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

Titre : Congrès international d'électricité. Rapports et procès-verbaux. 1900
Auteur : Exposition universelle. 1900. Paris

Mots-clés : Exposition internationale (1900 ; Paris) ; Electricité*Europe*1870-1914*Congrès
Description : 1 vol. ([4]-528 p.) ; 24 cm
Adresse : Paris : Gauthier-Villars, 1901
Cote de l'exemplaire : CNAM 8 Xae 490

URL permanente : http://cnum.cnam.fr/redir?8XAE490

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*.

CONGRÈS INTERNATIONAL

D'ÉLECTRICITÉ

(PARIS, 18-25 AOUT 1900).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

29046 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins, 55.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

8° 696 8° Zae 490

EXPOSITION UNIVERSELLE INTERNATIONALE DE 1900.

CONGRÈS INTERNATIONAL D'ÉLECTRICITÉ

(PARIS, 18-25 AOUT 1900).

RAPPORTS ET PROCÈS-VERBAUX

PUBLIÉS PAR LES SOINS

DE

M. É. HOSPITALIER, RAPPORTEUR GÉNÉRAL.

BIBLIOTHEQUE
DU CONSERVATOIRE NATIONAL
des ARTS & MÉTIERS
N° du Catalogue 8° Zae 75.
Prix ou Estimation 8 Fr
Entrée, le 16 Juin 1902.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.
—
1901

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

CONGRÈS INTERNATIONAL
D'ÉLECTRICITÉ.

18-25 AOUT 1900.

COMMISSION D'ORGANISATION.

Par arrêté en date du 8 février 1899, M. le Ministre du Commerce, de l'Industrie, des Postes et des Télégraphes a institué à Paris, au cours de l'Exposition universelle internationale, un *Congrès international d'Électricité*.

Dans sa séance du 25 novembre 1898, la *Commission supérieure des Congrès*, acceptant une proposition présentée par la *Société internationale des Électriciens*, autorisait l'organisation de ce Congrès.

La *Commission d'organisation* a été nommée par arrêté du Commissaire général en date du 8 février 1899.

COMPOSITION DE LA COMMISSION D'ORGANISATION.

PRÉSIDENT.

M. MASCART, Membre de l'Institut, directeur du Bureau central météorologique.

VICE-PRÉSIDENTS.

MM. MOISSAN (Henri), Membre de l'Institut et de l'Académie de Médecine.

FONTAINE (Hippolyte), ingénieur-électricien, administrateur de la Société des machines magnéto-électriques Gramme.

GARIEL (Charles), professeur à la Faculté de Médecine, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SECRÉTAIRES.

MM. JANET (Paul), directeur de l'École supérieure d'Électricité et du Laboratoire central d'Électricité.

SARTIAUX (Eugène), ingénieur chef des services électriques au chemin de fer du Nord.

TRÉSORIER.

M. VIOLET (L.), ingénieur directeur de la maison Carpentier.

MEMBRES.

MM. D'ARSONVAL (Arsène), Membre de l'Institut et de l'Académie de Médecine, professeur au Collège de France.

BERGER (Georges), député, président honoraire de la Société internale des Électriciens.

BLONDEL (André), professeur à l'École nationale des Ponts et Chaussées.

BOUILHET (André), ingénieur-manufacturier.

CARPENTIER (Jules), ingénieur-constructeur.

DARCQ, inspecteur général des services électriques au Ministère des Postes et Télégraphes.

GOSSELIN, secrétaire général de la Société internationale des Électriciens.

HILLAIRET (André), ingénieur-constructeur, vice-président de la Société internationale des Électriciens.

HOSPITALIER (Édouard), professeur à l'École municipale de Physique et de Chimie, ingénieur des arts et manufactures.

JOUBERT (Jules), inspecteur général de l'Instruction publique.

LIPPMANN (Jules), Membre de l'Institut, professeur à la Sorbonne.

MAZEN, inspecteur principal du matériel et de la traction au chemin de fer de l'Ouest.

MEYER (Ferdinand), directeur de la Compagnie continentale Edison, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

MONNIER (Dimitri), ingénieur des arts et manufactures, professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures.

GUILLEBOT DE NERVILLE, ingénieur des Télégraphes, professeur à l'École professionnelle supérieure des Télégraphes.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM. PELLAT (Henri), professeur à la Faculté des Sciences de Paris.
PICOU (Victor), ingénieur-électricien, ingénieur principal des installations électriques de l'Exposition de 1900.
POSTEL-VINAY (André), ingénieur-constructeur.
POTIER (Alfred), Membre de l'Institut, ingénieur en chef au corps des Mines, professeur du cours d'Électricité industrielle à l'École nationale des Mines.
SCIAMA (Gaston), directeur de la maison Breguet.
Le général SEBERT (Hippolyte), Membre de l'Institut.
DE LA TOUANNE, ingénieur des Télégraphes.
VIOLLE (Jules), Membre de l'Institut, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, président de la Société internationale des Électriciens.
VIVAREZ, ingénieur civil des Mines.
WUNSCHENDORFF (Eugène), administrateur des Postes et Télégraphes.

RÈGLEMENT.

ART. 1. — Conformément à l'arrêté ministériel en date du 8 février 1899, il est institué à Paris, au cours de l'Exposition universelle de 1900, un Congrès international d'Électricité.

ART. 2. — Ce Congrès s'ouvrira le 18 août dans la grande salle du Palais des Congrès. Sa durée sera de huit jours.

ART. 3. — Seront Membres du Congrès les personnes qui auront adressé leur adhésion au secrétaire de la Commission d'organisation avant l'ouverture de la session, ou qui se feront inscrire pendant la durée de celle-ci, et qui auront acquitté la cotisation dont le montant est fixé à 20 francs.

ART. 4. — Les Membres du Congrès recevront une carte qui leur sera délivrée par les soins de la Commission d'organisation.
La carte de Membre du Congrès donne droit à l'entrée dans l'enceinte de l'Exposition.

ART. 5. — La Commission d'organisation fera procéder, lors de la première séance, à la nomination du bureau du Congrès.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ART. 6. — Le bureau du Congrès règle la distribution des travaux pendant la session, fixe l'ordre du jour de chaque séance, dirige la discussion et rédige les procès-verbaux.

ART. 7. — Le Congrès comprend : des séances générales; des séances de section; des conférences; des visites aux établissements scientifiques et industriels.

ART. 8. — Les Membres du Congrès ont seuls le droit d'assister aux séances et aux visites préparées par la Commission, de présenter des travaux et de prendre part aux discussions.

Les délégués des Administrations publiques françaises et les délégués des gouvernements étrangers jouiront des avantages réservés aux Membres du Congrès.

ART. 9. — Les Membres adhérents qui désirent faire une Communication au Congrès sont invités à en transmettre le titre, le résumé et les conclusions à la Commission d'organisation avant le 10 août 1900. Ces documents serviront à préparer l'ordre du jour des séances.

ART. 10. — Les Membres du Congrès qui auront pris la parole dans une séance devront remettre au secrétaire, immédiatement après la séance, un résumé de leurs Communications pour la rédaction des procès-verbaux.

Dans le cas où ce résumé n'aurait pas été remis, le texte rédigé par le secrétaire en tiendra lieu ou le titre seul sera mentionné.

ART. 11. — Ces procès-verbaux seront imprimés et distribués aux Membres du Congrès le plus tôt possible.

ART. 12. — Un compte rendu détaillé des travaux du Congrès sera publié par les soins de la Commission d'organisation. Celle-ci se réserve de limiter l'étendue des Mémoires ou Communications livrés à l'impression.

ART. 13. — Le bureau du Congrès statue en dernier ressort sur tout incident non prévu au Règlement.

CIRCULAIRE.

MONSIEUR,

L'Exposition universelle de 1900, qui réunira à Paris un grand nombre de savants et d'ingénieurs du monde entier, offrira une occasion exceptionnellement favorable pour l'étude des questions d'intérêt général qui dépassent aujourd'hui les limites d'une seule nation pour s'étendre à tous les peuples civilisés.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Les électriciens français ont pensé qu'il serait utile, dans ces circonstances, de provoquer et d'organiser en 1900 un Congrès international d'Électricité. Depuis l'Exposition d'Électricité à Paris en 1881, des Congrès de cette nature, tenus dans différents pays, ont marqué déjà les progrès successifs de la Science et de l'Industrie électriques.

Les questions d'unités et de langage ont été d'abord la principale préoccupation de ces conférences, et nous apprécions chaque jour les immenses bienfaits des résolutions qui ont été prises dans un accord international.

Pendant la dernière période de vingt années, bien courte en elle-même, mais qui tiendra une place glorieuse dans l'histoire, nous avons vu surgir les découvertes les plus imprévues, les applications nouvelles de travaux qui paraissaient devoir rester dans le domaine purement scientifique, et l'extension extraordinaire des industries électriques. La pratique a fait naître un grand nombre de problèmes sur lesquels il sera intéressant et profitable de rapprocher les vues des techniciens.

Il semble donc que, sans enlever aux questions de théorie le rôle important qui leur convient, les discussions du Congrès devront avoir surtout un caractère industriel et économique. C'est dans ce sens que le programme ci-joint indique, à titre provisoire, la manière dont il conviendrait de distribuer le travail entre les différentes sections du Congrès.

Le compte rendu des séances, avec les Mémoires acceptés par le bureau, fera l'objet d'une publication qui sera adressée gratuitement à tous les Membres.

Nous espérons, Monsieur, que vous voudrez bien nous prêter votre précieux concours en vous associant aux travaux du Congrès d'Électricité de 1900. Nous vous envoyons ci-joint un bulletin d'adhésion qu'il vous suffira de remplir et de retourner à l'adresse indiquée.

Veuillez agréer, Monsieur, l'assurance de notre considération la plus distinguée.

PROGRAMME PROVISOIRE.

PREMIÈRE SECTION.

MÉTHODES SCIENTIFIQUES ET APPAREILS DE MESURE.

1° *Grandeurs et unités.* — Récapitulation et coordination des décisions des Congrès antérieurs.

2° *Méthodes de mesure.* — Méthodes d'essai des matériaux et spécification de leurs qualités : isolants; conducteurs; matériaux magnétiques. — Mesures des champs magnétiques. — Mesure de la puissance des courants alternatifs simples et polyphasés. — Méthodes pratiques de décomposition d'une courbe périodique en fonctions harmoniques simples.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

3° *Appareils de mesure.* — Perfectionnements récents des appareils de mesure. — Wattmètres. — Compteurs. — Phasemètres. — Hystérésimètres. — Oscillographes et rhéographes.

4° *Photométrie.* — Étalons secondaires — Comparaison des divers étalons. — Méthodes et appareils de mesure.

DEUXIÈME SECTION.

PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. — TRANSFORMATION. — TRANSPORT ET DISTRIBUTION. — TRACTION ÉLECTRIQUE. — ÉCLAIRAGE.

1° *Production de l'énergie électrique. — Transformation.* — Progrès réalisés dans les génératrices à courant continu au point de vue du décalage des balais. — Unification des méthodes d'essai et des définitions relatives aux machines. En particulier, définition du courant maximum, de la puissance normale, de la chute de tension, de l'élévation de température. — Comparaison entre les alternateurs à fer tournant et les autres types. — Unification des fréquences; discussion sur les meilleures fréquences à adopter, eu égard au prix et au bon fonctionnement des appareils. — Compoundage des alternateurs. — Génératrices asynchrones. — Couplage des alternateurs : influence de la régulation des machines motrices. — Commutatrices, transformateurs redresseurs. — Prix de l'énergie électrique dans les stations centrales. — Choix de la puissance des unités. — Compteurs et tarification.

2° *Transport et distribution.* — Lignes à haute tension; réglementation des conducteurs à haute tension sur les voies publiques; mesures de sécurité pour les tiers. — Mise à la terre des conducteurs dans divers systèmes de distribution. — Coups de foudre et parafoudres. — Mise à la terre automatique des circuits en cas d'élévation accidentelle de tension. — Comparaison des moteurs synchrones et asynchrones. — Emploi des condensateurs.

3° *Traction électrique.* — Progrès réalisés dans les moteurs de traction. — Comparaison entre les trois systèmes : courant continu direct, courant triphasé transformé en courant continu par sous-stations, courant triphasé direct. — Traction sur voies ferrées; voitures automotrices ou trains; comparaison. — Résistance de l'air sur les voitures. — Maximum de tension toléré par les règlements publics pour la traction sur voies urbaines et suburbaines, voies ferrées et canaux. — Constitution des voies. — Phénomènes d'électrolyse.

4° *Éclairage.* — Rendement lumineux de l'arc; comparaison entre l'arc à courant continu et à l'arc courant alternatif, à l'air libre et enfermé. — Couplage des arcs. — Nouvelles lampes à incandescence. — Éclairage des voitures et des trains.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

TROISIÈME SECTION.

ÉLECTROCHIMIE.

1° *Recherches théoriques.* — Conductivité des gaz raréfiés. — Vitesse de transport des ions. — Actions chimiques de l'étincelle et de l'effluve électriques. — Composés organiques produits par électrolyse.

2° *Appareils.* — Perfectionnements récents apportés aux piles. — Piles étalons. — Piles sèches. — Piles à grand débit. — Accumulateurs en métaux autres que le plomb. — Choix d'une batterie pour traction, sous-station ou régularisation. — Fours industriels. — Divers dispositifs adoptés dans les grandes industries.

3° *Analyses.* — Séparation et dosage des métaux. — Méthodes industrielles d'analyse dans les usines électrolytiques.

4° *Dépôts métalliques.* — Dépôts de chrome, d'aluminium et de zinc. — Documents statistiques donnant, pour chaque nation, la quantité d'argent, de cuivre et de nickel déposée annuellement.

5° *Métallurgie.* — Traitement électrolytique des minerais de cuivre, de zinc, de plomb et de nickel. — Traitement des mattes. — Métaux façonnés obtenus directement dans les bains électrolytiques. — Affinage industriel du cuivre. — Comparaison entre le prix des produits obtenns par l'électricité ou par diverses autres méthodes métallurgiques. — Documents statistiques sur les quantités de cuivre électrolytique et de nickel employés dans les divers pays de production et de consommation.

6° *Grandes industries.* — Fabrication par l'électrolyse du chlore et de la soude, des chlorates de potasse et de soude. — Fabrication du carbure de calcium, de l'aluminium, etc.

7° *Applications diverses.* — Moyens pratiques de produire et de doser l'ozone. — Applications de l'ozone. — Préparation de l'hydrogène et de l'oxygène. — Production du glucinium et de ses alliages. — Préparation du phosphure de calcium. Traitement des jus sucrés. — Teinture et blanchiment.

QUATRIÈME SECTION.

TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE. — APPLICATIONS DIVERSES.

1° *Génération de l'électricité.* — Piles. — Appels magnétiques. — Emploi des dynamos et accumulateurs.

2° *Lignes.* — a. *Lignes aériennes.* — Fils de fer et d'acier. — Fils de cuivre et de bronze. — Fils bimétalliques. — Fils d'aluminium. — Isolateurs en porcelaine, en verre. — Poteaux en bois. — Procédés de conservation.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

— Poteaux et potelets métalliques. — Herses. — Tourelles. — Systèmes de construction.

b. *Lignes souterraines.* — Câbles sous gutta, caoutchouc, papier, etc. — Câbles armés. — Câbles sous plomb. — Procédés de construction.

c. *Lignes sous-marines.* — Fabrication des âmes. — Diverses qualités de gutta extraite des feuilles. — Analyse des guttas. — Ames à grande vitesse de transmission. — Essais électriques des âmes. — Revêtements. — Armatures. — Emploi des aciers à grande résistance. — Câbles légers pour grands fonds. — Câbles d'atterrissements renforcés. — Utilisation des câbles pour la téléphonie. — Ames à isolement d'air. — Opérations de pose ou de réparations. — Navires. — Outillage. — Appareils de sondage. — Grappins. — Bouées.

3° *Appareils.* — a. *Appareils télégraphiques.* — Appareils multiples. — Multiples échelonnés. — Multiplex. — Appareils phoniques. — Appareils rapides. — Appareils à composition préalable. — Appareils à enregistrement photographique. — Relais. — Relais pour lignes souterraines ou sous-marines. — Accessoires.

b. *Appareils téléphoniques.* — Transmetteurs. — Récepteurs. — Répartiteurs. — Divers systèmes de multiples. — Multiples à capacité indéfinie. — Multiples à batterie centrale. — Multiples automatiques. — Bureaux centraux secondaires. — Postes d'abonnés. — Systèmes d'appels. — Relais. — Accessoires.

4° *Réseaux.* — Réseaux téléphoniques aériens, souterrains ou mixtes. — Réseaux à simple et double fil. — Lignes anti-inductées. — Téléphonie à grande distance. — Télégraphie et téléphonie simultanées.

5° *Propagation des courants en télégraphie et en téléphonie.* — Lignes à grande capacité. — Vitesse de transmission. — Ordre de grandeur des courants.

6° *Préservation des communications télégraphiques et téléphoniques.* — Actions perturbatrices dues au voisinage des courants industriels. — Dérivation par la terre. — Induction des courants alternatifs et des courants de commutatrices. — Préservation des lignes. — Isolants. — Filets. — Baguettes. — Mise à la terre automatique. — Interrupteurs automatiques. — Préservation des postes. — Coupe-circuits fusibles. — Influence des orages. — Parafoudres. — Courants telluriques.

7° *Télégraphie sans fils.* — Divers systèmes. — Excitateurs. — Récepteurs. — Cohéreurs. — Antennes. — Syntonisation des appareils. — Communications avec ou entre navires. — Télégraphie optique.

8° *Horlogerie.* — Remontage automatique. — Remise à l'heure automatique. — Emploi des fils télégraphiques et téléphoniques à l'unification

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de l'heure. — Adaptation des systèmes électriques aux types d'horlogerie d'usage courant.

9° *Applications diverses.* — Signaux et appels divers.

CINQUIÈME SECTION.

ÉLECTROPHYSIOLOGIE.

1° *Production d'électricité par les êtres vivants.* — a. Courants dits *de repos* dans les différents tissus : nerfs, muscles, glandes, etc.

b. Courants d'action ou oscillation négative dans les mêmes tissus.

c. Courants des organes spéciaux chez les poissons électriques, méthodes et instruments pour l'étude de ces divers courants.

2° *Action de l'électricité sur les êtres vivants.* — a. Influence de la forme de l'onde électrique d'excitation. — Caractéristique d'excitation.

b. Électrisation par la machine statique.

c. Électrisation par la pile.

d. Électrisation par les courants induits.

e. Électrisation par les courants sinusoïdaux.

f. Électrisation par les courants ondulatoires.

g. Électrisation par les courants de haute fréquence.

Procédés : direct, par condensation, par autoconduction, unipolaires ou bipolaires, par effluvation, etc. — Matériel instrumental pour la production et l'application de ces divers courants.

3° *Instruments de mesure et effets physiologiques divers.*

4° *Dangers des différents modes de l'énergie électrique.* — Mort par l'électricité. — Soins à donner aux personnes foudroyées.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

RAPPORTS PRÉLIMINAIRES.

PREMIÈRE SECTION.

RÉCAPITULATION DES DÉCISIONS DES CONGRÈS ANTÉRIEURS;

PAR M. E. HOSPITALIER,

Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles
de la Ville de Paris.

Bien que l'électricité compte aujourd'hui un siècle d'existence, les premières tentatives faites pour créer des unités exactes et rationnelles pour sa mesure remontent à peine à une quarantaine d'années.

C'est, en effet, en 1861 que la *British Association*, sur la proposition de M. William Thomson, aujourd'hui Lord Kelvin, institua une Commission chargée de déterminer la meilleure unité de résistance électrique.

Dans un Rapport présenté en 1862 au meeting de Cambridge. la Commission proposait l'adoption du système électromagnétique de Weber, basé sur le système métrique, et l'emploi d'unités dites *absolues,* déduites les unes des autres par un enchaînement logique de définitions successives, en vue de faire disparaître les coefficients numériques parasites dont il reste encore malheureusement trop d'exemples.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'œuvre de la Commission se compléta peu à peu par des rapports présentés :

Le deuxième à Newcastle-on-Tyne en 1863;

Le troisième à Bath en 1864;

Le quatrième à Birmingham en 1865;

Le cinquième à Dundee en 1867;

Le sixième à Exeter en 1869.

En 1875, la *Physical Society,* de Londres, publiait un Recueil de constantes physiques qui résumait et développait les décisions de la *British Association,* mais c'est seulement en 1881 que le premier *Congrès international des Électriciens,* tenu à Paris à l'occasion de l'Exposition universelle d'Électricité, donnait une sanction officielle internationale à quelques-unes de ces décisions.

Dans sa séance du 5 octobre 1881, le Congrès émit le vœu que le Gouvernement français voulût bien inviter les autres puissances à constituer des Commissions internationales chargées de résoudre un certain nombre de questions relatives aux unités électriques, à l'étalon de lumière et aux phénomènes électriques de l'atmosphère.

La *Conférence internationale pour la détermination des unités électriques,* convoquée à Paris par les soins du Ministère des Affaires étrangères en exécution des vœux du Congrès de 1881, tint deux réunions : la première du 16 au 26 octobre 1882, la seconde du 28 avril au 3 mai 1884.

Deux autres Congrès officiels se sont tenus à Paris en 1889 et à Chicago en 1893.

Enfin, deux Congrès internationaux non officiels se sont réunis à Francfort-sur-le-Mein en 1891, et à Genève en 1896.

A la veille du *Congrès international d'Électricité,* qui va siéger à Paris du 18 au 25 août, il nous a paru utile de réunir les décisions prises par chacun de ces Congrès, en vue de faciliter les propositions nouvelles, sans apporter aucune modification aux décisions antérieures, décisions qui doivent être respectées pour que les Congrès futurs respectent à leur tour celles du Congrès de 1900.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

CONGRÈS OFFICIELS.

Congrès international des Électriciens. Paris, 15 septembre–5 octobre 1881.

PREMIÈRE SECTION. — *Unités électriques.*

1° On adoptera pour les mesures électriques les unités fondamentales : centimètre, gramme-masse, seconde (C. G. S.).

2° Les unités pratiques, l'*ohm* et le *volt,* conserveront leurs définitions actuelles : 10^9 pour l'ohm et 10^8 pour le volt.

3° L'unité de résistance (ohm) sera représentée par une colonne de mercure d'un millimètre carré de section à la température de 0° C.

4° Une Commission internationale sera chargée de déterminer par de nouvelles expériences, pour la pratique, la longueur de la colonne de mercure d'un millimètre carré de section à la température de 0° C. qui représentera la valeur de l'ohm.

5° On appelle *ampère* le courant produit par un volt dans un ohm.

6° On appelle *coulomb* la quantité d'électricité définie par la condition qu'un ampère donne un coulomb par seconde.

7° On appelle *farad* la capacité définie par la condition qu'un coulomb dans un farad donne un volt.

(Séance du 20 septembre 1881.)

DEUXIÈME SECTION. — *Télégraphie et téléphonie.*

1° Une entente sera établie entre les administrations télégraphiques des divers pays à l'effet d'instituer des expériences périodiques de mesures sur les fils internationaux.

2° Dans les marchés et publications, on ne désignera désormais, dans tous les pays, les fils que par leur diamètre exprimé en millimètres ou fractions de millimètre, à l'exclusion de toute indication de jauge.

(Séance du 24 septembre 1881.)

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Le Congrès, en se ralliant aux vœux relatifs à la conservation des arbres à gutta-percha, désire signaler aux intéressés l'utilité des mesures qu'il conseille.

Que les Gouvernements des divers pays s'occupent de la nécessité d'établir des rapports internationaux concernant la propriété des câbles sous-marins.

(Séance du 28 septembre 1881.)

TROISIÈME SECTION. — *Unités de lumière.*

1° Que le Congrès recommande au jury l'emploi de la lampe Carcel dans les comparaisons faites avec les divers appareils de lumière électrique exposés.

