de suspension. Mais dans le chemin de fer de Barmen-Eberfeld, mis en service en 1900, et qui constitue la principale application du système Langen, le véhicule est suspendu à une seule roue.

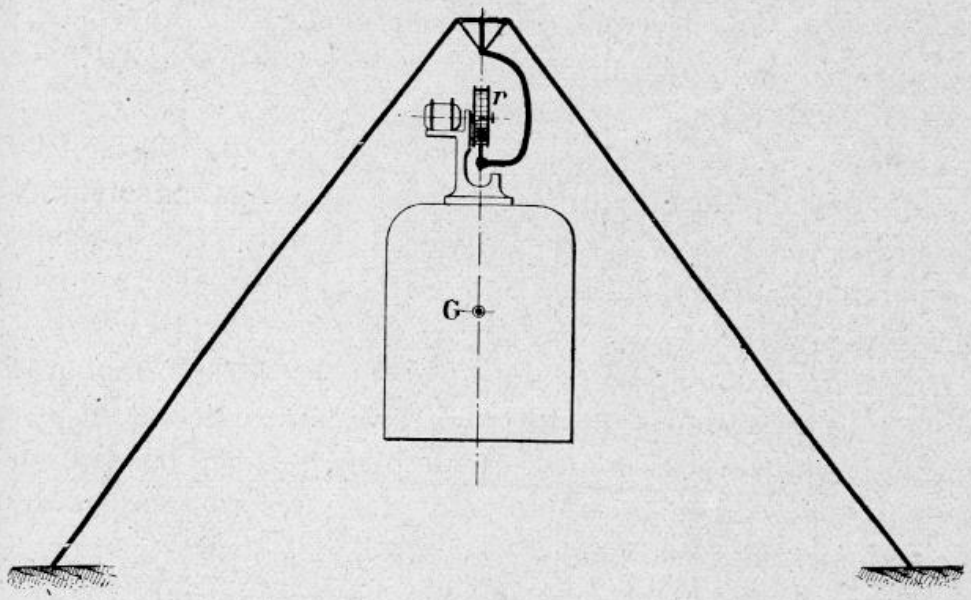


FIG. 545.

Système Langen, du chemin de fer de Barmen-Eberfeld.

Cette ligne comporte en réalité une voie double, portée par des portiques métalliques en forme de V renversé, établis en partie au-dessus d'une rivière (la Wüpper) et en partie au-dessus d'une route. Le système fonctionne régulièrement, la charpente est toutefois très coûteuse, et les frais d'établissement d'une telle ligne ne sont probablement pas inférieurs à ceux qui seraient résultés de l'établissement d'un chemin de fer birail. Ce système présente cependant des avantages au point de vue des grandes vitesses possibles et des passages en courbe.

La voiture Langen est actionnée par deux moteurs de 36 chevaux sous 600 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

234. **Monorail à gyroscope Brennan.** — Tous les systèmes précédents ont pour caractéristique commune de comporter un guidage matériel, constitué par des galets, ou d'être en équilibre stable normalement, sans guidage, sous l'action de la pesanteur seulement. Le monorail Brennan dérive d'un principe tout différent, il est purement monorail, sans dispositif de guidage et, cependant, le centre de gravité du véhicule est situé par rapport au rail de roulement comme sur les voies bi-rails ordinaires. La stabilité du véhicule est assurée par un *mécanisme gyroscopique,* que le véhicule soit au repos ou en mouvement, qu'il circule en ligne droite ou en courbe, que la pression de l'air agisse sur lui de front ou latéralement.

La propriété fondamentale du gyroscope sur laquelle est basée la construction de ce véhicule est la suivante :

Quand un disque gyroscope tourne à très grande vitesse, il faut, pour changer son plan de rotation, fournir un effort extérieur considérable, et par réaction le gyroscope tend à déplacer son axe dans un plan perpendiculaire à la résultante des efforts extérieurs (mouvement de précession).

M. Brennan a obtenu la stabilité verticale de son monorail au moyen de deux gyroscopes tournant en sens contraire et dont les axes sont normalement perpendiculaires au plan vertical passant par le rail porteur, c'est-à-dire parallèles aux axes des roues du véhicule. Ces gyroscopes sont actionnés par un moteur électrique.

Le principe de l'installation et du fonctionnement du système stabilisateur est le suivant :

Un châssis principal A (fig. 546) est supporté par des tourillons fixés à des cloisons transversales de la partie avant de la voiture (axe B). Ce châssis porte deux châssis secondaires D D′ articulés au châssis principal par des crapaudines C et C′. Ils renferment les volants gyroscopiques E E′ supportés eux-mêmes par les coussinets F F′ dans lesquels passent les arbres G G′. Enfin H H′ sont des pièces de butée fixées au véhicule lui-même, et la partie inférieure du châssis A porte une pièce K qui s'engage dans une fourche M fixée au véhicule et qui lui permet un léger déplacement autour de l'axe B.

Ceci posé, quand le véhicule tend à verser par l'effet d'une force extérieure, il arrive que le châssis qui supporte le mécanisme stabilisateur, tend à s'incliner avec le véhicule, mais en est empêché par l'effet gyroscopique des volants, et l'extrémité de l'arbre du gyros-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cope qui se trouve du côté où le véhicule se lève, prend vite contact avec le palier qui lui correspond. Dans ces conditions, un double effet se produit.

Supposons, pour fixer les idées, que le véhicule s'incline sur la droite :

1° Le palier H pousse sur l'arbre G du volant E et tend ainsi à déranger les plans de rotation des volants, ce qui leur procure un mouvement de précession, c'est-à-dire les contraint d'évoluer autour des axes C C et C' C'. A cause de ce mouvement de précession, les volants résistent à l'influence de l'effort de reversement ;

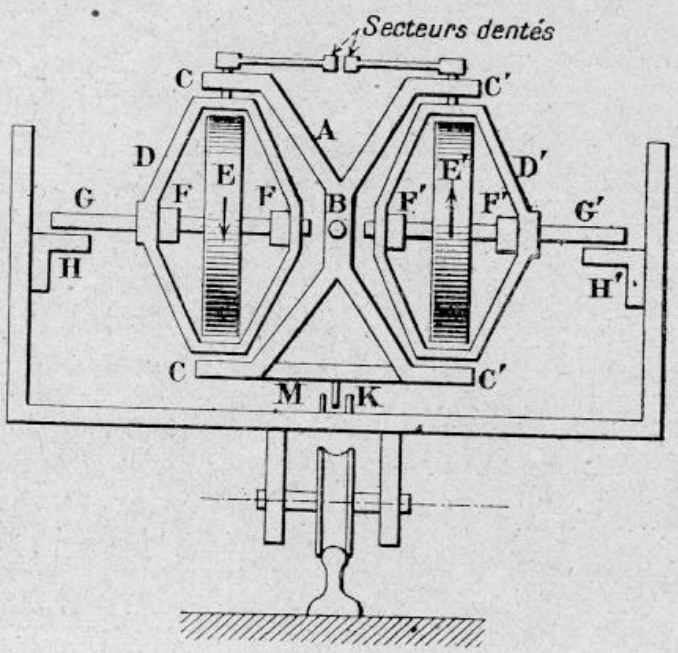


FIG. 546.

Gyroscopes du monorail Brennan.

2° L'arbre G, qui appuie sur le palier H, doit, à cause de son adhérence sur celui-ci, y rouler ; par suite, il y a amplification du mouvement normal de précession du volant.

Cette accélération du mouvement de précession oblige l'arbre du volant à appuyer sur H avec une force supérieure à celle qui tendait à faire incliner le véhicule, et, par là même, le ramène à la position d'équilibre.

Notons que, dans la réalité, l'inclinaison des gyroscopes est à peine appréciable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un petit modèle de véhicule Breman avait 1 m. 824 de longueur totale et contenait deux volants de 150 millimètres de diamètre tournant à une vitesse de 7.000 tours par minute. Le courant était fourni aux moteurs de traction et à des moteurs calés sur les arbres des gyroscopes par une batterie d'accumulateurs.

M. Brennan a construit en 1910 et essayé à New-Brompton (Angleterre) un grand modèle de 12 m. 20 environ de longueur sur 3 mètres de largeur, pesant à vide 22 tonnes et prévu pour

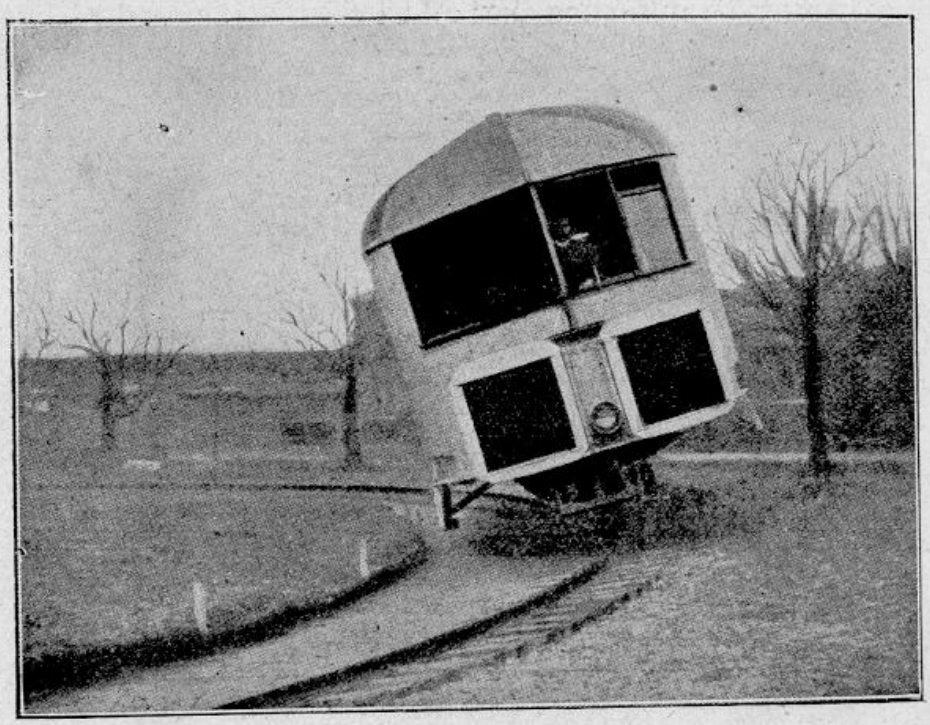


FIG. 547.

Automotrice monorail Brennan, type 1910.

une charge utile de 15 tonnes. Le véhicule est monté sur deux bogies. La vitesse réalisée est de 32 kilomètres-heure. Les volants ont environ 0 m. 930 de diamètre. Chacun pèse 750 kilogrammes et tourne à la vitesse de 3.000 tours-minute. La figure 547 représente une vue photographique intéressante prise en courbe et en pleine vitesse de cette automotrice.

La marche du véhicule et le fonctionnement des volants sont assurés par un système pétroléo-électrique comprenant deux moteurs à essence, un groupe moteur de 20 HP pour les gyroscopes et un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

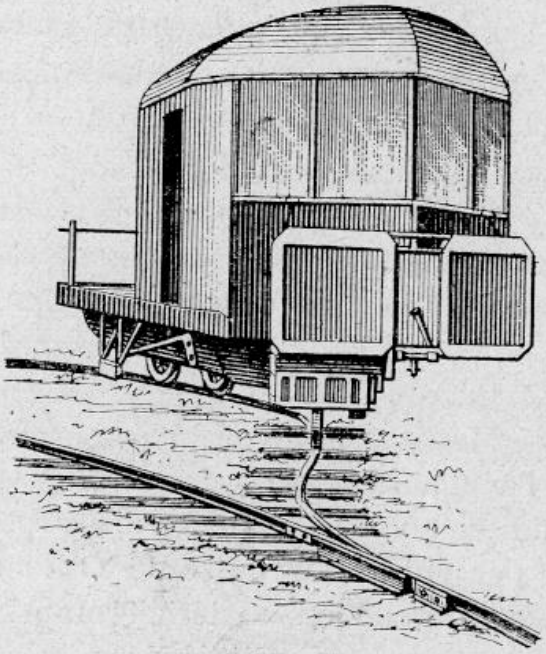


FIG. 548.

Voiture monorail Brennan (vue de l'avant) dans une courbe.

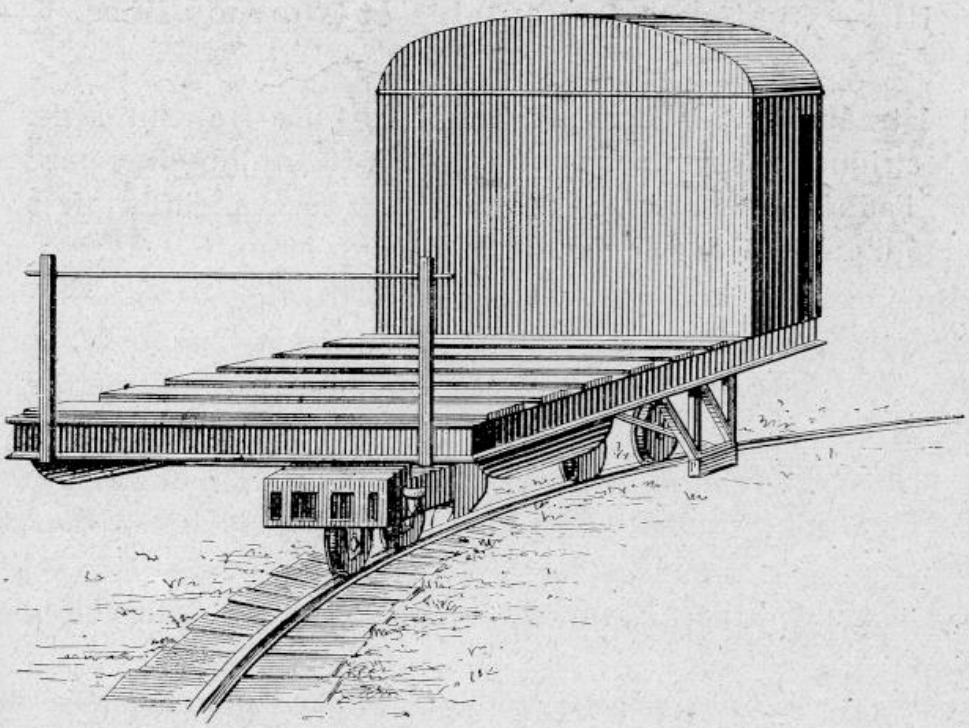


FIG. 549.

Voiture monorail Brennan (vue de l'arrière).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

autre groupe moteur de 80 HP pour les moteurs de propulsion. Chaque bogie comprend un moteur qui attaque les roues par bielles.

Un véhicule de ce genre a fonctionné avec succès à l'Exposition anglo-japonaise (mai 1910) (fig. 548 et 549).

Mentionnons pour terminer, le projet étudié en 1914 et dont la réalisation aurait probablement constitué la première application industrielle de ce monorail. Il s'agissait de la construction d'une ligne d'une longueur d'environ 160 kilomètres dans l'Alaska, la nouvelle voie devant prolonger la voie du chemin de fer actuel de l'Alaska central. Le but de cette voie sera de relier d'importants gisements houillers à Manatuska, au port d'embarquement, à Seward. On commencerait l'exploitation avec deux voitures pouvant transporter des marchandises ou 50 à 60 voyageurs et pouvant faire chacune deux voyages par jour, à la vitesse de 32 kilomètres à l'heure. La dépense totale de construction, matériel compris, ne dépasserait pas 15.500 francs par kilomètre, soit environ le septième de celle d'un chemin de fer bi-rail à voie étroite.

III. — Systèmes funiculaire et à crémaillère.

235. **Introduction.** — Lorsqu'il s'agit de faire franchir à des voitures électriques des rampes supérieures à 100 millimètres par mètre environ, l'adhérence ordinaire devient en général insuffisante et l'on est obligé d'y suppléer par des dispositifs spéciaux.

Comme exemple de fortes rampes où la traction se fait seulement par adhérence, nous citerons la ligne du Fayet à Chamonix, suivant la Vallée de l'Arve, et où les rampes atteignent 90 millimètres pour mètre.

On a atteint 113 millimètres à Lausanne et 115 millimètres au Havre, 113 et 122 millimètres à Laon (1), 120 millimètres à Boulogne-sur-Mer.

En Amérique, à San Francisco, on a atteint 140 millimètres.

(1) Le tramway de Laon comporte bien une crémaillère, mais elle n'est utilisée qu'à la descente sous forme de frein à crémaillère, les freins à sabots n'offrant plus une sécurité suffisante. Les rampes de 113 et 122 millimètres règnent respectivement sur 114 et 152 mètres et sont franchies par simple adhérence.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pratiquement, toutefois, on peut considérer que 100 millimètres est une limite rarement dépassée.

On peut se rendre compte de la manière suivante des conditions de marche d'un train électrique sur les fortes rampes et de la valeur théorique de la rampe maxima pour la marche par adhérence seule.

Soient :

P, le poids total d'une automotrice;
P_a, son poids adhérent en tonnes;
Q, le poids total des remorques en tonnes;
i, la rampe en millimètres par mètre;
r, le cœfficient global de traction supposé constant et supposé le même pour le poids adhérent que pour le poids remorqué. r est exprimé en kgs par tonne;
a, le cœfficient d'adhérence de la voie.

La condition de possibilité d'ascension de la rampe i supposée en alignement droit est :

$$(P + Q)(i + r) \leqslant 1000\ P_a\ a$$

d'où :

$$i_{max} = \frac{1000\ P_a\ a}{P + Q} - r.$$

Si, en particulier, il s'agit d'une automotrice seule dont tous les essieux sont moteurs (adhérence totale), on a :

$$1000\ P_a = P \quad \text{et} \quad Q = o$$

d'où :

$$i_{max} = a - r.$$

i_{max}, fonction de a et de r, est donc essentiellement variable.

Soit alors l'adhérence normale $a = 0{,}14$ et soit en outre $r = 10$, on a :

$$i_{max} = 140 - 10 = 130 \text{ millimètres par mètre.}$$

Pratiquement, on restera au-dessous de cette valeur, car le coefficient d'adhérence peut être plus petit que 0,14 et il est prudent de compter seulement sur $a = a = 0{,}12$ ou 0,10.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avec les locomotives à vapeur, on considère comme maximum une rampe de 55 millimètres par mètre et encore cette valeur est bien élevée. Cette limitation est due à ce que la limite de la puissance de vaporisation de la chaudière est rapidement atteinte.

Avec la locomotive électrique, on est seulement limité par l'adhérence, ainsi que nous venons de le voir. Au-dessus de cette limite, on est conduit à employer des dispositifs spéciaux : matériel roulant ordinaire et emploi de câbles funiculaires ou matériel à crémaillère.

Ce dernier système donne la solution la plus générale en même temps que la plus mécanique.

236. **Traction funiculaire.** — Les quelques exemples du premier système sont nombreux depuis les *ficelles* de Lyon, jusqu'aux funiculaires que l'on rencontre presque partout en Suisse. Comme dans les plans inclinés des galeries de mines, le wagon est fixé à l'extrémité d'un des brins du câble qui passe sur la poulie d'un treuil et qui supporte à l'extrémité de l'autre brin un contrepoids ou une voiture descendante.

Le mouvement alternatif de montée et de descente peut souvent être obtenu très économiquement dans les montagnes par un lest d'eau ; ailleurs, on emploie une machine hydraulique.

Enfin, aujourd'hui, que l'usage des moteurs électriques s'est étendu aux engins de levage, on les a tout naturellement appliqués à la commande de ces treuils.

Aussi le nombre de ces funiculaires électriques s'est-il accru très rapidement ; les plus connus sont ceux de *Burgenstock* et du *Stanserhom*, sur le lac des *Quatre-Cantons*, du *San Salvator*, près de *Lugano*, de *Bozen*, dans le *Tyrol*.

Le système à contrepoids a été appliqué à de véritables lignes de tramways, en particulier en Amérique : à Providence, à San Francisco, à Seattle, à Portland, etc....

Les câbles passent le plus souvent dans des caniveaux situés entre les rails, et les voitures viennent s'y accrocher par différents modèles de grippes.

Ce dispositif peut rendre des services pour faire franchir à des véhicules électriques circulant, en général, par simple adhérence, des parties de lignes où se trouvent des rampes exceptionnelles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

237. **Systèmes de crémaillères.** — La traction à crémaillère est d'une application plus générale que la traction funiculaire. La crémaillère n'est en sorte que l'extension du principe de l'adhérence, mais où le glissement possible des roues sur les rails est supprimé par la présence de la denture.

La première application sérieuse d'un chemin de fer à crémaillère fut faite en Europe par Riggenbach, qui, dès 1863, prenait un brevet relatif à l'emploi de la crémaillère, mais ce n'est qu'en 1869 que l'application en fut faite au chemin de fer du Rigi.

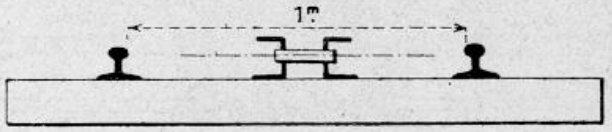


FIG. 550.
Voie à crémaillère Riggenbach du Corcovado.

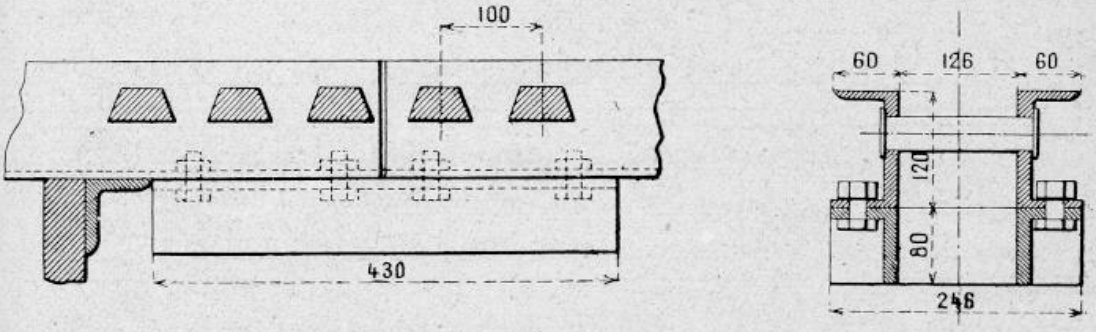


FIG. 551.
Crémaillère Riggenbach, du chemin de fer à crémaillère du Corcovado.

La première application de traction électrique sur crémaillère est due, d'après MM. Blondel et Dubois, à Daft, qui l'a réalisée au tramway de Pittsburg-Knoxville et Saint-Clair Street Railway en 1887, dont le tracé comportait une rampe maxima de 10 p. 100 seulement. Les moteurs des voitures actionnaient une roue dentée engrenant sur la crémaillère.

On peut répartir les systèmes de crémaillères en quatre types principaux :

1° Le type *Riggenbach* appliqué au Rigi dès 1869. Cette crémaillère comporte deux fers à U entretoisés et dont les entretoises constituent la crémaillère. Les figures 550 et 551 représentent une voie et une crémaillère de ce type.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme autres applications de ce type de crémaillère, nous citerons celles des chemins de fer du Brünig, de Langres, et plus récemment du Corcovado, près Rio-de-Janeiro.

La figure 551 *bis* (1) représente une modification de la crémaillère Riggenbach, c'est la crémaillère Bissenger et Klose adoptée au chemin de fer du Höltenthal ;

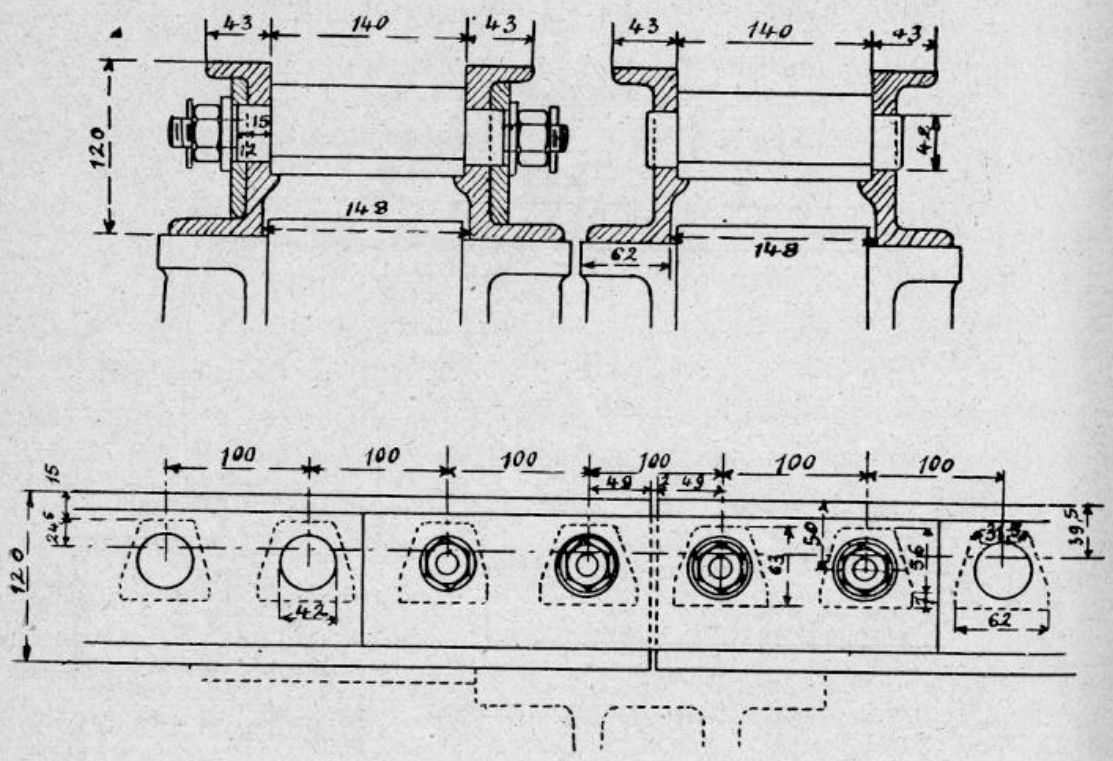


FIG. 551 *bis*.