2° Que le Gouvernement français veuille bien se mettre en rapport avec les Gouvernements étrangers, à l'effet de nommer une Commission internationale qui sera chargée de la détermination de l'étalon définitif de lumière, et des dispositions à observer dans l'exécution des expériences de comparaison.

(Séance du 24 septembre 1881.)

COMMISSIONS INTERNATIONALES.

Le Congrès émet le vœu que le Gouvernement français veuille bien inviter les autres Gouvernements à constituer trois Commissions internationales chargées d'étudier et de résoudre les questions suivantes :

PREMIÈRE COMMISSION.

Déterminer par de nouvelles expériences, pour la pratique, la longueur de la colonne de mercure de 1 mm^2 de section qui, à la température de zéro, représentera la valeur de l'*ohm*.

DEUXIÈME COMMISSION.

a. Préciser les méthodes d'observation pour l'électricité atmosphérique.

b. Réunir les éléments statistiques relatifs à l'efficacité des paratonnerres des divers systèmes, et à l'action préservatrice ou nuisible des réseaux télégraphiques et téléphoniques.

c. Organiser l'étude systématique des courants terrestres.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

d. Étudier les meilleures conditions d'établissement d'un réseau *télémétéorographique* international.

TROISIÈME COMMISSION.

Déterminer un étalon définitif de lumière et les dispositions à observer dans l'exécution des expériences de comparaison.

(Séance du 5 octobre 1881.)

Conférence internationale pour la détermination des unités électriques (1882-1884).

PREMIÈRE SESSION (1882).

PREMIÈRE COMMISSION. — *Unités électriques.*

La Commission considère que les déterminations faites jusqu'à présent n'offrent pas encore le degré de concordance qui serait nécessaire pour fixer la valeur numérique de l'ohm en colonne mercurielle.

Elle estime donc qu'il y a lieu de poursuivre les recherches....

La Conférence exprime le vœu que le Gouvernement français prenne les mesures nécessaires pour qu'un même étalon ou plusieurs étalons de résistance soient mis à la disposition des savants qui s'occupent de recherches absolues, afin de rendre les comparaisons plus faciles;

Que le Gouvernement français veuille bien transmettre aux Gouvernements représentés à la Conférence un vœu tendant à ce que chacun d'eux, en considération de l'importance d'une solution pratique et de son urgence, prenne les mesures nécessaires pour favoriser les recherches de ses nationaux relatives à la détermination des unités électriques.

(Séance du 26 octobre 1882.)

DEUXIÈME COMMISSION. — *Électricité atmosphérique et courants terrestres.*

La Commission recommande aux Gouvernements les observations régulières et continues de l'électricité atmosphérique.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La Commission émet le vœu que les paratonnerres soient partout soumis à une vérification périodique.

La Commission émet le vœu que certaines lignes, même de petite longueur, indépendantes du réseau télégraphique général dans chaque pays, soient consacrées d'une manière exclusive à l'étude des courants terrestres, et que les grandes lignes, particulièrement les lignes souterraines, soient utilisées, le plus fréquemment possible, pour des recherches de même nature.

Le moment ne paraît pas venu de donner suite au projet d'établissement d'un réseau télémétéorographique international, mais la Commission s'est montrée extrêmement favorable à toutes les mesures qui pourront faciliter le développement des dépêches météorologiques et améliorer le service de la prévision du temps.

(Séance du 26 octobre 1882.)

TROISIÈME COMMISSION. — *Étalon de lumière.*

La Conférence, reconnaissant que les recherches faites jusqu'à présent donnent lieu d'espérer que la lumière émise par le platine fondant pourra conduire à un étalon absolu, émet le vœu que ces expériences soient poursuivies.

Comme étalon secondaire usuel, la Conférence recommande l'emploi de la lampe Carcel, système de la vérification du gaz dû à MM. Dumas et Regnault, ou d'une lampe équivalente employée avec les mêmes soins.

Les bougies peuvent servir également, si l'on prend assez de soin pour assurer l'identité de composition, de forme, de construction et de consommation.

Pour les expériences de précision et pour quelques applications, telles que les phares, la comparaison des lumières doit être faite par une analyse des différents éléments qui les constituent.

La Conférence réitère la décision du Congrès de 1881, en vertu de laquelle toute détermination d'un foyer électrique et, en général, de tout foyer qui rayonne différemment dans les différentes directions doit comprendre comme élément essentiel la formule de ce foyer, c'est-à-dire la relation qui existe entre l'intensité lumineuse et la direction des rayons.

(Séance du 26 octobre 1882.)

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

DEUXIÈME SESSION (1884).

PREMIÈRE COMMISSION. — *Unités électriques.*

L'ohm légal est la résistance d'une colonne de mercure de 1 mm² de section et de 106 cm de longueur à la température de la glace fondante.

La Conférence émet le vœu que le Gouvernement français veuille bien transmettre cette résolution aux divers États et en recommande l'adoption internationale.

(Résolution du 29 avril 1884.)

La Commission recommande la construction d'étalons primaires en mercure conformes à la résolution précédemment adoptée, et concurremment l'emploi d'échelles de résistances secondaires en alliages solides qui seront fréquemment comparées entre elles et avec l'étalon primaire.

L'ampère est le courant dont la mesure absolue est 10^{-1} unités électromagnétiques C.G.S.

Le volt est la force électromotrice qui soutient le courant d'un ampère dans un conducteur dont la résistance est l'ohm légal.

(Résolutions du 2 mai 1884.)

DEUXIÈME COMMISSION. — *Électricité atmosphérique et courants terrestres.*

Il est à désirer que les résultats des observations recueillies par les diverses administrations soient envoyés chaque année au Bureau international des Administrations télégraphiques à Berne, qui en fera un relevé et le communiquera aux gouvernements.

La Conférence émet le vœu que les observations des courants terrestres soient poursuivies dans tous les pays.

(Résolutions du 2 mai 1884.)

TROISIÈME COMMISSION. — *Étalon de lumière.*

L'unité de chaque lumière simple est la quantité de lumière de même espèce émise en direction normale par un centimètre carré de surface de platine fondu, à la température de solidification.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'nnité pratique de lumière blanche est la quantité totale de lumière émise normalement par la même source.

(Résolutions du 2 mai 1884.)

Congrès international des Électriciens. Paris,

24-31 août 1889.

PREMIÈRE SECTION. — *Unités. Mesures.*

L'unité pratique de travail est le *joule*. Il est égal à 10^7 unités C.G.S. de travail. C'est l'énergie dépensée pendant une seconde par un ampère dans un ohm.

L'unité pratique de puissance est le *watt*. Il est égal à 10^7 unités C.G.S. de puissance. Le watt est égal à un joule par seconde.

Dans la pratique industrielle, on exprimera la puissance des machines en kilowatts, au lieu de l'exprimer en chevaux-vapeur.

Pour évaluer l'intensité d'une lampe en bougies, on prendra comme unité pratique, sous le nom de *bougie décimale,* la vingtième partie de l'étalon absolu de lumière défini par la Conférence internationale de 1884.

DEUXIÈME SECTION. — *Applications industrielles.*

L'unité pratique de coefficient d'induction est le *quadrant*.

1 quadrant = 10^9 centimètres.

La *période* d'un courant alternatif est la durée d'une oscillation complète.

La *fréquence* est le nombre de périodes par seconde.

L'*intensité moyenne* est définie par la relation

$$I_{moy} = \frac{1}{T}\int_0^T I\,dt.$$

L'*intensité efficace* est la racine carrée du carré moyen de l'intensité du courant.

La *force électromotrice efficace* est la racine carrée du carré moyen de la force électromotrice.

La *résistance apparente* est le facteur par lequel il faut multi-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

plier l'intensité efficace pour avoir la force électromotrice efficace.

Dans un accumulateur, la plaque positive est celle qui est reliée au pôle positif de la machine pendant la charge, et qui est le pôle positif pendant la décharge.

Le Congrès recommande comme moyen de déterminer le degré d'incandescence d'une lampe la méthode proposée par M. Crova et adoptée par la deuxième Section.

TROISIÈME SECTION. — *Télégraphie. Téléphonie. Signaux.*

Le double fil est adopté pour les réseaux téléphoniques urbains et les lignes interurbaines.

On désigne par l'appellation d'*interurbaine* toute communication téléphonique donnée entre deux abonnés ou cabines publiques faisant partie de groupes différents.

L'unité de conversation interurbaine est fixée à trois minutes.

(Cette proposition n'est pas adoptée en séance plénière, mais conserve sa valeur comme vœu émis par la troisième Section.)

(Séance du 31 août 1889.)

Congrès international des Électriciens. Chicago, 21-25 août 1893.

RÉSOLUTIONS DE LA CHAMBRE DES DÉLÉGUÉS.

UNITÉS ET ÉTALONS ÉLECTRIQUES.

Résolutions. — Que les divers Gouvernements représentés par les délégués à ce Congrès recommandent formellement d'adopter comme unités légales de mesure électrique les unités suivantes :

Comme unité de RÉSISTANCE, l'*Ohm international,* basé sur l'ohm égal à 10^9 unités du système électromagnétique C. G. S., qui est la résistance offerte à un courant électrique constant par une colonne de mercure, à la température de la glace fondante, de 14,4521 grammes-masse, d'une section transversale constante, et d'une longueur de 106,3 cm.

Comme unité de COURANT, l'*Ampère international,* égal à 0,1 unité électromagnétique C. G. S., suffisamment bien représenté, pour les besoins de la pratique, par le courant constant qui,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

traversant une solution d'azotate d'argent dans l'eau, conformément aux spécifications ci-jointes, dépose l'argent à raison de 0,001 118 g par seconde.

Comme unité de Force électromotrice, le *Volt international,* qui est la force électromotrice qui, appliquée d'une manière constante à un conducteur dont la résistance est de 1 ohm international, produit un courant égal à 1 ampère international, représenté avec une exactitude suffisante, pour les besoins de la pratique, par les $\frac{1000}{1434}$ de la force électromotrice de la pile connue sous le nom de *pile Clark,* à la température de 15°C., et préparée conformément aux spécifications ci-jointes.

Comme unité de Quantité, le *Coulomb international,* qui est la quantité d'électricité transportée par un courant de 1 ampère international pendant 1 seconde.

Comme unité de Capacité, le *Farad international,* qui est la capacité d'un conducteur chargé au potentiel de 1 volt international avec 1 coulomb international.

Comme unité de Travail, le *Joule,* égal à 10^7 unités C.G.S. de travail, représenté avec une exactitude suffisante, pour les besoins de la pratique, par l'énergie dépensée en 1 seconde par 1 ohm international traversé par un courant de 1 ampère international.

Comme unité de Puissance, le *Watt international,* égal à 10^7 unités C. G. S. de puissance, et représenté avec assez d'exactitude, pour les besoins de la pratique, comme la puissance de 1 joule par seconde.

Comme unité d'Induction, le *Henry,* qui est l'induction d'un circuit, lorsque la force électromotrice induite dans ce circuit est égale à 1 volt international et que le courant inducteur varie au taux de 1 ampère par seconde.

Étalon de lumière. — La Chambre des délégués, reconnaissant les grands progrès réalisés par la lampe-étalon de von Hefner-Alteneck et l'importance des recherches poursuivies au Reichanstalt, reconnaissant que d'autres étalons ont été proposés et sont actuellement à l'essai, que de sérieuses objections sont faites à tous les étalons à flamme libre, ne peut actuellement recommander l'adoption de la lampe de von Hefner ou de la lampe au pentane,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

mais recommande que toutes les nations soient invitées à effectuer des recherches en commun sur des étalons pratiques et bien définis, et sur la réalisation satisfaisante d'une unité absolue.

Notations. — La Chambre des délégués reçoit le Rapport du Comité spécial chargé de l'étude des notations, et décide qu'il soit imprimé comme appendice au Rapport général de la Chambre des délégués. Voici ce Rapport :

« La Chambre des délégués recommande l'emploi international, pour les besoins de la pratique, des notations, abréviations et symboles compris dans le Tableau ci-joint : »

(Nous ne reproduisons pas ici ce Tableau qui, depuis 1893, a subi un certain nombre de modifications et d'améliorations.)

(Séance du 25 août 1893.)

CONGRÈS NON OFFICIELS.

Depuis le Congrès international des Électriciens, tenu à Paris en 1889, il n'y a plus eu de Congrès officiels, et seulement deux Congrès internationaux indépendants organisés par des Sociétés savantes, sans aucune intervention de l'État.

Le premier s'est tenu à Francfort en 1891, le second à Genève en 1896.

Nous ne croyons pas devoir signaler ici les résolutions votées par ces Congrès, parce que, d'une part, elles n'ont aucun caractère officiel et pourraient être mises à néant par le Congrès international d'Électricité de 1900, et parce que, d'autre part, les progrès réalisés par la Science et l'Industrie électriques pendant cette dernière décade sont si prodigieux, que les décisions prises dans ces Congrès devront être reprises, modifiées et considérablement étendues pour satisfaire aux exigences actuelles des savants et des techniciens.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

UNITÉS ET ÉTALONS.

RÉSOLUTIONS DE « THE AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS ».

En mars 1900, *un Comité de l'*American Institute of Electrical Engineers *a été chargé d'examiner et de rapporter les questions suivantes :*

1° Donner des noms aux unités absolues des systèmes électromagnétique et électrostatique;

2° Désigner par des préfixes les multiples de ces unités;

3° Rationaliser le système actuel en faisant l'unité absolue de magnétisme égale à la ligne magnétique actuelle, et la différence absolue de potentiel magnétique égale à l'unité absolue actuelle de courant-tour;

4° Soumettre une partie ou la totalité de ces questions au Congrès qui doit se tenir à Paris cette année.

Le Comité, composé de MM. F.-B. Crocker, W.-E. Geyer, G.-A. Hamilton, A.-E. Kennelly (président) et W.-D. Weaver, après avoir étudié les questions qui lui étaient soumises, a présenté le Rapport suivant :

1° Nous estimons qu'il est nécessaire de donner des noms aux unités absolues des systèmes électromagnétique et électrostatique, ainsi qu'à des préfixes convenables pour désigner les multiples décimaux et les sous-multiples de ces unités, en supplément et en addition de ceux déjà en usage;

2° Le Congrès international d'Électriciens qui se tient cette année à Paris doit être invité à choisir ces noms et préfixes;

3° Un grand avantage serait attaché à la rationalisation des unités électriques et magnétiques, et le Congrès doit être invité à rechercher les voies et moyens d'obtenir cette rationalisation.

*Ces résolutions ont été adoptées par l'*American Institute of Electrical Engineers *dans une séance tenue en mai* 1900.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

PHOTOMÉTRIE;

PAR M. J. VIOLLE.

L'introduction des foyers électriques dans l'éclairage a entraîné pour la Photométrie de nouvelles exigences qui ont préoccupé les Conférences et Congrès internationaux successifs depuis 1881. Sans revenir sur les résolutions prises par ces Assemblées, nous rappellerons seulement les conventions adoptées au dernier Congrès. Nous indiquerons ensuite l'état actuel des diverses questions qui intéressent particulièrement la Photométrie industrielle touchant les étalons à incandescence ou à flammes comme les appareils de mesure, photomètres et spectrophotomètres.

CONVENTIONS INTERNATIONALES.

Le Congrès international des Électriciens, réuni à Genève en 1896, a adopté les résolutions suivantes relativement aux grandeurs photométriques et aux étalons de lumière :

1° Les grandeurs photométriques internationales ont comme base l'intensité lumineuse d'une source punctiforme.

Elles sont résumées dans le Tableau suivant :

Grandeur.	Nom de l'unité.	Équation de définition.
Intensité lumineuse...	Bougie	$\mathfrak{I}$
Flux lumineux.....	Lumen	$\Phi = \mathfrak{I}\,\Omega$
Éclairement.....	$\text{Lux} = \frac{\text{lumen}}{\text{mètre carré}}$	$E = \frac{\Phi}{S}$
Éclat.....	Bougie par mètre carré	$e = \frac{\mathfrak{I}}{S}$
Éclairage.....	Lumen-heure	$Q = \Phi T$

2° L'unité d'intensité est la bougie décimale.

3° Provisoirement, la bougie décimale pourra être représentée pour les besoins de l'industrie par l'intensité lumineuse horizontale de la lampe Hefner, à condition de tenir compte des corrections nécessaires.

ÉTALONS A INCANDESCENCE.

I. L'étalon international en platine a été l'objet, notamment au Congrès de Genève, de critiques qui semblent peu justifiées. Nous

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

avons rappelé, quelque temps après le Congrès, les conditions dans lesquelles il convient de se placer pour employer cet étalon. Il est essentiel que le platine soit parfaitement pur; la qualité de la chaux a aussi beaucoup d'importance. Si l'on prend soin de maintenir la surface du métal bien propre et de purifier chimiquement le platine dès que le nettoyage par le chlorure d'ammonium ou l'affinage par le creuset lui-même deviennent difficiles, on peut obtenir en une heure dix ou vingt fusions successives qui permettront d'exécuter autant de mesures. Le défaut de pureté des matériaux semble être la seule cause des insuccès qu'ont rencontrés quelques expérimentateurs.

Dans un travail fondamental sur les étalons de lumière, que nous aurons plusieurs fois à citer, M. Petavel donne la préférence à l'étalon Violle, employé dans les conditions suivantes :

1° Le platine doit être chimiquement pur;

2° Le creuset doit être fait de chaux pure (préparée par calcination du carbonate, obtenu en précipitant le nitrate de calcium par le carbonate d'ammoniaque);

3° L'hydrogène brûlé ne doit pas contenir d'hydrocarbures;

4° Les gaz doivent être dans la proportion de quatre volumes d'hydrogène pour trois d'oxygène. On obtient le mélange parfait en envoyant l'oxygène à la fois par un tube intérieur et par un conduit annulaire extérieur à la conduite d'hydrogène.

Dans ces conditions, le platine est porté à une température peu supérieure à celle de la fusion; il ne se forme pas sur le couvercle du creuset une condensation de gouttes dont la chute entraînerait des matières étrangères. L'éclat du métal n'est pas modifié par une combinaison avec le carbone.

L'appareil construit par M. Petavel permet à un seul expérimentateur de conduire toute l'opération : on règle, au moyen d'un manomètre différentiel, l'excès de pression sous lequel l'oxygène traverse une ouverture dont la section est environ le centième de celle des tubes de canalisation. Une jauge différentielle permet de fixer le rapport des volumes des deux gaz. Le débit d'hydrogène étant amené à 0,8 pied cube par minute, on produit la combustion pendant quinze minutes; au bout de ce temps, par le jeu d'un électro-aimant, on interrompt les deux courants de gaz et l'on substitue au chalumeau le diaphragme qui limite la surface utile;

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

on vérifie le centrage du couvercle, du bain de platine et du diaphragme. On est alors prêt à faire les mesures. Au bout d'un second chauffage de quinze minutes, on opère à des intervalles de dix secondes, marqués par une sonnerie; on marque les positions de l'index du photomètre, qu'on lit ensuite à loisir.

M. Petavel a été amené à fixer comme *normales* les conditions suivantes, qui lui ont paru les plus favorables (1) : la masse du platine est 345 g; l'aire de la surface du bain 17 cm; le diamètre de l'ouverture pratiquée dans le couvercle du four 1,6 cm. Le Tableau suivant donne la variation de l'intensité lumineuse en fonction du temps, exprimé en secondes, qui s'écoule à partir du moment où l'on a arrêté l'arrivée des gaz :

Temps.	Intensité.
10	2,236
20	1,503
30	1,196
40	0,908
50	0,693
60	0,623
70	0,559
80	1,008
90	1,001
100	0,993
110	0,991
120	0,988
130	0,986
140	0,984
150	0,897
160	0,722

L'intensité tombe d'abord très rapidement, puis elle se relève par un éclair et reste très lentement variable pendant un temps qui atteint quarante ou cinquante secondes, ensuite la diminution s'accélère. M. Petavel porte sur un papier quadrillé les points représentatifs de la variation lente; ces points sont sensiblement sur une droite qu'il prolonge jusqu'à l'abscisse correspondant à la production de l'éclair; la valeur ainsi extrapolée est appelée *inten-*

(1) Ces conditions n'ont rien d'absolu. M. Petavel conseille aux expérimentateurs qui reprendraient ces recherches d'adopter pour l'intérieur du creuset de chaux la forme hémisphérique au lieu de la forme cylindrique.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sité au moment de la solidification. Dans l'expérience dont les résultats ont été rapportés plus haut, on trouve 1,002 (1). L'erreur de la détermination est donc 0,002.

L'expérience n'est considérée comme bonne que si les lectures n'accusent qu'une variation inférieure à 0,03 pour 100 par seconde pendant trente secondes au moins.

Dans la suite du Mémoire, M. Petavel étudie le rôle de diverses circonstances : température à laquelle est porté le platine, masse du métal, dimensions de l'ouverture du couvercle, etc. La présence de la silice et du charbon doit être évitée avec le plus grand soin. En employant du gaz d'éclairage dans le chalumeau, il a observé une intensité de 36 pour 100 supérieure à la normale.

La conclusion générale, à laquelle on peut souscrire sans crainte, est que l'incertitude relativement à l'intensité de la lumière émise par du platine fondu dans les conditions normales ne dépasse pas 1 pour 100.

Citons enfin quelques essais de fusion du platine par le courant électrique. Dans ces expériences, les creusets de chaux se déforment rapidement; les meilleurs résultats ont été obtenus en supportant le platine dans une rigole de nickel refroidie par un courant d'eau : le platine reste solide au contact du nickel, qui n'est porté au rouge en aucun de ses points. Il suffirait d'employer des courants très intenses pour pouvoir opérer sur des tiges de platine de grand diamètre et varier à volonté les conditions de la fusion.

II. MM. Lummer et Kurlbaum ont proposé d'employer le platine incandescent à une température inférieure à celle de la fusion et définie par la condition que les $\frac{9}{10}$ de l'énergie rayonnée soient absorbés par une couche d'eau de 2 cm d'épaisseur. Dans l'appareil qui fonctionne à l'Institut Physicotechnique de Charlottenburg, la source est une lame de platine de 25 mm de large et de 0,015 mm d'épaisseur, portée à l'incandescence par un courant de 80 ampères environ. L'énergie rayonnée est mesurée par un bolomètre qui a été très soigneusement étudié en vue du but particulier à atteindre. Le travail de MM. Lummer et Kurlbaum est

(1) L'unité a été déterminée par la moyenne d'un grand nombre d'expériences.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

un bel exemple de l'application des méthodes de la Physique de précision à la Photométrie. La constance de l'étalon paraît satisfaisante, mais la construction et le maniement de l'appareil exigent évidemment une habileté qui a, jusqu'ici, limité son emploi (1). M. Petavel a observé fort justement que les trois méthodes qui se présentent pour vérifier que le rayonnement calorifique est réduit à $\frac{1}{10}$ ont toutes un point faible : l'emploi d'un shunt pour le galvanomètre risque d'introduire des forces électromotrices thermo-électriques; la réduction au $\frac{1}{10}$ du courant bolométrique complique beaucoup le dispositif; enfin, si l'on fait varier la distance de l'appareil au bolomètre, il faudra tenir compte de l'influence de l'enceinte dont la température n'est jamais rigoureusement égale à celle des résistances.

Une objection plus grave est relative à la composition de la lumière; la température choisie est trop basse, et la lumière émise est trop rouge. Si cette difficulté paraît devoir empêcher l'étalon Lummer et Kurlbaum d'être choisi comme absolu, elle n'interdit pas de l'employer comme étalon intermédiaire, surtout quand on s'en sert, comme on le fait à l'Institut Physicotechnique, pour vérifier la lampe Hefner.

III. Une autre température constante et très élevée nous est offerte par le cratère du charbon positif d'un arc. Les électriciens savaient depuis longtemps que l'aire de ce cratère varie à peu près proportionnellement à l'intensité des courants et que l'intensité suit approximativement la même loi. J'ai montré que l'éclat reste rigoureusement constant lorsque la puissance varie de 500 à 34000 watts; cette constance, qui résulte d'une étude spectrophotométrique et photographique, démontre que la température du charbon positif est invariable et confirme l'hypothèse, déjà ancienne, de la volatilisation du carbone dans l'arc. MM. Le Chatelier et Blondel ont vérifié, sur des charbons de provenance très différente, que l'éclat reste constant si le carbone (abstraction faite de la mèche) est suffisamment pur, quels que soient l'état moléculaire et la densité des crayons.