Crémaillère Bissinger et Klose.

2° Le type *Abt*, proposé en 1882, à lames verticales découpées en forme de dents (fig. 552 et 553). Cette crémaillère a été appliquée la première fois, au chemin de fer du Harz, en 1885. C'est le type qui paraît être le plus répandu. Les dents sont tracées dans le système des développantes de cercle; il y a par suite toujours deux dents de la roue motrice en prise sur chaque lame, soit quatre ou six, s'il y a

(1) Cette figure ainsi que les suivantes concernant les différents systèmes de crémaillère, sont empruntées à une communication de M. LÉVY-LAMBERT, à la Société des Ingénieurs civils de France (Bulletin de mars 1906), de laquelle nous avons fait divers extraits.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux ou trois lames. Un pareil système permet donc un effort de traction plus considérable et assure en outre un mouvement plus doux que le système à échelons précédent ;

On peut définir cette crémaillère comme étant un rail Vignole, à patin élevé, avec champignon laminé conique, taillé en crémaillère.

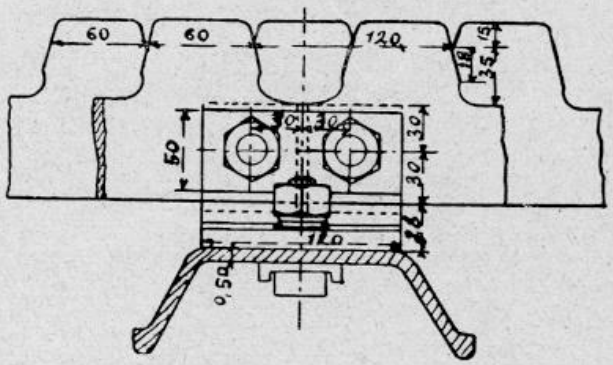


FIG. 552.

Crémaillère Abt.

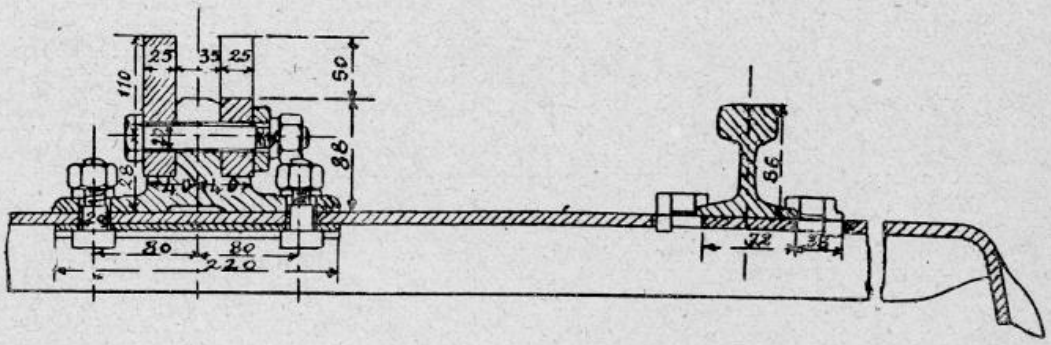


FIG. 553.

Crémaillère Abt.

Les dents ont une forme très particulière cylindro-conique et, entre deux dents consécutives, l'âme du rail est creusée de façon à ménager un vide dont le fond affecte une forme cylindrique.

3° Le type *Strub,* plus récent que les précédents, et dont la première application a été réalisée en 1890, au chemin de fer de la Jungfrau. Cette crémaillère n'est utilisée que pour les lignes entièrement à crémaillère, à l'exclusion des lignes mixtes.

Il est à remarquer que cette crémaillère permet l'emploi de pinces

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de sûreté latérales qui empêchent d'une façon absolue les véhicules de monter sur les dents de la crémaillère et servent en même temps comme guides dans le sens latéral. Elles peuvent aussi servir comme freins de sûreté (freins à mâchoires).

La figure 554 se rapporte à une voie à crémaillère Strub et la figure 555 donne le détail de la crémaillère elle-même.

Comme autres exemples nous citerons la ligne du Vésuve et celle de Martigny-Châtelard ;

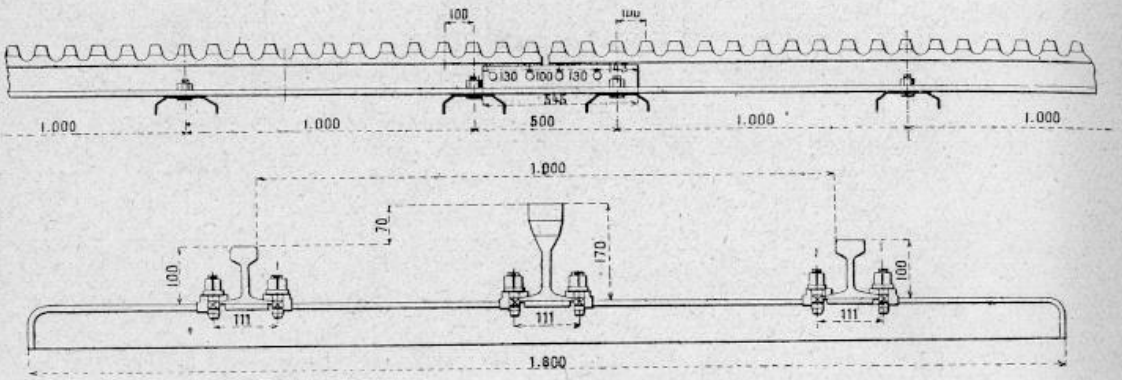


FIG. 554.

Crémaillère Strub.

4° Le type *Locher,* à lames horizontales dentées, les roues dentées engrenant étant ici à axes verticaux. Cette crémaillère a été créée pour la ligne du Mont-Pilate, qui présente les plus fortes déclivités parmi les lignes à crémaillère : 480 millimètres par mètre. Avec une telle déclivité la roue dentée du véhicule sort facilement des dents d'une crémaillère des types précédents, ainsi que des essais l'ont montré au mont Pilate. Ce système assez compliqué n'est intéressant que pour les pentes extrêmement raides et encore, dans ce cas, le système funiculaire paraît être généralement indiqué.

La figure 556 représente la crémaillère Locher et la figure 557 le schéma d'ensemble du mécanisme de commande.

238. **Pièces d'entrée de crémaillère.** — Sur toutes les lignes mixtes, où l'on passe alternativement d'une section à adhérence à une section à crémaillère, on ne peut évidemment laisser la roue motrice aborder brusquement la crémaillère non seulement parce qu'il y

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

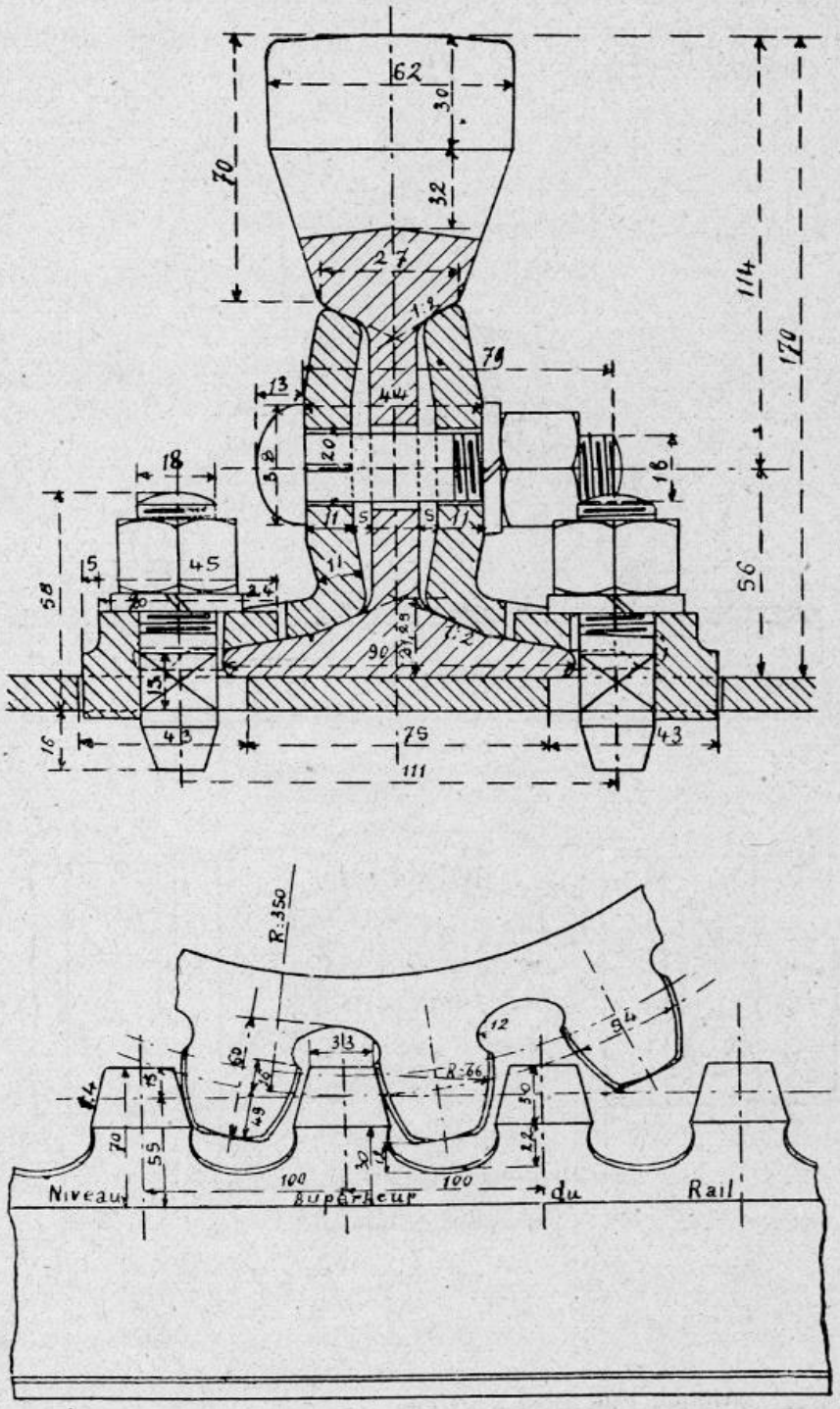


FIG. 555.

Crémaillère Strub.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aurait choc, mais aussi parce que l'engrènement pourrait ne se produire que très difficilement. Pour éviter ces inconvénients, on dispose, à l'entrée de la section, un tronçon de crémaillère mobile autour

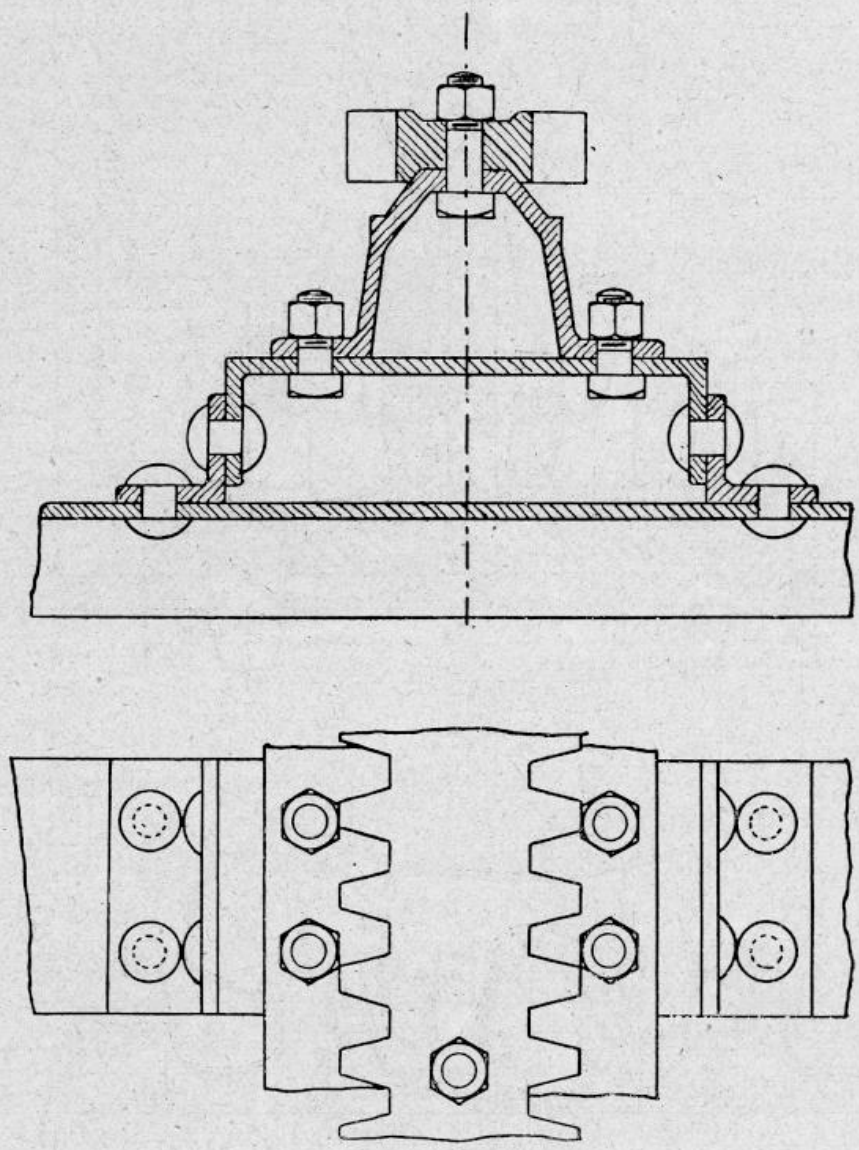


FIG. 556.

Crémaillère Locher.

d'un axe horizontal, à l'extrémité opposée à l'entrée, et supportée d'autre part par un ou plusieurs ressorts, ainsi que le montre la figure 558. Lorsque la roue dentée aborde cette pièce, celle-ci s'abaisse sous la pression, et comme le pas « p' » de la pièce d'entrée est plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

petit que le pas « p » de la crémaillère, l'engrènement se produit forcément au bout d'un certain temps.

Soit, en effet, « n » le nombre de dents venues en contact au moment de l'engrènement, « a » la distance séparant l'arête d'une dent de la roue dentée, de l'arête d'une dent de la crémaillère à l'entrée. On aura au moment de l'engrènement :

$$n\,p = a + n\,p'$$

d'où :

$$n = \frac{a}{p - p'}$$

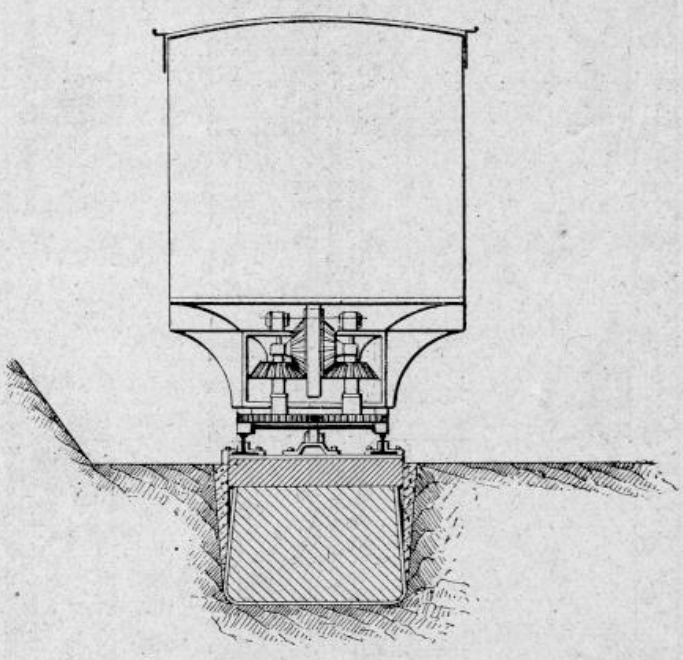


FIG. 557.

Crémaillère Locher. Mécanisme de commande.

A partir du moment où l'engrènement s'est produit, la roue dentée roule sur une crémaillère d'un pas légèrement inférieur au sien, ce qui produit des glissements.

Cet inconvénient est évité avec les machines à deux mécanismes.

La crémaillère des pièces d'entrée est toujours une crémaillère à lames du type Abt. La disposition des pièces d'entrée est d'ailleurs due à cet ingénieur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 558.

Pièces d'entrée de crémaillère.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

239. **Poussée longitudinale dans les systèmes à crémaillère.** — Une particularité que présente l'emploi des crémaillères, résulte des efforts longitudinaux importants qui s'y développent et qui obligent à prendre des dispositions très spéciales pour résister à la tendance au glissement qui en est la conséquence. Ainsi au Vitznau-Rigi, par exemple, la crémaillère est poussée en sens inverse de la marche par une force de près de 6 tonnes ; on comprend, dès lors, combien il importe de s'opposer à ce glissement longitudinal.

Les moyens employés consistent généralement à relier les traverses par deux cours de moises courant parallèlement aux rails et fixées symétriquement de part et d'autre de l'axe. Au lieu de moises, on emploie aussi des fers à U posés à plat et tire-fonnés sur les traverses. Avec les traverses métalliques, dont la section en U renversé pénètre dans le ballast, la nécessité de relier les traverses dans le sens longitudinal est moins pressante.

Lorsque la pente est raide, il faut, en outre, de distance en distance, faire buter la traverse contre un arrêt fixe solidement implanté dans la plate-forme.

Remarquons, en passant, que l'emploi de la traction électrique permettant par rapport à la traction à vapeur, l'emploi de locomoteurs plus légers, a l'avantage de diminuer la poussée longitudinale.

On peut se rendre compte de l'importance de cette poussée, de la manière suivante :

Soient :

i la pente de la voie ;
P le poids total du train en kgs ;
V sa vitesse en m/sec. ;
L le parcours en mètres effectué pendant la période de serrage des freins jusqu'à l'arrêt.

Au moment du serrage des freins, la force sollicitant le train est

$$P \sin i + \frac{P V^2}{2g L}$$

Soit F la force destinée à annuler la force vive, elle communiquerait sur une longueur L une vitesse V à la masse $\frac{P}{g}$, soit γ son accélération. On a

$$V = \gamma t$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et

$$L = \frac{1}{2}\gamma l^2$$

d'où

$$\gamma = \frac{V^2}{2L}$$

donc

$$\frac{F}{P} = \frac{\gamma}{g} = \frac{\frac{V^2}{2L}}{g}$$

et

$$F = \frac{V^2 P}{2gL}$$

La pression totale sur la crémaillère sera donc

$$Q = \frac{P V^2}{2g L} + P \sin i$$

Si l'on applique cette formule au cas du chemin de fer à crémaillère du Rigi (1) précité, où $V = 2^m$, $P = 20.000$ kilogrammes, $\text{Sin } i = tgi = \frac{1}{4}$, on obtient, en supposant que l'on veuille produire l'arrêt sur une longueur de 10 mètres

$$Q = \frac{20.000 \times 2^2}{2 \times 9{,}81 \times 10} + \frac{20.000}{4}$$

soit en chiffres ronds

$$Q = 400 + 5.000 \text{ kgs.}$$

Si au lieu de $V = 2$ on suppose $V = 3$, le terme dû à la force vive passe de 400 à 900 kilogrammes. On voit par là la nécessité d'éviter toute accélération.

---

(1) D'après la communication précitée de M. LÉVY-LAMBERT, à la Société des Ingénieurs civils de France.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

240. **Avantages de la traction électrique pour les systèmes à crémaillère.** — Les avantages de la traction électrique sur la traction à vapeur peuvent être résumés ainsi :

1° Faible poids des moteurs électriques par cheval développé réduisant ainsi le poids mort.

2° Facilité de transmission du mouvement et de réglage de la vitesse.

3° Faible place occupée par les moteurs électriques.

4° Freinage électrique sûr et énergique avec, accessoirement, faculté de récupération de l'énergie.

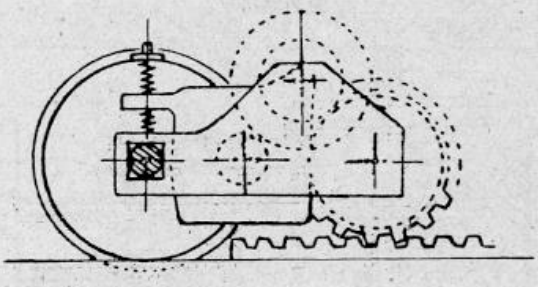


FIG. 559.

Moteur attaquant par engrenages à double réduction un pignon de crémaillère calé sur faux essieu (*première disposition*).

241. **Mécanismes de locomoteurs à crémaillère.** — Au point de vue de l'installation des moteurs et de la transmission du mouvement à la roue dentée, il faut tenir compte d'une circonstance particulière qui est la suivante : laisser, entre l'arbre du moteur et celui de cette roue, une distance assez grande pour que cette dernière ne vienne pas rencontrer l'enveloppe du moteur, ce qui oblige à recourir, en dehors de toute autre considération, à une double réduction.

A cet effet, l'arbre du moteur attaque un faux essieu placé, par exemple, au-dessus de lui, et ce faux essieu conduit à son tour l'arbre de la roue dentée placé dans le même plan horizontal que l'arbre du moteur. Les centres des trois arbres forment ainsi un triangle dont la base est horizontale. Cette disposition est appliquée en particulier comme l'indique la figure 559 aux voitures automotrices du mont Salève.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme variante de ce montage, les trois arbres peuvent être dans le même plan horizontal, suivant la figure 560 (1).

Dans un autre mode de montage, pour gagner de la place, le pignon de crémaillère et la roue dentée qui le commande sont calés sur un arbre creux enfilé sur l'essieu porteur. Cette disposition est indiquée sur la figure 561 (1).

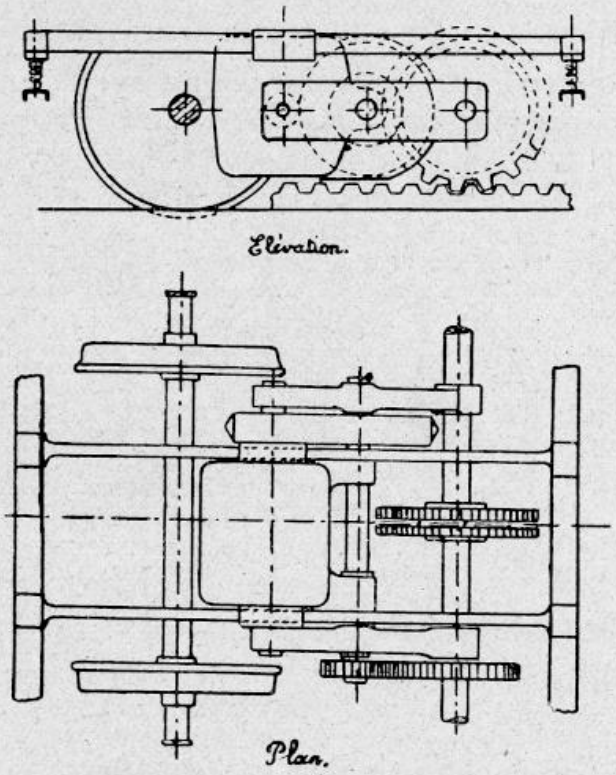


FIG. 560.

Moteur attaquant par engrenages à double réduction un pignon de crémaillère calé sur un faux essieu (*deuxième disposition*).

Avec des voitures automotrices à bogies et un moteur par bogie, on obtient, en général, la puissance suffisante.

Pour les locomotives, on place généralement les moteurs au-dessus du châssis, en raison de la place occupée par les roues dentées.

En ce qui concerne la dépendance ou l'indépendance relative des roues porteuses et des roues dentées commandant les pignons, on

(1) Empruntées à l'ouvrage de MM. BLONDEL et DUBOIS, tome I, déjà cité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut grouper les systèmes à crémaillère comme suit, suivant la valeur de la rampe maxima que présente la ligne.

1° Sur les profils ne comportant pas de rampes inférieures à environ 15 p. 100, on a avantage à rendre les roues porteuses complètement indépendantes des roues dentées qui seules supportent l'effort total de traction. Les autres roues étant exclusivement porteuses.

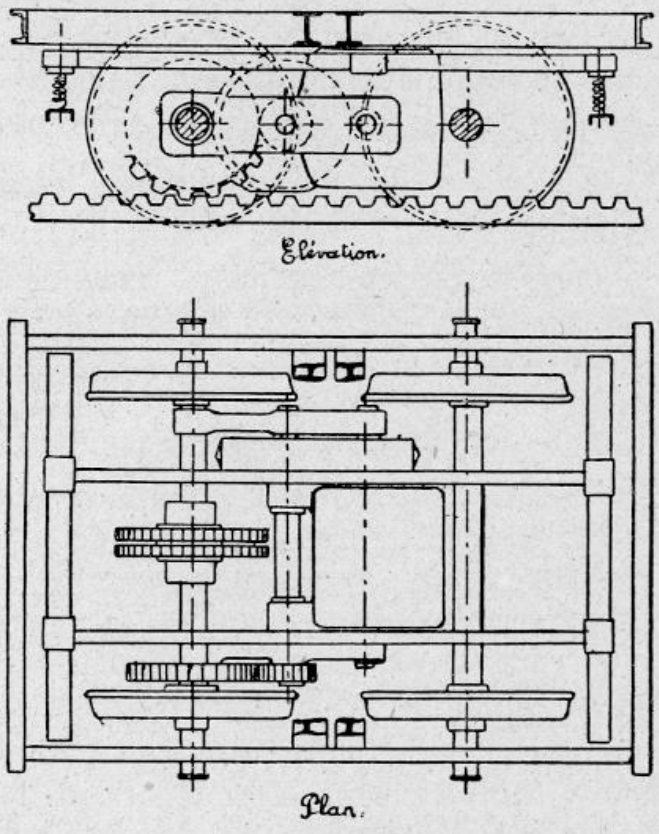


FIG. 561.

Truck à un moteur à action simple avec pignon de crémaillère concentrique à l'un des essieux

2° Sur les profils comportant beaucoup de déclivités inférieures à environ 15 p. 100, on peut, au contraire, rendre les roues porteuses solidaires des roues dentées, de façon que les roues porteuses contribuent pour une petite partie, par leur adhérence, au travail de traction total.