(1) Une erreur de 1 pour 100 sur les mesures bolométriques entraîne une erreur de 3 pour 100 sur la valeur de l'étalon.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

S'appuyant sur ces résultats, M. Blondel a fait construire un appareil permettant d'utiliser comme source de lumière une surface connue du cratère; MM. Abney, Swinburne et Silvanus Thompson avaient déjà tenté de réaliser un étalon secondaire basé sur le même principe; j'ai moi-même fait des essais dans ce sens. Ces essais n'ont pas encore fourni de résultats absolument satisfaisants. Une des causes de l'insuccès relatif de toutes les tentatives est aujourd'hui bien connue : quand l'arc siffle, la région la plus brillante se déplace périodiquement sur la surface du charbon; et même lorsque l'arc est silencieux, l'immobilité de la plage utile n'est peut-être pas aussi complète qu'on pourrait le désirer. M. Petavel, qui a également étudié le charbon positif au point de vue de son utilisation comme étalon de lumière, n'a pas réussi à obtenir des résultats parfaitement concordants dans la mesure de l'éclat du cratère. Il donne comme valeur moyenne 147 bougies par millimètre carré (1), nombre suffisamment rapproché de 158, obtenu par M. Blondel.

La confirmation du résultat essentiel, à savoir la constance de l'éclat de la partie la plus brillante du cratère, permet d'espérer, malgré tout, que l'on pourra arriver à faire du charbon positif un étalon pratique. M. Petavel avait obtenu déjà des résultats plus satisfaisants en se servant de trois charbons négatifs disposés suivant les arêtes d'une pyramide régulière ayant pour sommet le cratère; il n'a abandonné ce dispositif qu'à cause de sa complication, qui ne lui permettait pas d'expérimenter seul. Les inquiétudes que pourrait inspirer l'écart des résultats extrêmes obtenus par M. Petavel s'atténuent si l'on remarque avec lui qu'ils ne correspondent qu'à des valeurs de la température aussi peu distantes que 3935° et 4018° C. (2). Il y a lieu de croire que de nouvelles recherches permettront d'éliminer les perturbations restantes.

IV. L'étude des lampes à incandescence, en dehors de son

(1) En entourant l'arc d'une enveloppe de briques réfractaires portée à 900°, on ne voit pas varier l'éclat d'une quantité appréciable

(2) Ces nombres sont calculés à l'aide d'une formule exponentielle qui représente la radiation d'un fil de platine en fonction de la température; on peut considérer comme très sensiblement exact le rapport de ces deux températures, qui diffèrent seulement de 2 pour 100.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

importance pratique, présente un grand intérêt depuis l'introduction de ces appareils comme étalons intermédiaires en Photométrie. De nombreuses études ont établi que ces étalons peuvent être amenés à une intensité bien déterminée, quand on règle avec soin la tension aux bornes. Ce réglage doit être très précis; l'intensité lumineuse augmente beaucoup plus vite que le voltage (5,5 fois d'après M. Liebenthal).

La constance des étalons ne s'obtient que si l'on utilise les rayons émis dans une direction bien donnée au voisinage de laquelle l'intensité varie peu. Les travaux de M. Liebenthal nous fournissent un ensemble de documents précieux pour l'étude de diverses formes de lampes dans les différentes directions.

L'auteur distingue quatre types de filaments incandescents : 1° le filament rectiligne qui se trouve dans l'axe de la lampe; 2° le filament composé de deux parties rectilignes réunies par une partie courbe qui est une demi-circonférence ou un arc un peu plus grand lorsque les deux parties rectilignes ne sont pas parallèles; le filament peut être simple ou double et le diamètre de la courbe plus ou moins grand par rapport à la longueur totale; 3° le filament dans lequel deux parties rectilignes sont reliées par une courbe dont la projection sur le plan moyen présente un, deux ou trois points doubles; dans le cas d'un seul point double, la lampe peut contenir deux filaments semblables; 4° les filaments qui dessinent, autour d'une courbe gauche, des festons demi-circulaires dont le plan est, au voisinage des points d'attache, parallèle à l'axe de la lampe et, dans la partie moyenne, normal à cet axe.

L'étude de l'intensité horizontale faite, au moyen de 40 mesures réparties de 9° en 9° sur la circonférence (1), montre que les réflexions sur les parois de l'ampoule, notamment dans les lampes du type 3, peuvent causer des anomalies locales très considérables; il est donc nécessaire, si l'on veut pouvoir calculer l'intensité horizontale moyenne à l'aide d'une seule détermination, de choisir convenablement la direction unique. L'expérience montre que l'intensité passe généralement par un maximum, sans accidents notables, lorsqu'on observe, pour les types 2 et 3, dans une direc-

(1) Dans certaines régions, il a été nécessaire de faire des mesures encore plus serrées pour obtenir avec une précision suffisante l'intensité horizontale moyenne.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

tion normale au plan moyen du filament et, pour le type 4, dans le plan de symétrie.

Les facteurs suivants permettent de passer de la valeur de ce maximum à celle de l'intensité horizontale moyenne :

Type 2, parties rectilignes voisines.....	0,99
» parties rectilignes très distantes, filament creux..	0,88
Type 3, une seule boucle entre deux parties rectilignes...	0,94
» deux boucles ou trois boucles.....	0,90
Type 4.....	0,73

Deux mesures faites dans des directions rectangulaires ne donnent pas en général une moyenne satisfaisante; trois mesures faites dans des directions équidistantes pourraient à la rigueur suffire; l'erreur peut cependant encore dépasser 2 pour 100.

On obtient toujours une valeur exacte de l'intensité moyenne horizontale en recevant les rayons réfléchis par une lame de verre non argentée tournant autour de l'axe de la lampe, avec lequel il fait un angle voisin de 45°. On pourrait remplacer ce miroir par une pyramide immobile formée de dix lames de verre.

L'Union des Électriciens allemands adopte, pour l'intensité horizontale, la moyenne des intensités dans trois directions. On reçoit sur le photomètre les rayons émanés directement de la lampe et les rayons réfléchis par deux miroirs convenablement inclinés; l'erreur moyenne est de 1,9 pour 100, lorsque la droite qui joint les points d'attache du filament est normale à l'axe du photomètre. Le calcul complet, fait en tenant compte des pertes par réflexion et de la distance efficace, confirme ces résultats.

M. Liebenthal conclut que la méthode recommandée par l'Union pour les lampes à filament simple sans boucle ou à une seule boucle peut encore être appliquée, avec une approximation suffisante pour les besoins de la pratique, à d'autres types de lampes, à condition que la lampe à mesurer et la lampe normale soient de la même espèce et qu'elles soient orientées comme il a été dit plus haut. On peut même employer les lampes sans boucle, qui présentent une répartition très peu variable, pour étalonner les lampes à boucle. L'égalité d'intensité n'est pas absolument nécessaire; on peut comparer directement des lampes de dix bougies ou de 25 bougies à une lampe de 16 bougies.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'Institut américain des Ingénieurs électriciens recommande, pour évaluer l'intensité horizontale moyenne, de faire tourner la lampe sur son axe à une vitesse de 2 tours par seconde. Cette vitesse semble assez faible pour éviter les effets fâcheux de la force centrifuge et permettre l'application de la méthode proposée depuis longtemps par M. Crova.

Les études de M. Liebenthal sur la répartition de la lumière en dehors du plan horizontal lui ont montré que l'intensité moyenne sphérique des divers types de lampes à incandescence est égale à l'intensité moyenne mesurée dans une direction faisant avec l'axe un angle compris entre 46° et 53°. Ce résultat s'accorde assez bien avec celui des recherches de la Commission de l'Association américaine d'Éclairage électrique : M. Bell conseille, dans son Rapport, d'évaluer l'intensité moyenne sphérique en observant l'intensité d'une lampe tournant autour d'un axe incliné de 45° sur la verticale (1).

ÉTALONS A FLAMME.

Les principaux étalons à flamme sont : la lampe Carcel, dont l'emploi est réglementaire en France pour les essais de gaz; la lampe Vernon-Harcourt au pentane, employée en Angleterre sous deux formes, dont l'une représente maintenant la bougie anglaise; la lampe von Hefner-Alteneck à l'acétate d'amyle, qui est l'étalon légal en Allemagne où elle a remplacé la bougie de paraffine de l'*Union*.

Les prescriptions relatives à l'emploi de la lampe Carcel continuent à être appliquées telles qu'elles ont été formulées par Dumas et Regnault. Les lampes Hefner et Vernon-Harcourt ont été, dans ces dernières années, l'objet de travaux importants que nous allons résumer.

I. L'étalon Hefner comprend un récipient cylindrique et un porte-mèche, de dimensions minutieusement fixées, muni d'un mécanisme servant à régler la hauteur de la flamme. L'Institut Physicotechnique délivre avec chaque lampe un certificat de

(1) Nous devrions encore citer les intéressantes recherches de M. Bunte sur la Photométrie de l'incandescence par le gaz.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

garantie, constatant qu'à l'appareil sont adjoints un viseur von Hefner-Alteneck et un appareil de Krüss, pour mesurer la hauteur de la flamme (1), un porte-mèche de réserve et un calibre permettant de régler la hauteur de l'extrémité supérieure du porte-mèche et celle de l'axe du viseur; la différence de hauteur doit être de 60 mm. Une variation de hauteur de 1 mm de la pointe de la flamme modifie l'intensité de 3 pour 100. Le certificat atteste que les dimensions ne diffèrent des dimensions prescrites que de quantités tolérables; il donne l'intensité observée en employant successivement les deux porte-mèche et les deux appareils pour le réglage de la flamme.

M. Liebenthal a exécuté une série de mesures très importantes, relatives à l'influence qu'exercent la composition et la pression de l'atmosphère sur l'intensité de la lampe Hefner.

On constate facilement que l'intensité de la lampe Hefner est, en moyenne, de plusieurs centièmes plus grande en hiver qu'en été. Cet effet est dû surtout à la vapeur d'eau.

D'une série de 316 mesures exécutées de 1893 à 1895, M. Liebenthal a conclu que l'intensité lumineuse varie suivant la formule

$$y = 1049(1 - 0{,}0053x),$$

x étant le volume, en litres, de la vapeur d'eau, qui est diffusée dans la quantité d'air dont le volume, après dessiccation et absorption de l'acide carbonique, à la même température et sous la même pression, serait 1 m^3.

On a pris comme unité la moyenne des intensités d'un grand nombre de lampes, observées pendant plusieurs années. La différence entre le calcul et l'observation atteint au plus 0,9 pour 100, elle a pour valeur moyenne $\pm 0{,}41$ pour 100; x a varié de 3 à 19.

L'influence de la pression extérieure est faible : la variation d'intensité est représentée, en fonction de la hauteur barométrique b, par la formule

$$\Delta y = 0{,}0011(b - 760).$$

(1) Le viseur permet d'amener, à l'œil nu, la pointe de la flamme dans le plan d'une cloison horizontale qui le divise en deux; l'appareil de Krüss donne une image réelle sur un écran translucide. M. Martens a proposé récemment l'emploi d'un prisme rectangle isoscèle à face hypoténuse convexe, qui donne une image réelle et renversée au-dessus de la flamme.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Un changement de pression de 40 mm n'amène qu'une variation de 0,4 pour 100 dans l'intensité.

Les expériences de Bunte avaient déjà mis en évidence l'influence de la vapeur d'eau sur les flammes; le rôle de l'acide carbonique avait été également reconnu dans le cas de la lampe Hefner. M. Liebenthal, en faisant varier la quantité de ce gaz diffusé dans la salle d'expériences (1), a trouvé que, pour une teneur x' d'acide carbonique (exprimée en litres par mètre cube d'air pur et sec), l'intensité varie suivant la loi :

$$y = 1,012 - 0,0072x';$$

x' était compris, dans les expériences, entre 0,6 lit et 13,7 lit. Dans une salle bien ventilée et assez grande, x' reste voisin de 0,3; l'erreur correspondante, qui est 0,2 pour 100, est négligeable.

Il est à remarquer qu'à volume égal l'influence de l'acide carbonique est beaucoup plus grande que celle de la vapeur d'eau; M. Liebenthal explique ce fait en admettant que la présence de ces corps inertes abaisse la température de la flamme dans une proportion qui dépend directement de leur chaleur spécifique.

Enfin, la cause la plus importante de la diminution d'intensité que subit une lampe Hefner au bout d'un fonctionnement de plusieurs heures dans une salle fermée ne résulte pas seulement de l'addition à l'air, supposé de composition invariable, d'une quantité notable d'acide carbonique et de vapeur d'eau; la proportion d'oxygène, rapportée à l'azote, diminue également : le calcul de la chaleur spécifique montre que la variation de température pourrait atteindre 2 pour 100 par la disparition de 1 litre d'oxygène dans 1 m^3 d'air.

Si l'on fait les corrections dont l'étude de M. Liebenthal montre la nécessité, l'étalon Hefner devient parfaitement comparable à lui-même. On sait que, même alors, il ne peut pas être considéré comme parfait. La teinte rouge de la flamme et sa faible intensité lumineuse sont de graves défauts. La mobilité de la flamme nécessite souvent la présence d'un aide qui l'observe. M. Liebenthal a reconnu qu'il était insuffisant d'observer dans un seul plan,

(1) Bunte plaçait la flamme dans un appareil spécial, où elle se raccourcissait beaucoup (*Journ. für Gasbel.;* 1891).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

parce qu'on ne s'aperçoit pas de la courbure que la flamme peut prendre dans ce plan; au moyen d'un système optique, il renvoie dans le cathétomètre d'observation une deuxième image provenant de rayons émis dans un plan perpendiculaire au premier.

En 1891, j'avais trouvé pour l'étalon Hefner

1,026 bougie décimale.

A cette époque, les dimensions de la lampe à acétate d'amyle n'avaient pas encore été spécifiées rigoureusement et l'Institut Physicotechnique ne s'occupait pas de la vérification. Des mesures plus récentes de M. Laporte, exécutées au Laboratoire central d'Électricité, ont conduit à un nombre notablement différent :

0,885 bougie décimale.

Ce nombre a été déterminé par comparaison avec une lampe Carcel, en partant de sa valeur 9,6 bougies décimales, déterminée par moi. En l'adoptant, on voit apparaître une différence systématique entre les résultats des étalonnages d'une même lampe à incandescence, effectués successivement à Charlottenbourg et à Paris. La bougie allemande de paraffine a, d'après M. Laporte, une intensité de 1,05 bougie décimale.

II. Dans l'étalon au pentane d'une bougie, le pentane liquide contenu dans le récipient se vaporise par une mèche placée à l'intérieur d'un tube qui la dépasse de quelques centimètres; les vapeurs sont enflammées à la sortie du tube, de sorte que la mèche ne se carbonise pas. La flamme brûle à l'air libre; sa partie supérieure s'engage dans une cheminée qui diminue sa mobilité et qui, en activant la combustion, la rend plus blanche; une petite fenêtre percée dans cette cheminée permet d'apercevoir la pointe de la flamme, qui doit être maintenue au milieu de la fenêtre. L'intensité de la partie visible de la flamme, entre le brûleur et la base de la cheminée, est alors d'une bougie anglaise. D'après M. Vernon-Harcourt, au bout d'un quart d'heure d'allumage, la flamme se maintient à une hauteur constante; les variations n'auraient d'ailleurs qu'une influence très faible et n'occasionneraient qu'exceptionnellement un changement de 2 pour 100 dans l'intensité.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Dans un autre type, notamment dans la lampe de dix bougies qui est actuellement réglementaire pour les essais de gaz en Angleterre, la lampe est alimentée par un courant d'air chargé de vapeur de pentane dans son passage à travers un saturateur; le mélange descend sous l'action de son poids, par un tube de caoutchouc, dans un brûleur annulaire en stéatite; la cheminée est entourée d'un tube de laiton dans lequel se produit un courant d'air ascendant qu'on ramène à la base de l'anneau de stéatite. La hauteur de la partie visible de la flamme doit être de 47 mm, le réglage s'effectue au moyen d'un calibre de buis de 32 mm de diamètre. Il est prescrit de rendre vertical le tube de retour de l'air chaud, qui occupe la partie moyenne de l'appareil, et d'amener l'anneau de stéatite à une hauteur donnée au-dessus de la table sur laquelle repose le trépied à vis calantes qui supporte tout l'appareil. La hauteur de la flamme se règle au moyen de fenêtres fermées par des lames de mica; une variation de hauteur de 5 mm ou 6 mm n'aurait pas d'influence sur l'intensité utile.

Dans une Communication faite au *Meeting of the Institution of Gas Engineers* en juin 1898, M. Vernon-Harcourt a donné les résultats d'une série de comparaisons qui établissent que le rapport des intensités des deux étalons que nous venons de décrire ne varie pas de 1 pour 100 (chaque nombre étant la moyenne de dix déterminations).

M. Liebenthal a soumis l'étalon au pentane, d'une bougie, à une étude semblable à celle qu'il avait exécutée pour l'étalon Hefner. Il a constaté d'abord, en ce qui concerne le fonctionnement général, que la hauteur de la flamme doit être réglée exactement; quand la pointe est au milieu de la fenêtre, l'intensité passe par un maximum; elle diminue de 2,5 pour 100 ou de 2,1 pour 100 quand la pointe est en bas ou en haut de la fenêtre. Pendant les trente minutes qui suivent l'allumage, la hauteur de la flamme croît constamment, si l'on n'abaisse pas la mèche; même avec ce réglage, l'intensité augmente de plusieurs centièmes; ce n'est donc qu'au bout d'une demi-heure environ qu'on pourra faire une mesure.

Enfin M. Liebenthal observe que, quand une flamme est nue ou quand on prend pour une source une ouverture découpée dans un écran, on peut appliquer la loi de l'inverse du carré des distances

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

en partant, suivant le cas, de l'axe de la flamme ou du plan de l'ouverture. Dans un dispositif mixte comme celui de la lampe au pentane, le calcul montre que la distance efficace est celle du photomètre à l'axe de la lampe, diminuée de la moitié du rayon des tubes qui limitent la partie efficace de la flamme; on aurait donc une correction à effectuer si l'on opérait en faisant varier la distance du photomètre à l'étalon (1).

La lampe au pentane, qui présente sur la lampe Hefner l'avantage d'avoir une flamme beaucoup plus raide, exigerait, par contre, une surveillance plus attentive.

L'influence de l'humidité est sensiblement la même que pour la lampe Hefner; le binome de correction étant, pour la lampe au pentane,

$$1 - 0{,}0055\,x,$$

la pression fait varier l'intensité de l'étalon Vernon-Harcourt suivant la formule

$$\Delta y = 0{,}00049(b - 760);$$

un changement de 40 mm amène une variation de 2 pour 100.

M. Liebenthal conclut qu'il faudrait tenir compte, dans les mesures faites avec cet étalon, de l'altitude du lieu où l'on opère; il ne nous semble pas que ce défaut, le plus grave qu'ait révélé l'étude consciencieuse dont nous venons de résumer les résultats, établisse nettement, comme le pense l'auteur, la supériorité de la lampe Hefner sur la lampe au pentane.

III. L'appareil Dibdin, qui avait été recommandé par le *Report of the Photometric Committee,* a été l'objet d'une étude de M. Grafton. Dans cet appareil, où l'air se carbure par son passage sur le pentane dans un réservoir qui forme la base de l'appareil, la proportion d'air et de pentane varie avec la température de la salle. Le degré hygrométrique aurait également une grande influence. On n'obtient pas de meilleurs résultats en substituant à l'air le gaz d'éclairage.

Au contraire, l'étalon Methven à flamme diaphragmée, avec carburateur au pentane alimenté par du gaz d'éclairage, a donné

(1) Dans les essais de gaz, tous les appareils sont fixes, le débit du gaz seul est variable.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de très bons résultats. L'humidité et la température n'amèneraient pas de variations supérieures à 0,5 pour 100. Ce chiffre, qui est peut-être inférieur au degré de précision des mesures qu'on peut faire avec des bougies, ne semble pas toutefois devoir être accepté sans réserves.

IV. Divers étalons à flamme, qui ne sont pas encore entrés dans la pratique courante, ont été proposés dans ces dernières années, principalement des étalons à acétylène.

En 1893, la Commission photométrique néerlandaise a conseillé l'emploi d'une lampe du type Vernon-Harcourt légèrement modifié, dans laquelle on brûlerait un mélange de 9 parties de benzine dans 100 parties d'éther; l'intensité serait 1,48 bougie anglaise.

En brûlant l'acétylène sous une pression de 30cm d'eau, dans un bec qui l'étale en une large lame mince, j'ai obtenu, dès 1895, une flamme parfaitement fixe, dont l'intensité dépasse 100 bougies pour un débit de 58 litres par heure. L'éclat est sensiblement uniforme sur une grande surface. Dans le modèle construit par M. Carpentier, l'acétylène arrive par un orifice conique, entraîne avec lui l'air nécessaire, puis il pénètre par un trou étroit dans un tube où se fait le mélange et qui se termine par un bec papillon soigneusement ajusté. La flamme est enfermée dans une boîte dont une face porte un diaphragme à iris, tandis que l'autre peut recevoir des ouvertures calibrées à l'avance.

La flamme est d'une blancheur remarquable; l'étude spectrophotométrique a montré que, dans toute l'étendue du spectre visible, la lumière de l'acétylène diffère peu de celle du platine en fusion.

M. Féry brûle l'acétylène à l'extrémité d'un tube de thermomètre, de 0,5mm environ de diamètre, nettement coupé. La hauteur de la flamme varie de 5mm à 35mm quand le débit croît de 1,25 à 6 litres par heure. Entre 10mm et 25mm, l'intensité est très sensiblement fonction linéaire de la hauteur de la flamme; le diamètre de la flamme varie très peu.

M. Féry a effectué, à l'aide de cet appareil, une série de mesures d'éclat des différentes parties de diverses flammes.

L'inconvénient présenté par la combustion de l'acétylène d'amener trop souvent un dépôt de carbone qui obstrue les ori-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

fices serait évité si l'on adoptait, avec M. Blondel (1), l'éthylène pur brûlant dans l'oxygène pur.

Un étalon à acétylène a été construit également en Amérique par M. Fessenden. La Commission de l'Institut américain des Ingénieurs électriciens fait brûler un mélange de deux parties d'acétylène et d'une partie d'hydrogène dans un courant d'oxygène pur.

M. Blondel a fait construire une lampe à cheminée dans laquelle on brûle un mélange d'alcool et de benzine cristallisable. La cheminée, qui a pour but d'éviter le vacillement de la flamme, est en métal noirci et porte deux fenêtres fermées par des lames de verre, obliquement placées, de façon à supprimer les réflexions successives.

M. Broca a proposé la lampe à naphtaline (albo-carbon), réglée de manière que la flamme du papillon soit sur le point de devenir fuligineuse : placée dans une enceinte à température déterminée, elle fournit une intensité très constante.

V. Tout ce qui précède montre suffisamment combien il est difficile d'obtenir des résultats satisfaisants avec les étalons à flamme (2). Une étude très intéressante, exécutée à l'aide du bolomètre par MM. Clayton, Sharp et W.-R. Turnbull, a révélé l'existence de variations beaucoup plus considérables que celles auxquelles on pouvait s'attendre dans l'émission totale des divers étalons.

Pour la bougie anglaise, les variations peuvent atteindre 46,5 pour 100 de l'intensité moyenne; pour la bougie allemande, l'écart maximum est de 24 pour 100 (3).

Les variations de l'étalon Hefner peuvent atteindre 22,6 pour 100; mais elles sont dues surtout aux changements de hauteur de la flamme; quand on règle la flamme avec soin, l'am-

(1) Rapport sur les unités photométriques (*Congrès international des Électriciens à Genève;* 1896).