On a objecté que cette solidarité des pignons dentés et des roues

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

porteuses donnait lieu à des glissements par suite de l'inégalité dans l'usure des deux systèmes de roues, mais il a été reconnu, par expérience, que la valeur du travail ainsi perdu n'avait pas plus d'importance que le glissement dans les courbes, dû à la solidarité des roues et des essieux.

3° Enfin, sur les profils comportant des parties en palier et des parties à fortes déclivités, on peut se servir soit du système précédent, soit du système dit à double mécanisme, dans lequel les roues porteuses et la roue dentée, tout en restant indépendantes sont actionnées chacune par un mécanisme spécial. On met l'un ou l'autre de ces mécanismes en action suivant que l'on se trouve sur une partie de ligne avec crémaillère ou sur une partie sans crémaillère.

242. **Freinage des locomotives à crémaillère.** — Cette question est naturellement d'une extrême importance avec un tel matériel. Comme freinage normal, on a recours au freinage électrique continu réglable.

Quand il s'agit de moteurs asynchrones, ce qui est le cas le plus fréquent, on sait qu'ils fonctionnent automatiquement en générateurs asynchrones débitant sur le réseau, en récupération, dès que la vitesse dépasse légèrement celle du synchronisme. Ceci a toutefois l'inconvénient d'exiger que les moteurs demeurent reliés à la ligne d'alimentation pour recevoir leur excitation. Il y a là un élément grave d'insécurité, car, si pour une raison quelconque, le courant d'alimentation vient à manquer, l'action de freinage cesse. Pour cette raison, il est préférable, comme nous l'avons vu à l'étude du freinage (§ 156), de séparer complètement les moteurs de la ligne en les faisant fonctionner en générateurs synchrones débitant sur des résistances réglables. Les moteurs recevront alors leur excitation d'une petite dynamo à courant continu entraînée directement par l'arbre d'un des moteurs par exemple.

On peut d'ailleurs utiliser les deux procédés, ainsi que cela a été réalisé aux dernières locomotives Brown-Boveri de la Jungfrau, comme nous l'avons vu en détail antérieurement (§ 156 et fig. 367, schéma des connexions des nouvelles locomotives de la Jungfrau) et aussi au chemin de fer du Corcovado (Oerlikon).

Notons que les résistances de freinage devront être ventilées artificiellement (sur le schéma de la fig. 367 est représenté un ventila-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur), en vue de faciliter la dissipation de l'énergie produite, qui, on s'en rend compte, est considérable.

Le freinage électrique doit être complété par des moyens sûrs de *freinage mécanique* qui sont en général :

a) Un *frein à main* agissant sur les disques de freinage fixés aux roues dentées motrices par rubans et sabots, et en même temps sur les bandages des roues à adhérence (locomotive mixte) au moyen de sabots.

b) Un *frein à ruban et à sabots* commandé par une manivelle agissant uniquement sur des disques de freinage montés sur les essieux moteurs.

Un réservoir à eau doit être prévu, afin de refroidir les rubans de ces freins en cas d'usage prolongé.

c) Un *frein automatique à ressort* agissant, au moyen de rubans et sabots, sur des disques de freinage calés directement sur les arbres des moteurs. Ce frein est commandé par un régulateur qui le met automatiquement en fonction dès que la vitesse du véhicule dépasse une certaine valeur.

Au moyen d'un levier placé à portée du mécanicien, on devra d'ailleurs pouvoir mettre ce frein en fonction en cas de danger.

d) Pour la crémaillère Strub, on emploiera avantageusement un frein à mâchoires, ainsi que nous l'avons déjà vu. Ce frein pourra d'ailleurs être à commande manuelle ou automatique.

e) Signalons enfin comme autre moyen de freinage très efficace, celui donné par les freins électro-magnétiques à patins sur rails, moyen employé en particulier à la Jungfrau, ainsi que nous l'avons déjà signalé (§ 156 et fig. 367 sus rappelés), où toutes les voitures du train sont munies de tels freins.

243. **Exemples de chemins de fer à crémaillère.** — Nous donnons ci-après les caractéristiques principales de quelques-unes des lignes à crémaillère les plus connues.

Nous signalons particulièrement celles à courant continu à parcours mixtes adhérence et crémaillère, à cause des dispositions spéciales prises au point de vue moteurs pour le fonctionnement sur les deux sortes de parcours.

Zermatt-Gornergrat (1898). — Courants triphasés 540 volts, 40

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

périodes. Crémaillère seule. Locomotive à deux moteurs de 90 chevaux. Poids d'une locomotive en service : 11 tonnes. Poids d'un

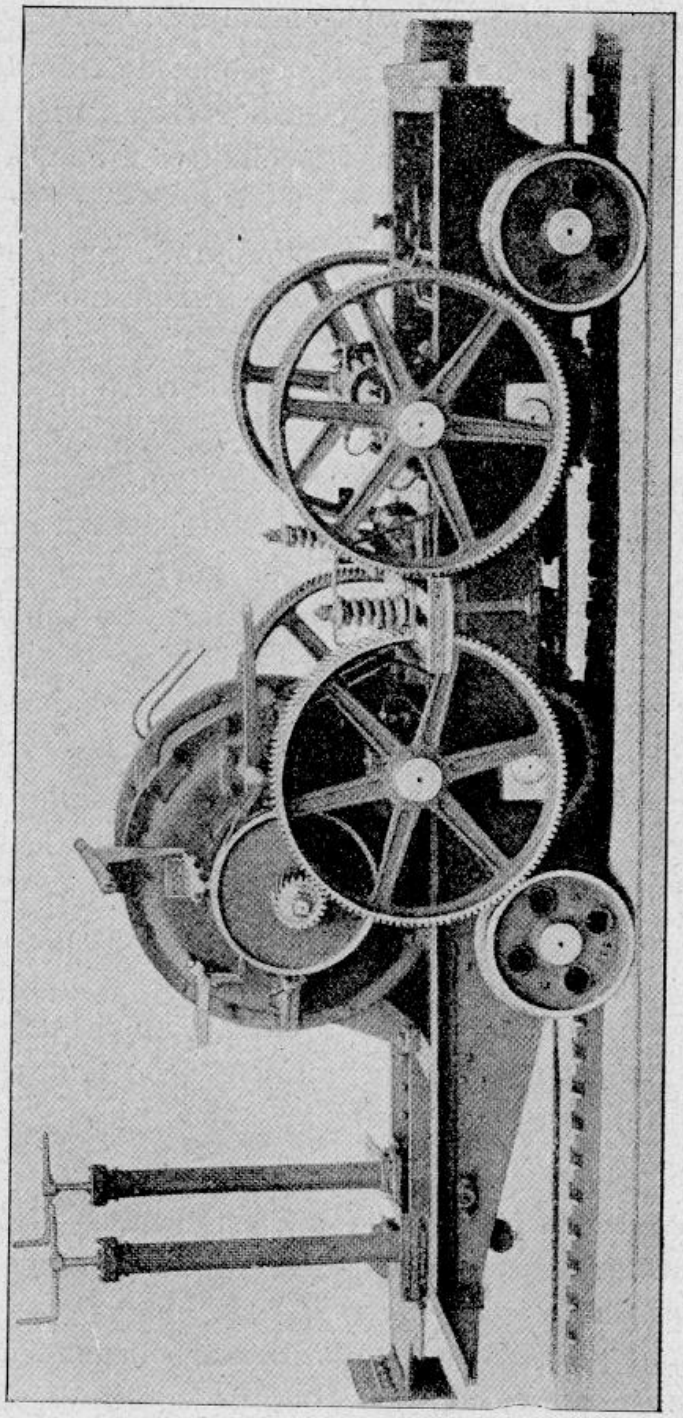


Fig. 562.
Locomotive à crémaillère Gornergrat.

train : 28 tonnes. Rampe maxima : 20 p. 100. Vitesse à la descente : 7 kilomètres à l'heure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La photographie (fig. 562) montre la disposition du mécanisme de commande.

Stansstaad-Engelberg (1898-1912). — Courants triphasés 750 volts 32 périodes. Ligne mixte : adhérence et crémaillère. Locomotive à

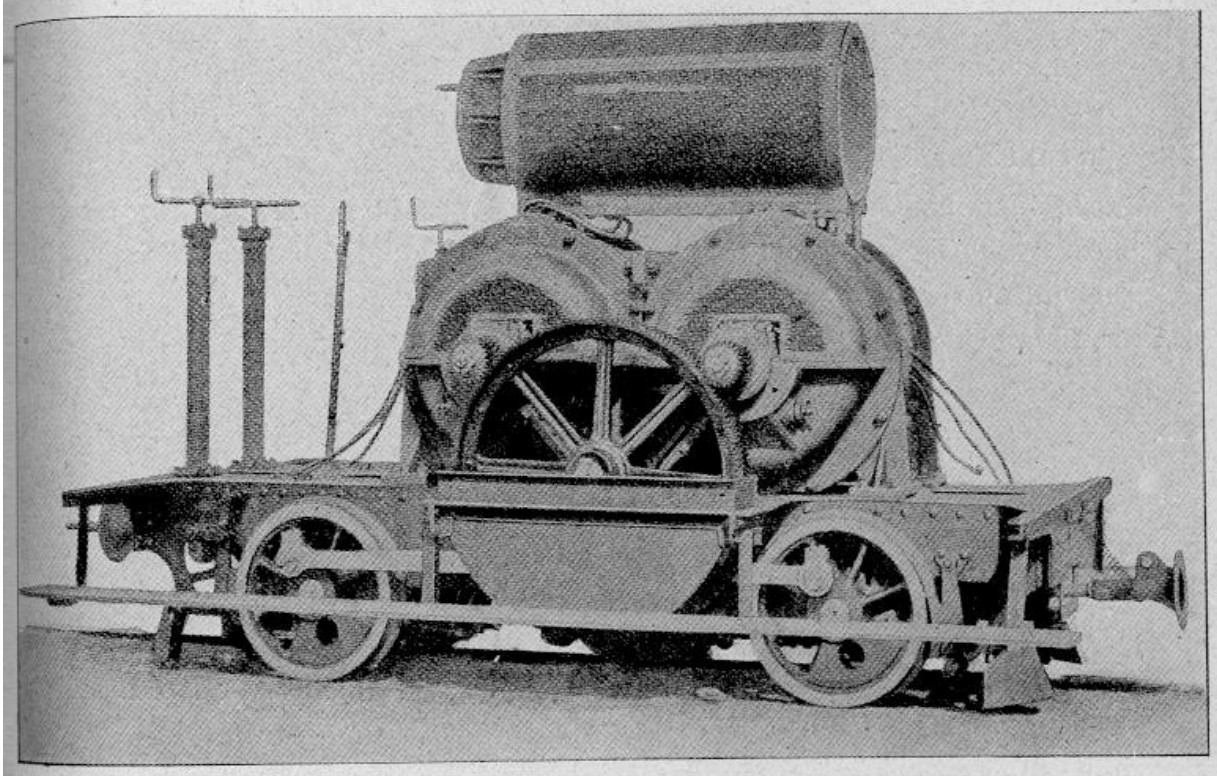


FIG. 563.

Locomotive mixte à adhérence et à crémaillère. Stansstaad-Engelberg.

deux moteurs de 75 chevaux. Poids de la locomotive : 12 t. 7. Poids d'un train : 26 tonnes. Rampe maxima sur l'adhérence : 5 p. 100. Rampe maxima sur la crémaillère : 25 p. 100. Vitesse sur l'adhérence : 11 k. 5 à l'heure. Vitesse sur la crémaillère : 5 kilomètres à l'heure.

La photographie (fig. 563) montre le mécanisme de ces locomotives.

Jungfrau (1898-1915). — Courants triphasés 650 volts 40 périodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Crémaillère et adhérence. Dernières locomotives type 1914 : deux moteurs de 165 chevaux.

Poids d'une locomotive en service . . . . . 18 tonnes;
Poids d'un train . . . . . 35 —
Rampe maxima : sur l'adhérence . . . . . 25 p. 100;
— sur la crémaillère . . . . 6,33 p. 100;
Vitesses : 18 kilomètres à l'heure sur l'adhérence;
— 8,5 kilomètres à l'heure sur la crémaillère.

Les figures 564 et 565 se rapportent à ces dernières locomotives. On y voit représentés, entre autres particularités, les freins à patins sur rails.

Lyon-Fourvière (1900-1912). — Courant continu 500 volts. Crémaillère et adhérence. Locomotive à trois moteurs : deux moteurs de 25 chevaux, excitation série, pour la marche en adhérence et un moteur de 150 chevaux, excitation shunt, pour la marche en crémaillère.

Poids de la locomotive . . . . . 14.5 tonnes;
— du train . . . . . 28 —
Rampe maxima : sur l'adhérence . . . . . 6 p. 100;
— sur la crémaillère . . . . 19 p. 100;
Vitesse sur l'adhérence ou sur la crémaillère : 9 kilomètres à l'heure.

La photographie (fig. 566) montre la disposition du mécanisme de ces locomotives.

Vésuve (1909-1910). — Courant continu 550 volts. Crémaillère et adhérence. Locomotives à quatre moteurs dont deux de 85 chevaux à excitation en dérivation pour la marche sur crémaillère et deux de 25 chevaux à excitation série pour la marche en adhérence.

Rampe maxima : sur l'adhérence . . . . . 8 p. 100 ;
— sur la crémaillère. . . . . 25 p. 100 ;
Poids des trains : sur le parcours à adhérence. 11 tonnes ;
— — à crémaillère. 22 —
Vitesse : sur l'adhérence. . . . . 12 à 15 Km/h.
— sur la crémaillère. . . . . 8 Km/h.

Wengernalp (1909-1910). — Courant continu 1.500 volts. Crémaillère seule. Locomotives à deux moteurs de 150 chevaux à excitation série et en série sous la tension totale. Poids d'une locomotive : 16 tonnes. Rampe maxima : 25 p. 100. Le poids d'un train varie de 33

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 564.

Locomotive du chemin de fer de la Jungfrau de la série No. 8 à 10, la caisse de la locomotive étant enlevée.
Vue du côté des accouplements à friction pour le service à adhérence.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 565.

Locomotive du chemin de fer de la Jungfrau de la série No. 8 à 10, la caisse de la locomotive étant enlevée.
Vue du côté de la transmission.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tonnes (rampes de 25 p. 100) à 43 tonnes (rampes de 19 p. 100). Vitesse : 9 kilomètres à l'heure.

La photographie (fig. 567) montre le mécanisme de ces locomotives.

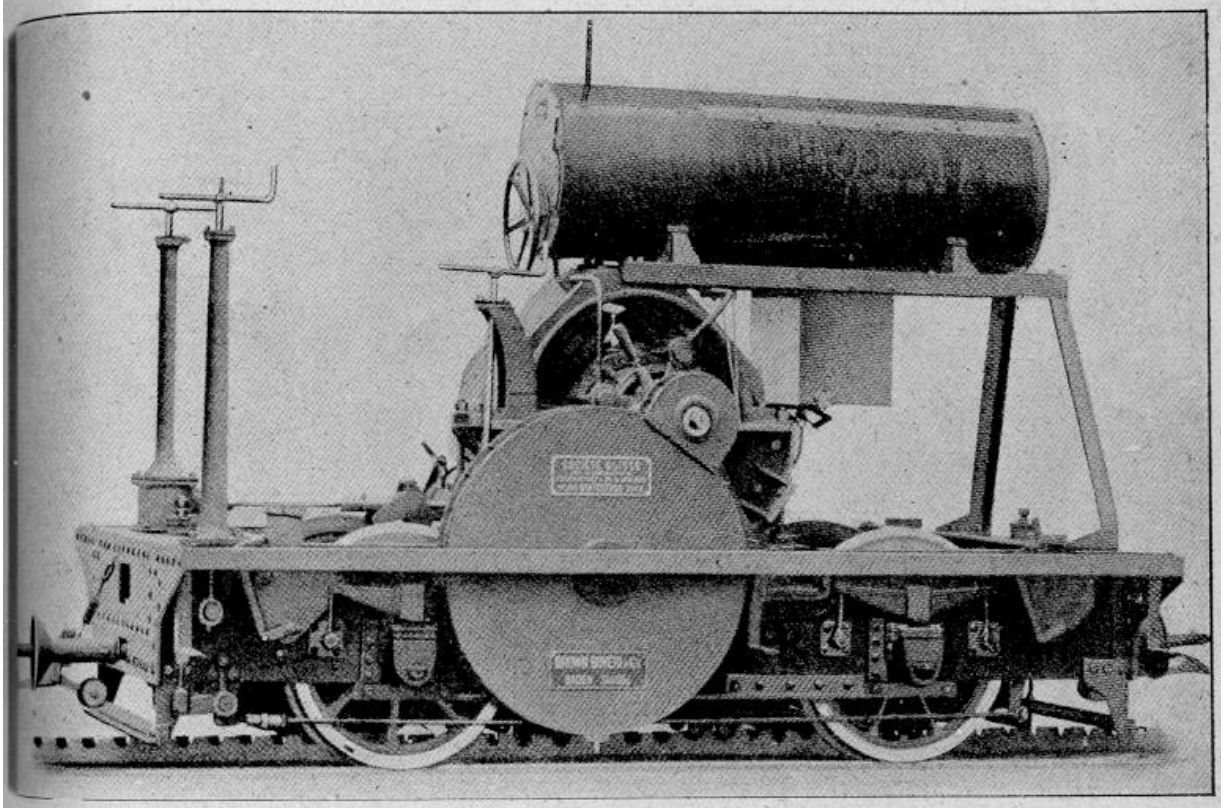


FIG. 566.

Locomotive mixte à adhérence et à crémaillère. Lyon-Fourvière.

Corcovado (1910). — Courants triphasés 750 volts 50 périodes. Crémaillère seule. Locomotives à deux moteurs de 150 chevaux. Rampe maxima : 30 p. 100 ; rampe moyenne : 16,7 p. 100. Poids d'une locomotive en service : 15 tonnes. Vitesse : 8 kilomètres à l'heure. Ces locomotives sont attelées à deux voitures de 55 places, sauf sur la rampe de 30 p. 100, où la remorque ne comprend qu'une voiture.

Loèche-les-Bains-Loèche-Ville (1915). — Courant continu 1.500 volts. Crémaillère et adhérence. Locomotive à deux moteurs à excitation série de 170 chevaux en permanence en série. Les véhicules sont des automotrices à deux bogies pesant à vide 30.900 kilogrammes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Poids maximum d'un train avec les remorques : 60 tonnes. Rampes maxima : 5 p. 100 sur l'adhérence et 16 p. 100 sur la crémaillère. Vitesses sur l'adhérence : 11 à 25 kilomètres à l'heure, sur la crémaillère : 8 à 12 kilomètres à l'heure. Ces vitesses différentes sont obtenues ainsi : pour la marche en crémaillère, les inducteurs des deux moteurs sont connectés en série, ce qui permet d'obtenir un

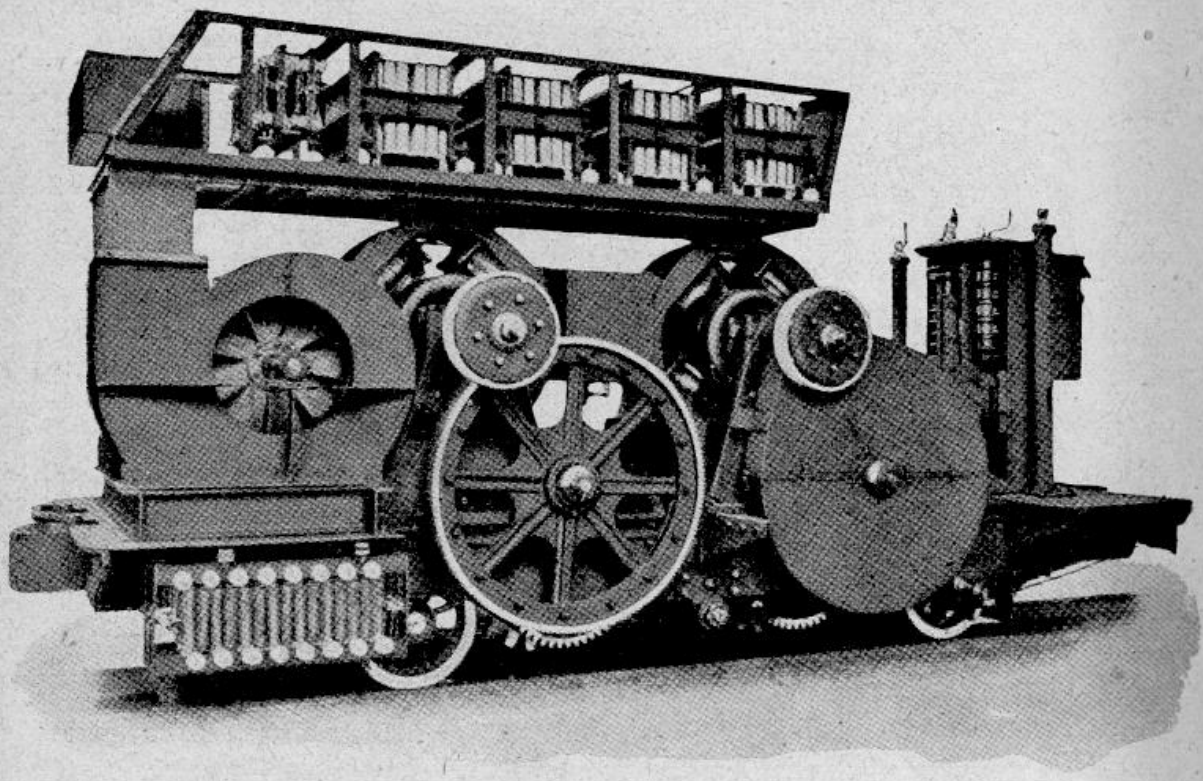


FIG. 567.

Locomotive à crémaillère du Wengernalp.

grand couple et une faible vitesse, et pour la marche en adhérence, les inducteurs sont connectés en parallèle, les champs sont affaiblis et les moteurs marchent avec couple réduit, mais à plus grande vitesse.

La régulation de la vitesse est obtenue au moyen d'un contrôleur spécial Brown-Boveri du type central et à trois cylindres : un cylindre principal, un cylindre inverseur et un cylindre de couplage des inducteurs. Ces deux derniers cylindres sont commandés pneumatiquement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

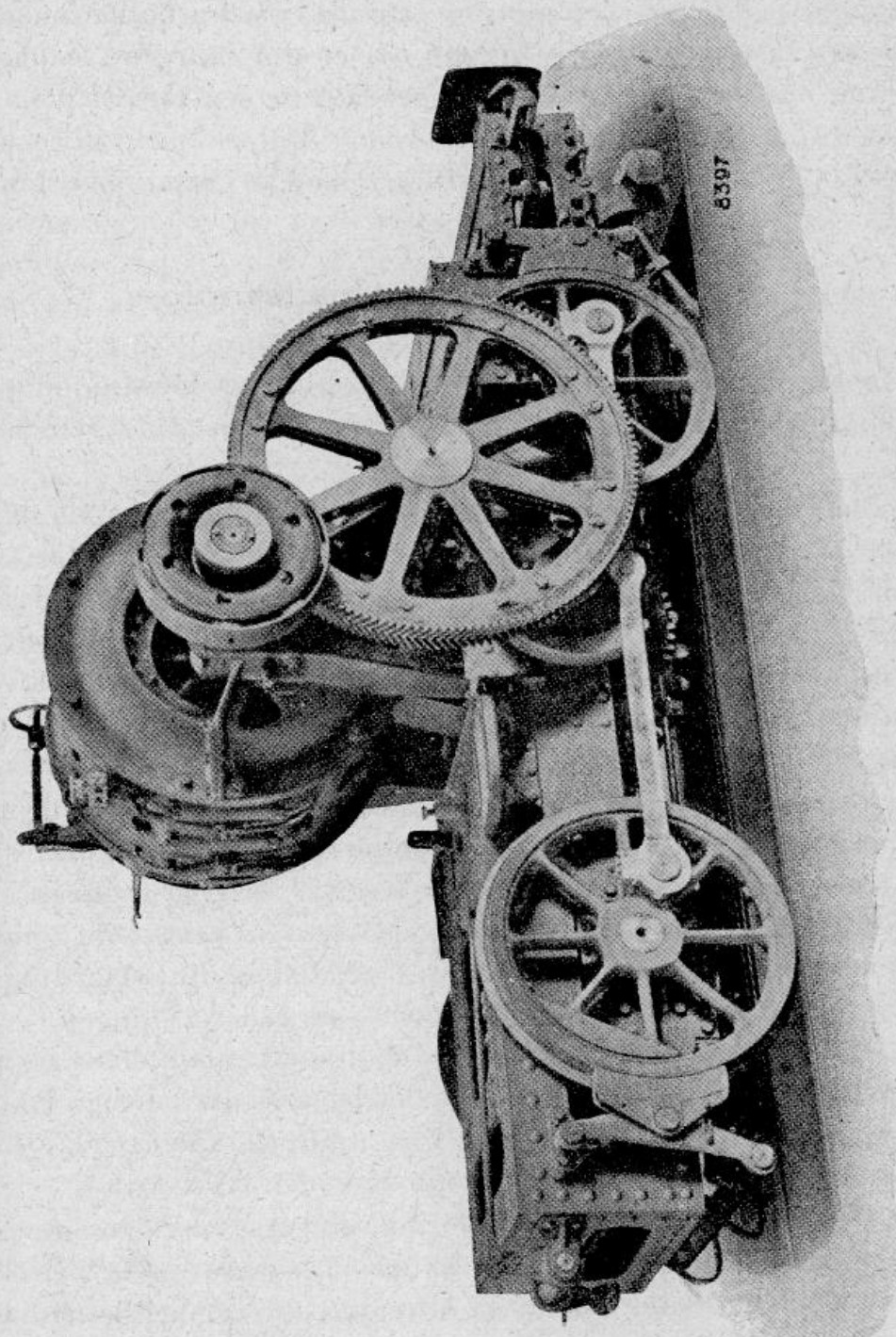


FIG. 568.
Bogie avec son moteur de traction des automotrices de Loèche-les-Bains.

La photographie (fig. 568) représente un des bogies avec son moteur des automotrices précédentes.

Remarques. — La majorité des lignes à crémaillère sont à cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rants triphasés; cependant, dans ces dernières années, on voit se développer pour ces lignes l'emploi du courant continu haute tension.

Toutes les installations précédentes, en ce qui concerne le matériel roulant, ont été exécutées par la Société Brown-Boveri pour la partie électrique (sauf celle du Corcovado, équipée par la Société Oerlikon) et par la Société de Winterthur, pour la partie mécanique.

IV. — Traction électrique dans les mines.

244. **Divers modes de traction.** — La traction mécanique par trains dans les mines se développe de plus en plus. Elle peut être réalisée :

1° *Par locomotives à vapeur.* — Ce système est inadmissible dans la plupart des cas. On l'a employé dans quelques mines de fer lorraines où les galeries sont, en général, hautes et larges, mais la fumée, les étincelles, la vapeur d'échappement sont des inconvénients très graves au point de vue exploitation, et ces locomotives sont pratiquement abandonnées. Leur puissance spécifique est, en outre, beaucoup trop faible pour leur emploi.

2° *Par locomotives à air comprimé.* — Des expériences entreprises depuis fort longtemps en Amérique, donnèrent, il y a quelques dix ans, de bons résultats. Le grand avantage de ces locomotives est leur sécurité absolue dans des mines grisouteuses. Elles sont toutefois trop encombrantes ou trop lourdes relativement à leur puissance. Une locomotive de ce type comporte, en général, un réservoir où la pression au début d'une période de travail atteint 50 kg/cm² et une distribution type Heusinger. La locomotive est ordinaire alimentée par un compresseur placé au jour, comprimant l'air à 75 ou 100 kg/cm². Le rendement de ces locomotives est assez faible.

3° *Par locomotives à moteur à explosion,* utilisant comme combustibles principalement la benzine, le benzol, l'essence ou le pétrole. Le manque d'élasticité du moteur, sa difficulté de réglage, de démarrage et la difficulté d'obtenir une réduction convenable de sa vitesse sont des inconvénients sérieux. En plus, ces locomotives sont onéreuses, compliquées et les frais de surveillance sont très élevés. Enfin, leur emploi présente des dangers d'incendie.

En outre, avec ces moteurs, pour une voie de 500, la puissance ma-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

xima possible ne dépasse guère 15 à 16 chevaux, au lieu que les locomotives électriques donnent couramment au moins le double.

4° *Par locomotives électriques.* — C'est le système qui l'emporte sur tous les autres, et dont nous allons nous occuper.

245. **Locomotives à trolley.** — *a) Alimentation.* — L'alimentation a généralement lieu par courant continu sous une tension ne dépassant pas 250 volts dans les galeries de mine, à cause des dangers pouvant résulter pour les ouvriers d'un contact accidentel avec une tension supérieure. Le retour se fait par les voies de roulement qui sont alors éclissées comme en matière de tramway.

Dans le cas où l'éclissage électrique offre trop de difficultés, ou quand la tension au trolley dépasse 250 volts, on emploie quelquefois deux fils d'alimentation (mines de Pienne, d'Anderny-Chevillon, par exemple), dont le voltage par rapport à la terre est de $\pm$ 250 volts. La tension d'alimentation des locomotives atteint ainsi en réalité 500 volts, sans cependant que le danger d'accident soit augmenté pour les ouvriers circulant sur les voies.

L'organe de prise de courant est le plus généralement constitué par une perche trolley à roulette pouvant tourner autour d'un axe vertical pour faciliter les passages en courbe.

L'emploi de deux fils aériens exige naturellement deux appareils distincts de prise de courant, montés sur la locomotive.

La photographie (fig. 569) représente, à titre d'exemple, une locomotive des mines d'Anderny-Chevillon, pourvue de la prise de courant double et construite par la Compagnie Thomson-Houston. Cette prise double est constituée par deux perches de trolley indépendantes, chacune étant montée sur une base et les deux bases sur un plateau commun pivotant autour d'un axe vertical. Un dispositif de verrouillage est, en outre, prévu pour permettre de fixer le plateau dans deux directions diamétralement opposées qui correspondent aux deux sens de marche. Enfin, chaque base de trolley peut pivoter d'un certain angle, autour d'un axe vertical pour permettre à la prise de courant de suivre les variations de l'écartement des deux fils de ligne, lequel écartement varie de 300 à 500 millimètres.

Les longueurs de perches sont généralement prévues pour une hauteur moyenne des fils de trolley de 2 m. 50.

L'alimentation a lieu quelquefois, assez rarement cependant, en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courants triphasés, mais cela complique beaucoup l'installation de la ligne. Il y a cependant quelques applications pour des exploitations importantes.

L'énergie étant généralement produite en courants triphasés, il faut nécessairement employer des convertisseurs pour le cas de la trac-

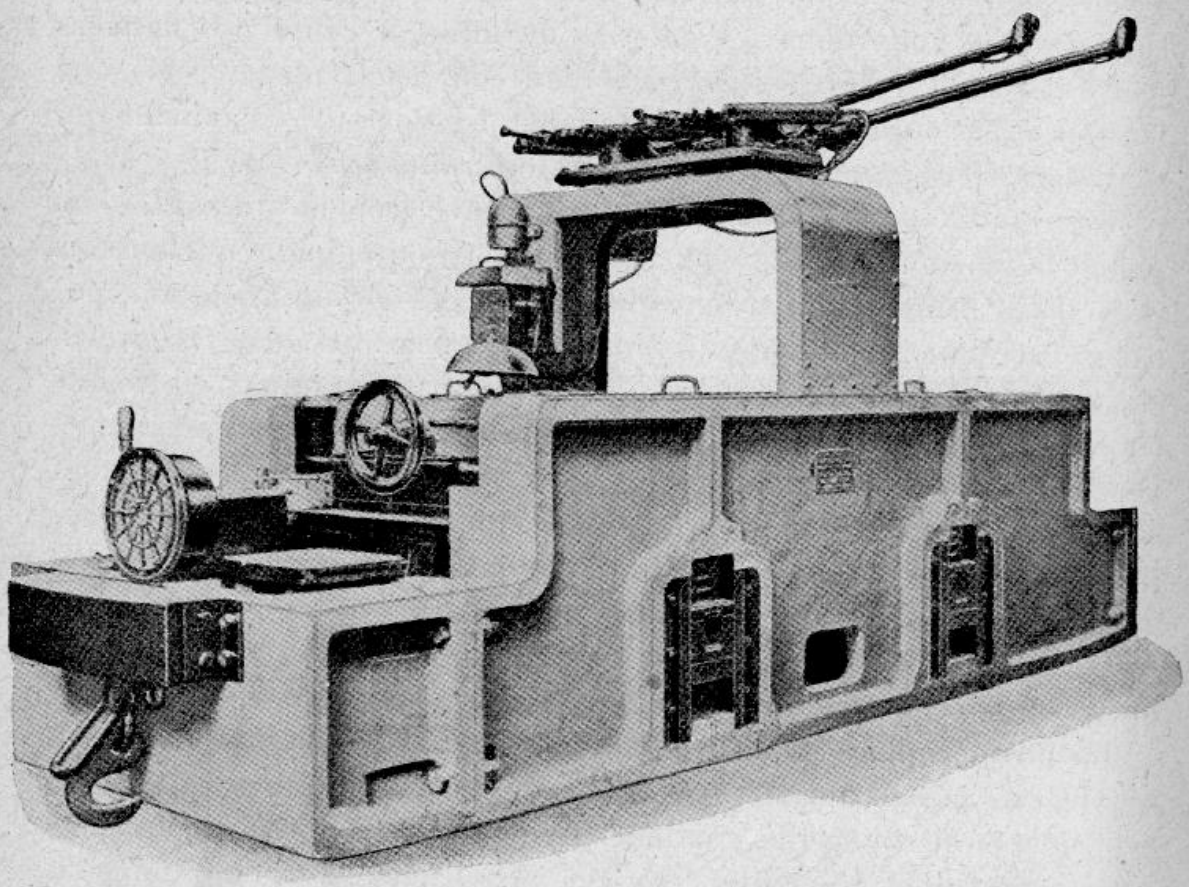


FIG. 569.

Locomotive de 9 tonnes Thomson-Houston des mines d'Anderny-Chevillon.

tion par courant continu. Malgré cela, on peut considérer qu'en général le prix total de l'installation d'une ligne à courant continu, y compris les postes à convertisseurs, est à peu près équivalent et même plutôt inférieur à celui de l'installation en courants triphasés.

b) Voies. — Les voies sont généralement à écartement de 500, 600 ou 700 millimètres. Pour de grandes exploitations, on a des voies de 1 mètre. Il y a intérêt à employer des rails plutôt lourds, au point

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de vue de la diminution de la résistance au roulement et surtout de la conservation du matériel roulant. Il est bon de prendre comme poids des rails en kilogrammes au mètre courant trois à cinq fois le poids en tonnes par essieu du tracteur ; le coefficient 5 se rapportant aux plus petites locomotives, soit 3 tonnes, et le coefficient 3 aux plus lourdes, soit 20 tonnes.

On emploie le plus souvent des rails Vignole.

c) Construction de locomotives. — Les locomotives destinées à circuler dans des galeries ont à fonctionner dans des conditions tellement particulières qu'il a fallu créer pour cet usage un type absolument spécial.

Ces machines sont appelées à servir dans des galeries extrêmement basses et resserrées, sur une voie souvent légère et d'entretien difficile.

Le faible écartement des rails limite l'emplacement disponible pour les moteurs. Les rayons des courbes, très faibles et descendant au-dessous de 8 mètres, forcent à rapprocher le plus possible les essieux.

L'atmosphère poussiéreuse de la mine, l'humidité et la boue, l'eau tombant des galeries, obligent le constructeur à prendre des précautions spéciales pour l'établissement du matériel électrique. Enfin, ces machines sont le plus souvent conduites par des mains brutales et malhabiles, dans des endroits où la surveillance est difficile.

En plus des qualités de robustesse qui sont demandées à ces locomotives, il est encore nécessaire que les réparations et le nettoyage soient aussi faciles que possible.

Elles se caractérisent pas leur forme ramassée, très compacte, « cuirassée ».

Leur poids varie de 3 à 20 tonnes.

Elles sont généralement à adhérence totale et à deux essieux, quelquefois à trois essieux, mais il est préférable, lorsqu'on veut de grandes puissances, d'employer deux locomotives tandem à deux essieux chaque (G. E. Co).

Le bâti des locomotives légères, soit jusque 5 tonnes, est généralement d'une seule pièce en fonte moulée ou préférablement en fers laminés. Le bâti en fers laminés assure une certaine élasticité, d'où bonne résistance au choc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les locomotives plus lourdes et pour avoir un poids adhérent suffisant sans recourir à l'emploi de lest, on construit généralement le bâti en quatre pièces en fonte, assemblées par boulons, 2 longerons et 2 traverses-butoirs. Celles-ci sont quelquefois en acier coulé, de même que les longerons.

Ces locomotives sont munies d'un ou deux systèmes indépendants de freins à commande mécanique par volant.

En raison du service très dur que ces machines ont à assurer, l'ensemble de la locomotive doit être particulièrement robuste et tout à fait blindé, l'équipement électrique bien protégé.

Quand les locomotives circulent au jour, elles sont généralement munies d'une cabine-abri plus ou moins simplifiée pour le wattman.

Dans tous les cas, les locomotives sont munies de boîtes à sable pour faciliter le démarrage sur des rails plus ou moins glissants.

d) Moteurs. — Quelques maisons construisent des moteurs spéciaux dans ce sens qu'ils sont très ramassés pour obtenir le maximum de puissance dans le faible emplacement dont on dispose. Les moteurs sont suspendus à la façon des moteurs de tramways, montés sur trucks rigides.

La transmission du couple moteur est généralement réalisée par un système d'engrenages droits à simple ou double réduction.

Les Ateliers de Constructions Electriques du Nord et de l'Est, les Ateliers de Charleroi, emploient avec assez de succès la vis sans fin pour les machines à faible écartement et pour tous les cas où une réduction simple ne suffit pas.

Dans le cas général de l'emploi de deux moteurs, ceux-ci peuvent être extérieurs à l'intervalle des roues, ce qui donne un empattement minimum, ou intérieur à cet intervalle, ce qui conduit à un grand empattement, mais donne une meilleure stabilité à la locomotive ; enfin, ils peuvent être en tandem, montage qui participe des deux cas précédents, c'est le cas de la figure 570.

e) Système de contrôle. — Le contrôleur est généralement du type ordinaire série parallèle avec quatre ou cinq touches série et trois ou quatre parallèle, ainsi que quelques touches pour le freinage rhéostatique.

Dans le cas de deux locomotives en tandem, la General Electric Co emploie un système analogue à celui de ses « unités multiples ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

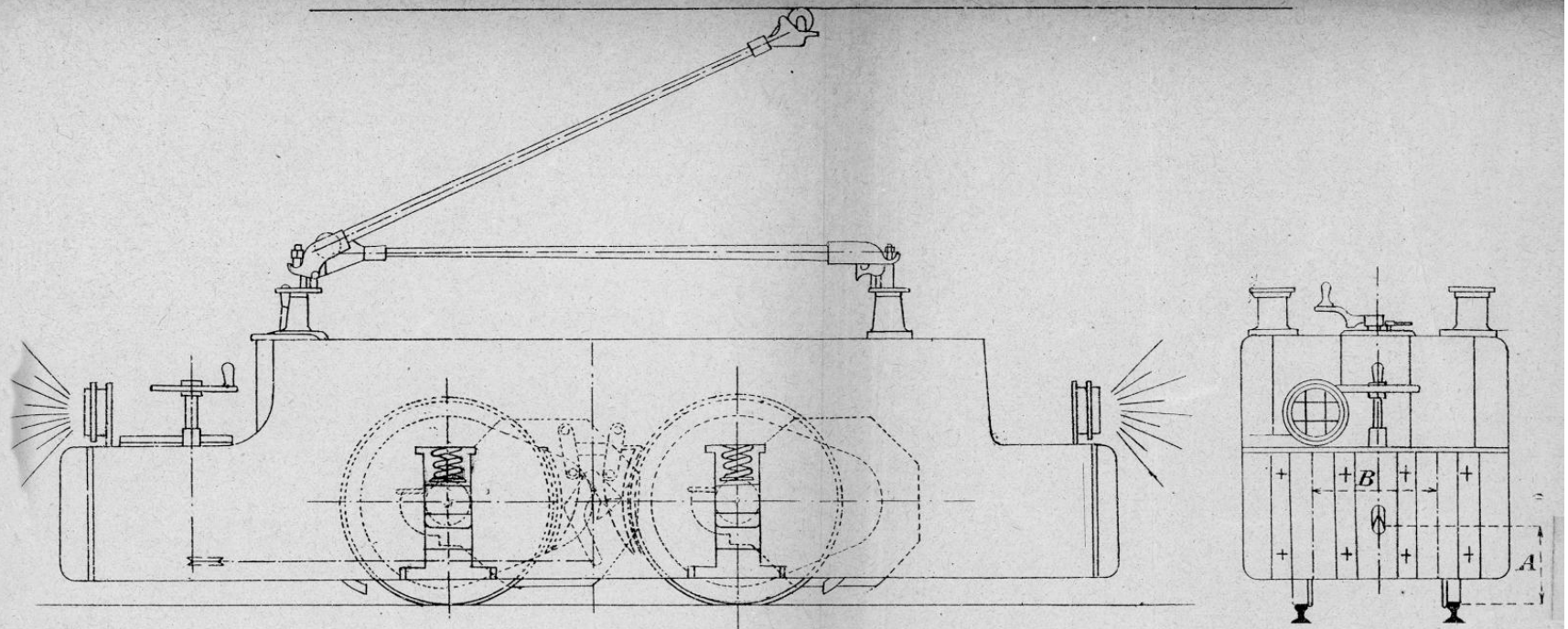


Fig. 370 Locomotive de mine type (moteurs en tandem.)

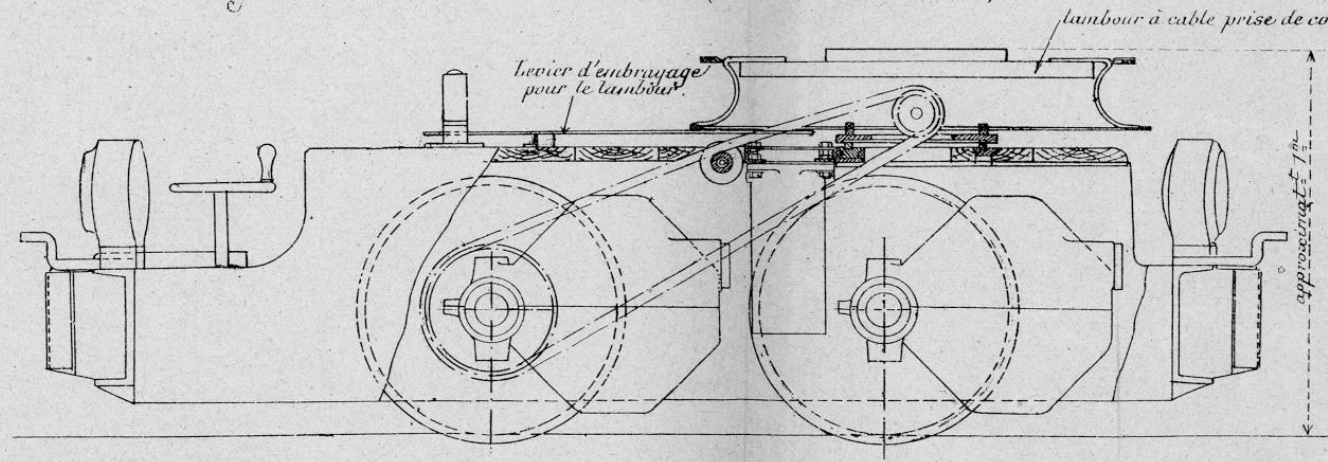


Fig. 371. Locomotive de mine à tambour avec câble prise de courant (à commande mécanique)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

246. **Résistance au roulement.** — La résistance au roulement dans une galerie de mine est assez élevée; cela tient à ce que les rails sont généralement humides et gras et plus ou moins recouverts de débris de matériaux divers.

Il est bon de compter sur une résistance au roulement globale par tonne de 5 à 10 kilogrammes pour une voie étroite « au jour », et de 10 à 20 kilogrammes pour une voie étroite, en palier et alignement droit et « au fond » (rails Vignole).

La résistance de l'air est négligeable, car les vitesses sont généralement faibles : 10 à 15 kilomètres à l'heure.

Le poids adhérent doit être au moins égal à quatre ou cinq fois l'effort maximum à développer et sept fois l'effort normal.

247. **Locomotives à tambour à câble prise de courant.** — Elles permettent le roulage dans des portions de galerie non encore équipées avec le trolley, et par suite d'aller jusqu'au front d'attaque au fur et à mesure de l'avancement des travaux, pourvu seulement que la voie existe.

Sur la locomotive est monté un tambour sur lequel est entouré un câble isolé de prise de courant. Le tambour repose sur un disque horizontal au mouvement duquel il participe par l'effet du frottement ; ce disque étant mis lui-même en mouvement par une transmission mécanique : chaîne et engrenage à partir d'un essieu moteur (fig. 571).

L'embrayage est réalisé par un levier dans un sens ou l'autre. Un commutateur à double direction permet de relier le contrôleur au câble du tambour ou à celui du trolley.

L'extrémité libre du câble prise de courant est terminée par un crochet qu'il suffit de mettre en prise avec le fil trolley (fig. 572) là où ce fil cesse.

L'autre extrémité du câble est reliée à une bague métallique fixée au treuil, sur sa face inférieure. Sûr cette bague frotte un balai fixe duquel le courant passe au contrôleur et aux moteurs à la manière ordinaire.

Dans ses derniers modèles, la General Electric Co remplace le système de commande du tambour par chaîne, engrenage et action de frottement, par un dispositif électrique comprenant un moteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

série alimenté en dérivation sur le circuit principal et actionnant le tambour par un engrenage réducteur de vitesse. Le moteur est d'une

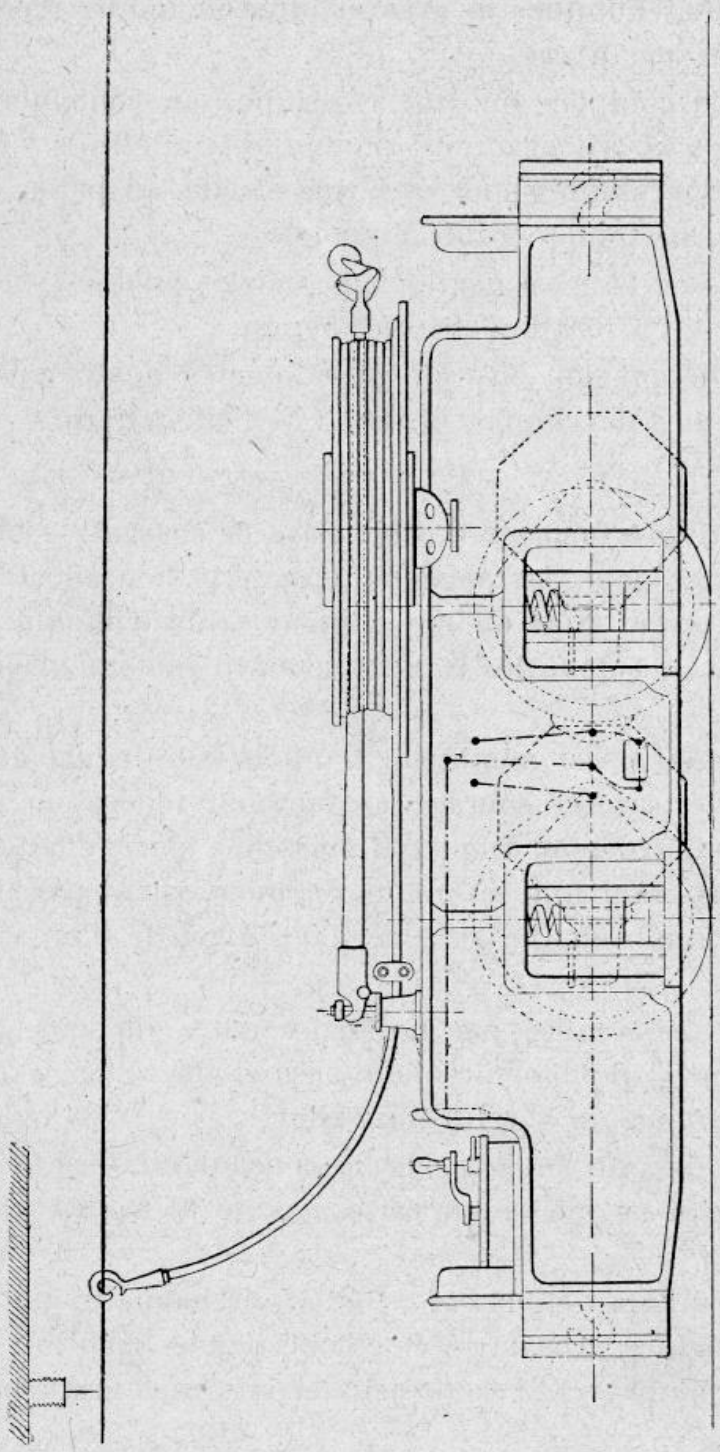


Fig. 572.
Vue schématique d'ensemble d'une locomotive munie d'un tambour à câble prise de courant.

puissance de un cheval et demi environ. Il est en série avec des résistances appropriées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le schéma de montage de ce moteur est donné figure 573.

On voit que dans la position (2), le moteur du treuil est en circuit entre le fil trolley et la terre ; le courant est capté par le câble du treuil et se rend d'une part dans le circuit du contrôleur et des moteurs de traction, et d'autre part dans le circuit du moteur du treuil. Ce dernier circuit comprend en outre un fusible et un interrupteur à simple direction qui permet, si l'on veut, d'isoler le moteur ; mais, en temps normal et tant que le treuil est utilisé, son moteur doit être laissé en circuit.

Le moteur du treuil est calculé de telle sorte qu'il puisse être traversé par le courant pendant un temps quelconque sans que son échauffement dépasse la limite admissible.

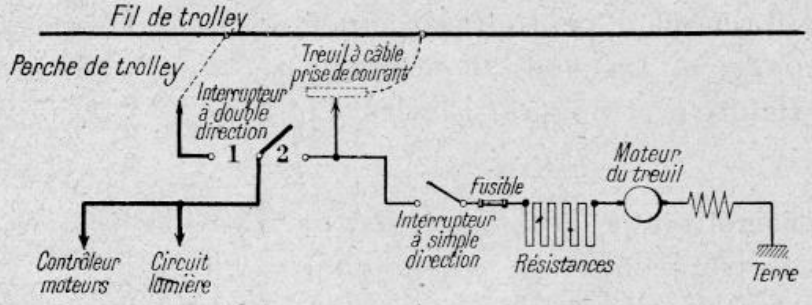


FIG. 573.

Schéma des connexions (Locomotive munie d'un treuil).

L'objet du rhéostat en série avec le moteur est de protéger celui-ci contre un courant excessif quand le câble se déroule ou que la locomotive est au repos.

Dans les conditions normales, le circuit du moteur du treuil ne demande aucune attention spéciale car le moteur détermine automatiquement l'enroulement ou le déroulement du câble suivant le sens de marche de la locomotive.

Quand la locomotive est au repos, le couple développé par le moteur est suffisant pour exercer sur le câble une tension constante d'environ 12 kilogrammes. Dès que la locomotive démarre dans un certain sens, le moteur tourne pour déterminer automatiquement l'enroulement du câble. La tendance du moteur à un moment quelconque est de communiquer à la circonférence du treuil une vitesse périphérique qui soit légèrement supérieure à la vitesse de trans-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lation de la locomotive ; de sorte qu'il y a toujours une tension sensiblement constante sur le câble. Quand la locomotive se déplace en sens inverse de telle sorte que le treuil doive dérouler le câble, le moteur développe un couple antagoniste, agit comme frein et produit sur le câble une tension d'environ 15 kilogrammes. Par suite de ces tensions constantes exercées sur le câble, celui-ci s'enroule et se déroule sans à-coups.