(2) Il y aurait probablement avantage à utiliser d'une façon générale l'existence d'un maximum d'intensité des flammes démontrée par M. Crova.

(3) Une étude postérieure par le bolomètre et le photomètre, due à M. Sharp, montre que ces variations doivent être principalement attribuées aux changements de hauteur de la flamme. Une correction de ce chef « permet d'espérer raisonnablement une erreur inférieure à 2 pour 100; la probabilité de commettre une erreur supérieure à 4 pour 100 est faible ».

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

plitude des oscillations de l'intensité ne dépasse pas 2 pour 100.

La lampe Carcel a présenté des variations qui peuvent atteindre 18,2 pour 100; mais l'examen des courbes montre que, en général, les changements sont très lents; la variation a pu rester, pendant une durée de trente-cinq minutes, inférieure à 0,8 pour 100.

L'écran Methven, employé avec un brûleur Argand, donne lieu à des variations beaucoup plus considérables.

Les auteurs concluent que la lampe Carcel est le plus constant des étalons photométriques qu'ils aient étudiés.

PHOTOMÈTRES.

I. Le principe du photomètre de Bunsen a été utilisé par MM. Lummer et Brodhun pour la construction d'un appareil bien supérieur à ceux qui l'avaient précédé. La région opaque de l'écran est constituée par une partie de la face hypoténuse d'un prisme à réflexion totale, qui renvoie les rayons provenant d'une des sources. La région moyenne est, au contraire, dénuée de pouvoir réflecteur et laisse passer les rayons de l'autre source. Pour réaliser cette condition, MM. Lummer et Brodhun, retrouvant une disposition déjà indiquée par Swan (1) en 1859 et tombée depuis dans l'oubli, ont d'abord proposé d'écraser une goutte de baume de Canada entre les faces hypoténuses de deux prismes à réflexion totale; plus tard ils ont trouvé préférable de ne conserver qu'une partie de la face hypoténuse de l'un des prismes en usant le reste en forme sphérique et d'accoler cette partie plane à l'autre prisme. Quand le contact parfait est obtenu, la continuité est complète entre les deux masses de verre, et la plage commune joue le rôle d'une tache d'huile transparente sans diffusion ni réflexion. Le plan commun des faces hypoténuses est le plan de symétrie de l'appareil; les rayons qui l'atteignent, de part et d'autre, sous l'incidence de 45°, proviennent des deux faces d'un écran diffusant situé dans le même plan; ils ont été réfléchis par deux miroirs parallèles. Les rayons sortants sont ramenés dans le plan de symétrie par un prisme à deux réflexions de Kruss.

La supériorité de l'écran de Lummer et Brodhun résulte surtout de la netteté de la ligne de séparation des deux plages, qui est

(1) *Voir* KNOTT (*Phil. Mag ;* janv. 1900).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

parfaite lorsqu'on compare deux sources de même couleur. Lorsque les teintes diffèrent peu, la dispersion des prismes produit une irisation qui sépare nettement les deux champs tant que les éclats sont différents et qui se réduit à une variation continue quand on arrive à l'égalité. D'après les auteurs, le phénomène serait assez net pour permettre de comparer des sources de teinte légèrement différente (lampe Hefner et lampe à incandescence) avec la même précision que des sources de même couleur.

Quelque soin que l'on mette à réaliser un appareil parfaitement symétrique par rapport au plan commun des hypoténuses, il n'est pas rare qu'en faisant tourner l'appareil autour de l'axe du viseur, de façon à intervertir les faces de l'écran opposées aux deux sources, on n'obtienne, pour le rapport des intensités, des valeurs qui diffèrent de 3 pour 100. MM. Lummer et Brodhun pensent qu'une étude plus complète de la réflexion dite *totale* expliquerait probablement ces écarts; la question n'a pas encore été élucidée.

En admettant que la transmission et la réflexion soient totales dans les diverses plages, il est facile de calculer la sensibilité de l'appareil. Placé sur un banc de 800 mm de long, entre deux sources d'intensité égale, un photomètre parfaitement symétrique doit être déplacé de 1 mm seulement, si l'on veut produire entre les plages contiguës une différence d'éclat de 1 pour 100. Les auteurs considèrent qu'une variation de 1,5 pour 100 dans l'intensité d'une source est nettement visible et que l'erreur moyenne d'un pointé est inférieure à 0,5 pour 100.

On peut employer le même appareil en remplaçant le principe de l'égalité par celui du contraste. En interposant, sur la moitié de chacun des deux faisceaux, une lamelle de verre, on obtient quatre plages et l'on règle les distances de façon que la différence d'éclat soit la même entre les deux plages de chaque couple. Dans le modèle le plus récent de cet appareil, le champ de vision est limité par une courbe elliptique allongée verticalement; à droite et à gauche se détachent deux aires trapézoïdales qui, au moment du réglage, doivent paraître plus sombres que les demi-ellipses qui les entourent et ressortir également (1). A mesure qu'on

(1) Le grand axe disparaît également, par suite de l'égalité d'éclat des plages contiguës.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dérègle, le rapport des éclats devient de plus en plus différent de part et d'autre; l'une des plages trapézoïdales se fond dans la région qui l'entoure pour reparaître plus claire, tandis que l'autre continue à paraître de plus en plus sombre.

Ces apparences s'obtiennent au moyen de deux prismes dont les faces hypoténuses sont planes et accolées; sur l'une d'elles on a évité la transmission de la lumière en enlevant la couche superficielle à l'aide d'un jet de sable suivant trois bandes parallèles aux arêtes des prismes. La différence d'éclat des plages contiguës dont on observe le contraste est de 8 pour 100. On peut la faire varier entre certaines limites dans un autre modèle construit par les mêmes auteurs.

II. MM. Blondel et Broca ont construit un *photomètre universel,* qui permet de faire toutes les mesures utiles en Photométrie : intensité, éclairements, éclats, cette dernière évaluation étant possible aussi bien pour les sources éloignées que pour les sources rapprochées. L'appareil est symétrique, il comporte deux écrans diffuseurs transparents que l'on observe simultanément et binoculairement par l'intermédiaire de deux miroirs rectangulaires entre eux, inclinés de 45° sur les rayons. Cette partie de l'appareil peut remplacer un photomètre Bunsen ou Violle. Les mesures d'intensité peuvent se faire de plusieurs manières, notamment par l'intermédiaire d'œils de chat. Les mesures d'éclairement se font comme dans le photomètre Mascart. Pour la mesure des éclats intrinsèques, on produit des images réelles sur les écrans, et l'on procède comme dans le microphotomètre de M. Cornu. Enfin, on peut substituer aux écrans diffusifs des objets convenables pour remplacer l'étude des égales clartés par celle des égales acuités.

III. Le *photomésomètre* de M. Blondel applique les principes de la méthode de M. Allard pour la détermination de l'intensité moyenne, c'est-à-dire de la quantité

$$I_m = \frac{1}{2}\int_0^{\pi} I_\alpha \sin\alpha \, d\alpha,$$

α désignant l'angle que fait avec un rayon fixe une droite qui

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

balaye le plan dans lequel on observe. On remplace l'évaluation de cette intégrale par celle de n termes

$$I_m = \frac{1}{n} \sum_0^n I_\alpha \sin\alpha.$$

M. Blondel renvoie les rayons de l'arc sur le photomètre au moyen d'un réflecteur formé de vingt-quatre miroirs assemblés en tronc de pyramide régulière. Pour mesurer l'intensité moyenne, il place l'arc au centre d'une sphère munie d'ouvertures en forme de fenêtres accolées, limitées par des portions de méridiens et sous-tendant un angle horizontal proportionnel à $\sin\alpha$; on peut remplacer toutes ces fenêtres par une seule échancrure dont la forme se détermine aisément; on répartit plusieurs de ces échancrures sur la surface de la sphère que l'on fait tourner à 200 tours par minute.

La courbe photométrique peut se tracer aussi très facilement si l'on emploie une sphère portant des ouvertures en nombre égal à celui des miroirs et permettant l'accès de la lumière successivement sur chacun d'eux; c'est le renversement de la méthode qui consiste à faire tourner un miroir autour d'une source.

IV. Dans le *lumen-mètre* de M. Blondel le centre géométrique de la source à étudier coïncide avec le centre de figure d'une sphère coupée dans deux directions opposées, suivant deux fuseaux de 18° chacun qui la séparent en deux parties; les rayons tombent sur un miroir ellipsoïdal qui les fait converger sur un écran diffusant où ils dessinent une tache lumineuse dont le diamètre varie de 0,20 m à 0,50 m et dont on détermine l'intensité à l'aide d'un photomètre placé à une distance comprise entre 2 m et 5 m. Si la source est symétrique autour d'un axe de révolution, une seule mesure suffit pour obtenir le flux lumineux total. Dans un type beaucoup plus simple le miroir est remplacé par un tronc de cône de révolution de 100° d'angle au sommet recouvert d'une substance diffusante dont l'*indicatrice* de diffusion soit voisine du cercle, c'est-à-dire qui obéisse sensiblement à la loi du cosinus. On pourrait encore simplifier l'appareil en employant comme écran diffusant la partie utile du tronc de cône précédent, de façon à éviter l'emploi de la sphère à fuseaux découpés.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

V. Le point le plus important à signaler dans les progrès de la Spectrophotométrie est l'étude de l'influence qu'excerce la répartition de la lumière dans le spectre sur l'intensité de la lumière provenant d'une fente collimatrice. Ce n'est que quand la dispersion est grande et la fente étroite qu'on peut admettre la proportionnalité de la largeur de la fente à l'intensité lumineuse obtenue dans une région donnée du spectre. Le fait a été établi par les expériences de M. Lummer et de M. Murphy.

Il est aussi à noter que, contrairement à une opinion quelquefois admise, on ne doit pas considérer la Photométrie hétérochrome comme facilitée par la réduction des intensités à une valeur assez faible pour que la notion de couleur disparaisse. D'après M. Broca, dont les expériences confirment celles de nombreux auteurs, la diminution de la sensibilité différentielle avec l'éclairement est à peu près aussi rapide que la diminution de la notion de différence de couleur.

VI. Les variations d'intensité nécessaires dans les expériences de Spectrophotométrie s'obtiennent souvent par l'application de la loi de Talbot, en faisant tourner devant la source un système de deux disques évidés suivant des secteurs complémentaires et qu'on déplace l'un par rapport à l'autre de façon à régler l'espace libre. La proportionnalité de l'intensité lumineuse efficace à l'angle des ouvertures a été discutée à maintes reprises; d'après les expériences de MM. Lummer et Brodhun elle serait exacte au moins à 1 pour 100 près (1); d'une étude approfondie des phénomènes dont la rétine est le siège, M. Charpentier conclut que cette proportionnalité ne saurait subsister que si chaque admission de lumière ne dépasse pas $\frac{1}{100}$ de seconde (2).

VII. MM. Lummer et Brodhun ont construit un spectrophoto-

(1) A ce propos rappelons que, d'après les études de M. Bouasse et de M. de la Baume Pluvinel, la vitesse de rotation aurait une influence notable sur l'action photographique et qu'on ne saurait admettre la proportionnalité de cette action à la durée totale de l'exposition de la plaque aux rayons lumineux.

(2) Dans un travail très intéressant, dont l'étude nous entraînerait en dehors de notre cadre, M. Porter a déterminé la durée de la persistance de l'impression lumineuse maxima, c'est-à-dire la durée minima que doivent avoir les éclipses; cette durée varie avec la couleur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

mètre dans lequel la superposition des rayons provenant de deux collimateurs rectangulaires s'effectue au moyen d'un système de deux prismes à réflexion totale dont les arêtes sont verticales; les faces hypoténuses sont planes comme dans le photomètre à contraste; sur l'une d'elles la couche superficielle est enlevée suivant des bandes normales aux arêtes. M. Brace a basé sur le même principe la construction d'un appareil plus simple; son spectrophotomètre se compose de deux prismes rectangles égaux, dont l'ensemble constitue un prisme équilatéral; l'une des deux faces en contact est argentée, dans sa partie moyenne, suivant une bande perpendiculaire aux arêtes, qui sont verticales. Les deux prismes sont collés par du baume de Canada ou réunis par l'intermédiaire d'une goutte de naphtaline monobromée α. Deux collimateurs envoient, sous le même angle, leurs faisceaux aux deux faces qui sont dans le prolongement l'une de l'autre; une partie de l'un des faisceaux est réfléchie presque totalement sur l'argenture; une partie de l'autre traverse la série des deux prismes; les directions sont encore parallèles à la sortie pour les rayons de même couleur. On obtient dans une lunette deux spectres, dont l'un s'étend entre les deux parties de l'autre.

VIII. La Photométrie hétérochrome semble avoir réalisé un progrès notable depuis l'application d'une méthode proposée par M. Charpentier et M. Rood. Quand on observe un objet soumis alternativement aux rayons de deux sources de couleur très différente, la succession produit, en général, un papillotement que l'on peut faire disparaître en faisant varier graduellement l'intensité de l'une des sources. On peut prendre cette condition comme définition de l'égalité d'intensité des deux sources. Malheureusement, il ne semble pas établi que le papillotement qui a disparu dans un premier réglage ne reparaisse pas, quand on fait varier dans un même rapport les deux intensités.

Pour utiliser le nouveau principe, M. Whitman divise en deux parties égales, par une section méridienne, un tronc de cône en bois, peint en blanc, de 3,7 cm de haut, dont les bases ont pour diamètres respectivement 20 cm et 15 cm; il applique les deux masses l'une contre l'autre, après avoir fait tourner l'une d'elles de 180°. L'ensemble est mis en rotation autour de l'axe

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

commun des cônes, qui est parallèle à celui du photomètre.

Dans le modèle décrit par M. Rood, les sources éclairent directement les deux faces verticales et rectangulaires d'un prisme d'albâtre (comme dans le photomètre à relief d'Yvon). Devant le prisme oscille une lentille cylindrique plan-concave dont les génératrices sont parallèles à l'arête et qui envoie successivement dans l'œil de l'observateur des rayons provenant des deux faces; on déplace la source à étudier jusqu'à faire disparaître le papillotement (1).

MESURES PRÉCISES DES COURANTS ALTERNATIFS ET POLYPHASÉS;

PAR M. G.-L. ADDENBROOKE.

Voici plusieurs années que je m'occupe de ce sujet, et j'ai aujourd'hui l'honneur de faire connaître au Congrès international d'Électricité les résultats de mes expériences et de mes recherches.

Il y a une certaine opportunité à présenter pour la première fois ce travail à Paris : lorsque, il y a à peu près seize ans, je commençai mes études sur les courants alternatifs, le livre classique sur la matière était le Traité bien connu de MM. Mascart et Joubert : ces savants employaient les instruments électrostatiques, le professeur Mascart ayant combiné son électromètre bien connu d'après celui de Lord Kelvin; et depuis il y a toujours eu en France une tendance à employer les instruments et les méthodes électrostatiques.

A peu près à la même époque paraissaient les remarquables travaux de M. Th. Blakesley, dans lesquels il montrait l'avantage des méthodes géométriques pour l'étude des problèmes de courants alternatifs, et signalait en même temps la possibilité d'appliquer l'électrodynamomètre comme wattmètre pour les courants alternatifs. Comme on le sait, c'est l'électrodynamomètre qui a été le plus employé jusqu'à présent pour la mesure de ces courants; et il est juste de dire que la plupart des travaux modernes sur les

(1) Rappelons, en quittant ce sujet, que l'usage le plus courant actuellement semble être celui qui consiste à filtrer les rayons des sources colorées à travers des papiers très légèrement teintés.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

courants alternatifs sont sortis des observations faites au moyen de cet instrument. Son emploi présente cependant quelques inconvénients et quelques incertitudes, et je n'ai jamais pu me débarrasser de la tendance à employer les méthodes électrostatiques, que j'avais tirée de travaux de MM. Mascart et Joubert, bien que j'en aie été parfois tenté. A l'époque dont je parle, j'ai construit un électromètre qui était à peu près l'intermédiaire entre le type de Lord Kelvin et celui de M. Mascart, et, tout en reconnaissant parfaitement ses imperfections, néanmoins le parti que je pus en tirer pour la mesure des courants alternatifs me convainquit de l'avantage du principe de ces mesures, de telle sorte que je n'ai jamais pu me défaire du désir de posséder une méthode générale de mesure des courants alternatifs fondée sur les principes électrostatiques. Je ne parlerai pas ici des détails de ce travail, de ses échecs, de ses difficultés. Il me suffit de dire que je n'ai jamais désespéré et que, pendant les trois ou quatre dernières années, le succès ne s'est jamais démenti, et a abouti à la méthode et aux appareils que je me propose maintenant de décrire.

Le point principal qui m'avait frappé depuis plusieurs années était la nécessité de considérer la question comme un ensemble.

Examinons pour un instant les éléments du problème. Lorsque l'on mesure les courants alternatifs, il faut faire attention à ce fait que, lorsqu'il y a inductance ou capacité dans le circuit (comme cela a lieu généralement), le courant dépend de trois questions :

1° La résistance du circuit et l'énergie qui s'y dépense;

2° L'inductance du circuit;

3° La capacité du circuit.

Les effets de l'inductance et de la capacité étant exactement opposés en phase se contre-balancent l'un l'autre autant qu'il est possible, le facteur le plus grand prédominant, de sorte que la phase du courant correspondant sera de 90° en arrière ou en avance du courant énergétique, suivant que la self-induction ou la capacité du circuit domine. Ce courant, composé avec le courant énergétique, produit un courant résultant qui est le courant réel existant dans le circuit, et que je préfère appeler le *courant total* plutôt que le *courant apparent;* ce courant, évidemment, ne sera pas en phase avec l'une ou l'autre de ses composantes.

Afin de mesurer les composantes d'un courant de cette espèce,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

il est nécessaire d'adopter un principe qui permettra de distinguer le courant de self-induction et le courant de capacité, quel que soit celui des deux qui prédomine, afin de pouvoir le séparer du courant énergétique soit par une mesure directe, soit par le calcul.

D'après cela, il existe plusieurs principes sur lesquels on peut fonder des méthodes de ce genre.

En exécutant les mesures, on rencontre cependant certains inconvénients inhérents à la plupart de ces principes et, par une sorte de survivance du meilleur, l'un d'eux, celui du wattmètre, est arrivé à être presque universellement employé. Par de légères modifications, ma méthode et mes instruments peuvent être employés pour des mesures effectuées d'après l'un quelconque de ces principes, mais comme celui du wattmètre est presque toujours préférable pratiquement, j'adapterai ma description à celui-ci.

En supposant donc que l'on emploie le principe du wattmètre, il y a trois mesures à effectuer pour obtenir les facteurs fondamentaux d'uu courant alternatif. Lorsque ces facteurs sont connus, on peut en déduire les autres caractéristiques du courant.

On doit mesurer :

1° Les volts appliqués;

2° Les ampères apparents ou, comme je préfère les appeler, les *ampères totaux;*

3° Les ampères ou les watts effectifs (si l'on mesure directement les watts effectifs, et si l'on connaît les volts appliqués, on peut en déduire directement les ampères effectifs).

Connaissant ces quantités, nous pouvons en déduire directement le facteur de puissance, l'angle de phase, et le courant magnétisant ou de capacité, ou leur différence si tous les deux existent.

S'il y a inductance et capacité, nous pouvons, en mesurant la capacité et utilisant les données précédentes, trouver l'inductance. Si nous connaissons la fréquence et la capacité, nous pouvons obtenir, toujours avec les données précédentes et sans autre observation, le coefficient de self-induction du circuit et ses autres caractéristiques.

Tel est le problème général. Ma première idée fut d'employer un voltmètre électrostatique ordinaire pour mesurer les volts et un électrodynamomètre Siemens pour mesurer les ampères; en effet, bien qu'il soit très important de connaître les ampères totaux

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

parcourant le circuit, il n'est pas aussi important de les mesurer avec la même précision que les volts et les watts; de plus l'électrodynamomètre est un instrument plus simple et plus exact quand il est employé comme ampèremètre que quand il est employé comme wattmètre. Par suite, dans mes premiers travaux, j'ai consacré tous mes efforts à imaginer un wattmètre électrostatique convenable et un moyen pour l'étalonner. Mais, lorsque j'eus atteint ce but, je vis qu'il serait très désirable de pouvoir étalonner le voltmètre et l'ampèremètre par la même méthode que le wattmètre, à de légères modifications près, et de faire les lectures de la même manière : et je vis aussi que, si je pouvais atteindre ce but, l'ensemble des instruments pourrait être combiné de façon à permettre les mesures entre des limites plus étendues qu'il n'eût été possible autrement.

Pour transformer l'électromètre en wattmètre, j'ai introduit

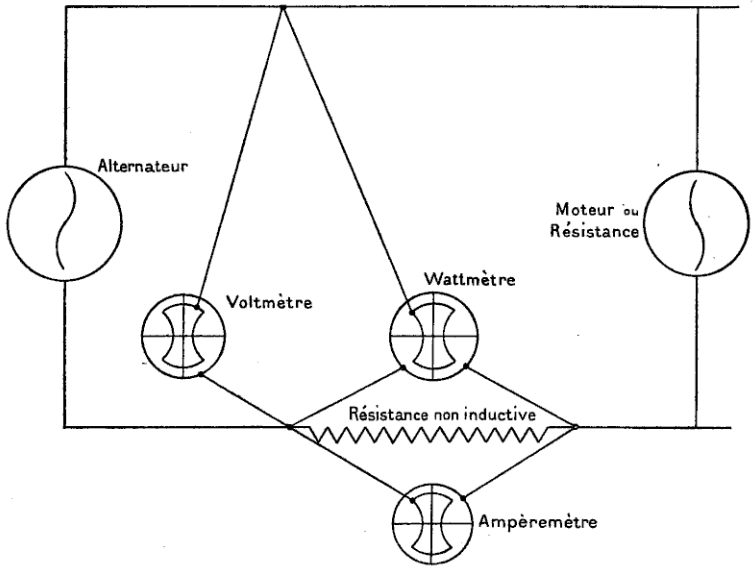


Fig. 1.

dans le circuit à étudier une résistance non inductive aux bornes de laquelle sont attachés les quadrants, tandis que l'aiguille communique avec l'autre côté du circuit. En arrangeant l'instrument de cette manière, et le calibrant d'une manière convenable, il est

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

possible, dans des conditions déterminées, de faire de l'électromètre un wattmètre à lecture directe.

Ayant nécessairement dans le circuit la résistance mentionnée ci-dessus, il est clair que, s'il était possible de faire un voltmètre électrostatique suffisamment sensible pour mesurer la faible différence de potentiel aux deux extrémités de cette résistance, un tel instrument, ainsi employé, deviendrait une forme très commode d'ampèremètre : je décrirai plus loin comment j'ai réussi à le réaliser.

Je décrirai aussi plus loin la forme de voltmètre électrostatique que j'ai employée pour lire les volts appliqués.

L'arrangement théorique des instruments disposés sur un circuit où l'on veut faire simultanément les trois mesures fondamentales est représenté dans la *fig.* 1.

Je puis dire que j'ai pu obtenir dans l'instrument employé comme ampèremètre une sensibilité telle qu'il est possible de faire de bonnes lectures avec une chute de 1 à 2 volts dans la résistance non inductive insérée dans le circuit. En pratique, je dispose mes instruments de telle façon que la résistance non inductive intercalée dans le circuit cause une chute de tension d'environ 1,5 volt en moyenne, ce qui est aussi très convenable pour le wattmètre. Cette chute de tension est commode, parce qu'elle est à peu près égale à la force électromotrice de l'élément Clark qui est employé pour étalonner les instruments, et par conséquent les lectures se rapprochent de la partie de l'échelle pour laquelle les instruments sont étalonnés. Pour obtenir ce résultat, c'est-à-dire pour obtenir toujours une bonne déviation sur l'instrument, j'emploie une série de résistances non inductives formées de bandes de manganine. En pratique, ces bandes ont environ 1 mètre de long; il est commode de commencer par un fil ou une bande pouvant supporter 1 ampère, puis de faire la suivante pour deux ampères, la troisième pour 4 ampères, de telle sorte que dix bandes environ suffiront, en général, pour tous les courants employés dans la pratique. Bien entendu, pour des cas spéciaux, on peut faire des résistances plus élevées ou plus faibles, et, puisque les instruments ne prennent que des courants infiniment petits, la même série d'instruments pourra mesurer des courants variant de $\frac{1}{1000}$ jusqu'à 1000 ampères ou plus avec une erreur relative constante et, par conséquent,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

les instruments sont pratiquement universels, à ce point de vue, au moins d'une manière approximative. En arrangeant ces résistances de manière à pouvoir les monter en parallèle, on peut, si on le désire, travailler toujours avec la même déviation des instruments.