La distance qu'il est possible de franchir avec des locomotives munies de ce tambour à câble prise de courant est normalement 150 mètres. Sur cette distance, il suffit, par suite, que la voie soit installée.

248. **Locomotives à cabestan.** — Un cabestan est installé sur la locomotive. Le moteur peut être accouplé à volonté à ce cabestan ou aux roues motrices. Le cabestan sert pour le traînage par câble (Westinghouse-Baldwin et General Electric Co).

249. **Locomotives à accumulateurs.** — Ces locomotives ont reçu un grand développement en Allemagne.

Les locomotives du dernier type de la Felten et Guillaume-Lahmeyerwerke AG, de Francfort, sont ainsi construites (fig. 574 à 576).

Une caisse en bois blindée de fer contenant les accumulateurs est placée sur la locomotive et repose sur un système de cylindres rendus solidaires les uns des autres par chaîne.

Pour enlever la batterie, on amène la machine près d'une table de décharge à rouleaux; on relie les rouleaux de la table à ceux de la locomotive, on met le tout en mouvement. La batterie est transportée de la machine sur la table et, de la même manière, une nouvelle batterie vient prendre la place de la première.

Des locomotives de ce type sont en service aux *mines de Dortsfeld* en Westphalie. Elles circulent sur une voie de 530 millimètres et développent 18 chevaux. Les accumulateurs sont de l'Akkumulatoren-Fabrik A. G., de Berlin. L'opération du changement d'accumulateurs dure 1 ou 2 minutes seulement, assure-t-on.

Une importante innovation a été introduite, il y a quelques années, dans l'emploi de ces locomotives, par la réalisation de machines sans machiniste.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Des machines de ce genre ont été mises en usage au charbonnage Von der Heydt, dans le bassin de la Saar ; elles fonctionnent

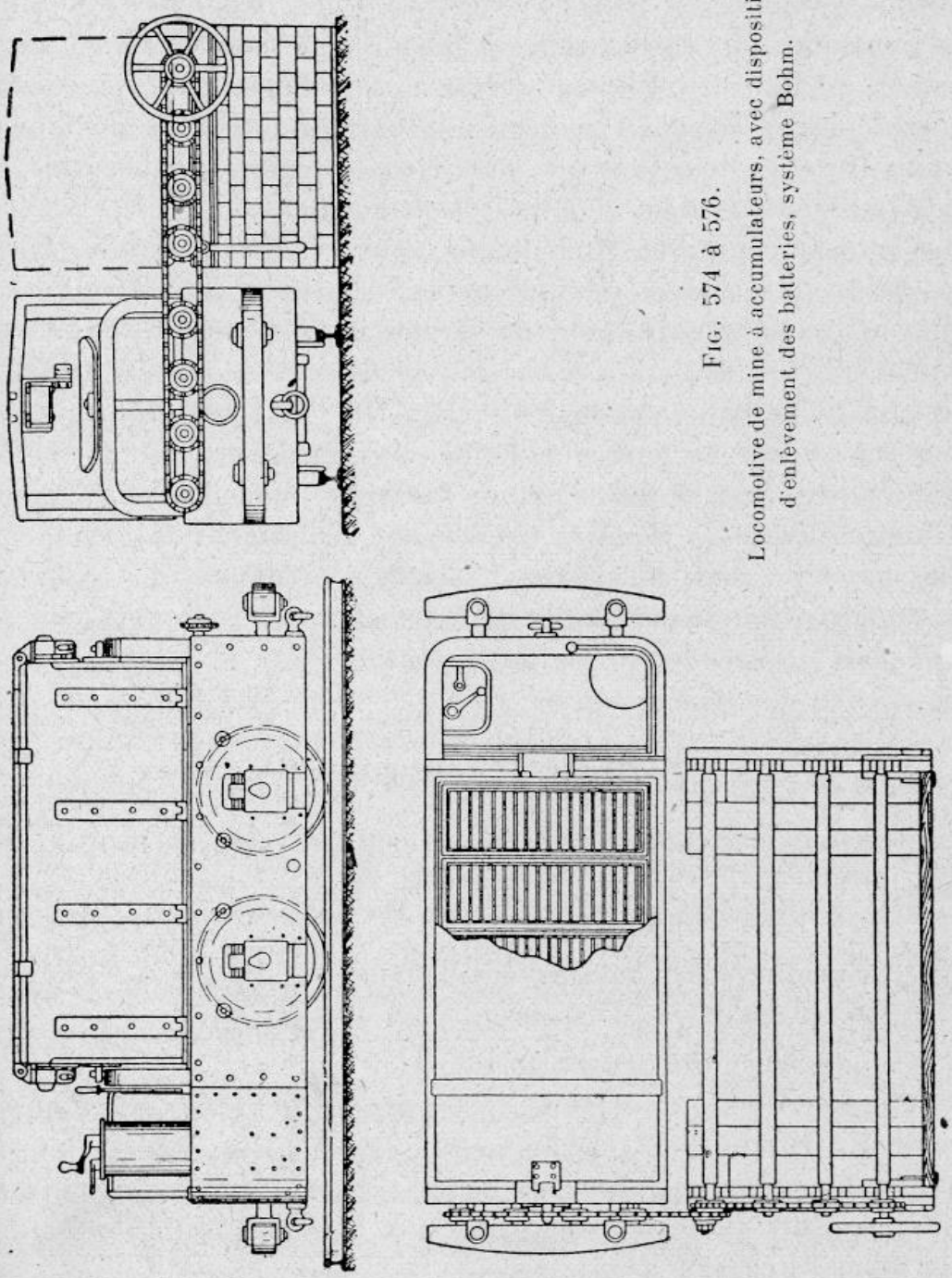


Fig. 574 à 576.
Locomotive de mine à accumulateurs, avec dispositif d'enlèvement des batteries, système Bohm.

d'une façon entièrement automatique : mises en marche en un point déterminé, elles effectuent un parcours donné pour aller s'arrêter

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

automatiquement à l'endroit voulu, s'arrêtant de même automatiquement, lorsque les voies qu'elles doivent parcourir sont occupées ou obstruées ; une sorte d'antenne dont elles sont pourvues à l'avant provoque à cette fin la mise hors du circuit du moteur lorsque la machine rencontre un obstacle ; le recul de l'antenne à la rencontre de l'obstacle bande un ressort qui tend à la ramener dans la position normale lorsque l'obstacle a disparu et permet ainsi à la machine de se remettre en service dès que plus rien n'obstrue son chemin ; les aiguillages sont de même équipés électriquement.

La batterie comporte 30 éléments ; elle a une capacité de 72 ampères-heure ; la vitesse de marche est d'environ 3,6 kilomètres à l'heure ; la batterie suffit pour un service de huit heures approximativement, correspondant à un rendement de 70 tonnes-kilomètres utiles. La puissance du moteur est de 2 HP ; le poids de la locomotive de 2,5 tonnes; la longueur, l'antenne rentrée, est de 2,35 mètres et, l'antenne sortie, de 3,23 mètres; l'arrêt se fait sur une longueur de 1 mètre environ.

Ces machines ont été mises en service, sans qu'aucune modification fût apportée aux installations, sur des voies qui avaient été posées pour un service à traction chevaline.

V. — Traction électrique sur les canaux.

La traction électrique sur canaux peut être réalisée de trois façons :

250. **Remorquage par bateaux automoteurs.** — Le moteur actionne des hélices ou des roues. Le courant peut être fourni :

1° Par des accumulateurs (Siemens).

2° Par une dynamo actionnée par un moteur à vapeur (Walker), un moteur à combustion interne, pétrole, gaz pauvre (Société Nobel).

3° Par une canalisation sur la berge avec laquelle prend contact :

Un dispositif genre trolley,

Un chariot léger.

D'une manière générale, le remorquage qui donne des résultats satisfaisants dans les rivières, n'est pas possible dans nos canaux. Il pourrait seulement convenir pour des canaux de grande section..

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En effet, d'une part, la largeur de nos canaux est faible et rendrait difficile le croisement de deux convois ; d'autre part, les écluses du type normal pour canaux ne peuvent contenir qu'un bateau (péniche, flûte ou toue), et comme, pour que le remorquage soit réalisable au point de vue économique, il faut former des convois de plusieurs bateaux, il en résulterait une perte de temps considérable aux éclusages ; il faudrait, en plus, écluser le remorqueur, la longueur ordinaire des biefs ne permettant pas, en général, d'avoir des remorqueurs affectés uniquement au service d'un bief, et, dans tous les cas, il faudrait posséder un autre mode de traction pour le passage des écluses. Les remorqueurs présentent, en outre, un grave inconvénient : les masses d'eau mises en mouvement par l'hélice déforment le profil du canal, le plafond est creusé, et les terres enlevées sont rejetées sur les parties latérales, le canal passe de la forme trapézoïdale à la forme parabolique. Pour éviter les risque d'échouage, il faudra draguer très souvent ou constituer le fond des canaux par des pierres suffisamment lourdes pour que ce phénomène ne se produise pas. Toutefois, des essais faits en Allemagne ont prouvé que c'était la position du gouvernail derrière l'hélice unique qui était la cause de tout le mal ; des résultats satisfaisants ont, en effet, été obtenus en utilisant un double gouvernail ou en munissant le gouvernail unique d'une plaque empêchant l'eau d'être rejetée vers le fond.

Quoiqu'il en soit, la méthode par remorquage est peu recommandable.

En ce qui concerne, en particulier, le procédé par accumulateurs qui a été très essayé autrefois, en particulier sur le Rhin, il y a lieu de noter qu'il permet la suppression des chemins de halage ; en revanche, les frais d'entretien sont très élevés, et le procédé est, en définitive, très onéreux.

251. **Touage.** — La méthode du touage a été appliquée sur de nombreux fleuves ou canaux en France (Seine, canal de Saint-Denis, canal de Bourgogne, etc.) et à l'étranger.

Dans sa forme primitive, elle consiste à haler le bateau toueur sur une chaîne noyée qui s'enroule sur deux tambours à gorge (fig. 577) à axes parallèles, sur lesquels elle fait un nombre de tours suffisants pour que son adhérence équilibre l'effort de traction nécessaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à la remorque. On n'a pas moins de 30 à 50 mètres de chaîne enroulée. Les tambours sont actionnés par un groupe à vapeur.

Outre les inconvénients généraux que présente la méthode du touage, ce procédé conduit à une usure rapide de la chaîne.

L'embrayage magnétique de Bovet a réalisé une amélioration sensible. Il permet de réduire l'axe d'enroulement aux 3/4 de la circonférence. Dans ce but, on aimante la jante du tambour qui devient alors une simple poulie à gorge, sur lequel passe la chaîne. Deux flasques EF (fig. 578) forment carcasse magnétique de l'électro-aimant, ils sont reliés par des boulons en bronze. B est l'enroulement excitateur, où le courant est amené par deux bagues *bb*. Il est

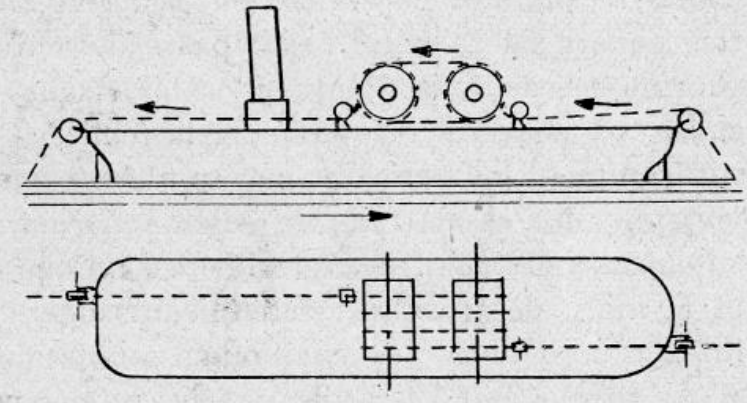


FIG. 577.

Touage ordinaire. Bateau toueur.

fourni par un groupe électrogène monté sur le bateau toueur ou peut être capté sur un conducteur genre trolley au moyen d'un câble souple et d'un petit chariot, par exemple. D est une pièce de bronze destinée à protéger les enroulements contre toute introduction d'eau ou corps étranger. La chaîne C fait en quelque sorte partie du circuit-magnétique de l'électro. Au moment où la chaîne quitte la poulie, il faut exercer un effort de décollement. A cet effet, on dispose un galet de sortie G en fonte (fig. 579) qui touche la poulie. Le champ magnétique est modifié dans la région du contact, et la chaîne n'a plus tendance à coller uniquement sur la poulie. Si cette action est insuffisante le décollement se fait sur un doigt de métal dur et non magnétique qui est placé dans la gorge et qui en épouse exactement la forme. Du côté de l'avant il y a, au contraire, tout intérêt à ne pas

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

modifier le champ magnétique et, à cet effet, on emploie un galet en bronze G'. Si le bateau toueur doit fonctionner en marche arrière, on emploiera seulement le dispositif de décollement par doigt.

La poulie d'entraînement est d'assez grand diamètre soit, en prenant un exemple 1 m. 250 ; le courant d'excitation de l'électro est de 48 ampères sous 70 volts. L'effort de traction développé est de 6.000 kilogrammes. La vitesse d'enroulement ne dépasse pas 1 m. 50 par seconde. Le travail de remorquage est alors de $6.000 \times 1,5 = 9.000$ kgms, soit 120 chevaux.

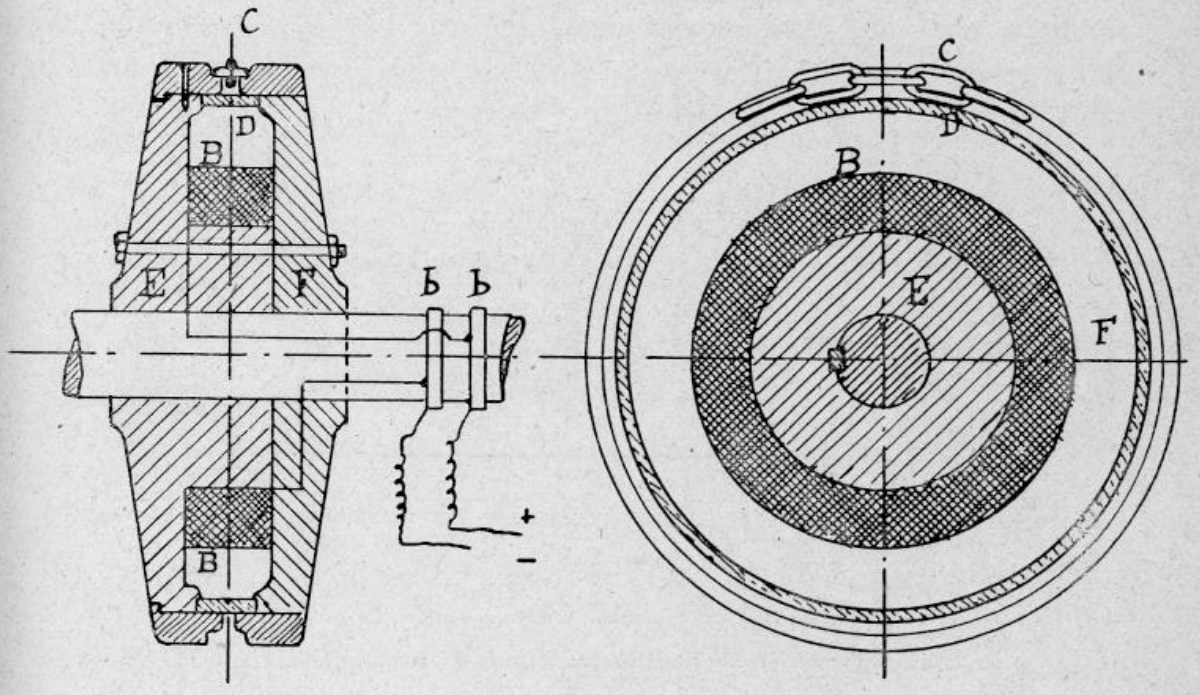


FIG. 578.

Touage par adhérence électromagnétique de Bovet. Poulie du toueur.

Des essais de touage par ce système ont été faits par la Compagnie de Fives-Lille, sur le canal Saint-Denis, avec une péniche de 300 tonnes, chaîne de 14 millimètres enroulée sur 3/4 de la circonférence, ligne à 110 volts, prise de courant par deux chariots roulants. La puissance absorbée était de 2.000 watts et la vitesse obtenue 2 kil. 800 à l'heure.

La méthode du touage est peu satisfaisante. Sans occasionner les mouvements d'eau funestes au profil du canal que provoque le remorquage, le touage cause, néanmoins, encore des dommages au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fond et présente les mêmes inconvénients que les remorqueurs, au point de vue de la composition des convois et du passage aux écluses ; de plus, le prix d'installation est très élevé, l'entretien de la chaîne est dispendieux, quoique considérablement diminué par l'emploi du système de Bovet. Il faut noter, par contre, qu'il permet un effort de traction considérable, mais la vitesse maxima possible, 3 à 3,5 kilomètres à l'heure, est insuffisante.

252. **Halage.** — Le halage consiste dans l'emploi d'un tracteur électrique circulant sur une voie aérienne installée sur le chemin de halage ou préférablement circulant sur ce chemin même, avec ligne aérienne d'alimentation. Ce procédé offre l'avantage que la ligne peut servir pour une distribution d'énergie.

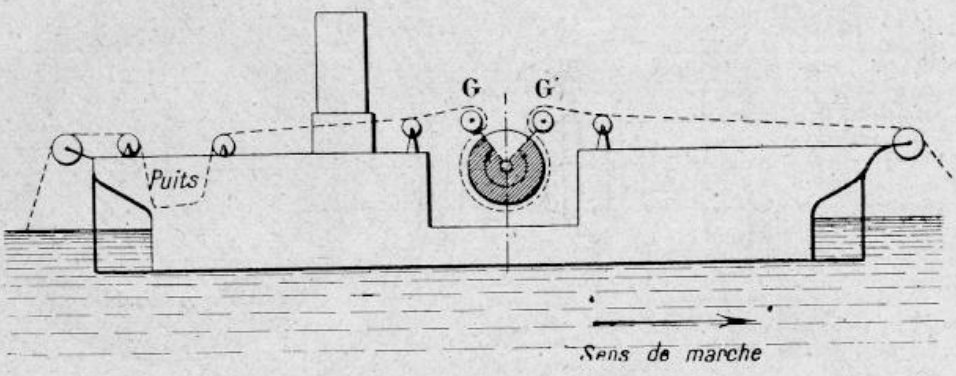


FIG. 579.

Touage par adhérence électromagnétique de Bovet. Bateau toueur.

On peut soit disposer la voie d'un seul côté du canal, ce qui entraîne des aiguillages, soit une voie de chaque côté : une pour la montée et une pour la descente, dans le cas d'un trafic assez considérable.

Cette méthode peut être réalisée de deux façons :

a) Tracteurs suspendus. — Les premiers essais de tracteurs suspendus sont ceux de *Lamb* (1895) à *Buffalo,* puis viennent ceux de *Siemens-Halske* (1898) sur le *canal Finow.* Dans ce dernier cas, on employait un tracteur léger roulant sur un câble suspendu à des poteaux de 4 à 5 mètres de hauteur. Au-dessus de ce câble (câble

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

porteur), il y avait le câble de traction, recevant l'effort de traction et passant à cet effet entre deux tambours actionnés électriquement. Enfin, il y avait un troisième fil au-dessus de l'ensemble, ce fil constituait le conducteur d'alimentation et le courant était capté par une roulette de trolley.

L'effort de traction disponible dans ce procédé est très limité, en outre la vitesse maxima est d'environ 5 kilomètres à l'heure. Les efforts sur les poteaux sont très considérables.

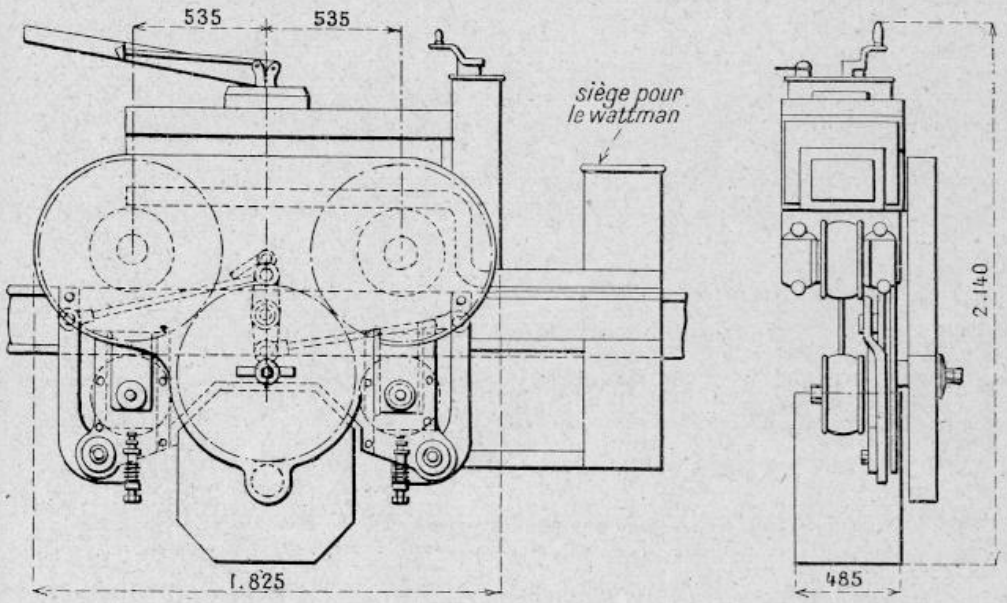


FIG. 580.

Tracteur du Canal Erié.

Le tracteur *Thwaite et Cauley* (1898) est du même genre, mais l'effort sur le cable de halage est transformé en effort adhérent. Ce tracteur, qui a simplement été à l'état de projet devait se déplacer sur deux rails en « Z » superposés et était muni de quatre roues qui roulaient par paires, de part et d'autre de chaque rail.

Le tracteur du *canal d'Erié,* étudié par *Stillwel et Putman* avec le concours de la General Electric Co, en 1905, est encore un tracteur aérien. Ses dispositions générales sont indiquées sur la figure 580. La voie est formée d'une poutre à double T haute de 250 millimètres et supportée latéralement. Le tracteur est actionné par un moteur de 25 chevaux à 500 volts courant continu. La marche est réglée par un petit contrôleur rhéostatique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce tracteur est à adhérence proportionnelle. A vide, l'appareil repose sur des galets porteurs. Les seuls frottements résultent du poids de l'appareil (3 tonnes environ) et des engrenages.

L'adhérence est assurée au moyen de galets compresseurs fixés à un système de ressorts placés sur le petit bras d'un levier dont le grand bras sert de point d'attache au câble de halage.

Il y a deux leviers correspondant aux deux directions de marche.

La pression exercée est égale à 5 à 7 fois l'effort de traction à développer, elle lui est strictement proportionnelle.

Les essais ont montré que l'on pouvait compter sur un rendement moyen de 70 p. 100.

Ce système de traction à adhérence proportionnelle est applicable aux services lourds. Il n'encombre pas le chemin de halage et est facilement monté, soit sur le chemin de halage, soit sur la berge.

b) Tracteurs circulant sur le chemin de halage. — Ce mode de réalisation du halage est de beaucoup préférable. Plusieurs systèmes ont été successivement essayés. Celui qui a donné les meilleurs résultats consiste dans l'emploi de tracteurs type locomotives circulant sur voie ferrée birail et constitue actuellement le procédé moderne à adopter surtout sur les canaux où le trafic annuel est d'une certaine importance, soit au moins 2.000.000 tonnes.

Le halage sur voie monorail à adhérence proportionnelle, que nous venons de voir, paraît pouvoir convenir quand le trafic ne dépasse pas 1.500.000 tonnes.

Enfin, sur les canaux de faible trafic, soit 400.000 tonnes, il semble que le halage par chevaux soit encore le plus économique ; malheureusement, la vitesse obtenue n'est guère que de 2,5 kilomètres à l'heure.

Nous allons passer en revue les principaux systèmes de tracteurs qui ont été successivement employés.

Le tracteur *tricycle Galliot* (1898) construit par la Compagnie Denèfle, et mis en service sur le canal de l'Aire et de la Deule, entre Douai et Béthune, a réalisé la première application assez importante de ce mode de halage par tracteur. Ce tracteur circulait sur le chemin de halage sans voie spéciale.

Son poids était de 2,5 tonnes environ. Il était actionné par un moteur de 7 chevaux sous 500 volts, transmettant son couple par vis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sans fin et engrenage hélicoïdal. Il remorquait trois bateaux ordinaires avec charge utile de 290 tonnes par bateau à la vitesse de 2 kilomètres à l'heure. On peut compter que l'effort à développer pour un bateau est d'environ 300 kilogrammes.

La prise de courant consistait en un chariot aérien léger à 2 poulies roulant sur un double fil trolley.

Ce tracteur présente l'inconvénient d'endommager assez rapidement le chemin de halage. Sa conduite est, en outre, difficile.

En 1899, *L. Gérard* lui substitua un quadricycle et l'expérimenta sur le canal de Charleroi.

En 1898, Karl Hottgen étudia avec Siemens et Halske un tracteur sur rails Vignole pour le *canal Finow* de l'Etat prussien. Ce tracteur comportait un moteur de 12 chevaux.

On avait équipé une partie de la ligne avec une crémaillère, car on craignait de ne pas avoir une adhérence suffisante. Les roues motrices engrenaient avec la crémaillère et les roues porteuses roulaient sur le chemin de halage. Le câble de halage était fixé sur une sorte de petit pylône porté par la locomotive et était à environ un mètre du sol. La voie était de 1 mètre.

La locomotive pesait 2 tonnes et développait au crochet, en temps sec, un effort de traction d'environ 600 kilogrammes.

Le rendement total était d'environ 60 p. 100.

Le *tracteur Siemens* du *canal de Teltow* est un tracteur Köttgen perfectionné ; c'est celui qui figura à l'Exposition de Paris de 1900. Après quelques perfectionnements, il fut expérimenté en 1903 et adopté définitivement en 1904 en même temps qu'était décidée l'électrification générale du canal. Le service est fait totalement par l'électricité depuis 1907. Cette installation de halage électrique est prévue pour un mouvement de deux millions de tonnes par an. Il n'atteint toutefois, actuellement, guère que 850.000 tonnes.

Avec le tracteur suivant, on arrive enfin à la forme générale actuelle.

Le nouveau tracteur Siemens est un tracteur normal *symétrique circulant dans les deux sens sur voie Vignole.* Son poids est de 7 t. 5. Il est à deux essieux-moteurs actionnés chacun par un moteur de 17 chevaux. Le câble est fixé à l'extrémité d'un bras pivotant de trois mètres environ, muni d'un dispositif qui permet de le lever

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour passer au-dessus des bateaux qui se trouvent à l'amarre le long des berges. La manœuvre est faite par un moteur électrique.

Un tambour permet, en marche, d'enrouler une longueur plus ou moins grande de câble.

On a installé une voie sur chaque chemin de halage.

L'effort normal développé au crochet est de 1.000 kilogrammes, et le rendement total du tracteur de 70 p. 100. Le tracteur traîne sa remorque de 1.200 tonnes utiles à la vitesse d'environ 5 kilomètres à l'heure.

Locomotive Chanay de 10 tonnes. — Ce tracteur, représenté sur les figures 581 à 583, est symétrique, à cabine centrale et à bâti en fonte. Il est employé sur le système des *canaux du Nord, Sensée-Scarpe-Aire-Deule,* qui comprend plus de 55 kilomètres de ligne. La locomotive Chanay est à deux essieux-moteurs et deux moteurs à double réduction de 25 HP chacun, courant continu 550 volts. Elle est à contrôleur série-parallèle à sept crans. La remorque se fait, moteurs en série, l'effort total sur le câble est alors de 1.200 kilogrammes à la vitesse de 3 kilomètres à l'heure et de 300 à 400 kilogrammes à la vitesse de 5 kilomètres à l'heure. Les moteurs sont en parallèle pour la marche haut-le-pied, la vitesse est alors de 14 kilomètres à l'heure. Cette locomotive roule sur une voie de 1 mètre en rails Vignole de 20 kilogrammes. La voie est unique et sur un seul chemin de halage. Quand deux locomotives se rencontrent, elles échangent leur remorque.

A la fin de 1910, il y avait en service environ 120 locomotives de ce type. Les locomotives sont construites par les Ateliers de Constructions Electriques du Nord et de l'Est (Jeumont).

Le rendement total d'une locomotive Chanay est de 67 p. 100 environ.

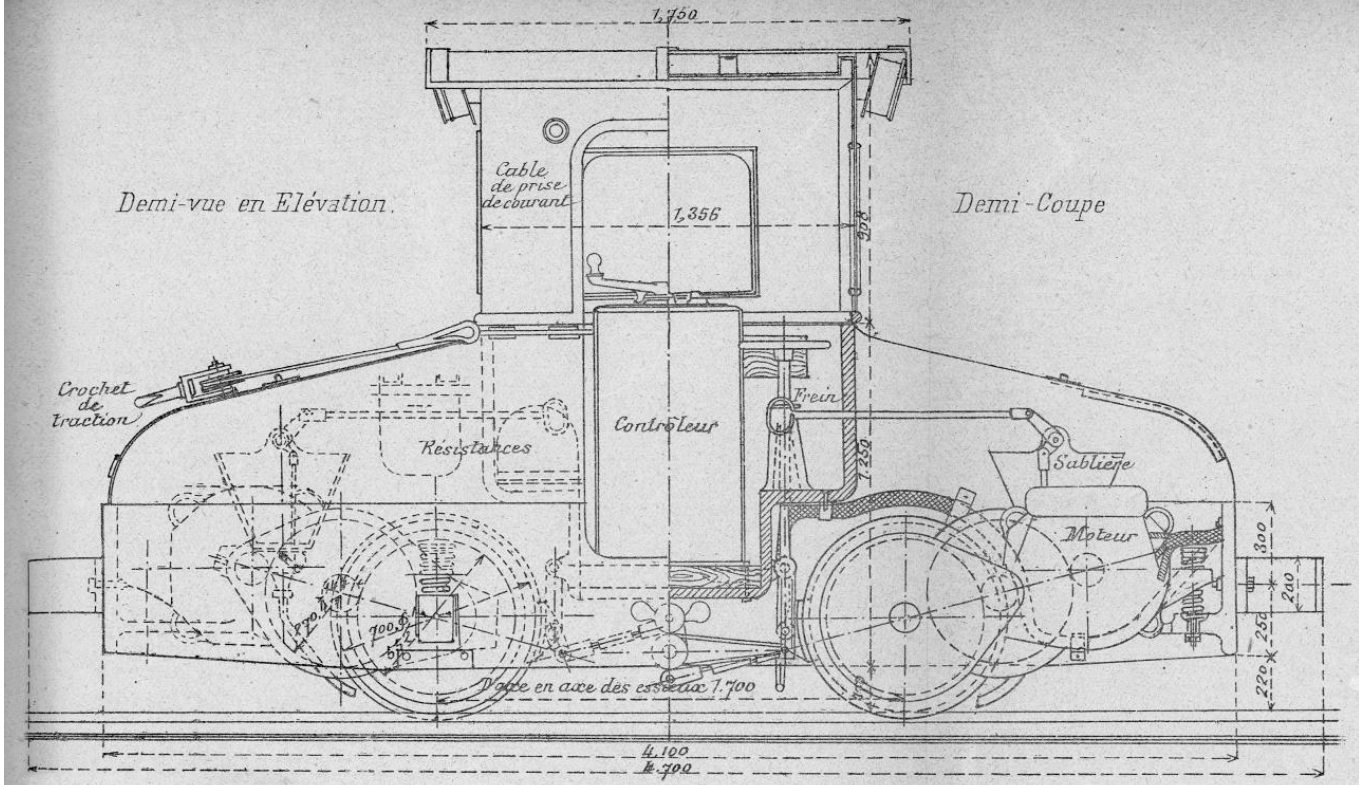
Le tarif de halage, pour ce cas particulier, est fixé par le Gouvernement à 0,4 centimes par tonne-kilomètre pour la montée, et 0,35 pour la descente.

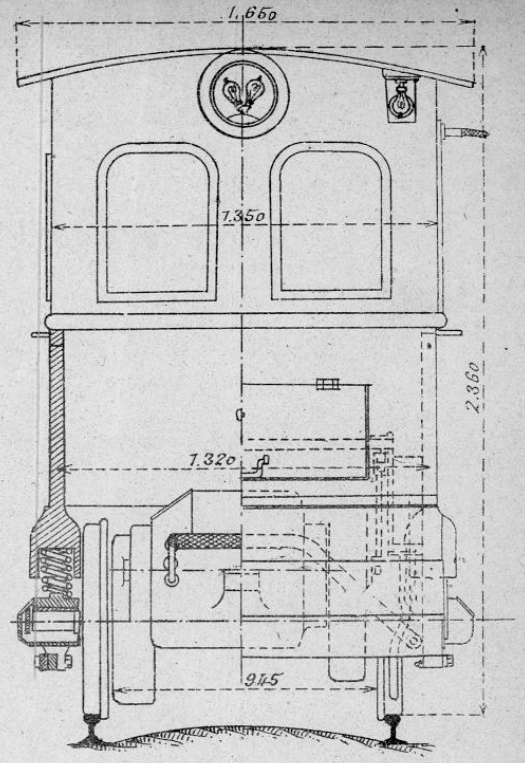
Le trafic est de 3 à 4 millions de tonnes par an.

VI. — Traction électrique sans rails sur routes.

253. **Généralités.** — Le matériel automobile sur route présente, par comparaison avec le matériel sur rails, l'avantage suivant : il est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires





Vue de Profil.

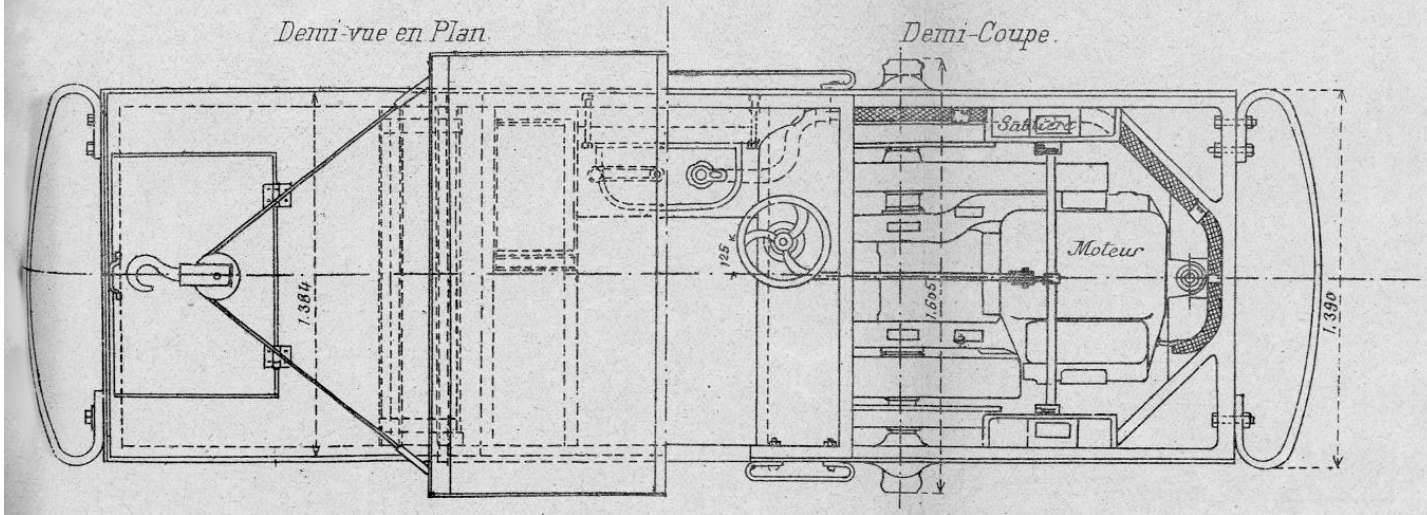


Fig. 581 à 583 Locomotive Chanay. Halage sur les canaux du Nord.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

possible de changer l'itinéraire, c'est-à-dire de déplacer l'ensemble de l'exploitation, si les conditions du trafic changent.

Les automotrices électriques sans rails à prise de courant aérienne peuvent revendiquer, en grande partie, le même avantage. En cas de transfert de l'exploitation, on peut réemployer ses éléments constitutifs et, au cas où l'augmentation du trafic viendrait à justifier l'établissement d'une voie ferrée, l'installation aérienne resterait utilisable pour la nouvelle exploitation. En plus, la liberté du mouvement des voitures peut y être réalisée de façon presqu'aussi parfaite qu'avec les automobiles.

Il convient de noter qu'en raison de l'augmentation de la résistance au roulement du véhicule, la consommation de courant par tonne et par kilomètre est sensiblement plus élevée pour ces automotrices que pour les tramways. Cette augmentation est, d'ailleurs, très variable — de 25 à 100 p. 100 — suivant le modèle de véhicule et la nature de la route ; mais d'autres considérations, principalement la différence dans les frais de premier établissement, viennent la compenser dans une notable mesure.

Les véhicules en question sont généralement montés sur roues à bandages caoutchoutés. La ligne aérienne d'alimentation est nécessairement double : un fil d'amenée et un fil de retour.

Il faut noter que l'installation ne doit apporter aucune gêne au roulage des voitures ordinaires et que l'omnibus électrique doit pouvoir se déplacer d'un côté de la route à l'autre, de manière à pouvoir éviter les obstacles. En outre, la prise de courant ne doit pas quitter la canalisation aérienne et ce, quels que soient les mouvements de la voiture.

Il y a là des difficultés qui ont conduit à des dispositifs intéressants et variés.

Ce mode de traction a reçu quelques applications en France, en Allemagne, Autriche-Hongrie, Italie, et semble devoir se développer beaucoup actuellement en Angleterre.

254. **Systèmes principaux.** — *a) Système Lombard-Guérin.* — Ce qui le caractérise est l'organe de prise de courant qui est un *chariot automoteur* dont le principe est le suivant (fig. 584) :

Un moteur électrique M a son induit calé sur l'axe de deux roulettes de trolley, l'une roulant sur le fil + et l'autre sur le fil —. Le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur est isolé des roulettes. Un contrepoids et un cadre inférieur avec roulettes sont étudiés en vue de maintenir le chariot en équilibre.

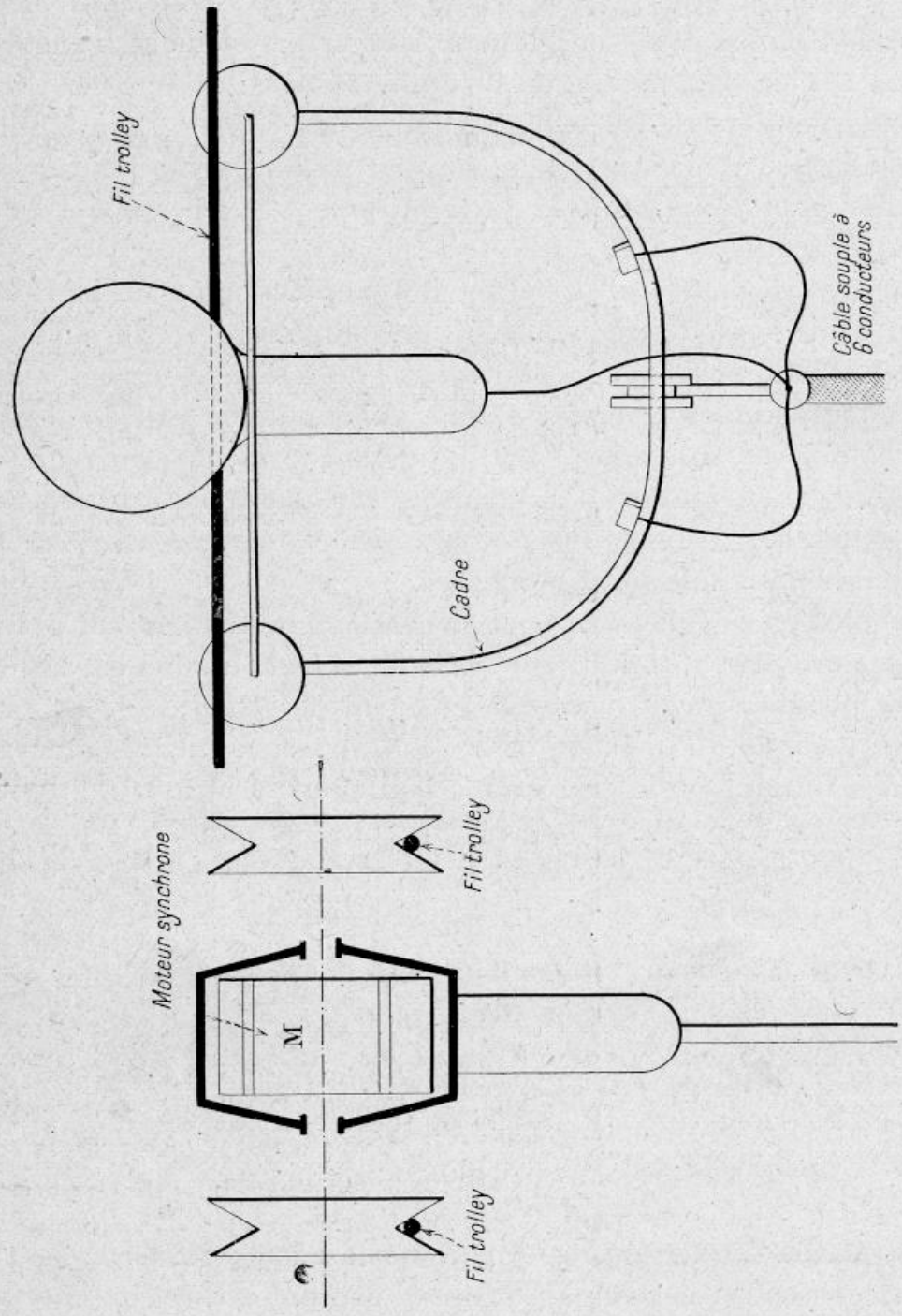


FIG. 584.
Chariot auto-moteur Lombard-Guérin.

Le moteur précédent est un moteur synchrone alimenté par des courants triphasés provenant du moteur courant-continu, type série,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

actionnant le véhicule. A cet effet, trois points de l'enroulement induit de ce dernier moteur, points distants entre eux du tiers de l'intervalle entre deux pôles consécutifs, sont reliés à trois bagues du moteur du trolley. La vitesse du chariot de prise de courant est ainsi liée à celle de l'omnibus et, en outre, les transmissions sont telles, qu'elle tend à lui être légèrement supérieure.

Un petit frein électro-magnétique alimenté en courant continu et agissant sur l'arbre de l'induit du moteur du trolley permet au wattman d'arrêter le chariot-trolley à volonté.

Un câble souple à six conducteurs, dont deux (un au pôle + et un au pôle —) principaux, assez gros, pour l'alimentation du moteur d'essieu de l'omnibus, trois plus faibles pour l'alimentation du moteur du trolley et un dernier pour le frein précédent, relie le chariot-trolley à l'omnibus. Un dévidoir placé sur la voiture en règle la tension.

Le moteur d'essieu est un moteur-série actionnant l'*essieu arrière* par un train d'engrenages.

La ligne aérienne comprend deux fils de cuivre de 8 millimètres distants de 30 centimètres.

En cas de croisement, les voitures échangent leurs trolleys.

Une ligne équipée de la sorte a été celle de Fontainebleau-Sannois (4 kilomètres) ; une autre, celle de Montauban-Gare à Montauban-Ville (4 à 6 kilomètres), formant boucle aux deux extrémités.

Une ligne de ce genre a été aussi en exploitation à Eberswalde, près Berlin.

b) Système Schieman (application à Mulhouse). — Dans ce système, les véhicules sont équipés avec un moteur de 15 à 20 chevaux attaquant par engrenages l'*essieu avant*. La vitesse en palier atteint 20 kilomètres-heure. Ce qui caractérise particulièrement ce système est l'emploi d'un *accouplement souple à ressort entre le moteur et les roues motrices* destiné à assurer l'adhérence complète dans les tournants. Les roues motrices sont libres de tourner l'une par rapport à l'autre ; mais leurs mouvements relatifs sont limités par un système de ressorts de butée.

L'appareil de contact avec les fils aériens est un appareil glissant, monté sur perche. Le contact se fait par dessous. Le courant est à 500 volts. Les véhicules peuvent faire un écart de 3 mètres par rap-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

port à la canalisation aérienne. Sur les lignes comportant l'application de ce système, eu égard au faible trafic, une voiture se gare en abaissant son trolley aux croisements. Il n'est pas besoin de l'ar-

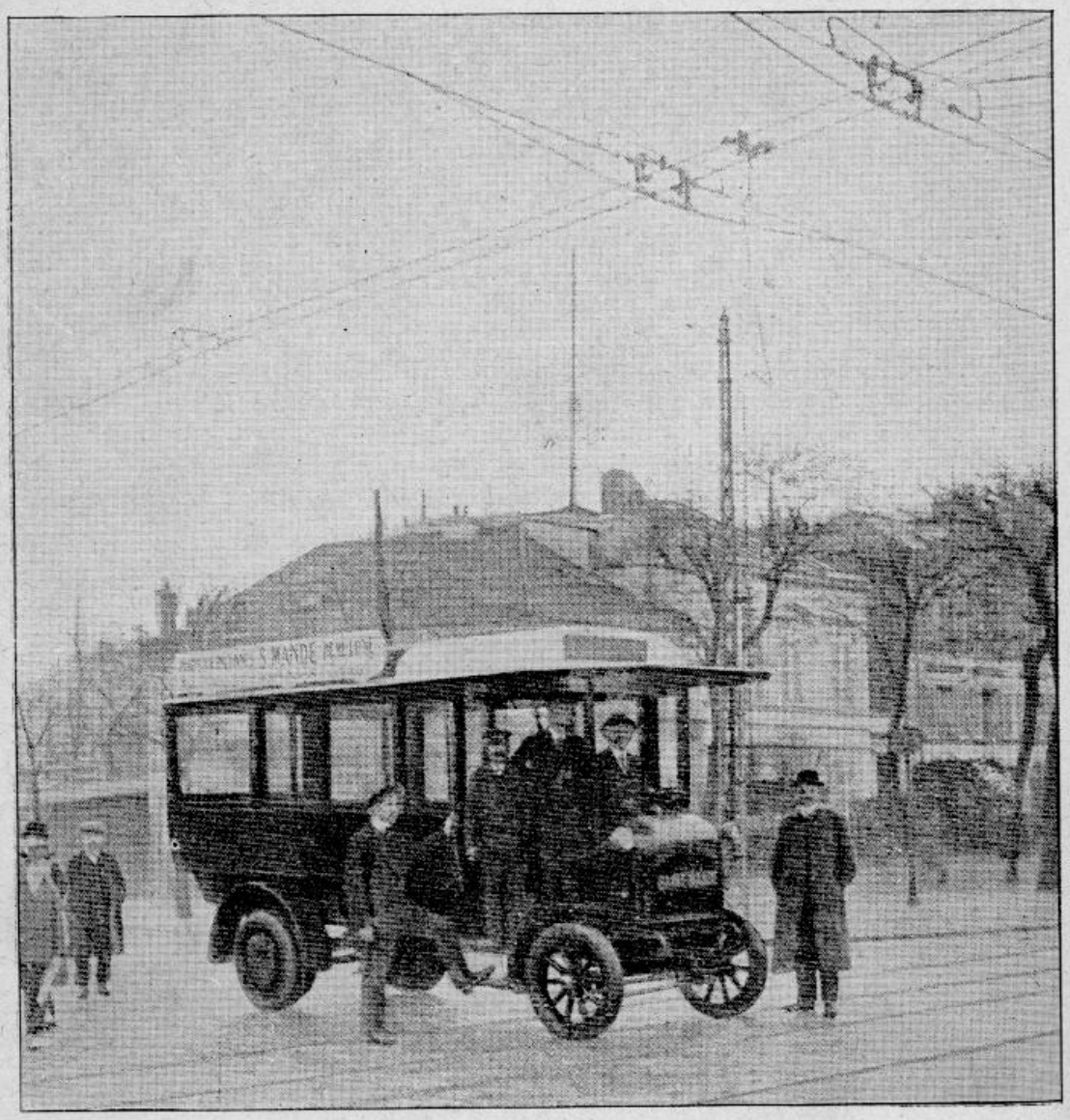


Fig. 585.

Omnibus électrique à trolley de Saint-Mandé.

rêter. Ce système a aussi reçu quelques applications en Norvège et avec une variante, en Angleterre.

c) Système Mercédès-Stoll (Application à Fribourg). — Dans ce système, les véhicules comprennent *deux moteurs de 20 chevaux calés*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

directement sur les moyeux des deux roues arrière. Le contact avec la ligne aérienne a lieu par-dessus au moyen de deux chariots et la liaison avec la voiture a lieu au moyen d'un câble flexible. Aux croisements de deux voitures, on échange les prises de courant, à moins que l'on ait prévu quatre fils aériens.

Ce système a reçu une application fin 1912 à la ligne Porte de Vincennes-Saint-Mandé aux portes de Paris. L'exploitation n'a toutefois pas été continuée. Les véhicules avaient été exécutés par la « Trackless Trolley Ld ». Leur contenance était de 24 places. Le courant absorbé à pleine charge, en pleine marche et terrain plat sec, était de 15 ampères sous 500 volts, la vitesse environ 24 kilomètres-heure.

La photographie, figuré 585, représente cet omnibus à un croisement.

Nous ajouterons enfin qu'un projet comportant l'application de ce système est à l'étude pour la ligne Rumilly-Seyssel (Haute-Savoie), d'une longueur de 18 kilom. 5. Ici, les moteurs d'essieux seraient monophasés.

d) Système Filovia (Italie). — Dans ce système, les automotrices sont équipées *avec deux moteurs de 12 chevaux chacun montés sur le châssis et reliés aux deux roues arrière au moyen d'engrenages réducteurs droits et transmission par chaîne.* Les deux roues motrices sont indépendantes. La prise de courant et le retour ont lieu au moyen d'un appareil double, sorte de chariot monté sur une perche ; le contact se fait par-dessous.

255. **Remarques.** — Un système de prise de courant et retour par contact par-dessous semble préférable, car le type ordinaire de trolley et ligne aérienne correspondants peuvent être employés. Par suite les automotrices genre tramway peuvent être immédiatement utilisés avec de telles lignes. Il semble également préférable d'avoir l'essieu arrière moteur, en vue de rendre plus facile la direction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INDEX DES PRINCIPALES FIGURES, SCHÉMAS, ETC.