En ce qui concerne les courants à haute tension, il y a deux manières de procéder. Les instruments eux-mêmes peuvent être construits de façon à être mis directement sur le circuit à haut voltage, et ma première idée a été de les employer ainsi. Il y a cependant des difficultés considérables à étalonner directement

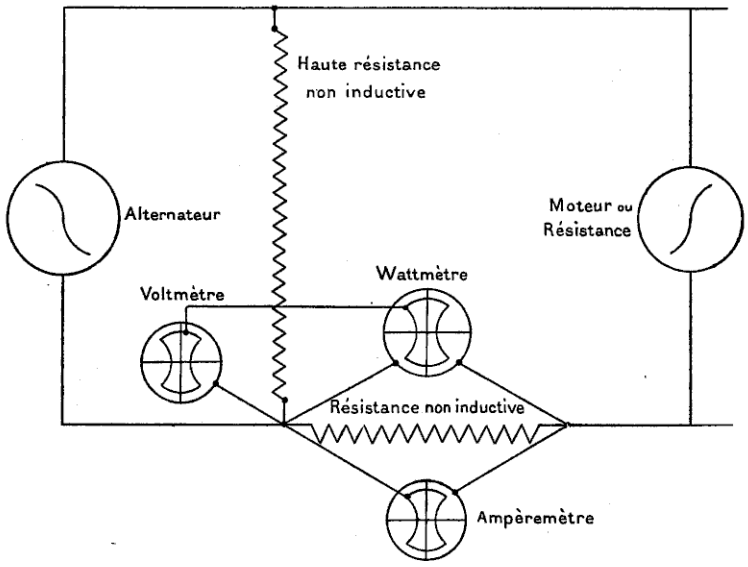


Fig. 2.

les instruments pour de hauts voltages, et je préfère, pour les usages ordinaires, procéder comme l'indique la *fig.* 2.

Les instruments eux-mêmes sont étalonnés pour travailler sur des circuits de 100 à 200 volts et, pour de plus hautes tensions, une grande résistance non inductive est placée aux bornes du circuit, et les instruments sont placés en dérivation sur une fraction connue de cette résistance, cette fraction étant choisie de manière à donner 100 ou 200 volts aux bornes de l'instrument. Ces résistances se font facilement et peuvent être employées pour un voltage quelconque sans introduire d'erreur appréciable; employé de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

cette façon, le même ensemble d'instruments devient pratiquement universel par rapport aux tensions comme par rapport aux courants.

Tels sont, dans leurs lignes générales, les principes d'après lesquels j'ai travaillé. Pour mettre ces principes en pratique, il fallait étudier une méthode complète d'application, ainsi qu'un ensemble d'appareils, d'instruments et d'autres accessoires. Il

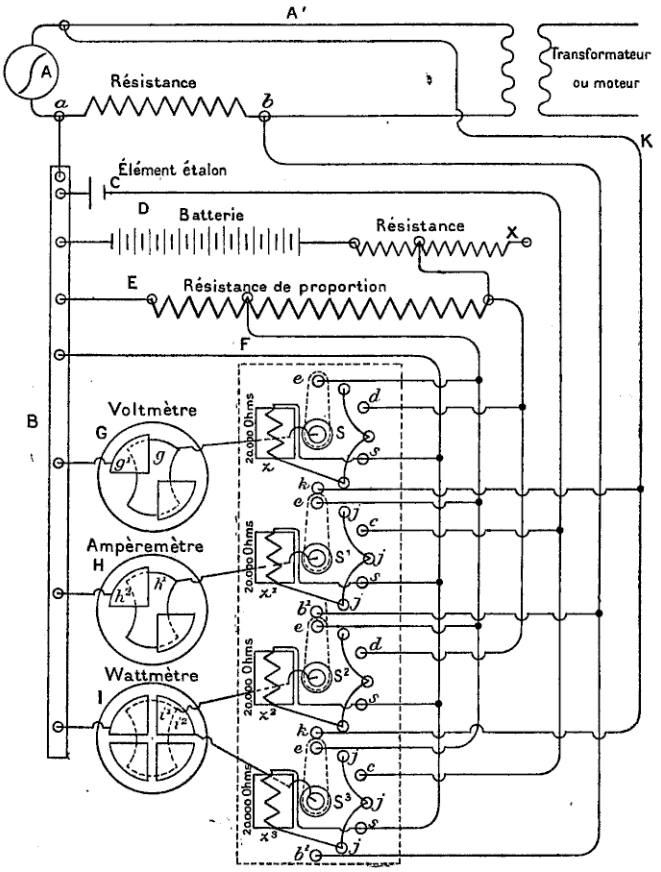


Fig. 3.

reste maintenant à décrire cette méthode, et le dessin de l'appareil et des instruments, et de montrer comment ils sont employés et appliqués pour le but que nous avons en vue.

La *fig.* 3 est un diagramme montrant la méthode employée pour effectuer les connexions des instruments dans un circuit sur lequel

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

on veut faire des mesures, et la même figure donne le diagramme de la méthode employée pour l'établissement des instruments, ainsi que les dispositions des commutateurs qui permettent de faire les différentes connexions : ceci s'obtient en tournant simplement certaines clefs, une fois les appareils mis en place.

Dans le diagramme, A indique l'alternateur fermé sur un circuit principal A′ sur lequel est placée la résistance non inductive *ab* mentionnée ci-dessus. Du point *a* part une connexion jointe à une barre omnibus ou commune, à laquelle aboutissent un certain nombre des circuits mentionnés ci-dessous. Le meilleur arrangement se fait dans l'ordre suivant :

C est un étalon Clark ; D est une batterie suffisante pour donner un voltage plus élevé que celui qui est nécessaire pour étalonner les instruments. J'estime qu'une batterie de petits accumulateurs est très commode pour cet objet ; si l'on n'a pas une telle batterie à sa disposition, les instruments peuvent être étalonnés en faisant usage d'un circuit d'éclairage, pourvu que l'on ait soin de faire les lectures à une tension semblable, ce qui peut être observé en mettant un voltmètre sur le circuit d'éclairage pendant que l'on fait les lectures au wattmètre. X est une résistance variable en série avec la batterie, E est une boîte de bobines de résistance arrangée de façon qu'une résistance de 100 000 ohms est toujours maintenue entre ses extrémités ; mais au moyen d'un contact mobile, une troisième connexion peut être faite en un point quelconque de cette résistance.

Les extrémités extérieures de cette résistance E que j'appelle *résistance de proportion* communiquent avec la barre commune et avec la résistance X, de façon que la résistance de proportion forme un shunt sur la batterie et la résistance X. Supposons que la force électromotrice de la batterie soit de 105 volts : en faisant varier convenablement la résistance X, nous pouvons nous arranger de façon qu'il y ait exactement 100 volts entre les extrémités de la résistance de proportion E ; nous pouvons alors, en plaçant le contact de la résistance de proportion en un point convenable, obtenir exactement un voltage quelconque entre 0 et 100 volts. F est un court-circuit entre la barre B et les plots *s* des commutateurs décrits ci-dessous, par lequel un quelconque des instruments peut être mis en court-circuit et son zéro vérifié. G est un

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

voltmètre électrostatique muni d'un commutateur S; H est un ampèremètre muni d'un commutateur S^1, et I est un wattmètre muni de deux commutateurs S^2 et S^3. Le commutateur S du voltmètre a quatre directions *e*, *d*, *s* et *k*; le plot *s* met l'instrument en court-circuit, comme on l'a vu; le plot *d* le met en rapport avec la batterie D; le plot *e* avec la résistance de proportion E, de telle sorte qu'une partie déterminée ou une fraction de la résistance totale peut être mesurée à part, et qu'un voltage quelconque, dans les limites de la force électromotrice de la batterie, peut être appliqué à l'aiguille *g* du voltmètre G, le quadrant g^1 communiquant avec la barre B. Par ce moyen, le voltmètre peut être gradué sur toute la longueur de son échelle, comme on l'explique plus bas; le plot *k* sert à mettre l'aiguille *g* en relation avec le circuit K sur lequel les mesures doivent être faites.

Le commutateur de l'ampèremètre S^1 est, de même, muni de quatre plots *e*, *c*, *s* et b^1. Le plot *e* met l'aiguille en relation avec la résistance de proportion E pour la porter à un potentiel quelconque, et permet ainsi de calibrer l'instrument dans toute l'étendue de son échelle. Le plot *c* met l'aiguille h^1 en communication avec la pile étalon C, le quadrant h^2 étant en communication avec la barre B; le plot *s* sert à court-circuiter l'instrument; et le dernier plot b^1 met en rapport l'ampèremètre avec le circuit principal A' à l'extrémité de la résistance non inductive mesurée *ab*.

Le wattmètre a une double série de plots : l'une *e*, *d*, *s*, *k* pour le commutateur S^2 exactement semblable et avec les mêmes connexions que pour le voltmètre G; l'autre, correspondant au commutateur S^3, comprend un plot *e* permettant de mettre le quadrant i^2 en relation avec la résistance de proportion E comme plus haut; un plot *c* pour le mettre en relation avec la pile-étalon, exactement comme pour l'ampèremètre H; un plot S pour court-circuiter les quadrants de l'instrument; un plot b^1 pour le mettre en communication avec l'extrémité *b* de la résistance non inductive mesurée dans le circuit principal, comme il est décrit pour l'ampèremètre H. Le commutateur S^2 met en rapport l'aiguille i^1 avec la première série de plots *e*, *d*, *s* et *k*, comme il est indiqué dans la *fig.* 1, et le commutateur additionnel S^3 met en rapport les quadrants du wattmètre i^2 avec la seconde série des plots *e*, *c*, *s*, b^1.

Lorsqu'on fait passer les instruments d'une série de connexions

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

à une autre, il est très désirable d'avoir un moyen de les mettre séparément en court-circuit à travers une haute résistance d'environ 20 000 ohms pendant que l'opération s'effectue, autrement les quadrants doivent être laissés isolés pendant un certain temps, ce qui pourrait amener de violentes déviations de l'aiguille, à cause de charges sur l'ébonite ou sur d'autres surfaces voisines qui autrement seraient difficiles à éviter. On y a pourvu dans chacun des commutateurs au moyen de contacts intermédiaires mis en rapport, comme on le voit sur la figure, avec des bobines d'une résistance d'environ 20000 ohms, une pour chaque série des contacts de commutateurs, comme on le voit en z, z^1, z^2, z^3.

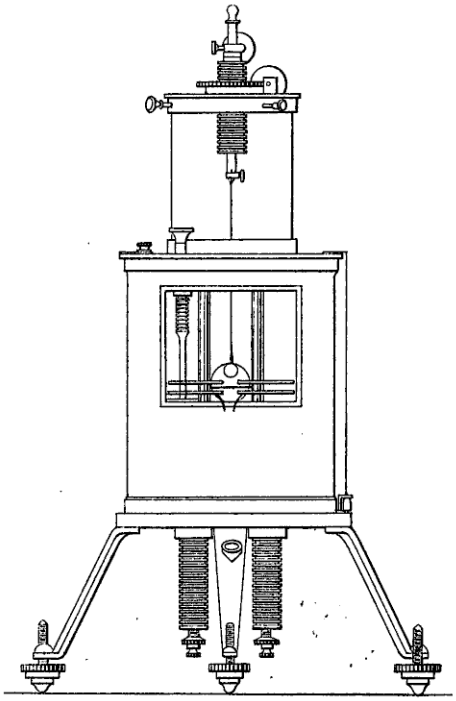


Fig. 4. — Wattmètre électrostatique.

Arrivons maintenant aux instruments eux-mêmes. Ils sont électrostatiques et sont tous construits sur un même type, ce qu'on pourra mieux voir en se reportant aux dessins ci-joints. Le premier (*fig.* 4) montre une vue de face du principal d'entre eux, le wattmètre; on peut noter ici que cet instrument remplira aussi les

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

fonctions d'un voltmètre et d'un ampèremètre (ou voltmètre à basse lecture), en changeant simplement la suspension de l'aiguille et en ajustant convenablement les quadrants, ainsi qu'il est décrit ci-après. L'instrument représenté est muni d'un très haut isolement, pour qu'il puisse être employé à la mesure de hautes résistances, de capacités, etc. Mais un si grand isolement n'est pas nécessaire lorsque l'instrument est employé pour mesurer simplement des courants et, dans ce cas, bien que la construction générale reste la même, on peut y apporter quelques simplifications; de plus, lorsque l'"instrument doit être employé seulement comme ampèremètre, c'est-à-dire comme voltmètre électrostatique sensible, ou lorsqu'il est employé comme voltmètre pour 100 ou

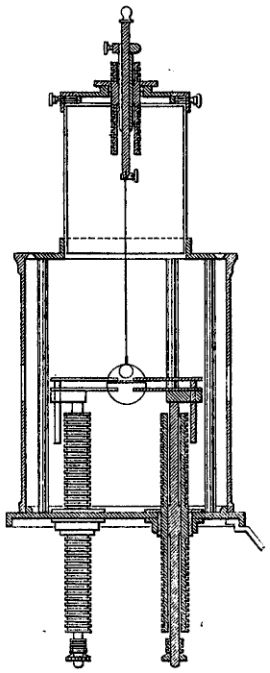


Fig. 5. — Coupe du wattmètre électrostatique.

200 volts, d'autres simplifications peuvent être apportées. La *fig.* 5 donne une coupe du wattmètre.

L'arrangement général des instruments a été choisi de manière à les rendre aussi pratiques que possible à l'usage, tout en assurant l'exactitude. La suspension consiste généralement en bandes de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

bronze phosphoreux, du genre de celles qui ont été employées par MM. Ayrton et Perry, et de celles si généralement employées pour le galvanomètre d'Arsonval. On a ainsi une excellente communication avec l'aiguille, de sorte qu'il est inutile d'employer l'acide sulfurique. De plus, en employant une aiguille particulièrement légère, je trouve qu'il est possible d'avoir un décrément suffisant sans autre forme d'amortissement et que, par conséquent, l'aiguille peut être suspendue librement dans l'air, et rien ne peut interférer avec son mouvement propre. Cependant, je puis aussi employer avec succès un amortisseur lorsqu'il est nécessaire de faire des lectures rapides. Il est à remarquer que les quadrants n'ont pas la forme d'une boîte, comme c'est généralement le cas, mais consistent en deux séries de plateaux plats, dont l'une (généralement la supérieure) est réglable, et peut être même tout à fait séparée si on le désire. Ce simple progrès, bien qu'il n'ait pas de rapport avec le fonctionnement de l'instrument, augmente beaucoup les limites de son emploi et facilite son réglage et son transport : en fait, il est l'équivalent de l'adjonction d'un shunt universel à un galvanomètre. On remarquera que l'aiguille peut être déplacée verticalement au moyen d'un mouvement à crémaillère, et peut être mise ainsi au centre des quadrants, quelle que soit la position des plateaux supérieur et inférieur. Pour de hautes tensions, le plateau supérieur peut être tout à fait enlevé et l'aiguille éloignée à quelque distance des quadrants inférieurs. D'autre part, l'aiguille peut être abaissée tout près des quadrants inférieurs, et les quadrants supérieurs peuvent être aussi abaissés jusqu'à ce que l'espace intermédiaire ne dépasse pas 1 mm. Dans ces circonstances, une déviation de 50mm à 100mm, avec l'échelle à une distance de 2 m, peut correspondre, avec la bande de suspension la plus sensible, à une tension de 1 volt lorsque l'instrumeut est employé à la manière idiostatique ou comme simple voltmètre, et c'est sous cette forme que l'instrument peut être employé comme ampèremètre, en le mettant en communication avec les deux extrémités d'une résistance présentant une chute de tension de un ou deux volts, comme il a été dit plus haut. Si nous prenons cet ampèremètre comme instrument fondamental, le wattmètre correspondant doit avoir une suspension moins sensible, et doit être employé avec les quadrants plus écartés. En fait, il

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

doit avoir à peu près $\frac{1}{100}$ de la sensibilité de l'ampèremètre.

Le voltmètre doit être encore beaucoup moins sensible, cette réduction de sensibilité étant obtenue par l'emploi d'une série seulement de quadrants et d'un bande de suspension beaucoup plus épaisse et plus courte; dans ce dernier cas, à cause de la grandeur du couple, il vaut mieux réduire la période en amortissant avec de l'huile. Dans chacun des instruments, en ôtant un ou plusieurs des quadrants supérieurs et en dévissant la vis centrale de la partie supérieure de l'appareil, cette partie peut être enlevée, entraînant avec elle l'aiguille que l'on peut ainsi changer facilement. Pour le transport, il est simplement nécessaire de faire reposer l'aiguille sur le quadrant inférieur, et les quadrants supérieurs sur l'aiguille, ce qui la serre fortement, si bien que l'instrument peut être secoué ou renversé sans qu'il en résulte aucun dommage. Les aiguilles étant plates et très légères ne sont que très légèrement affectées par les vibrations, de sorte que les instruments peuvent être employés dans les étages supérieurs et dans le voisinage des machines. En pratique, il est bon de mettre dans le circuit de chaque aiguille une lampe de 250 volts et de 5 bougies. Je trouve que cela est préférable à n'importe quel fil fusible, puisque le courant qui peut ainsi passer à travers l'instrument est trop petit pour endommager la bande de suspension ou l'aiguille, et qu'en même temps l'allumage de la lampe donne un avertissement instantané si par hasard l'aiguille vient toucher les quadrants.

Une bonne manière d'arranger les instruments pour la mesure des courants alternatifs est indiquée par les diagrammes ci-après (*fig.* 6 et 7), dont l'un est une élévation, l'autre un plan.

Les lectures se font par réflexion, et les échelles sont à une distance de 2 m environ des instruments.

En supposant les instruments ainsi disposés, à l'aide des appareils d'étalonnement, on établit des déviations approximativement égales à celles qu'ils sont destinés à donner pour des voltages donnés des quadrants et des aiguilles respectivement. La sensibilité requise est alors obtenue approximativement en faisant varier la distance des plateaux supérieurs et inférieurs dans deux des instruments et la distance de l'aiguille au plateau inférieur dans le voltmètre jusqu'à ce que l'on ait obtenu, à très peu près, les déviations voulues. Il faut remarquer de plus que les échelles

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

elles-mêmes sont placées sur des supports glissants, et que l'ajustement final s'obtient en rapprochant ou éloignant les échelles des instruments jusqu'à ce que les voltages donnés produisent des déviations déterminées sur les échelles. De cette façon, les instruments peuvent être gradués respectivement en watts, en volts et ampères.

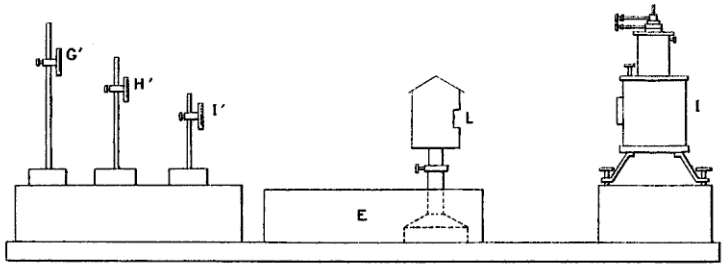


Fig. 6.

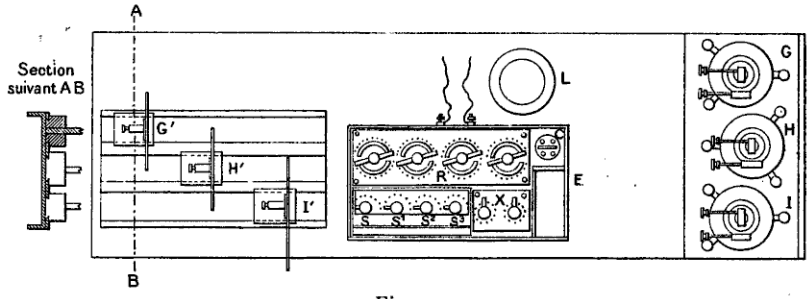


Fig. 7.

Pour étalonner les instruments, ce qui se fait très rapidement, nous procédons comme il suit :

1° Mettre tous les instruments en court-circuit, placer les échelles à peu près au centre de leur étendue de lecture, et ajuster l'image au zéro de chaque échelle. Puis tourner le commutateur de l'aiguille du wattmètre pour mettre cette aiguille en communication avec la batterie, les quadrants restant en court-circuit; observer s'il y a quelque déviation : s'il y en a une, changer le quadrant ajustable en tournant le bouton d'ébonite jusqu'à ce que l'aiguille ne soit plus déviée lorsque la batterie est reliée ou séparée. Laissant alors la batterie en connexion avec l'aiguille (ce qui donnera une tension un peu supérieure à 100 volts),

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

déplacer le commutateur relié à une paire de quadrants de manière à relier ces quadrants à un pôle de l'étalon Clark; observer la déviation, qui doit être au moins de 150 mm. S'il n'en est pas ainsi, changer l'échelle ou augmenter la sensibilité de l'instrument. Placer alors la résistance de proportion à 1440, ce qui correspond à la force électromotrice de l'étalon Clark (en supposant que la résistance totale est de 100000 ohms, que la différence de potentiel entre ses extrémités est de 100 volts, et que la force électromotrice de l'étalon Clark est 1,44). Tourner maintenant le commutateur des quadrants de façon que les quadrants soient en relation avec l'extrémité positive de la résistance de proportion au lieu de l'être avec le pôle positif de l'étalon; observer de nouveau la déviation. Si elle est plus grande qu'auparavant, la résistance X doit être changée afin d'introduire une résistance plus élevée dans le circuit de la batterie; si elle est moindre, la résistance X doit être diminuée. La résistance X peut être facilement ajustée après deux ou trois essais, de façon que la déviation demeure la même soit que l'électromètre communique avec l'élément Clark, soit qu'il communique avec le point de contact de la résistance de proportion. Il est évident que, dans ces circonstances, la différence de potentiel entre les extrémités de la résistance de proportion doit être de 100 volts. Nous connaissons ainsi le voltage de l'aiguille et des quadrants, ce qui donne les facteurs nécessaires pour obtenir la constante de l'électromètre. Si l'échelle est graduée en millimètres, il est alors facile d'ajuster l'instrument et la distance de l'échelle de façon que la lecture soit de 144 mm. Cela étant, si les quadrants communiquent avec les deux extrémités d'une résistance connue en ohms et fractions d'ohm, insérée dans un circuit, et si l'aiguille communique avec l'autre côté de ce circuit, en admettant que la chute de tension ne soit pas très inférieure à 100 volts, l'instrument donne directement la puissance en watts, à condition de multiplier les lectures par l'inverse de la résistance; si ces résistances sont mesurées par leur conductibilité, il nous suffira de multiplier les lectures par cette conductibilité, de façon que l'instrument devient un wattmètre à lecture directe d'une étendue presque universelle. Ayant ainsi obtenu exactement 100 volts aux deux extrémités du circuit de la batterie, le calibrage de l'électromètre pourra s'obtenir dans toute l'étendue de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

son échelle en faisant varier le point de contact de la résistance de proportion. On trouve ainsi que l'échelle est proportionnelle à moins de $\frac{1}{2}$ pour 100 au-dessus de 200 mm, et 1 pour 100 au-dessus de 300 mm. On peut observer que, en calibrant l'instrument dans les conditions exactes de l'usage, nous évitons la nécessité de l'emploi d'une formule de déviation.

2° Pour graduer le voltmètre il suffit de le mettre en communication avec les extrémités de la résistance de proportion, puisque la différence de potentiel entre ces extrémités est exactement 100 volts. La sensibilité de l'instrument sera alors ajustée en élevant ou en abaissant l'aiguille et en déplaçant l'échelle en avant ou en arrière de façon que, l'instrument étant ainsi relié, la déviation soit de 100 divisions sur l'échelle. L'instrument peut être calibré pour une lecture inférieure à celle lue sur l'échelle en changeant le point de proportion de la quantité voulue; mais les lectures sont presque exactement proportionnelles à une échelle calculée théoriquement.

3° Le voltmètre sensible électrostatique, qui est employé comme ampèremètre, est calibré en le mettant en rapport directement, au moyen de son commutateur, avec les pôles de l'élément Clark, ou avec les points correspondants sur la résistance de proportion, et cet instrument peut aussi être calibré dans toute son échelle en employant cette résistance de proportion. Cpendant, à cause de sa délicatesse et de sa construction, l'échelle de cet instrument n'est pas aussi proportionnelle que dans le cas des deux autres, et par conséquent il est bon de lui construire une échelle, en mettant la résistance de proportion aux points voulus, et en notant les déviations correspondantes. Ceci peut être fait rapidement, et, une fois l'échelle construite, l'instrument peut être ajusté pour lire exactement, comme on l'a fait pour les autres.

Les instruments sont maintenant tous calibrés, et il ne reste plus qu'à tourner les commutateurs vers les connexions de circuit, pour qu'ils donnent des lectures directes sur un circuit quelconque avec lequel on peut les relier, la lecture du voltmètre étant naturellement multipliée par le rapport suivant lequel est divisée la haute résistance aux bornes du circuit (si cette résistance est employée), la lecture de l'ampèremètre étant multipliée par la conductance de la résistance connue intercalée dans le circuit, et

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

la lecture du wattmètre étant multipliée par ces deux facteurs.

Si le circuit n'est pas inductif, les lectures du voltmètre et de l'ampèremètre, multipliées l'une par l'autre, correspondent à la lecture du wattmètre; s'il est inductif, ce n'est plus le cas; si nous divisons les watts, donnés par le wattmètre, par les volts, donnés par le voltmètre, nous avons alors les ampères effectifs qui parcourent le circuit. D'autre part, l'ampèremètre nous donne le courant total ou, comme on l'appelle quelquefois, le courant *apparent* qui parcourt le circuit. Le rapport de ces deux quantités nous donne le facteur de puissance, d'où l'on déduit la différence de phase en consultant simplement une table de sinus et de cosinus. Si nous connaissons la fréquence et s'il n'y a pas de capacité, le coefficient de self-induction s'en déduit immédiatement.

Si l'on a un contact tournant actionné par un petit moteur synchrone, il est évident que, à l'aide des instruments ci-dessus, il est aussi facile de faire une série de lectures, d'après lesquelles on peut tracer les courbes de forces électromotrices et d'intensités avec leur avance ou leur retard.

Lorsqu'on a besoin d'une grande exactitude dans les lectures, il est évident que l'on peut prendre une série de lectures sur un circuit quelconque, puis tourner les commutateurs les uns après les autres sur la résistance de proportion, de manière à reproduire les déviations des instruments. Nous pouvons alors lire directement et sans calcul la force électromotrice continue nécessaire pour produire ces déviations, d'où l'on peut déduire immédiatement la force électromotrice et l'intensité dans le circuit (la résistance aux bornes de laquelle les mesures ont été faites étant connue).

Il est évident que les instruments sont également propres à mesurer des courants continus presque dans une étendue quelconque, de sorte qu'ils forment pratiquement une série universelle d'instruments de mesure, soit pour courants continus, soit pour courants alternatifs. Ils peuvent aussi être employés pour des expériences d'hystérésis et de perméabilité et pour un grand nombre d'autres objets qu'il est inutile de mentionner ici.

N'étant pas affectés par le magnétisme et le champ terrestre, étant dénués des effets d'induction, prenant un courant négligeable

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et enfin pouvant être étalonnés facilement à tout moment, ces instruments, disposés comme il est décrit ci-dessus, permettent de prendre des mesures avec un haut degré de certitude et de précision; et à cause de la méthode d'étalonnement, on peut se dispenser tout à fait de formules, de sorte que, dans les usines ou les stations centrales, la mesure des courants alternatifs et polyphasés devient très simple.

Pour un système polyphasé dont les circuits peuvent être inégalement chargés, on peut employer deux séries de résistances, et les instruments peuvent passer rapidement de l'une à l'autre, ou bien l'on peut employer deux séries d'instruments, ou bien des instruments particuliers comme le wattmètre peuvent être employés avec une double série de quadrants et une double aiguille, l'aiguille supérieure étant isolée de l'aiguille inférieure, laquelle recevra sa charge par l'intermédiaire d'un vase rempli d'acide sulfurique. Au moyen des quadrants ajustables, il est facile d'obtenir que les deux aiguilles donnent des déviations égales pour des charges égales, de sorte que, les deux étant employées ensemble, leurs lectures s'ajoutent. Pour d'autres mesures, il est possible de se servir de ce double instrument comme instrument de zéro, et d'équilibrer un voltage continu par un voltage alternatif.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

DEUXIÈME SECTION.

SOUS-SECTION A.

SUR LA CONSTRUCTION DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES;

PAR M. MAURICE LEBLANC.

Dans toute dynamo, les flux utiles sont ceux qui coupent de la même manière les circuits inducteurs et les induits. Les autres, dits *fuites magnétiques,* ont toujours une action nuisible. Aussi nous paraît-il légitime de dire :

Le meilleur système de machine dynamo-électrique est celui qui comporte le moins de fuites magnétiques.

Pour réduire au minimum les fuites magnétiques d'une dynamo, il faut rapprocher, autant que possible, ses circuits inducteurs et ses circuits induits. Il convient pour cela :

1° De les disposer, les uns dans des encoches pratiquées le long

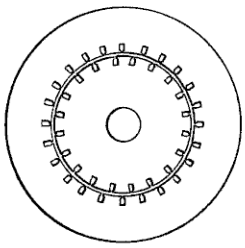


Fig. 1.

de la surface interne d'un anneau de tôles, les autres dans des encoches pratiquées le long de la surface externe d'un autre anneau de tôles concentrique au premier, les deux anneaux étant séparés par un très petit entrefer (*fig.* 1); 2° de disposer leurs fils de connexions sur deux cylindres concentriques, s'étendant de part

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et d'autre des anneaux (*fig.* 2) et aussi voisins que les nécessités de la construction le permettront.

Lorsqu'on a voulu faire des machines d'induction, dans lesquelles le flux est engendré par des courants alternatifs de fréquence

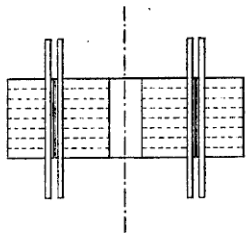


Fig. 2.

élevée, les qualités de ce type de machine ont imposé son adoption.

Nous croyons qu'il y aurait, également, le plus grand intérêt à l'employer pour faire des machines à courant continu ou des alternateurs, et que l'on arriverait ainsi à constituer des machines beaucoup plus économiques, à tous les points de vue, que celles qui sont en usage.

Mais, dans les machines de ce type, la force magnétisante développée par les circuits induits sera du même ordre de grandeur que celle developpée par les circuits inducteurs.

Il en résulte que, si l'on veut obtenir des courants de tension constante, ce qui est le cas général, il faudra faire varier, dans une proportion très considérable, l'intensité du courant d'excitation avec le débit de la machine.

Pour que ce type de machine puisse être utilisé, comme nous le proposons, il faut que ces variations des courants d'excitation puissent être obtenues automatiquement et par des procédés aussi simples que ceux employés dans les machines à courant continu, dites *compound*. Nous allons voir comment ce résultat peut être obtenu dans tous les cas.

I. — Machines a courant continu.

La disposition qu'il convient d'adopter est représentée sur le schéma de la *fig.* 3. L'armature est semblable à celle de toutes les machines à courant continu dont les connexions sont disposées à la surface d'un cylindre.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les encoches de l'anneau fixe qui l'entoure, on loge :

1° Un enroulement SS reproduisant celui de l'armature et monté en série, dans le circuit branché sur les balais. Cet enroulement est fait de telle manière qu'il développe, le long de chaque rayon mené par l'axe, une force magnétisante égale et de signe contraire à celle développée par l'armature.

Dans ces conditions, le circuit de la machine compris entre le

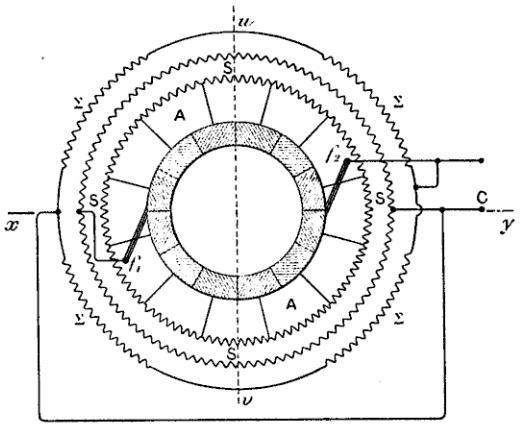


Fig. 3.

balai f_1 et la prise de courant c peut être considéré comme n'ayant pas de self-induction appréciable, car il ne peut engendrer d'autre flux que les fuites magnétiques qui pourront se produire le long de l'entrefer séparant les deux anneaux.

2° Un enroulement ΣΣ monté en dérivation entre le balai f_2 et la prise de courant c, dont les bobines développeront un flux dirigé suivant le diamètre uv perpendiculaire à la ligne des balais.

La production du flux utile coûtera d'autant moins cher qu'aucun autre ne lui sera superposé, et qu'il n'y aura pas accroissement de la reluctance des circuits magnétiques de la machine, lorsque son débit augmentera, comme cela arrive dans les machines ordinaires, ainsi que l'a fait remarquer M. Picou.

La disposition qui consiste à annuler directement la réaction d'induit d'une machine à courant continu, en faisant développer, par un enroulement spécial, suivant toute direction, une force magnétisante égale et de signe contraire à celle développée par

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

son armature, a déjà été proposée, croyons-nous par MM. Fischer-Hinnen et Ryan.

Lorsqu'on l'a appliquée à des machines dimensionnées suivant la méthode habituelle, on n'en a pas retiré grand bénéfice. Cela était naturel, puisque les machines étaient construites de manière à pouvoir s'en passer.

Mais il n'en serait plus de même si l'on se servait, comme nous venons de le proposer, d'une carcasse de machine d'induction, pour constituer une machine à courant continu. On devrait profiter de l'absence de réaction d'induit pour augmenter, autant qu'il conviendrait, la longueur développée de chaque pôle de la machine, et pour réduire son entrefer au jeu nécessaire au point de vue mécanique.

On pourrait constituer ainsi des machines dont le calage des balais serait invariable, dans lesquelles la production du champ ne coûterait presque rien, et dont l'inducteur comporterait sensiblement les mêmes poids de fer et de cuivre que l'armature. Elles seraient donc très légères et, par suite, très économiques.

Ces machines n'ayant aucune réaction d'induit appréciable, il serait possible de faire varier leur tension dans les limites les plus étendues, lorsqu'elles serviraient de génératrices.

De même, en réglant leur champ, on pourrait faire varier beaucoup leur vitesse de rotation, lorsqu'elles serviraient de moteurs.

II. — Alternateurs.

Dans une machine à courant continu, il faut, pour la commutation, que la direction du flux développé dans la machine demeure constante, si l'on ne veut pas avoir à changer le calage des balais, lorsque le débit de la machine varie.

Cette condition n'a plus à être remplie dans un alternateur. Il suffira, dès lors, de lui donner un seul circuit inducteur et de régler l'intensité du courant d'excitation, en fonction de son débit, de manière que son voltage demeure constant.

Mais, comme dans le cas précédent, la principale fonction du courant d'excitation ne sera pas d'engendrer le flux inducteur dont on facilitera la production, autant que possible, en réduisant au minimum l'entrefer et en tenant toujours les masses de fer dans un état éloigné de la saturation. Cette principale fonction sera de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

développer une force magnétisante égale et de signe contraire à celle développée par les circuits d'armature. L'intensité du courant d'excitation devra varier beaucoup avec le débit de l'alternateur : il convient donc que ses variations soient obtenues automatiquement.

Le plus souvent, on règle la tension d'un alternateur en faisant varier le champ de son excitatrice. Nous allons voir que l'on peut conserver ce mode de réglage et le rendre automatique :

1° En employant, comme excitatrice, une machine à courant continu, dont le champ soit engendré par des courants alternatifs, telle qu'une *commutatrice* ou un *transformateur-redresseur;*

2° En faisant produire le champ de cette excitatrice, comme dans les machines à courant continu dites *compound,* par des circuits associés : les uns en parallèle, les autres en série, avec les circuits d'armature de l'alternateur que l'on veut exciter.

Pour fixer les idées, nous supposerons que l'on veuille exciter un alternateur à courants triphasés, et que l'on emploie, comme

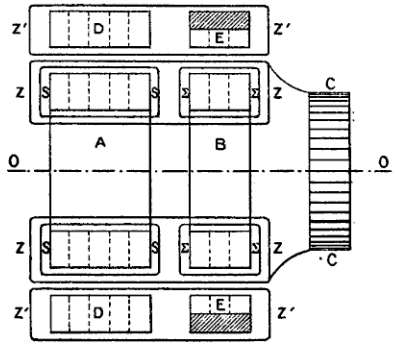


Fig. 4.

excitatrice, la commutatrice spéciale, à deux pôles, représentée schématiquement sur la *fig.* 4.

Sur un même axe OO sont disposés deux anneaux A et B. Autour de l'anneau A est fait un enroulement S comportant trois bobines décalées de 120°, S_1, S_2, S_3. Ces bobines sont montées en série avec les circuits P_1, P_2, P_3 de l'alternateur, par l'intermédiaire de bagues et de frotteurs, d'après les indications du schéma de la *fig.* 5.

Autour de l'anneau B est fait un enroulement Σ comportant

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

trois bobines décalées de 120°, Σ_1, Σ_2, Σ_3. Ces bobines sont montées en dérivation entre les trois bornes de l'alternateur I, II, III et un point neutre M, où viennent aboutir aussi les extrémités des bobines S_1, S_2, S_3.

On monte en série, avec chacune des bobines Σ_1, Σ_2, Σ_3, une bobine de self-induction ajustable λ (voir *fig.* 5).

Les anneaux A et B, une fois recouverts de ces enroulements,

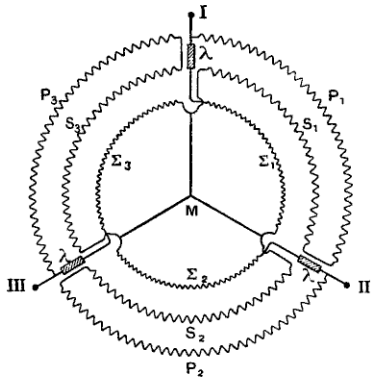


Fig. 5.

sont décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un certain angle ξ qui sera défini plus loin.

On dispose alors un enroulement Z de machine à courant continu, qui recouvre simultanément les anneaux A et B, comme s'ils n'en formaient qu'un, se superpose aux enroulements S et Σ et aboutit à un collecteur CC (voir *fig.* 4). Deux balais diamétralement opposés, appuyés sur ce collecteur, permettront de recueillir un courant continu qui servira à l'excitation de l'alternateur.

Les anneaux A et B tournent à l'intérieur d'anneaux de fer D et E où se ferment les flux qu'ils engendrent.

Les sections des anneaux A et D sont déterminées de telle manière que les circuits magnétiques, le long desquels se propagent les flux engendrés par l'anneau A, soient toujours dans un état éloigné de la saturation. La section de l'anneau E, au contraire, sera suffisamment réduite pour que son fer soit fortement saturé, lorsque l'alternateur produira son voltage normal.

Enfin, un enroulement Z', comportant le même nombre de spires que l'enroulement Z, recouvre simultanément les anneaux D et E.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Il est parcouru par le courant recueilli sur le collecteur CC, comme il est représenté sur la *fig.* 6 par des flèches. Les points d'entrée et de sortie de cet enroulement sont choisis de telle

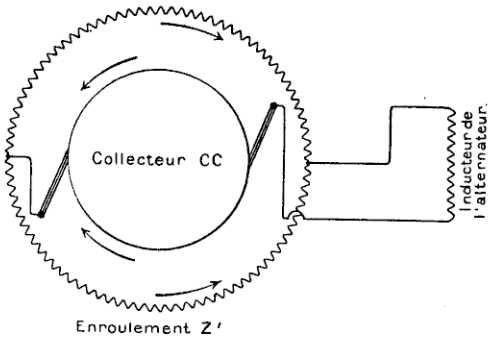


Fig. 6.

manière que sa force magnétisante soit égale et de signe contraire à celle développée par l'enroulement Z.

L'axe OO est assujetti à tourner synchroniquement avec l'alternateur, par un procédé quelconque.

On détermine son sens de rotation, de manière que les champs engendrés par les enroulements S et Σ demeurent fixes dans l'espace.

Dans ces conditions, l'enroulement Z produira un courant continu, comme s'il était soumis à l'action d'un inducteur fixe excité par un courant continu.

Mais quelle que soit l'intensité du courant fourni par l'enroulement Z, il ne pourra produire aucun flux appréciable, ayant sa force magnétisante contre-balancée par celle de l'enroulement Z'.

Nous allons montrer que, si cette commutatrice est convenablement dimensionnée, l'alternateur qu'elle excitera produira une tension constante, quel que soit son débit, et sans qu'il y ait lieu de modifier le calage des balais de la commutatrice.

L'alternateur ayant été construit comme il a été dit plus haut, la reluctance de la portion de ses circuits magnétiques comprise dans ses masses de fer sera négligeable devant celle de l'entrefer.

On pourra alors considérer comme constants ses coefficients d'induction. Il en sera de même pour le coefficient de self-induction de chacun des circuits de l'enroulement S de la commutatrice.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

1° *Angle de calage des anneaux* A *et* B. — Désignons par r et l la résistance et le coefficient de self-induction de chacun des circuits formés par la réunion en série de l'un des circuits d'armature de l'alternateur et l'un des enroulements S de la commutatrice. Soit α la fréquence des courants engendrés.

D'après ce que nous venons de dire, le rapport $\frac{2\pi\alpha l}{r}$ sera constant. Posons

$$\operatorname{tang}\omega = \frac{2\pi\alpha l}{r} \qquad \text{et} \qquad \xi = \frac{\pi}{2} - \omega.$$

L'angle ξ ainsi défini est celui dont il conviendra de décaler l'un des anneaux par rapport à l'autre, comme il a été dit plus haut. On décalera l'anneau B, par rapport à l'anneau A, dans le sens de la rotation des anneaux.

2° *Dimensionnement de l'anneau* A *et des enroulements* S *et* Σ. — Mettons l'armature de notre alternateur en court-circuit, fermons les balais de la commutatrice sur une résistance égale à celle de son inducteur, et excitons-le avec un courant continu fourni par une source étrangère. Faisons-le tourner à sa vitesse normale et calons les balais, de manière que l'intensité du courant débité par la commutatrice soit maxima. Nous relèverons alors les valeurs de l'intensité J du courant fourni par la commutatrice, en

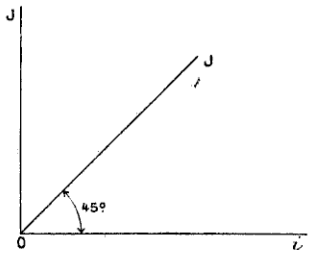


Fig. 7.

fonction de l'intensité i du courant d'excitation. Les variations de l'intensité J seront représentées par une droite (*fig.* 7).

L'anneau A et les enroulements S et Z devront être dimensionnés de manière que cette droite fasse un angle de 45° avec la ligne Oi. On facilitera le réglage en introduisant une résistance ajustable dans le circuit inducteur de l'alternateur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

3° *Dimensionnement de l'anneau* B *et de l'enroulement* Σ. — Ouvrons maintenant les circuits d'armature de notre alternateur. Laissons la commutatrice fermée sur la même résistance, et faisons encore tourner l'alternateur à sa vitesse normale, en l'excitant avec un courant continu fourni par une source étrangère. Le calage des balais de la commutatrice sera le même que dans le cas précédent.

Nous mesurerons l'intensité J de son débit, l'intensité i du courant d'excitation et le voltage h aux bornes de l'alternateur. Nous

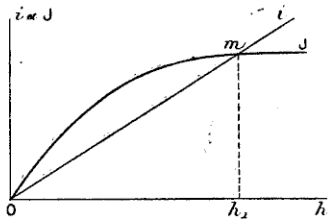


Fig. 8.

porterons ce voltage en abscisses et les intensités i et J en ordonnées (*fig.* 8).

Les variations de l'intensité i seront représentées par une droite Oi et celles de l'intensité J par une courbe OJ.

L'anneau B et l'enroulement Σ devront être dimensionnés de manière que la courbe OJ, s'élevant d'abord plus rapidement que la droite Oi, vienne ensuite la couper en un point m dont l'abscisse Oh_1 représente précisément le voltage h_1 que doit fournir l'alternateur.

On arrivera à un réglage précis en ajustant les bobines de self-induction λ (voir *fig.* 5) montées en série avec les bobines Σ_1, Σ_2, Σ_3.

Posons

$$R = \sqrt{r^2 + 4\pi^2 \alpha^2 l^2}.$$

Désignons par a l'intensité du courant débité sous le voltage h_1 par chacun des circuits d'armature de l'alternateur, par φ la différence de phase entre les variations de l'intensité du courant et celles du voltage, et par e la force électromotrice que doit développer, dans les circuits d'armature, la rotation de l'alternateur, pour produire le voltage h_1 dans ces conditions de débit.

On démontre facilement que la grandeur de la force électromo-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

trice e peut être déterminée en fonction des quantités h_1, a et φ, par la construction géométrique représentée sur la *fig.* 9.

Sur une droite Oh, prenons une longueur Oh_1 proportionnelle au voltage h_1. A partir du point h_1 menons une droite OP dont la longueur soit dans le même rapport avec le produit Ra que la

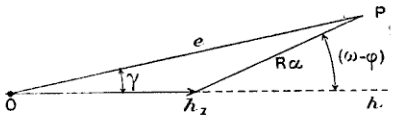


Fig. 9.

longueur Oh_1 avec le voltage h_1 et dont la direction fasse un angle égal à $(\omega - \varphi)$ avec la direction Oh.

Joignons les points O et P; la longueur OP sera, avec la force électromotrice e, dans le même rapport que la longueur Oh_1 avec le voltage h_1.

L'angle γ, que feront entre elles les droites OP et Oh, représentera la différence de phases entre les variations de la force électromotrice e et celle du voltage h_1.

Nous pouvons considérer les trois forces électromotrices h_1, Ra

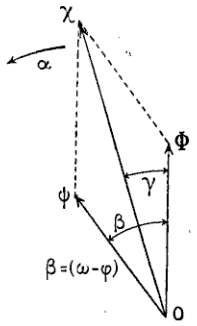


Fig. 10.

et e comme développées par la rotation de trois flux d'intensités constantes OΦ, Oψ et Oχ telles que l'on ait

$$\frac{O\Phi}{h_1} = \frac{O\psi}{Ra} = \frac{O\chi}{e}.$$

Ces flux tourneraient simultanément, par rapport à l'armature de l'alternateur supposé bipolaire, avec la vitesse α (*fig.* 10).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Le flux $O\chi$ serait développé par l'inducteur : son mouvement de rotation ne dépendrait que de celui de l'alternateur.

La phase du mouvement du flux $O\Phi$, définie par l'angle γ que feraient entre elles les directions $O\chi$ et $O\Phi$, varierait avec le débit de l'alternateur.

Les directions $O\Phi$ et $O\psi$ feraient entre elles un angle

$$\beta = (\omega - \varphi).$$

Examinons maintenant ce qui se passe dans la commutatrice lorsque chaque circuit de l'armature de l'alternateur développe un voltage h et débite un courant d'intensité a, l'angle φ ayant une valeur déterminée.

L'enroulement Σ crée, dans les anneaux B et E, un flux $O\Phi'$ (*fig.* 11) qui tourne par rapport à lui comme le flux $O\Phi$ tourne

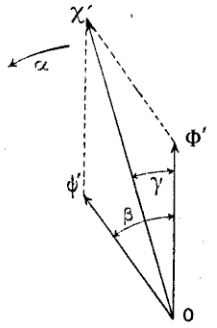


Fig. 11.

par rapport aux circuits de l'armature de l'alternateur. Mais le rapport des intensités des flux $O\Phi$ et $O\Phi'$ n'est pas constant, et varie, avec le voltage h, suivant une loi que l'on pourrait déduire de la connaissance de la courbe OJ de la *fig.* 8.

L'enroulement S développe, dans les anneaux A et C, un flux $O\psi'$. Ce flux est, à chaque instant, proportionnel au produit Ra, et sa direction fait toujours un angle $\beta = (\omega - \varphi)$ avec la direction du flux $O\Phi$, grâce au décalage donné aux anneaux A et B, lors de la construction.

Si l'on examine les *fig.* 7 et 8, on voit que :

Si l'on a $h < h_1$, on a

$$\frac{O\Phi'}{O\Phi} > \frac{O\psi'}{O\psi};$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

si l'on a $h = h_1$, on a

$$\frac{O\Phi'}{O\Phi} = \frac{O\psi'}{O\psi};$$

si l'on a $h > h_1$, on a

$$\frac{O\Phi'}{O\Phi} > \frac{O\psi'}{O\psi}.$$

Lorsque l'on a $h = h_1$, la *fig.* 11 est semblable à la *fig.* 10. La direction $O\Phi'$ étant toujours la même que la direction $O\Phi$, la direction $O\chi'$ se confond avec la direction $O\chi$.

Le mouvement de rotation du flux $O\chi'$, par rapport aux anneaux A et B, ne dépend plus alors que du mouvement de rotation de l'alternateur. Si celui-ci prend une avance, le mouvement des anneaux A et B prend un retard égal. La direction $O\chi'$ est donc fixe dans l'espace et invariable par rapport aux balais de la commutatrice, tant que le voltage développé par l'alternateur est égal à h_1.

Lorsqu'il en est ainsi, nous avons :

$$\frac{O\chi'}{e} = \frac{O\Phi'}{h_1} = \frac{O\psi'}{Ra}.$$

Mais la commutatrice a été dimensionnée de telle manière que, lorsque le flux $O\psi'$ existait seul et avait une direction normale à la ligne de contact des balais, son action produisait un courant continu capable de faire développer, par l'inducteur de l'alternateur, dans chacun de ses circuits d'armature, une force électromotrice égale à Ra.

Le flux $O\chi'$ ayant aussi sa direction normale à la ligne de contact des balais fera donc produire, par la commutatrice, un courant continu capable de faire développer, par l'inducteur de l'alternateur, dans chacun de ses circuits d'armature, une force électromotrice égale à e. Or, c'est précisément la force électromotrice qu'il convient de développer, pour que l'alternateur produise un voltage égal à h_1, dans les mêmes conditions de débit.

Supposons, maintenant, que le voltage h soit plus petit que le voltage h_1. La force électromotrice développée entre les balais et, par suite, l'intensité du courant d'excitation fourni par la commutatrice, sera proportionnelle à la somme des projections des longueurs $O\Phi'$ et $O\psi'$, sur la direction de $O\chi'$, considérée comme invariable et perpendiculaire à la ligne de contact des balais.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'angle γ des directions $O\chi'$ et $O\Phi'$ sera toujours égal à l'angle γ des directions $O\chi'$ et $O\Phi'$ de la *fig.* 10. De même, l'angle β des directions $O\Phi'$ et $O\psi$ sera toujours égal à l'angle β des directions $O\Phi$ et $O\psi$.

Mais on aura

$$\frac{O\Phi' \cos\gamma + O\psi \cos(\beta - \gamma)}{O\chi} > \frac{O\Phi'}{O\Phi}.$$

L'intensité du courant d'excitation fourni sera plus grande qu'il ne faudrait pour maintenir un voltage h aux bornes de l'alternateur. Celui-ci ira donc en croissant, jusqu'à ce qu'il soit devenu égal à h_1.

Réciproquement, si l'on avait $h < h_1$, on aurait

$$\frac{O\Phi' \cos\gamma + O\psi \cos(\beta - \gamma)}{O\chi} < \frac{O\Phi'}{O\Phi},$$

et le voltage h irait en décroissant jusqu'à ce qu'il fût devenu égal à h_1.

Ainsi l'alternateur développera forcément un voltage constant, quel que soit son débit.

Nous pensons avoir démontré, dans ce qui précède, que l'on peut arriver à une solution rigoureuse du *compoundage à voltage constant* des alternateurs, lorsque leurs coefficients d'induction sont constants, condition facile à remplir, si on les construit comme les machines d'induction actuellement en usage.

On peut se proposer d'appliquer le même mode de compoundage aux alternateurs à pôles, dont les inducteurs sont toujours fortement saturés. Il ne sera pas possible, alors, d'arriver à une solution rigoureuse, les coefficients d'induction de ces alternateurs variant avec leur débit; mais on pourra arriver à limiter suffisamment les variations de voltage occasionnées par des variations brusques de débit, pour que leur puissance ne soit plus limitée que par l'échauffement des circuits, et non par la chute de voltage. On supposera l'angle ω égal à $\frac{\pi}{2}$.

On dimensionnera l'anneau B et les enroulements Σ et Z, de manière que l'alternateur fournisse le voltage voulu à vide. On dimensionnera ensuite l'anneau A et l'enroulement S, de manière que l'alternateur fournisse le même voltage en pleine charge.

Il sera inutile, dans ce cas, de saturer les circuits magnétiques

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

des anneaux B et E. Si l'on se reporte à la *fig.* 8, la courbe OJ sera représentée par une droite, et la droite Oi par une courbe de même allure que la courbe OJ. Elles se rencontreront toujours en un point m dont l'abscisse mesurera le voltage que doit fournir l'alternateur.

La commutatrice que nous avons décrite, à titre d'exemple, ne présente qu'un caractère essentiel.

Elle comporte deux carcasses magnétiques dans lesquelles sont développés deux champs tournants distincts : l'un par des circuits montés en série avec ceux de l'armature de l'alternateur que l'on veut exciter, l'autre par des circuits montés en parallèle avec ces derniers.

Ces deux champs agissent simultanément sur un enroulement de machine à courant continu aboutissant à un collecteur.

Nous croyons que cette disposition est nécessaire et qu'elle doit être conservée, quel que soit le système de commutatrice ou de transformateur redresseur que l'on voudra substituer à celui que nous avons décrit. Nous allons tâcher de le montrer.

Proposons-nous d'employer une commutatrice ou un transformateur redresseur ne comportant qu'une seule carcasse magnétique.

La force électromotrice e que doit produire, dans chacun de ses circuits d'armature, la rotation de l'alternateur, lorsque ce circuit doit développer un voltage h et débiter un courant d'intensité j est

$$e = h + rj + l\frac{dj}{dt}.$$

L'intensité du courant d'excitation doit être, à chaque instant, proportionnelle à la valeur efficace de la force électromotrice e.

On pourrait produire ce courant au moyen d'une commutatrice entre les bagues de laquelle on développerait une force électromotrice alternative égale à e.

Pour simplifier le problème, remarquons que la grandeur efficace du produit rj étant toujours petite, par rapport à celle du produit $l\frac{dj}{dt}$, on peut, sans commettre une grande erreur, substituer à la force électromotrice e la force électromotrice

$$e' = h + l\frac{dj}{dt}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

On obtiendra cette force électromotrice de la manière suivante :

Soit P (*fig.* 12) l'un des circuits d'armature de l'alternateur que l'on veut exciter. Nous le monterons en série avec le circuit primaire S d'un transformateur T.

Le circuit secondaire Z de ce transformateur sera intercalé dans

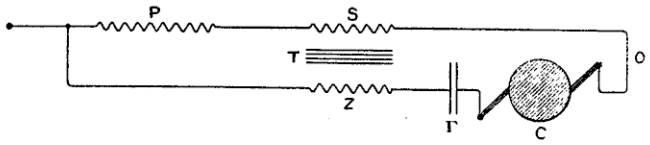


Fig. 12.

un circuit branché entre le point neutre O et l'extrémité libre du circuit P.

Ce circuit franchira la commutatrice C et sera coupé par un condensateur Γ, dont la capacité sera ajustée de manière à rendre nul le coefficient de self-induction apparent du circuit secondaire Z.

Dans ces conditions, si l'on désigne par m le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits du transformateur, le voltage, aux bornes de la commutatrice, sera égal à $h + m\frac{dj}{dt}$. Il suffira de faire $m = l$.

Mais nous avons supposé que l'on employait un condensateur, ce qui n'est pas pratique. Si on le supprimait, le circuit fermé sur la commutatrice aurait un coefficient de self-induction L. Appelons i l'intensité du courant dans le circuit secondaire Z, le voltage aux bornes de la commutatrice sera égal à $h + \frac{m\,dj}{dt} + L\frac{di}{dt}$. Cette expression est complètement différente de celle de la force électromotrice e'. Si l'on voulait rendre petite la valeur efficace du produit $L\frac{di}{dt}$ par rapport à celle du produit $m\frac{dj}{dt}$, il faudrait donner un énorme coefficient de self-induction au circuit primaire du transformateur qui est monté en série avec l'un des circuits d'armature de l'alternateur. Cela conduirait à réduire, dans une forte proportion, la puissance de l'alternateur.

Avec la disposition que nous avons adoptée, le circuit secondaire Z du transformateur T était remplacé par un enroulement de machine à courant continu aboutissant à un collecteur. L'action de ce dernier annulait les effets de la self-induction de cet enrou-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

lement et jouait le même rôle que le condensateur Γ dans le cas examiné ci-dessus.

On pourrait supprimer le transformateur T et monter, en série avec l'alternateur, les circuits S de la commutatrice qui serait soumise, d'un autre côté, à l'action d'un inducteur I excité par un

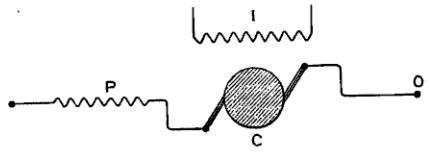


Fig. 13.

courant continu, d'intensité constante, fourni par une source étrangère (*fig.* 13).

On voit immédiatement que cette excitatrice ne pourrait fournir une solution exacte du problème du compoundage que si le $\cos\varphi$ du réseau était constant. Or cette condition n'est jamais réalisée : c'est ainsi que les brusques variations de débit occasionnées par le démarrage de moteurs d'induction sont toujours accompagnées d'une diminution momentanée, mais considérable, du $\cos\varphi$ du réseau.

CONCLUSION.

Nous pensons avoir établi, dans ce qui précède, qu'il y aurait tout intérêt, au point de vue de la bonne utilisation des matériaux et du rendement, à construire toutes les machines dynamo-électriques, à courant continu ou à courant alternatif, comme les machines d'induction. Il conviendrait alors de les exciter avec des courants d'intensité variant automatiquement avec le débit de la machine, car la fonction principale de l'inducteur ne serait plus d'engendrer le flux, mais de développer, suivant toute direction, une force magnétisante égale et de signe contraire à celle développée par l'armature.

Nous pensons avoir montré aussi que rien n'était plus facile que d'obtenir ces variations automatiques du courant d'excitation.

La possibilité de réaliser des appareils conçus comme nous l'avons dit a d'ailleurs été vérifiée expérimentalement.

Il y a au Champ-de-Mars, dans l'exposition de la Société des

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Établissements Postel-Vinay, un moteur de transformateur redresseur que l'on peut considérer comme une machine à courant continu, construite comme une machine d'induction.

Il y a, dans l'exposition de la maison A. Grammont, un petit alternateur de 75 kilowatts à la vitesse de 800 tours par minute, construit aussi comme une machine d'induction, et muni d'une excitatrice identique à celle qui a été décrite plus haut.

Un autre alternateur à pôles de 1000 chevaux à la vitesse de 94 tours par minute, étudié par M. Routin, figure également dans la même exposition. Il est muni d'une excitatrice d'un modèle différent de celui décrit ci-dessus, mais qui lui est équivalent.

Il y a un grand nombre d'appareils semblables à celui exposé par M. Postel-Vinay, en service depuis plusieurs années, et leur usage se répand.

L'alternateur de 75 kilowatts a certainement de faibles dimensions par rapport à sa puissance. Il a été expérimenté avec succès.

Nous avons vérifié avec lui :

1° Que les machines de ce genre étaient auto-excitatrices;

2° Que la constance du voltage de l'alternateur pourrait être obtenue dans tous les cas;

3° Que la tenue des balais de l'excitatrice était excellente;

4° Que ces machines se synchronisaient parfaitement avec d'autres alternateurs.

Quant à la grande machine, ses premiers essais ayant eu lieu à l'Exposition même, il a été impossible d'ajuster rigoureusement son excitatrice pour le service qu'elle devait faire. Mais on pourra constater que la tenue des balais de l'excitatrice est très bonne et que l'intensité du courant d'excitation qu'elle fournit augmente graduellement avec le débit de l'alternateur.

D'autre part, on trouvera d'autres solutions du compoundage des alternateurs dues à MM. Blondel et Boucherot et présentées par MM. Sautter et Harlé et la maison Breguet.

Dans ces conditions, il nous a semblé que les considérations précédentes pouvaient présenter un intérêt d'ordre général. C'est pourquoi nous avons l'honneur de les soumettre au Congrès des Électriciens.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SUR L'EXCITATION DES MACHINES D'INDUCTION;

PAR M. MAURICE LEBLANC.

Une machine d'induction, branchée sur un réseau alimenté par un alternateur, fonctionne comme réceptrice ou comme génératrice, suivant que sa vitesse de rotation est inférieure ou supérieure à celle du synchronisme.

Dans un cas comme dans l'autre, la machine d'induction n'a pas à tourner synchroniquement avec l'alternateur : elle peut être accouplée avec lui aussi facilement qu'on accouplerait entre elles deux machines à courant continu. Enfin, lorsqu'on l'emploie comme génératrice, elle peut être accouplée avec l'alternateur, en série ou en parallèle, alors que deux alternateurs ne peuvent être accouplés qu'en parallèle.

Ce sont là de précieux avantages qui devraient toujours imposer son emploi.

Mais la machine d'induction, à circuits induits fermés sur eux-mêmes, a un grave défaut.

Les courants qui doivent engendrer son champ inducteur viennent du réseau et, comme leur fréquence est élevée, le travail apparent nécessaire pour les faire passer dans la machine est du même ordre de grandeur que le travail réel qu'elle doit fournir, même si son entrefer est très petit.

Il en résulte que :

1° Les alternateurs qui desservent des moteurs d'induction sont mal utilisés.

2° Si l'on voulait employer une machine d'induction comme génératrice, l'alternateur qui devrait l'exciter serait presque aussi grand qu'elle.

Il est heureusement facile de supprimer ce défaut. On peut, dans tous les cas, ne plus demander au réseau sur lequel elle est branchée les courants qui doivent exciter une machine d'induction, et les faire produire sur place par des machines comparables, comme dimensions, à l'excitatrice d'un alternateur de même puissance.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

On peut même demander à une machine d'induction de fournir au réseau des courants déwattés, comme pourrait le faire un alternateur ou un moteur synchrone.

Mais, pour que ce résultat soit obtenu, c'est-à-dire pour que les courants d'excitation d'une machine d'induction puissent être fournis par une petite excitatrice locale, il faut que ses courants aient à circuler dans ses circuits induits, et non dans ses circuits inducteurs.

En effet, que les courants circulent dans les circuits inducteurs ou dans les circuits induits, le nombre d'ampères-tours nécessaire pour développer la force magnétisante voulue sera le même. Si les courants ont la même intensité, les circuits qu'ils auront à traverser auront le même coefficient de self-induction.

Mais, dans le premier cas, la fréquence des courants sera celle du réseau. Le travail apparent nécessaire pour leur faire traverser les circuits inducteurs sera beaucoup plus grand (30 ou 40 fois environ) que le travail réel représentant le dégagement de chaleur effectué par les circuits.

Dans le second cas, la fréquence des courants ne sera plus que celle dite *du glissement,* et variera entre 0 et 2. Le travail apparent sera du même ordre de grandeur que le travail réel.

Nous allons voir que l'on peut faire produire ce dernier travail apparent par des machines à courant continu, dont les dimensions seront les mêmes que si elles avaient à fournir un travail réel égal.

Considérons une machine d'induction à deux pôles. Soient α la fréquence des courants qu'elle reçoit du réseau, ou qu'elle lui fournit, et ω sa vitesse de rotation; appelons β la fréquence du glissement : par définition $\beta = \alpha - \omega$.

Nous supposerons, pour fixer les idées, que la machine ne comporte que deux circuits induits, décalés de 90°, dont le coefficient d'induction mutuelle soit nul, et qu'il convienne de les faire traverser par des courants d'intensités i_1 et i_2, telles que l'on ait, en désignant par a une constante,

$$i_1 = a \sin 2\pi\beta t, \qquad i_2 = a \cos 2\pi\beta t.$$

Du moment que la machine est branchée sur un réseau desservi par un alternateur, elle est le siège d'un flux qui détermine, par sa

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

rotation, des forces électromotrices de même grandeur, de même fréquence β, mais décalées de $\frac{1}{4}$ de période, dans les deux circuits induits.

Soit H la valeur maxima de ces forces électromotrices. Appelons R et L la résistance et le coefficient de self-induction apparent de chacun des circuits induits.

Pour que notre problème fût résolu, il faudrait avoir

$$a = \frac{H}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 \beta^2 L^2}}.$$

Mais cette condition ne sera pas naturellement remplie. Pour qu'elle le fût, il faudrait que les quantités R et L eussent des valeurs plus petites que leurs valeurs réelles.

Nous sommes ainsi ramenés à résoudre le problème suivant :

Rendre artificiellement nuls ou très petits la résistance et le coefficient de self-induction apparent d'un circuit parcouru par un courant alternatif de basse fréquence.

Il nous faut développer, dans ce circuit, deux forces électromotrices proportionnelles : l'une à l'intensité, l'autre à sa dérivée. Comme nous ne nous occupons que de courants de basse fréquence (soit comprise entre o et 2), nous pourrons employer, dans ce but, des machines à courant continu que nous ferons exécuter par des courants alternatifs ayant la fréquence et la phase voulues.

Les variations de flux de cette fréquence ne pourront, en effet, produire aucun trouble dans la commutation, et les forces électromotrices qu'elles développeront dans les circuits de la machine seront très petites par rapport à celles développées par sa rotation. Celle-ci sera aussi rapide que si l'on faisait produire un courant continu à la machine.

Dans ces conditions, les dimensions de la machine seront celles d'une dynamo à courant continu capable de produire un travail réel égal au travail apparent qu'elle devra fournir.

Considérons une machine à courant continu montée en série et groupée en génératrice. Soient R la résistante totale du circuit où elle est intercalée, L son coefficient de self-induction, E une force électromotrice quelconque développée dans ce circuit, U la vitesse

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de rotation de la machine et i l'intensité du courant produit.

La force électromotrice développée par la rotation de cette machine sera proportionnelle, à chaque instant, à sa vitesse de rotation U, à l'intensité i et à un coefficient constant de proportionnalité K. Nous pourrons donc écrire

$$E + KU i = R i + L \frac{di}{dt},$$

ou

$$E = (R - KU) i + L \frac{di}{dt}.$$

Les choses se passent donc comme si la force électromotrice e agissait sur un circuit ayant une résistance

$$r = (R - KU).$$

Cela nous donne le moyen de rendre, artificiellement, aussi petite que nous voudrons la résistance d'un circuit.

Toutefois, nous ne pouvons rendre nulle ou négative la quantité r, car un régime ne pourrait s'établir, et la machine tendrait constamment à s'amorcer et à fournir un courant continu.

Supposons maintenant que l'on dispose de deux circuits identiques qui soient le siège de deux forces électromotrices E_1 et E_2, de même fréquence β, même grandeur efficace, mais dont les variations soient décalées de $\frac{1}{4}$ de période.

Nous intercalerons, dans chacun de ces circuits, une dynamo à courant continu. Les deux dynamos seront identiques et tourneront avec la même vitesse U.

Le premier circuit comprendra l'armature de la première dynamo et l'inducteur de la seconde. Le second circuit comprendra l'armature de la seconde dynamo et l'inducteur de la première. Les deux circuits inducteurs seront enroulés en sens inverse l'un de l'autre.

Désignons par i_1 et i_2 les intensités des courants développés dans ces deux circuits. Nous aurons à chaque instant

$$(1) \qquad E_1 + KU i_2 = R i_1 + L \frac{di_1}{dt},$$

$$(2) \qquad E_2 - KU i_1 = R i_2 + L \frac{di_2}{dt}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Ces équations peuvent être remplacées par les suivantes :

$$RE_1 + KUE_2 + L\frac{dE_1}{dt} = (R^2 + K^2U^2)i_1 + 2RL\frac{di_1}{dt} + L^2\frac{d^2i_1}{dt^2},$$

$$RE_2 - KUE_1 + L\frac{dE_2}{dt} = (R^2 + K^2U^2)i_2 + 2RL\frac{di_2}{dt} + L^2\frac{d^2i_2}{dt^2}.$$

Nous voyons, à l'examen de ces équations, que les quantités R, KU et L étant supposées constantes, les termes en exponentielles qui feront partie des expressions générales des intensités i_1 et i_2 auront en facteur la quantité $e^{-\frac{R}{L}t}$.

Ces termes en exponentielles s'amortiront donc naturellement et un régime s'établira, quelle que soit la valeur du produit KU. Supposons que, une fois ce régime établi, on ait

$$i_1 = a\sin 2\pi\beta t, \qquad i_2 = a\cos 2\pi\beta t.$$

Les équations (1) et (2) deviendront

$$E_1 + KUa\cos 2\pi\beta t = Ra\sin 2\pi\beta t + 2\pi\beta La\cos 2\pi\beta t,$$
$$E_2 - KUa\sin 2\pi\beta t = Ra\cos 2\pi\beta t - 2\pi\beta La\sin 2\pi\beta t,$$

ou

$$(1') \qquad E_1 = Ra\sin 2\pi\beta t + 2\pi\beta\left(L - \frac{KU}{2\pi\beta}\right)a\cos 2\pi\beta t,$$

$$(2') \qquad E_2 = Ra\cos 2\pi\beta t + 2\pi\beta\left(L - \frac{KU}{2\pi\beta}\right)a\sin 2\pi\beta t.$$

Les expressions des forces électromotrices E_1 et E_2 ainsi obtenues, et qui sont nécessaires pour faire passer dans nos deux circuits des courants d'intensités $i_1 = a\sin 2\pi\beta t$ et $i_2 = a\cos 2\pi\beta t$, représentent bien des forces électromotrices de même fréquence β, même grandeur, mais dont les variations sont décalées d'un quart de période, comme cela avait été supposé.

Donc l'hypothèse que nous avons faite, en posant $i_1 = a\sin 2\pi\beta t$ et $i_2 = a\cos 2\pi\beta t$, est justifiée.

Si nous revenons aux équations (1') et (2'), nous voyons que les choses se passent comme si le coefficient de self-induction de chacun des circuits considérés était devenu égal à

$$l = L - \frac{KU}{2\pi\beta}.$$

Cette quantité l, qui représente le coefficient de self-induction

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

apparent de nos circuits, pourra recevoir une valeur quelconque, positive, nulle ou négative, puisque, comme nous l'avons vu plus haut, le régime s'établit toujours, quels que soient la grandeur et le signe du produit KU.

Nous sommes à même, désormais, de réaliser une excitatrice spéciale pour machine d'induction.

Elle se composera de deux machines à courant continu que

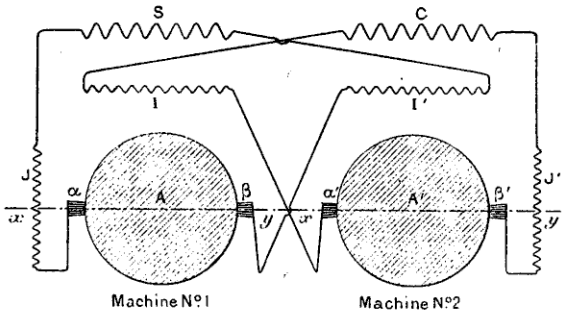


Fig. 1. — S et C, circuits induits de la machine d'induction; A et A', les deux armatures de l'excitatrice; αβ et α'β', leurs balais; J et J', les circuits inducteurs des dynamos de l'excitatrice, montés en série avec leurs armatures; I et I' les circuits inducteurs de chacune de ces dynamos, montés en série avec l'armature de l'autre dynamo.

nous associerons sur un même axe xy. Chacune d'elles sera munie de deux enroulements inducteurs et les connexions du système seront établies comme il est représenté sur la *fig.* 1.

Les deux circuits induits du moteur à champ tournant sont représentés en S et C.

Le circuit S est fermé sur un circuit inducteur comprenant le circuit inducteur I' de la machine n° 2, l'armature A de la machine n° 1 et le circuit inducteur en série J de cette machine.

Le circuit C est fermé sur un circuit extérieur comprenant le circuit inducteur I de la machine n° 1, l'armature A' de la machine n° 2 et le circuit inducteur en série J' de cette machine.

On devra inverser le sens des enroulements des circuits inducteurs I et I', de manière que, si l'action de l'inducteur I produit une force électromotrice $-\mathrm{KU}a\cos 2\pi\beta t$ dans l'armature A, celle de l'inducteur I produise une force électromotrice $+\mathrm{KU}a\sin\beta t$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans l'armature A'. Cela est nécessaire pour tenir compte du signe des dérivées des fonctions sinus et cosinus. Comme les circuits inducteurs J et J' devront être enroulés dans le même sens, le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits induits de la machine d'induction sera toujours nul.

L'excitatrice, formée par la réunion de ces deux machines à courant continu et que l'on fera tourner d'une manière quelconque, nous permettra de diminuer artificiellement, autant que nous le voudrons, la résistance et le coefficient de self-induction de chacun des circuits induits de la machine d'induction.

Revenons à la condition

$$a = \frac{H}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2\beta^2 L^2}}.$$

La force électromotrice H allant en croissant avec la fréquence β, nous pourrions satisfaire à cette condition en attribuant une valeur convenable à la fréquence β, si le dénominateur n'était fonction que de la résistance R.

La valeur que peut prendre la fréquence β étant indifférente, nous pourrons nous contenter, pour résoudre le problème que nous nous sommes posé, de diminuer artificiellement le coefficient de self-induction de chacun de nos circuits induits.

Voici une autre manière d'y arriver :

Fermons chacun de ces circuits sur l'armature d'une dynamo à courant continu, qu'il conviendra de faire aussi légère que possible en se servant, par exemple, d'une machine d'un genre Desroziers.

L'inducteur de cette machine sera excité par une source de courant continu extérieure. Son axe sera libre de se mouvoir à son gré.

L'armature, étant traversée par un courant alternatif, sera le siège d'un couple oscillatoire proportionnel à l'intensité de ce courant et à l'intensité du champ.

Elle prendra donc un mouvement oscillatoire dont l'amplitude pourra être égale à un multiple de 2π.

Si l'armature est assez légère et le champ assez puissant, la fréquence β étant très petite, la vitesse moyenne de cette dynamo sera grande et le travail apparent fourni par cette machine différera peu du travail réel qu'elle fournirait en tournant à sa vitesse normale et en produisant du courant continu.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'axe étant libre, les forces d'amortissement opposées au mouvement de cette machine seront très petites par rapport aux forces d'inertie.

Donc, sa vitesse de rotation sera maxima lorsque le couple moteur développé sur son axe et, par suite, l'intensité du courant alternatif lancé dans son armature seront nuls.

Mais l'énergie emmagasinée dans le système, soit la force vive de l'armature, sera maxima en même temps que sa vitesse de rotation.

Cette énergie sera donc maxima lorsque l'intensité du courant alternatif sera nulle.

La machine se comportera comme un condensateur que l'on aurait intercalé à sa place dans le circuit.

Elle prendra au courant les mêmes quantités d'énergie, lorsque son intensité passera par les mêmes valeurs : c'est que les forces électromotrices qu'elle développera, en oscillant, seront les mêmes que celles que développerait le condensateur mis à sa place.

Elle diminuera donc, comme lui, la valeur apparente du coefficient de self-induction du circuit où elle aura été intercalée.

En fermant chacun des deux circuits induits d'une machine d'induction sur une machine à courant continu libre d'osciller autour de son axe, nous la rendrons capable de produire elle-même les courants nécessaires à son excitation.

On pourrait imaginer une infinité d'autres procédés permettant d'ariver aux mêmes résultats, mais qui seraient tous caractérisés par l'emploi de machines dont les circuits d'armatures seraient branchés sur un collecteur et dont les circuits inducteurs seraient parcourus par des courants alternatifs ayant la fréquence du glissement de la machine d'induction que l'on voudrait exciter (1).

Dans ce qui précède, nous avons supposé qu'on fermerait chaque circuit induit de la machine d'induction sur une dynamo munie d'un collecteur.

On pourrait n'employer qu'une seule dynamo, dont l'armature serait soumise à l'action d'un champ tournant, et sur le collecteur

(1) Il est entendu que nous ne parlons ici que d'appareils mécaniques et qu'on pourrait leur substituer des capacités constituées par des condensateurs ou des voltamètres.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de laquelle on disposerait autant de balais régulièrement décalés qu'il y aurait de circuits différents à faire parcourir par des courants alternatifs. Mais il faudrait prendre des précautions spéciales pour éviter des étincelles aux balais, la direction du champ prenant successivement tous les calages possibles par rapport aux lignes de contact des balais.

Au contraire, avec les dispositions indiquées plus haut, la direction du champ inducteur, par rapport à la ligne de contact des balais, pourra être déterminée à volonté et demeurera ensuite constante.

Si une machine d'induction, excitée, comme nous l'avons dit, est branchée sur un réseau à voltage constant, qu'elle serve de génératrice ou de réceptrice :

1° La grandeur du couple développé sur son axe ira d'abord en décroissant.

On dimensionnera l'excitatrice de manière que la valeur maxima de ce couple soit très supérieure à la charge maxima qu'aura à supporter la machine et pour laquelle elle aura été construite.

2° Lorsque le glissement sera nul, la machine prendra forcément au réseau les courants déwattés nécessaires à son excitation, les circuits induits n'étant alors le siège d'aucun courant. Si le glissement augmente, l'intensité de ces courants diminuera jusqu'à devenir nulle. Lorsque le glissement continuera à augmenter, c'est la machine qui fournira des courants déwattés au réseau, mais l'intensité de ceux-ci croîtra d'abord avec le glissement, passera par un maximun, puis diminuera jusqu'à devenir nulle. Pour des valeurs supérieures du glissement, c'est le réseau qui refournira des courants déwattés à la machine.

Pour une valeur du glissement, on pourra, soit en faisant varier la résistance des circuits induits de la machine d'induction, soit en faisant varier l'excitation de son excitatrice :

1° Obtenir la production sur son axe d'un couple de grandeur déterminée;

2° Lui faire fournir au réseau des courants déwattés d'intensité également déterminée.

Mais il importe d'éviter tout réglage, et rien n'est plus facile.

S'il s'agit d'un moteur d'induction, nous ferons en sorte que

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

son $\cos\varphi$ soit égal à 1, lorsque sa charge aura sa valeur moyenne. Comme une fonction varie très lentement de part et d'autre de son maximum, il conservera toujours une valeur élevée.

D'un autre côté, un même réseau desservira généralement un grand nombre de moteurs qui seront différemment chargés. Il y aura des échanges de courants déwattés, par l'intermédiaire du réseau, entre les moteurs qui seront faiblement chargés et ceux qui le seront fortement. C'est encore une raison pour que le $\cos\varphi$ général de l'installation ne puisse différer que très peu de l'unité.

Supposons maintenant que l'on veuille constituer une station génératrice centrale avec des machines d'induction.

Toutes les machines seront identiques entre elles. Elles seront munies d'un des systèmes d'excitatrices décrits ci-dessus, sauf l'une d'elles qui sera accompagnée de la commutatrice compoundeuse décrite dans une autre Note.

Cette machine se trouvera ainsi transformée en un alternateur compoundé à voltage constant, puisque c'est un courant continu que l'on enverra dans ses circuits inducteurs.

Lorsqu'elle sera associée avec les autres, elle jouera le rôle de chef d'orchestre, en déterminant le voltage et la fréquence des courants qu'elles devront engendrer.

Le réglage du fonctionnement d'une semblable installation sera des plus simples.

Les excitatrices de toutes les machines d'induction seront déterminées, en vue de leur marche en pleine charge, pour la valeur qu'aura alors la fréquence β du glissement, et pour la quantité de courant déwatté qu'elles devront fournir au réseau, étant donné son $\cos\varphi$. On déterminera la fréquence β, de manière que la dérivée du couple résistant développé sur l'axe de la machine, par rapport à elle, soit positive.

Cela fait, supposons que la vitesse de l'alternateur soit de 60 tours par minute et que, dans ces conditions, la vitesse des machines d'induction doive être de 62 tours. Nous chargerons les régulateurs de leurs moteurs, de façon qu'ils tendent à régler leur vitesse à 63 tours, par exemple, ou toute valeur supérieure, mais non dangereuse.

Dans toutes les machines à vapeur existe un dispositif qui permet de régler à volonté la limite supérieure de l'admission. Nous sup-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

poserons ce réglage fait de manière que les machines développent leur puissance normale à la vitesse de 62 tours.

Si l'on a affaire à une turbine, on ouvrira en grand son vannage.

Tant que la charge du réseau sera inférieure à la charge maxima d'une des génératrices, on ne se servira que de l'alternateur. Lorsqu'elle viendra à la dépasser, on lui adjoindra une machine d'induction. La vitesse de cette dernière s'accélérera, jusqu'à ce que le couple résistant développé sur son axe fasse équilibre au couple de la machine à vapeur. Comme le couple résistant croît avec le glissement, alors que le couple moteur est constant, il y aura toujours établissement d'un état d'équilibre dynamique stable, le glissement prenant de lui-même la valeur qui correspond à cet état d'équilibre.

La machine d'induction prendra ainsi toute la charge de l'alternateur.

Si la charge du réseau continue à augmenter, l'alternateur se chargera à nouveau. Lorsqu'il redonnera son plein débit, on lui adjoindra une seconde machine d'induction, et ainsi de suite.

De même, lorsque la charge du réseau diminuera, on supprimera une machine d'induction, chaque fois que la charge de l'alternateur deviendra nulle.

Toutes les machines d'induction travailleront toujours à pleine charge, l'alternateur ne faisant que l'appoint.

De même, la proportion des courants déwattés fournis par les machines d'induction demeurera constante. Si le réseau vient à en prendre plus ou moins, c'est l'alternateur qui fournira ou absorbera la différence.

Supposons que le réseau vienne à être brusquement déchargé. Qu'arrivera-t-il, puisque les machines d'induction travaillent toujours à pleine charge?

L'alternateur deviendra moteur, son régulateur, après avoir fermé complètement l'introduction de vapeur, ne pourra l'empêcher de s'accélérer. Pour que le glissement demeure constant, les génératrices d'induction s'accéléreront à leur tour, mais dès qu'elles auront atteint la vitesse de 63 tours, leurs régulateurs entreront en jeu et supprimeront le couple moteur développé sur elles. Il n'arrivera donc rien.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La conduite de l'installation se résume, dès lors, à mettre les machines en service ou à les en retirer suivant les besoins de la consommation. Cette conduite est aussi simple que possible.

ASSOCIATION EN SÉRIE DES MACHINES GÉNÉRATRICES DE COURANTS ALTERNATIFS.

Les machines d'induction peuvent être aussi bien accouplées en série qu'en parallèle, car la grandeur du couple résistant développé sur leur axe, à égalité d'intensité dans les circuits inducteurs, ne dépend que de leur vitesse de rotation et non de la phase de leur mouvement. Ce couple croissant avec la vitesse, il suffit de les faire conduire par des machines dont le couple moteur soit constant ou aille en décroissant avec la vitesse, pour qu'un état d'équilibre dynamique stable soit maintenu.

On peut donc accoupler ces machines en série avec un alternateur compoundé, non plus à tension constante, mais à intensité constante.

La commutatrice que nous avons décrite dans une première Note permet d'effectuer aussi ce mode de compoundage. Il suffit pour cela de saturer le circuit magnétique de l'anneau dont les circuits à courants alternatifs sont montés en série avec ceux de l'alternateur, au lieu de saturer celui de l'anneau dont les circuits sont montés en parallèle avec eux.

CONCLUSION.

Les machines à courant continu, que nous proposons d'employer comme excitatrices de machines d'induction, pourront être le siège de flux aussi intenses que s'ils ne variaient pas : cela parce que la fréquence de leurs variations sera toujours très faible. D'un autre côté, nous pourrons toujours communiquer une grande vitesse de rotation à leurs armatures.

Une machine capable de fournir un travail apparent déterminé aura les mêmes dimensions qu'une machine à courant continu capable de fournir un travail réel égal. Comme les travaux apparents que devra fournir l'excitatrice d'une machine d'induction seront très petits par rapport à sa puissance, cette excitatrice aura des dimensions très petites par rapport à celles de la machine qu'elle accompagnera.

S'il s'agit de faire des génératrices, la nécessité d'employer ces

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

excitatrices ne peut donner lieu à aucune objection, puisqu'elles ne feront que remplacer celles des alternateurs employés maintenant.

S'il s'agit de faire des réceptrices, la légère augmentation de matériel qui en résultera sera largement compensée par le seul accroissement de puissance des moteurs, l'influence de leurs fuites magnétiques se trouvant considérablement diminuée. C'est ainsi que nous avons pu faire fournir 120 chevaux à un moteur qui n'en donnait que 70, lorsque ses circuits induits étaient fermés sur eux-mêmes, en même temps que nous rendions son $\cos\varphi$ pratiquement égal à 1, en fermant ses circuits induits sur des condensateurs électrolytiques, à défaut d'excitatrice spéciale.

D'un autre côté, on fera de grandes économies sur le matériel générateur, lorsqu'il n'aura plus à travailler que sur un réseau ayant un $\cos\varphi$ sensiblement égal à 1.

En résumé, les machines d'induction excitées comme nous l'avons dit permettent de faire des génératrices qui s'accouplent entre elles comme des machines à courant continu, sans être assujetties à tourner synchroniquement. Elles permettent de faire des moteurs à courants alternatifs démarrant sous charge et ayant, dès qu'ils ont atteint leur vitesse normale, un $\cos\varphi$ moyen égal à 1.

CONDUITE DES ALTERNATEURS COUPLÉS EN PARALLÈLE;

PAR M. G. CHEVRIER.

1. La recherche des conditions à remplir pour réaliser l'aptitude au couplage des alternateurs ou, plus exactement, des groupes électrogènes, a donné lieu à de nombreuses études, et les résultats obtenus montrent que le problème est actuellement résolu d'une manière suffisante au point de vue pratique (1).

Une autre question qui, pour être d'un ordre technique moins élevé, ne laisse pas de présenter quelque intérêt pratique, est la suivante :

Étant donné un ensemble d'unités électrogènes alternatives

(1) *Voir,* pour plus amples détails, *La pratique industrielle des courants alternatifs,* par G. CHEVRIER; Carré et Naud, éditeurs.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

fonctionnant en parallèle, quelles sont les règles à suivre dans la conduite de cet ensemble pour assurer, au cours de la marche, le maximum d'utilisation et de stabilité?

Une opinion assez répandue consiste à croire que, seule, l'opération du couplage peut présenter quelque difficulté, et que tout se passe à merveille dès que les alternateurs ont été amenés au synchronisme. Il n'en est pas tout à fait ainsi dans la pratique : en réalité, si les groupes électrogènes sont tels que leur fonctionnement en parallèle soit pratiquement réalisable, et si l'on dispose des moyens d'action convenables, la mise au couplage de l'un quelconque d'entre eux s'effectuera en général très facilement; par contre, deux genres de difficultés pourront se présenter dans la marche :

La première consiste dans le réglage des charges apparentes, c'est-à-dire des débits indiqués par les ampèremètres de chaque unité, et dans la possibilité de faire varier d'une manière quelconque la répartition de ces charges suivant les besoins du service, sans introduire d'élément de trouble dans le fonctionnement.

La seconde réside dans ce fait que la stabilité de la marche pourra, au bout d'un temps absolument quelconque de fonctionnement irréprochable, se trouver compromise, alors même que n'interviendrait aucune cause extérieure, telle qu'une brusque variation de charge sur le réseau.

Nous allons étudier successivement ces deux cas.

2. *Répartition des charges apparentes.* — Lorsqu'on opère sur des dynamos à courant continu conduites par des moteurs munis de régulateurs de vitesse, on sait que la seule manœuvre des rhéostats de champ permet de faire varier la charge de l'une quelconque des unités en parallèle depuis o jusqu'à son maximum, la tension demeurant constante aux bornes du réseau.

Il n'en est plus ainsi lorsqu'il s'agit d'alternateurs couplés en parallèle. Prenons le cas d'alternateurs identiques, excités au même taux, et débitant des intensités égales. Si l'on modifie l'excitation de l'un d'eux tout en maintenant, par un réglage convenable des autres unités, la tension constante aux bornes du réseau, il pourra sembler à première vue que le débit de l'alternateur varie toujours dans le même sens que le taux de son exci-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

tation, et que la répartition des charges est dès lors subordonnée à une simple manœuvre des rhéostats de champ. Mais un examen plus approfondi mettra en évidence les deux faits caractéristiques suivants :

1° Si l'on diminue progressivement l'excitation, le débit de l'alternateur décroîtra d'abord, *passera par un minimum et augmentera ensuite indéfiniment, tant que subsistera le synchronisme*. Nous déterminerons plus loin la valeur de cette intensité minima, et nous verrons qu'elle diffère généralement assez peu de celle de l'intensité initiale correspondant aux conditions énoncées plus haut. Ce fait est d'une importance pratique considérable, car il exclut la possibilité de faire tomber, au moyen du rhéostat, le débit à o et, par suite, de mettre par ce procédé seul l'alternateur hors circuit sans produire un à-coup sur le réseau.

Par contre, en augmentant l'excitation, on augmentera bien le débit. Mais :

2° Dans ce cas, ainsi que dans le précédent, on constatera que le changement apporté aux conditions initiales spécifiées plus haut a eu pour effet d'*accroître la valeur primitive de la somme arithmétique des intensités débitées par les alternateurs,* en attribuant à cette somme une valeur plus grande que celle de l'intensité totale passant au réseau de distribution.

Il en sera de même dans le cas où un alternateur possédant, à excitation égale, une charge différente de celle des autres unités, on chercherait à égaliser cette charge en modifiant son excitation. Cette manœuvre conduira toujours à avoir un débit total plus grand sur l'ensemble des alternateurs que sur le réseau.

3. La cause fondamentale de cet ordre de choses réside dans ce fait que l'état de synchronisme imposé à l'ensemble des alternateurs en parallèle exclut tout écart permanent entre les vitesses individuelles et ne permet, par suite, pas aux régulateurs des machines motrices de proportionner le travail moteur au travail résistant, lorsqu'on fait, *momentanément,* varier ce dernier par une modification du champ inducteur. C'est par ce point essentiel que se différencient les conditions de fonctionnement des alternateurs de celles des dynamos continues au couplage. Dans ce dernier cas, toute variation dans le taux d'excitation des inducteurs

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

modifie en même temps la valeur du travail résistant et, par suite, la vitesse angulaire du groupe électrogène, et cette modification, dont l'effet est de rétablir l'équilibre dynamique momentanément troublé, en ramenant le travail résistant à sa valeur initiale, subsistera aussi longtemps que l'action régulatrice de vitesse, opérée par le régulateur de la machine motrice, n'aura pas modifié à son tour les conditions initiales de puissance transmise, de manière à ramener la vitesse actuelle à une valeur plus ou moins voisine de sa valeur primitive. Mais, dans le cas spécial qui nous occupe, la variation de vitesse produite par une modification du champ inducteur ne saurait subsister, sauf décrochage de l'alternateur : elle correspondra à un glissement limité de la partie tournante, modifiant le calage initial de la force électromotrice induite jusqu'à ramener le couple résistant à sa première valeur. A cet instant, la vitesse étant redevenue la même qu'à l'origine, la cause susceptible de mettre en jeu le régulateur se trouve éliminée sans que cet organe ait eu à intervenir pour modifier le travail moteur, sauf toutefois à admettre qu'il ait pu agir au cours de la période de vitesse variable. Nous exposerons plus loin les raisons d'ordre pratique qui nous portent à considérer ce dernier fait comme irréalisable, et la conclusion de ce qui précède sera donc que *la puissance individuellement développée par un quelconque des groupes électrogènes couplés en parallèle demeurera indépendante de son taux d'excitation, tant que le synchronisme subsistera et que les conditions de charge demeureront constantes sur le réseau.*

4. Ces préliminaires établis, il est facile de justifier théoriquement les faits d'expérience énoncés plus haut.

Nous prendrons le cas de deux alternateurs monophasés identiques, couplés aux bornes d'un réseau à potentiel constant. Soient :

R et L la résistance ohmique et le coefficient de self-induction du circuit de distribution ;
V la différence de potentiel aux bornes.

Considérons un état de régime défini par la valeur I de l'intensité totale du courant distribué, et par le calage φ de ce courant par rapport à la tension de distribution V.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Traçons (*fig.* 1) le vecteur OB figurant V, la ligne OC faisant avec OB l'angle φ dans le sens des retards de phase, et BC perpendiculaire à OC. Les trois côtés du triangle OBC seront les vecteurs

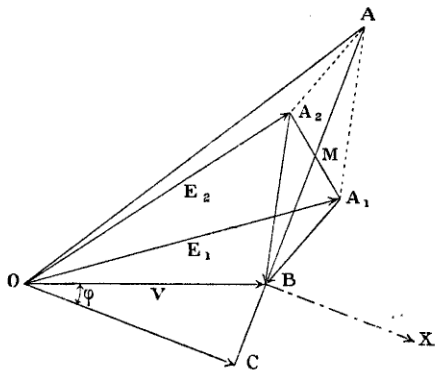


Fig. 1.

respectifs des forces électromotrices en circuit dans le réseau, savoir :

$$OB = V,$$
$$OC = RI,$$
$$BC = \omega LI.$$

Supposons d'abord que le courant total I soit fourni par un seul alternateur; soit l le coefficient de self-induction de son induit, dont nous admettrons comme négligeable la résistance ohmique. Prolongeant CB de la longueur $BA = \omega lI$ et joignant OA, nous aurons suivant OAB le diagramme des forces électromotrices en circuit dans l'induit, savoir :

$OA = E$, force électromotrice induite à circuit ouvert;
$AB = \omega lI$, chute de tension dans l'induit;
$OB = V$, force électromotrice effective aux bornes.

Le segment AB, proportionnel à l'intensité I, peut représenter en grandeur cette intensité, le calage du courant étant suivant BX, à 90° en avant de AB; autrement dit, si l'on convient de disposer le diagramme des intensités à 90° en avant de celui des forces électromotrices, AB sera le vecteur de l'intensité totale passant au réseau.

Si maintenant on suppose que deux alternateurs concourent à la

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

production de ce courant, leurs débits respectifs auront, dans tous les cas, pour somme géométrique la valeur I, et les vecteurs de ces intensités seront, toujours en conservant la convention précédente, les côtés du parallélogramme ayant AB pour diagonale : soient (*fig.* 1)

$$A_1B = I_