FIGURES		PAGES
3.	Locomotive du Baltimore et Ohio Ry de la General Electric Co (1895)	7
4.	Schéma d'installation type à courant continu avec sous-station	23
5.	Schéma d'installation type à courant alternatif monophasé sans sous-station	23
6.	Schéma d'installation type à courant alternatif monophasé avec sous-station	23
7.	Schéma d'installation type à courants triphasés avec sous-station	23
10.	Caractéristiques d'un moteur excité en série en fonction du courant. Allure théorique générale	48
17.	Montage de deux moteurs sur banc d'essai	75
18.	Montage électrique en opposition avec survolteur de deux moteurs sur banc d'essai	75
19.	Montage électrique direct de deux moteurs sur banc d'essai	76
20.	Moteur de 50 chx. Pertes mécaniques	81
21.	Moteur de 50 chx. Pertes dans le noyau	82
22.	Séparation des pertes. Rendements	83
23.	Moteur de 50 chx. Caractéristiques en charge. Rendement. Couple utile	84
25.	Moteur de 50 chx. Caractéristiques thermiques	86
26.	Moteur de 50 chx. Courant et puissance pour un échauffement de 75°	87
27.	Courbe de refroidissement de l'induit	88
31.	Détermination graphique des résistances de démarrage	103
33.	Schéma d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston type R pour un moteur	108
34.	Connexions et développement d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston type R pour deux moteurs	109
35.	Contrôleur rhéostatique Thomson-Houston ouvert	110
40.	Passage de série à parallèle par court-circuit d'un moteur	114
41.	Equipement à 2 moteurs avec contrôleurs Thomson-Houston K-36-Z à frein de secours (Compagnie générale des Omnibus de Paris)	114

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

42. Passage de série à parallèle par la méthode du pont..... 114
43. Equipement à contrôleurs Thomson-Houston K-34 à connexion à pont 115
51. Equipement Sprague à 2 moteurs de la Société de Fives-Lille. Contrôle par commutation des bobines de champ..... 122
51 *bis*. Schéma des combinaisons réalisées avec un seul moteur... 122
55. Contrôleur série parallèle avec shuntage..... 130
56. Schéma des connexions aux différents crans du contrôleur de la figure 55 131
57. Equipement à 2 moteurs et 2 contrôleurs Thomson-Houston K-501-X avec shuntage et frein de secours (Compagnie générale des Omnibus de Paris) 132
58. Contrôleur K-501-X Thomson-Houston avec le séparateur d'arc ouvert (Compagnie générale des Omnibus de Paris). 133
78. Schéma des connexions du moteur série-compensé Winter-Eichberg du London Brighton and South Coast Ry..... 151
81-82. Schémas de montage des deux moteurs Thomson-Houston A T H-85 de la locomotive du Midi..... 153
83. Caractéristiques du moteur A T H-85 (Midi)..... 154
84-85. Schémas de montage des moteurs de la locomotive d'essai des Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est pour la Compagnie des chemins de fer du Midi..... 155
98. Locomotive Westinghouse de la Compagnie des chemins de fer du Midi. Schéma amplifié des connexions du circuit principal. 176
99. Equipement monophasé Thomson-Houston de la locomotive des chemins de fer du Midi : A. Schéma détaillé; B. Schéma simplifié 176
100. Locomotive des Ateliers de Jeumont pour la Compagnie des chemin de fer du Midi. Schéma des connexions..... 176
105. Equipement de locomotive avec redresseur à mercure Cowper-Hewitt. Schéma simplifié du circuit principal..... 181
108. Chemins de fer départementaux de la Haute-Vienne, courant alternatif monophasé 10.000 volts et 600 volts. Schéma des connexions d'une automotrice 184
118. Caractéristiques des moteurs triphasés de 475 chx 25 périodes 500 volts des locomotives de 105 tonnes à 4 moteurs du Great Northern. Roues de 1^{m}524. Rapport d'engrenages, 4,26 (General Electric Co) 207
128. Traction électrique par courants triphasés, ligne Burgdorf-Thoune. Schéma des connexions d'une locomotive..... 220
128 *bis*. Schéma de connexions d'une locomotive de la Valteline (1901) 220
131. Ensemble d'un moteur triphasé (locomotive du Simplon, 1908) 223
132. Rotor d'un moteur triphasé (locomotive du Simplon, 1908). 223
133-134. Locomotive du Simplon (Brown-Boveri) 225-226
135. Locomotive du Simplon (premier type) Brown-Boveri 1906.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

— Réglage de la vitesse par changement du nombre des pôles et rhéostats. Locomotive à 2 vitesses. — Schéma des connexions 226

136. Locomotive triphasée à 4 vitesses du Simplon (deuxième type (Brown-Boveri, 1908. — Réglage de la vitesse par seul changement du nombre de pôles dans chaque moteur. — Schéma général des connexions de l'équipement électrique. 226

139. Locomotive de la Valteline. — Réglage de la vitesse par mise des moteurs en cascade. — Schéma des connexions..... 231

146. Schéma des connexions du convertisseur de phases et des moteurs d'essieu des locomotives du Norfolk and Western Ry 245

147. Convertisseur de phases du Norfolk and Western Ry..... 247

148. Locomotive mono-triphasée du Pennsylvania R. R. Schéma général des connexions..... 249

149-150. Moteur à carcasse fendue de la General Electric Co, type G. E.-88-B. 40 chx..... 255

151-152. Moteur à carcasse fendue de la Westinghouse, type W.-307. 257

153. Moteur de traction Thomson-Houston, type G. E.-216 de 50 chx de la Compagnie générale des Omnibus de Paris. Couronne inductrice après démontage des paliers..... 258

154. Moteur de traction Thomson-Houston, type T.-H.-523 de 60 chx de la Compagnie générale des Omnibus de Paris. Vue d'ensemble 259

155. Moteur de traction Thomson-Houston de la Compagnie générale des Omnibus de Paris. Vues intérieures des flasques porte-paliers 259

156. Moteur de traction Thomson-Houston, type G. E.-216 de la Compagnie générale des Omnibus de Paris. Coupe longitudinale et élévation..... 260

157. Moteur de traction Thomson-Houston, type G. E.-216 de la Compagnie générale des Omnibus de Paris. Vue parallèle en élévation et coupe, montrant deux bobines principales et une bobine de pôle de commutation en position..... 260

158. Moteur Dick-Kerr. Section longitudinale..... 261

159. Moteur Westinghouse W.-307. Coupe du palier..... 262

160. Moteur de traction Thomson-Houston G. E.-216. Graissage. Vue d'un palier d'induit..... 262

163. Moteur Brown-Boveri à paliers à billes..... 264

166. Induit en cours de bobinage..... 267

174. Moteur de traction. Bobine inductrice principale..... 270

175. Moteur de traction d'un pôle de commutation..... 271

176. Collecteur 271

179-182. Montage sur essieu du moteur de traction Thomson-Houston G. E.-216 de 50 chx..... 274

185-190. Moteur de 135 chx sous 1.000 volts de la Compagnie Siemens-Schuckert (Ligne de Cologne à Bonn)..... 278

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

191. Section transversale du moteur G. E.-253 de 430 chx sous 1.500 volts des locomotives General Electric du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul 279
192. Roue dentée commune..... 280
193. Moteur bipolaire double à courant continu..... 281
194. Stator d'un moteur série-monophasé Westinghouse de 100 chx montrant les encoches destinées à recevoir les bobines formant pôles de commutation..... 282
195. Stator du moteur de la figure 194 avec les bobines formant pôles de commutation en place..... 282
196. Induit du moteur des figures 194 et 195..... 283
197. Stator d'un moteur monophasé répulsion-compensé Winter-Eichberg de 115 chx (A. E. G.)..... 283
198. Rotor du même moteur que le stator de la figure 197..... 283
199. Moteur ventilé des locomotives du Milwaukee..... 286
205. Locomotive du New-York Central (Premier type)..... 292
206. Locomotive du New-York Central (Deuxième type)..... 292
207. Locomotive du New-York Central (Troisième type)..... 292
210. Locomotive du New-York Central. Essieu-moteur..... 294
211. Locomotive du New-York Central. Essieu-moteur avec son induit 294
212. Moteur du New-York Central. Circuit magnétique..... 295
213. Locomotive du New-York Central. Démontage d'un essieu-moteur 295
215. Schéma de principe du montage avec arbre creux Raffard. Coupe horizontale par l'essieu..... 298
218 *bis*. Vue d'ensemble d'un bogie moteur d'automotrice à voyageurs (Valteline)..... 301
219. Schéma de l'entraînement élastique de la locomotive Heilmann. 302
220 *bis*. Automotrice Paris-Invalides-Versailles. Moteur sans engrenage avec suspension et accouplement élastique de l'induit. 303
221. Truck de locomotives à moteurs à action directe Brown-Boveri de la ligne Paris-Invalides-Versailles..... 304
222. Rotor du moteur Westinghouse des locomotives du New-York, New-Haven et Hartford R. R..... 305
223. Moteur Westinghouse complet monté sur essieu des locomotives du New-York, New-Haven et Hartford R. R..... 305
224. Détail de l'accouplement élastique..... 306
225. Locomotives du New-York, New-Haven et Hartford R. R. Bogie 306
231. Bogie-truck des locomotives du Paris-Orléans..... 311
237. Engrenage élastique Abt..... 319
238. Engrenage élastique des locomotives Loetschberg..... 320
240. Transmission élastique de la locomotive Westinghouse de la Compagnie du Midi..... 321

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

245. Locomotive du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul..... 323
246. Truck d'une demi-locomotive..... 323
247. Roue dentée élastique..... 325
248. Détails de la roue dentée élastique..... 325
249. Vue d'un des quatre bogies-moteurs..... 326
250. Vue en plan d'un truck avec ses deux moteurs à engrenages jumelés..... 326
252. Locomotive Westinghouse du New-York, New-Haven and Hartford Railroad..... 327
253-255. Essieux-moteurs des locomotives à voyageurs et à marchandises du New-York, New-Haven et Hartford R. R..... 328
256. Locomotive N.-Y. N.-H. H. (voyageurs et marchandises)..... 329
257-259. Locomotive N.-Y. N.-H. H., 1.360 chx. Truck, moteur, essieu 330
260. Essieu-moteur. Locomotive du N.-Y. N.-H. H..... 331
261. Locomotive du chemin de fer du Midi (Jeumont)..... 333
262. Dispositif d'attaque des roues par les moteurs..... 333
263. Vue d'un train de roues..... 334
267-297. Schémas des principales locomotives électriques européennes et américaines.....337 à 344
298. Locomotive de la Valteline..... 345
299. Bielle triangulaire. Locomotive Valteline et Giovi..... 345
300. Moteurs, engrenages et faux essieu de la locomotive du Norfolk and Western Ry..... 347
301. Locomotive d'essai Westinghouse, du Midi..... 348
302. Locomotive d'essai Thomson-Houston, du Midi..... 349
303. Locomotive de la Wiesenthal (Siemens-Schuckert)..... 349
304. Locomotive du Pennsylvania R. R. (Westinghouse)..... 350
305. Locomotive du Loetschberg (Oerlikon)..... 351
309-310. Schémas du montage des moteurs des automotrices du Fayet à Chamonix..... 359
311. Entraînement élastique (Fayet-Chamonix)..... 360
312. Moteur démonté. Pignon et roue conique. Manchon élastique. Carter..... 361
313. Moteur Alioth des automotrices du Fayet à Chamonix..... 361
319. Groupe compresseur, type C.-P.-27 démonté..... 379
320. Carcasse du compresseur. Couronne inductrice du moteur (groupe compresseur, type C.-P.-27)..... 379
321. Groupe compresseur pour service de traction. Châssis pour montage sous la voiture..... 380
346. Schéma des connexions d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston à un moteur avec freinage sur résistances..... 411
347. Schéma d'un contrôleur Thomson-Houston, type B.-13 à freinage rhéostatique et freinage électromagnétique..... 413
348. Schéma des connexions d'un équipement à contrôleurs Thomson-Houston, type B.-302 à connexion à pont et à freinages électrique et électromagnétique..... 414

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

349. Schéma des combinaisons obtenues avec un contrôleur Thomson-Houston, type B.-302 avec la connexion du pont et freinages électrique et électromagnétique..... 414
350. Contrôleur Brown-Boveri, type G.-6/0 pour 4 moteurs avec freinage électrique et régulation par le champ..... 414
351. Contrôleur Westinghouse T.-4.-S. Schéma des connexions avec freinage rhéostatique, freinage magnétique et régulation par le champ..... 414
355. Schéma d'un contrôleur rhéostatique Thomson-Houston avec freinage de secours par mise du moteur en court-circuit.. 427
359. Automotrices monophasées Westinghouse du Midi. Schéma simplifié du circuit principal..... 440
367. Locomotive Brown-Boveri du chemin de fer de la Jungfrau. Schéma des connexions..... 456
368. Traction électrique par courant continu. Systèmes à deux unités motrices. Ligne Champ de Mars-Invalides (1900). Schéma des connexions..... 466
370. Schéma de câblage d'un train à 8 voitures (1re combinaison).. 469
371. Schéma de câblage d'un train à 8 voitures (2e combinaison).. 470
372. Appareil de commande (système Auvert) du chemin de fer électrique de Chamonix..... 474
373. Systèmes à unités motrices multiples. Contrôleurs rhéostatiques asservis de la ligne du Fayet à Chamonix, procédé Auvert, 1895. Schéma des connexions..... 476
375. Traction à unités multiples, système Sprague. Schéma simplifié des connexions pour l'explication du fonctionnement..... 477
376. Système Sprague. Schéma des connexions d'une motrice..... 477
379. Système électropneumatique de traction à unités multiples Siemens-Schuckert. Schéma général des appareils de commande d'un équipement..... 485
380. Système électropneumatique de traction à unités multiples Siemens-Schuckert. Ensemble des appareils..... 489
381. Système Thomson-Houston ou General Electric. Schéma simplifié des connexions..... 491
382. Schéma d'un équipement Thomson-Houston à 2 moteurs.... 491
383. Disposition usuelle d'un équipement Thomson-Houston à 2 moteurs..... 492
388. Schéma d'un équipement à 4 moteurs avec contrôleur non automatique utilisant le système du pont au passage de série à parallèle..... 497
389. Schéma d'un équipement à 4 moteurs avec contrôleur non automatique et avec rupture de courant au passage de série à parallèle..... 498
390. Schéma d'un équipement à 4 moteurs avec contrôleur automatique utilisant le système du pont au passage de série à parallèle (même schéma pour un équipement semi-automatique 501

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

391. Schéma d'un équipement à 4 moteurs avec relais automatique utilisant le système du pont au passage de série à parallèle. 503
400. Schéma d'un équipement à 2 moteurs système « Série multiple Unit » Dick Kerr 514
401. Coupe verticale de l'appareil « Turret » ou « Contacteur » placé sous les voitures 517
402. Schéma des connexions de l'équipement Westinghouse-Turret. 519
404-405. Groupe de contacteurs, système « Unit Switch » électro-pneumatique Westinghouse 521
408. Schéma des connexions d'un équipement « Unit Switch » Westinghouse 522
409. Schéma complet d'un équipement électro-pneumatique « Unit Switch » Westinghouse à 4 moteurs 522
410. Vue perspective montrant la disposition d'un équipement « Unit Switch » Westinghouse (système électro-pneumatique) 524
411. Schéma perspectif d'un équipement à unités multiples Sprague General Electric pour ligne mixte courants monophasé et continu 525
412. Traction par courant monophasé Westinghouse. Equipement à unités multiples. Schéma perspectif des connexions 527
413. Schéma des connexions d'une automotrice Nord-Sud. Equipement Sprague-Thomson 540
414. Relais double d'accélération des nouveaux équipements Sprague-Thomson de l'Ouest-Etat 541
419. Diagramme du fonctionnement de la régulatrice d'un équipement S. T. A. R. au démarrage et au freinage 549
420. Schéma simplifié d'un équipement S. T. A. R., courant continu. Démarrage 550
421. Schéma simplifié d'un équipement S. T. A. R. courant continu. Freinage et récupération 554
427-428-429. Schéma de l'équipement d'une automotrice Westinghouse sous 5.000 volts courant continu 567
430. Schéma de contrôle des moteurs des voitures de Bonn-Siegburg (Siemens-Schuckert) 569
431. Schéma du groupe d'éclairage Brown-Boveri 571
432. Schéma de l'automotrice du chemin de fer de Biasca-Acquarossa (Brown-Boveri) 572
433. Schéma des connexions d'une automotrice à 4 moteurs du chemin de fer des Basses-Pyrénées (Brown-Boveri) 573
434. Schéma de connexions d'une automotrice à 2 moteurs du chemin de fer des Basses-Pyrénées (Brown-Boveri) 573
458. Truck à grand empattement de la Compagnie générale des Omnibus de Paris 597
459-463. Truck à grand empattement des automotrices électriques de la Compagnie générale des Omnibus de Paris 598

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

464. Truck à grand empattement de la Compagnie des Tramways de Paris et du département de la Seine 599
465. Truck à grand empattement de la Compagnie des chemins de fer Nogentais 600
466. Détail de la suspension oscillante du truck de la Compagnie des Chemins de fer Nogentais 601
469. Bogie à petit empattement de la Compagnie Brill pour moteurs extérieurs 603
470. Bogie à grand empattement de la Compagnie Brill pour moteurs intérieurs 605
471. Bogie moteur. Compagnie du Métropolitain de Paris..... 605
472. Bogie moteur des automotrices du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris..... 606
474. Bogie-truck à 3 essieux Siemens-Schuckert..... 608
476. Bogie Brill maximum traction..... 610
478-480. Bogie maximum traction des automotrices de la Compagnie générale des Omnibus de Paris 612
482. Truck Brill à essieux radiaux de la Compagnie des tramways suburbains de Nancy 614
492-496. Voitures de métropolitains. Dispositions des caisses en plan 623
497-498. Nouvelles automotrices de l'Ouest-Etat..... 624
499. Elévation, plan, profil et coupe de la voiture à grand empattement de la Compagnie générale des Omnibus de Paris..... 625
500. Voiture motrice à bogies de la Compagnie générale des Omnibus de Paris 626
501. Voiture motrice à grand empattement de la Compagnie des tramways de Paris et du département de la Seine..... 627
502. Nouvelle motrice de la Compagnie générale parisienne de tramways 628
503. Voiture automotrice, type E de la Compagnie de l'Est-Parisien. 629
504. Voiture automotrice, type 500 de la Compagnie de l'Est parisien 630
505. Voiture à bogie de la Compagnie des Tramways de Nice.... 631
506. Automotrice à bogies du Métropolitain de Paris..... 632
507. Automotrice à bogies du Nord-Sud de Paris..... 632
508. Cabine de wattman des automotrices du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris..... 632
509. Automotrice à grand empattement de la Compagnie générale des Omnibus de Paris 632
510. Automotrice à bogie et à plate-forme centrale de la Compagnie générale des Omnibus de Paris 632
511. Automotrice à bogies de la Compagnie des tramways de Nice et du littoral (Menton-Sospel)..... 632
512. Tramway urbain américain à truck rigide à deux essieux type Brill 632

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIGURES PAGES

513. Voiture automotrice américaine pour service interurbain, montée sur bogies Brill 632
514. Tramway de Philadelphie, monté sur truck Brill à essieux radiaux 632
519. Schéma d'équipement d'une voiture avec trolley, caniveau et accumulateurs 646
520. Automotrices à accumulateurs de la Felten-Guillaume-Lahmeyerwerke 649
562. Locomotive à crémaillère Gornergrat 716
563. Locomotive mixte à adhérence et à crémaillère Stansstaad-Engelberg 717
564-565. Locomotive du chemin de fer à crémaillère de la Jungfrau 719-720
566. Locomotive mixte à adhérence et crémaillère Lyon-Fourvière. 721
567. Locomotive à crémaillère du Wengernalp..... 722
568. Automotrice du chemin de fer à crémaillère de Loèche-les-Bains 723
581-583. Locomotive Chanay. Halage sur les canaux du Nord..... 742

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE ALPHABÉTIQUE

SE RÉFÉRANT AUX PRINCIPALES INSTALLATIONS AYANT FAIT L'OBJET DE DESCRIPTIONS DANS LE CORPS DE L'OUVRAGE

PAGES

Auvert-Ferrand.
Redresseur-régulateur 176
Equipements à unités multiples, système pneumatique Auvert ligne du Fayet à Chamonix)..... 472

Brown-Boveri.
Redresseur de courant à vapeur de mercure 182

Burgdorf-Thoune.
Locomotives Brown-Boveri, régulation de la marche..... 219
Locomotives Brown-Boveri, transmission du couple moteur.... 336

Chamonix (chemins de fer du Fayet à Chamonix).
Moteurs et transmission du couple moteur..... 360
Equipements à unités multiples, système pneumatique Auvert. 472

Cologne (chemins de fer de Cologne à Bonn).
Moteurs 278

Ganz.
Montage en cascade de deux moteurs triphasés..... 227
Cascade triple 235

Giovi.
Locomotives Westinghouse, régulation de la vitesse..... 232, 235
Transmission du couple moteur 345
Fonctionnement en récupération 454

Great-Northern.
Locomotives de la General Electric Co, régulation de la charge entre les moteurs 220, 249
Fonctionnement en récupération 454
Equipements 528

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGES

Haute-Vienne (chemins de fer départementaux de la Hte-Vienne).
Equipement des automotrices..... 184

Heilmann.
Locomotives. Régulation de la vitesse..... 137

Invalides (ligne Invalides-Champ de Mars).
Equipements à unités doubles..... 465

Italien (chemins de fer de l'Etat italien).
Locomotives Westinghouse, régulation de la vitesse..... 232, 235, 237
Traction double symétrique..... 533
Répartition de la charge entre les locomotives d'un train à traction double symétrique..... 536

Jungfrau.
Locomotives Brown-Boveri, freinage électrique et récupération. 458
Données sur ces locomotives..... 715

Lamme.
Moteur monophasé Westinghouse-Lamme..... 145
Locomotives européennes et américaines. Schémas d'ensemble. 337

Loetschberg.
Locomotives. Transmission du couple moteur..... 350

London (London Brighton and South Coast Ry).
Moteurs des automotrices..... 151, 284

London (Central-London).
Moteurs des locomotives..... 288

London (City and South London).
Moteurs des locomotives..... 288

Lugano (tramways de Lugano).
Régulation de la marche des automotrices..... 219

Lyon (tramways Lyon-Miribel-Jons).
Equipements des automotrices..... 183

Malakoff (anciens tramways de Malakoff-Vanves).
Equipements des automotrices..... 175

Mersey.
Equipements à unités multiples, système électro-pneumatique Westinghouse 479

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGES

Métropolitain de Paris.
Equipements à unités doubles, système Thomson-Houston..... 466
Equipements à unités multiples, système électro-pneumatique Westinghouse 516

Michigan Railway.
Moteurs Westinghouse..... 280

Midi (Compagnie des chemins de fer du Midi).
Moteurs des locomotives Westinghouse..... 146
Moteurs des locomotives Thomson-Houston..... 152
Moteurs des locomotives A. C. E. N. E..... 154
Locomotives des A. C. E. N. E. Transmission du couple moteur. 333
Régulateur d'induction des locomotives A. C. E. N. E..... 173
Equipements des locomotives..... 175
Perturbations sur les lignes des P. T. T. — Emploi des transformateurs-suceurs 194
Engrenages élastiques des locomotives Westinghouse..... 321
Locomotives Westinghouse. Transmission du couple moteur... 348
Locomotives Westinghouse. Freinage sur résistances..... 440
Locomotives Thomson-Houston. Fonctionnement en récupération 444
Locomotives des A. C. E. N. E. Fonctionnement en récupération. 445

Milwaukee (Chicago-Milwaukee-Saint-Paul-Railvoad) Locomotives.
Groupement des moteurs..... 119
Shuntage des inducteurs..... 132
Moteurs des locomotives..... 296
Moteurs des locomotives de la General Electric Co..... 324
Moteurs des locomotives Westinghouse..... 333
Locomotives General Electric Co. Fonctionnement en récupération 431

New-York-Central R. R.
Poids des trains..... 15
Puissances, poids et frais d'entretien des locomotives et automotrices 187
Moteurs des locomotives..... 291

New-York-New-Haven et Hartford R. R.
Moteurs des locomotives..... 146, 184
Puissances, poids et frais d'entretien des locomotrices et automotrices 188
Perturbations sur les lignes des P. T. T..... 190
Moteurs des locomotives Westinghouse..... 304, 317

Nord-Sud (chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris).
Equipements Sprague-Thomson-Houston des automotrices..... 538

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGES

Norfolk et Western R. R.
Perturbations sur les lignes des P. T. T. Emploi des transformateurs-suceurs 197
Locomotives mono-triphasées Westinghouse..... 226, 245
Transmission du couple moteur..... 346
Fonctionnement en récupération..... 454

Oerlikon.
Locomotives du Saint-Gothard. Fonctionnement en récupération. 446

Omnibus (Compagnie générale des Omnibus de Paris).
Contrôleurs 114
Shuntage des inducteurs..... 131
Moteurs 258, 263

Omnibus (Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon).
Moteurs 146

Orléans (chemins de fer Paris-Orléans).
Traction double symétrique..... 532

Pennsylvania R. R.
Perturbations sur les lignes des P. T. T. — Emploi des transformateurs-suceurs 197
Locomotives mono-triphasées Westinghouse..... 245
Transmission du couple moteur..... 347
Fonctionnement en récupération..... 454

Saxon (chemins de fer saxons et prussiens).
Automotrices à moteur Diesel..... 677

Simplon.
Locomotives Brown-Boveri. Moteurs et régulation de la marche 221, 237
Transmission du couple moteur..... 345

S. T. A. R. (système de traction auto-régulateur des ateliers de construction électriques du Nord et de l'Est).
Equipements à unités multiples..... 140, 547

Suédois (chemins de fer de l'Etat suédois).
Automotrices à moteurs Diesel de l'Etat suédois..... 674

Valteline.
Régulation de la marche..... 219
Accouplement des moteurs en cascade..... 227, 232, 233
Moteurs des locomotives..... 300
Transmission du couple moteur..... 345

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAGES

Versailles (chemin de fer de Paris-Invalides-Versailles).
Moteurs Brown-Boveri des automotrices..... 302
Moteurs Thomson-Houston des automotrices..... 326
Equipements Sprague-Thomson-Houston des automotrices..... 541

Ward-Léonard.
Système de régulation..... 136, 139, 176

Westinghouse-Cooper-Hevitt.
Redresseur de courant à vapeur de mercure..... 180

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE ANALYTIQUE DÉTAILLÉE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

Introduction.

Nos des paragraphes		PAGES
1.	Développement historique de la traction électrique	1
2.	La traction électrique sur les chemins de fer	5
3.	Courant d'alimentation	6
4.	Classification des lignes à traction électrique et causes de l'électrification de ces lignes	8
5.	Avantages de la traction électrique par rapport à la traction à vapeur	10
	a) Absence de fumée	10
	b) Augmentation de la capacité de trafic d'une gare terminus	11
	c) Accélération aux démarrages	12
	d) Augmentation de la capacité du trafic d'une voie	13
	e) Economie de combustible	13
	f) Diminution du poids par essieu moteur	14
	g) Couple moteur uniforme	15
	h) Poids moindre à égalité de puissance	15
	i) Souplesse	17
	j) Sécurité	17
	k) Franchissement des fortes rampes	17
	l) Augmentation du coefficient d'utilisation des locomotives électriques par rapport à celles à vapeur	18
6.	Conclusion et critique. Systèmes divers	18

CHAPITRE II

Utilisation de l'énergie électrique. — Systèmes de traction. Généralités.

7.	Production, transmission et utilisation de l'énergie électrique.	21
8.	Tension et nature du courant d'alimentation	22

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

N°s des paragraphes		PAGES
9.	Classification des systèmes de traction	25
	a) Système de traction à courant continu	25
	b) Système de traction à courant alternatif monophasé	25
	c) Systèmes à courants alternatifs triphasés	25
	d) Systèmes de traction mixtes	26
10.	Applications diverses	26
	a) Lignes à courant continu	26
	b) Lignes à courant alternatif monophasé	29
	c) Lignes à courants triphasés	31
	d) Lignes mixtes	31
11.	Conditions d'emploi des divers systèmes de traction	31

CHAPITRE III

Moteurs à courant continu. — Étude électrique.

12.	Généralités : types de moteurs	34
13.	Moteur série, fonctionnement	35
	a) Sens de rotation	35
	b) Force contre électromotrice, courant absorbé	35
	c) Vitesse	38
	d) Puissances :	39
	1° Puissance absorbée	39
	2° Puissance électromagnétique de l'induit	39
	3° Puissance utile	40
	e) Couples :	41
	1° Couple électromagnétique	41
	2° Couple utile	41
	f) Rendements :	42
	1° Rendement organique du moteur	42
	2° Rendement organique de l'induit	43
	3° Rendement électrique du moteur	44
	4° Rendement à la jante des roues	44
	g) Autres expressions du couple utile et remarques sur quelques-unes des formules précédentes	45
14.	Caractéristiques électro-mécaniques	47
	1° Courbe du couple utile	48
	2° Courbe de la vitesse ou caractéristique en charge	50
	3° Courbe du rendement	51
	Exemple: Caractéristiques sous 500 volts du moteur des tramways Thonson-Houston TH-2 de 40 chevaux	51

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nos des paragraphes — PAGES

15. Influence d'une modification de la différence de potentiel aux bornes du moteur 52
16. Influence d'une modification de l'enroulement induit..... 54
17. Stabilité de marche, caractéristique mécanique..... 57
18. Caractéristiques de la marche d'une voiture motrice..... 58
1° Courbe des vitesses en km/h..... 58
2° Courbe du rendement à la jante..... 59
3° Courbe des efforts en kgs..... 59
19. Remarques sur les formules de conversion du calcul des caractéristiques 59
20. Remarque sur l'effort théorique et l'effort réel à la jante.... 60
21. Calage des balais. — Moteurs à pôles de commutation..... 62
22. Puissance nominale d'un moteur de traction. — Régime uni-horaire. — Régime de 10 heures..... 64
23. Application des définitions de la puissance d'un moteur à l'étude d'un projet de traction 65
24. Puissance continue de même échauffement 68
25. Puissance uni-horaire d'un moteur et puissance absorbée au démarrage 70
26. Poids moyen des moteurs de traction..... 70

CHAPITRE IV

Essais industriels et calculs des caractéristiques des moteurs à courant continu.

27. Essais en plate-forme. — Nature et but des essais..... 73
28. Montage de deux moteurs sur banc d'essai..... 74
a) Montage mécanique..... 74
b) Montages électriques..... 75
1° Méthode en opposition avec survolteur..... 75
2° Méthode directe 76
29. Vérifications diverses. — Mesure des résistances..... 77
30. *Moteurs d'un type existant. Essais courants*..... 78
a) Essai d'échauffement d'une heure..... 78
b) Caractéristique en charge. — Rendement avec engrenages 78
c) Essai d'emballement..... 79
d) Essai de surtension..... 79
31. *Moteurs d'un type nouveau. Essais complets*..... 79
a) Caractéristique à vide..... 79
b) Rendement par les pertes séparées..... 79
c) Essais d'échauffement. Caractéristiques thermiques.. 84
d) Courbe de refroidissement..... 88

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE V

Courant continu. — Régulation de la marche des voitures.

N°s des paragraphes		PAGES
32.	Objet de la régulation de la marche des voitures	90
33.	Principe des méthodes employées	91
	I. — La ligne étant alimentée à potentiel constant	91
	1° Contrôle rhéostatique	91
	2° Contrôle série-parallèle	91
	3° Modification du bobinage de l'armature ou méthode du double induit	91
	4° Variation du flux inducteur	91
	II. — La ligne étant alimentée à potentiel variable	91
34.	Etude du démarrage. Calcul de l'effort à développer. Poids d'inertie	92
	ALIMENTATION A POTENTIEL CONSTANT	
35.	Contrôle rhéostatique. Théorie	97
36.	Détermination graphique des résistances de démarrage	100
	1° Cas d'un moteur	100
	2° Cas de deux moteurs	107
37.	Contrôleurs	107
38.	Résistances employées	111
39.	Contrôle série parallèle	111
40.	Détermination graphique des résistances de démarrage d'un contrôle série-parallèle	115
41.	Equipements à quatre moteurs	117
42.	Contrôleurs	119
43.	Cas particulier de l'alimentation à haute tension	119
44.	Modification du bobinage de l'induit	119
45.	Variation du flux inducteur	120
	1° Par modification du nombre des spires inductrices.	120
	2° Par shuntage des spires inductrices par des résistances	123
46.	Caractéristiques du moteur à inducteurs shuntés par une résistance	125
	1° Vitesses	126
	2° Rendement	127
	3° Couples	128
47.	Remarques sur l'emploi du shuntage	128
48.	Contrôleur série-parallèle avec shuntage	130
49.	Résultats d'essais et applications	130
50.	Remarque générale sur les démarrages	135

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ALIMENTATION A POTENTIEL VARIABLE OU VARIATION DE LA TENSION A LA SOURCE. DÉMARRAGE SANS EMPLOI DE RÉSISTANCES

Nos des paragraphes		PAGES
51.	La ligne d'alimentation est à potentiel constant	135
52.	Méthode des accumulateurs à groupements variables	136
53.	Méthode de la variation d'excitation de la génératrice	137
	a) Locomotive Heilmann indépendante	137
	b) Locomotive Heilmann à alimentation extérieure	138
54.	Méthodes diverses	139
	1° Méthode du survolteur-dévolteur Ward-Léonard	139
	2° Méthode nouvelle : système de traction auto-régulateur à récupération dit système S. T. A. R. des Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est	140

CHAPITRE VI

Moteurs à courant monophasé. — Étude électrique.

55.	Introduction	141
56.	Différents types de moteurs	142
57.	Moteurs type série	142
58.	Moteur type répulsion	147
59.	Moteur répulsion-compensé de M. Latour	149
60.	Moteurs dérivés	151
	1° Moteur répulsion-compensé Winter-Eichberg A. E. G.	151
	2° Moteur série-répulsion Alexanderson de la General Electric Co.	152
	3° Moteur répulsion-série-répulsion Thomson-Houston	152
	4° Moteur série-compensé-répulsion des Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est (Jeumont)	154

APPENDICE

Théorie algébrique élémentaire des moteurs monophasés à collecteur série et répulsion. Détermination du couple moteur.

I. — MOTEUR SÉRIE

61.	Force électromotrice instantanée induite entre balais	157
62.	Moteur série-compensé	160
63.	Equation du moteur série-compensé et diagramme du fonctionnement	161

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — Moteur répulsion

N° des paragraphes		PAGES
64.	Fonctionnement. Angle de calage des balais. Sens de rotation du moteur	164
65.	Force électromotrice instantanée induite entre balais	165
66.	Calcul du couple moteur	166
67.	Diagramme du fonctionnement du moteur répulsion	170

CHAPITRE VII

Courant alternatif monophasé — Régulation de la marche des voitures. — Influence perturbatrice des lignes de traction monophasées sur les lignes des P. T. T.

68.	Procédés employés pour la régulation	171
69.	Exemples de schémas d'équipements monophasés	175
70.	Systèmes monophasés mixtes	176
71.	Système monophasé continu	176
	1° Méthode de Ward-Léonard	176
	2° Emploi du courant redressé par le redresseur-régulateur Auvert-Ferrand	180
	3° Locomotive à redresseur de courant à vapeur de mercure, système Westinghouse	182
72.	Système mono-triphasé Westinghouse et Pennsylvania. Applications du système monophasé	183
73.	Remarques générales sur le système monophasé	183
	1° Lignes à alimentation mixte: courant continu et courant monophasé	184
	2° Lignes monophasées à haute et à basse tension	185
	3° Fréquence du courant d'alimentation	185
	4° Forme du couple développé par les moteurs monophasés	186
	5° Poids et coût d'entretien du matériel monophasé	189
74.	Influence perturbatrice des lignes de traction monophasées sur les circuits téléphoniques et télégraphiques voisins	190
	1° Dispositif employé sur la ligne principale du New-York, New-Haven et Hartford	192
	2° Méthode Girousse	194
	3° Méthode des transformateurs-suceurs	

CHAPITRE VIII

Moteurs à courants triphasés. — Étude électrique.

75.	Introduction	199

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

N°s des paragraphes — PAGES

76. Rappel des propriétés fondamentales des moteurs d'induction à courant triphasé 200
1° Glissement 201
2° Vitesse 202
3° Changement du sens de rotation 202
4° Couple 202
5° Puissances et rendements 205
77. Caractéristiques électromécaniques 207
78. Caractéristique mécanique. — Stabilité de marche 207
79. Réversibilité du moteur d'induction. — Fonctionnement en récupération 209
80. Résumé des propriétés principales du moteur asynchrone 211

CHAPITRE IX

Courants alternatifs triphasés. — Régulation de la marche des voitures.

81. Différents modes de régulation: couple ou vitesse 212
82. Etude du démarrage 213
83. Procédés de réglage du couple 215
1° Au moyen d'un transformateur survolteur à rapport de transformation variable 216
2° Par une modification du groupement des enroulements inducteurs ou montage étoile-triangle 216
3° Par groupement série-parallèle 216
84. Procédés de réglage de la vitesse 216
1° Contrôle rhéostatique 217
2° Modification du nombre de pôles des moteurs 220
3° Groupement en cascade ou tandem. Cascade triple (Ganz) 226
4° Régulation de la vitesse par combinaison de la modification du nombre de pôles et du groupement en cascade 236
85. Système mixte monophasé-triphasé (split-phase) Westinghouse 245
1° Locomotives du Norfolk et Western Ry 245
2° Locomotives du Pennsylvania Railroad 248
86. Remarques générales sur le système triphasé 249

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X

Construction des moteurs de traction.

Nos paragraphes — PAGES

87. Conditions mécaniques générales d'établissement d'un moteur de traction 253

I. — Moteurs a courant continu

88. Conditions générales 254
Détails de construction 256
a) Carcasse inductrice ou stator 256
b) Paliers d'induit 260
c) Paliers à billes 262
d) Armature ou induit ou rotor 267
e) Pôles inducteurs 269
f) Enroulement des inducteurs 270
g) Collecteur 271
h) Balais et porte-balais 272
i) Isolants 273
j) Engrenages et carters 273
90. Remarques sur les moteurs à courant continu à haute tension. 277

II. — Moteurs a courants alternatifs

1. Moteurs monophasés 281
2. Moteurs triphasés 284

III. — Moteurs ventilés

3. Moteurs ventilés : courant continu ou alternatif 284

CHAPITRE XI

Transmission de l'effort moteur à l'essieu et suspension des moteurs.

I. — Moteurs a action directe

94. Moteurs non suspendus 288
95. Moteurs à demi-suspendus 291
96. Moteurs complètement suspendus: emploi d'un manchon concentrique à l'essieu (Raffard-Short) 296

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — Moteurs a action indirecte

Nos des paragraphes		PAGES
97.	Moteurs à engrenages rigides	307
	a) Engrenages à double réduction	307
	b) Engrenages à simple réduction	308
98.	Suspension des moteurs à engrenages	308
	a) Suspension par le nez	309
	b) Suspension par barres latérales de la General Electric Co	312
	c) Suspension par joug de la General Electric Co	312
	d) Suspension par barres supérieures de la Westinghouse	313
	e) Suspension Westinghouse dite « Cradle suspension »	314
	f) Suspension Walker	314
99.	Etude des effets du couple de réaction sur la suspension des moteurs	315
100.	Moteurs à engrenages élastiques	319
101.	Moteurs à engrenages élastiques et arbre creux	326
102.	Transmissions par bielles et manivelles avec ou sans engrenages	335
103.	Locomotives à moteurs très surélevés	348
104.	Remarques générales sur les transmissions par bielles et manivelles	351
105.	Influence de la position du moteur sur la position du centre de gravité du véhicule, sur la stabilité de celui-ci et sur les efforts latéraux sur la voie	354
106.	Phénomènes d'oscillation des locomotives électriques	356
107.	Transmissions diverses	358
108.	Transmission par engrenages coniques	358

CHAPITRE XII

Freinage des voitures électriques.

109.	Considérations générales	364
110.	Modes d'action des freins. — Absorption de l'énergie par frottement	365

I. — Absorption de l'énergie par frottement

A. — *Etude théorique du freinage*

111.	Parcours minima pour l'arrêt d'une voiture automotrice	366
112.	Parcours minima pour l'arrêt d'une automotrice attelée d'une remorque	371

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

N° des paragraphes — PAGES

113. Autre méthode de calcul 372
114. Pression totale sur les sabots pour un bon freinage dans les conditions ordinaires 373
115. Sablières 374

B. — *Différents systèmes de freins utilisant les effets de frottement*

116. 1° Freins exclusivement mécaniques.
a) Freins à sabots..... 374
b) Freins à patins 375
c) Freins à coins 376
d) Freins à plateaux de friction et à bande sur tambour 376

2° Freins à air comprimé.

117. Divers procédés 376
118. Production de l'air comprimé 377
119. Equipement des freins à air comprimé par groupe moteur-compresseur électrique 381
1° Freins à air comprimé direct 382
2° Système automatique 384
3° Système automatique perfectionné..... 386
4° Equipement pour locomotive électrique..... 386
120. Pressions ordinaires pour le fonctionnement des freins 388
121. Régulateurs électro-pneumatiques 389
122. Détermination de la puissance d'un compresseur..... 393
123. Consommation d'air pour le freinage. — Données expérimentales 394

3° Freins électromagnétiques.

124. Principe 395
125. Frein à plateau sur essieu de la General Electric Co..... 396
126. Freins modernes à patins sur rails 399
127. Excitation des freins..... 400
a) Par une excitation simple..... 400
b) Par une excitation double..... 401
c) Par l'emploi d'une batterie d'accumulateurs..... 403
128. Freins à patins sur rails pour voitures de remorque..... 404
129. Application des freins électromagnétiques à patins sur rails. — Calcul de la distance parcourue jusqu'à l'arrêt par une voiture 405
130. Avantages des freins électromagnétiques 406

II. — FREINAGE ÉLECTRIQUE PAR LES MOTEURS

131. Divers procédés 407

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A. — *Courant continu*

Nos des paragraphes		PAGES
132.	Freinage par inversion de marche	407
133.	Freinage électrique par fonctionnement des moteurs en génératrices débitant sur résistances	408
134.	Contrôleurs à freinage électrique	412
135.	Théorie du freinage électrique par fonctionnement des moteurs en génératrices	414
136.	Résistances de freinage	418
137.	Caractéristiques du fonctionnement d'une voiture en freinage électrique sur une pente donnée	419
	1° Effort retardateur	420
	2° Intensité du courant débité	420
	3° Résistance à insérer dans le circuit des moteurs	421
138.	Calcul des résistances de freinage, la vitesse devant rester dans des limites données	423
139.	Exemple. Epure de freinage	425
140.	Freinage par mise des moteurs en court-circuit franc	426
141.	Freinage par récupération	428
142.	Fonctionnement en récupération des locomotives du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul	431
	a) Locomotives à 8 moteurs de la General Electric	431
	b) Locomotives à 12 moteurs de la General Electric	437
	c) Locomotives à 12 moteurs de la Westinghouse	438

B. — *Courant alternatif monophasé*

143.	Observation générale	438
144.	Freinage par inversion de marche	438
145.	Freinage par fonctionnement des moteurs en génératrices	439
146.	Freinage sur résistances	440
147.	Freinage par mise des moteurs en court-circuit	441
148.	Freinage par récupération	442
149.	Nouveau procédé de freinage par récupération (Oerlikon)	446

C. — *Courants alternatifs triphasés*

150.	Freinage par inversion de marche	448
151.	Freinage par fonctionnement des moteurs en génératrices asynchrones	450
152.	Diagramme du fonctionnement en récupération	451
153.	Caractéristiques du fonctionnement en freinage électrique sur une pente donnée	452
154.	Rendement de la récupération aux moteurs	453

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

N°s des paragraphes — PAGES

155. Applications du fonctionnement en récupération..... 454
156. Freinage par fonctionnement en générateur synchrone sur résistances 455

D. — *Remarques générales sur le freinage électrique par récupération ou sur résistances en courant continu, monophasé ou triphasé*

157. Nature du freinage par récupération..... 456
158. Rendement de la récupération en fonction de la pente..... 457
159. Avantages du freinage électrique par récupération ou sur résistances 458

CHAPITRE XIII

Systèmes de traction à unités multiples. — Traction double symétrique.

I. — Systèmes de traction a unités multiples

160. Introduction. Caractéristiques de ces systèmes..... 461
161. Remarques sur les conditions économiques d'établissement... 465

A. — *Systèmes à unités doubles*

162. 1er système (ligne Invalides-Champ de Mars 1900)..... 465
163. 2e système (Siemens et Halske)..... 466
164. 3e système (Thomson-Houston-Métropolitain de Paris)..... 466
165. Critique de ces systèmes..... 471

B. — *Systèmes à unités multiples*

166. Principe. Systèmes divers..... 471

1° Systèmes à contrôleurs asservis.

167. Système pneumatique Auvert (1895)..... 472
168. Système électro-magnétique Sprague..... 476
169. Système électro-pneumatique Westinghouse (Mersey)..... 479
170. Système électro-pneumatique Siemens-Schuckert..... 485

2° Systèmes à contrôleurs relayés.

171. Système électro-magnétique General Electric ou Thomson-Houston 488
172. Equipements modernes électro-magnétiques Sprague-General Electric ou Sprague-Thomson-Houston..... 493
1° Equipements non automatiques 494
2° Equipements semi-automatiques 496

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nos des paragraphes		PAGES
	3° Equipements à accélération automatique par contrôleur	499
	4° Equipements à accélération automatique par relais.	500
173.	Détails des principaux appareils d'un équipement à relais automatique	507
174.	Système électro-magnétique Dick-Kerr « Unit series-control »	512
175.	Systèmes électro-pneumatiques modernes Westinghouse	516
	a) Dispositif du Métropolitain de Paris « Turret type »	516
	b) Dispositif moderne dit « Unit Switch system » à contacteur unité	520
	C. — *Application des systèmes à unités multiples*	
176.	Equipements à unités multiples pour la traction à courant alternatif monophasé ou pour la traction mixte : courants monophasé et continu, et pour la traction à courants triphasés	523
177.	Application des systèmes à unités multiples aux motrices isolées	528
178.	Extension des systèmes à unités multiples à la commande de machines fixes	529
	II. — Traction double symétrique	
	Traction double symétrique sur les chemins de fer de l'Etat italien	533
	Répartition de la charge entre les locomotives d'un train à traction symétrique	536
	III. — Annexes	
179.	Equipements des automotrices du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris	538
180.	Equipements des automotrices de la Compagnie du chemin de fer de l'Ouest-Etat	540
181.	Système de traction auto-régulateur à récupération dit système S. T. A. R.	547
	CHAPITRE XIV	
	Traction par courant continu haute tension. Equipements des motrices.	
182.	Introduction. Généralités	558
183.	Systèmes General Electric et Thomson-Houston	560
184.	Système Westinghouse	563
185.	Système Siemens-Schuckert	566
186.	Système Brown-Boveri	570

BIBLIOTHEQUE ET MUSÉES

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XV

Accessoires de la traction.

I. — Eclairage

N°s des paragraphes		PAGES
187.	Eclairage des automotrices	574
188.	Eclairage des remorques	577
189.	Cas de l'alimentation en courant continu haute tension	577
190.	Cas de l'alimentation en courants alternatifs	580

II. — Chauffage

191.	Divers modes de chauffage	580
192.	Comparaison entre les quantités de chaleur dégagées par le courant électrique et par la houille	581
193.	Divers modes de chauffage électrique	582
194.	Conditions d'emploi des deux systèmes	583
195.	Appareils employés	583
	1° Radiateurs chauffant l'air	583
	2° Chaufferettes	586
196.	Garanties de construction des chaufferettes	588
197.	Consommation d'énergie	588

III. — Equipement électrique d'une voiture automotrice

198.	Dispositions générales	588
199.	Causes d'incendie et précautions à prendre pour la câblerie	592

CHAPITRE XVI

Trucks et Caisses des voitures.

I. — Trucks

200.	Trucks rigides à deux essieux parallèles	594
201.	Trucks à grand empattement à deux essieux	596
202.	Trucks rigides à trois essieux parallèles	598
203.	Trucks rigides à quatre essieux parallèles ou davantage	598
204.	Bogies-trucks	601
205.	Bogies-trucks à traction maxima	609
206.	Trucks à essieux radiaux	612
207.	Essieu monté et bandages	615

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — CAISSES DES VOITURES

Nos des paragraphes		PAGES
208.	Matériaux employés	619
209.	Dispositions intérieures des voitures automotrices types	621
210.	Aspect extérieur de quelques voitures automotrices types	632
210 *bis*.	Nouvelles voitures américaines de tramways	632
211.	Chasse-corps. Ramasse-corps	633
212.	Attelages	639

CHAPITRE XVII

Traction par automotrices indépendantes.

213.	De l'emploi des automotrices indépendantes en général	640

I. — TRACTION PAR ACCUMULATEURS

A. — *Tramways*

214.	Remarques générales sur l'emploi des accumulateurs	642
215.	Lignes à traction uniquement par accumulateurs	644
216.	Lignes à traction mixte par accumulateurs et trolley (ou caniveau)	645
217.	Installation des éléments des voitures	646
218.	Régulation de la vitesse des voitures	646
219.	Exemples de tramways urbains à accumulateurs	647

B. — *Automotrices sur voies ferrées*

220.	Développement de la traction par accumulateurs en Allemagne	648

II. — AUTOMOTRICES THERMO-ÉLECTRIQUES

221.	Introduction	650

A. — *Emploi du moteur à explosion*

222.	Dispositions générales employées	651
223.	Automotrices à transmission électrique	652
	1° Automotrices de la Société anonyme de locomotion électrique	652
	2° Automotrices Westinghouse du North-Eastern Ry	653
	3° Automotrices du réseau d'Arad-Osanad	654
	4° Automotrices Westinghouse	655
	5° Automotrices de la Bergmann Electricitäts-Unternehmungen Aktien-Gesellschaft	657

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nos des paragraphes — PAGES

6° Automotrices de l'Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft (A. E. G.) 661
7° Automotrices de la General Electric Co 664
8° Automotrices de la British Thomson-Houston 667
224. Automotrices pétroléo-électriques à transmission mixte et à récupération, système Pieper dit à électro-tamponnage 667
225. Comparaison entre les systèmes à transmission électrique et le système à électro-tamponnage 671
226. Consommation de combustible des automotrices pétroléo-électriques 674

B. — *Emploi du moteur à combustion interne, type Diesel*

227. Automotrices de l'Etat suédois 674
228. Automotrices des chemins de fer saxons et prussiens 677

C. — *Remarques générales*

229. Emploi des voitures thermo-électriques : pétroléo-électriques et à moteur Diesel 679
230. Applications 681

CHAPITRE XVIII

Matériels spéciaux.

I. — Trottoir roulant

231. Principe et description 682

II. — Automotrices monorails

232. Introduction 685
233. Systèmes monorails divers 685
234. Monorail à gyroscope Brennan 694

III. — Systèmes funiculaire et a crémaillère

235. Introduction 698
236. Traction funiculaire 700
237. Systèmes de crémaillères 701
238. Pièces d'entrée de crémaillère 704
239. Poussée longitudinale dans les systèmes à crémaillère 709
240. Avantages de la traction électrique pour les systèmes à crémaillère 711
241. Mécanismes de locomoteurs à crémaillère 711
242. Freinage des locomotives à crémaillère 714
243. Exemples de chemins de fer à crémaillère 715

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IV. — Traction électrique dans les mines

Nos des paragraphes		PAGES
244.	Divers modes de traction	
	1° Par locomotives à vapeur	724
	2° Par locomotives à air comprimé	724
	3° Par locomotives à moteur à explosion	724
	4° Par locomotives électriques	724
245.	Locomotive à trolley	725
	a) Alimentation	725
	b) Voie	725
	c) Construction des locomotives	726
	d) Moteurs	727
	e) Système de contrôle	728
246.	Résistance au roulement	728
247.	Locomotives à tambour à câble prise de courant	729
248.	Locomotives à cabestan	729
249.	Locomotives à accumulateurs	732
		732

V. — Traction électrique sur les canaux

250.	Remorquage par bateaux automoteurs	734
251.	Touage	735
252.	Halage	738
	a) Tracteurs suspendus	738
	b) Tracteurs circulant sur le chemin de halage	740

VI. — Traction électrique sans rails sur routes

253.	Généralités	742
254.	Systèmes principaux	743
	a) Système Lombard-Guérin	743
	b) Système Schieman	745
	c) Système Mercédès-Stoll	746
	d) Système Filovia	747
255.	Remarques	748

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires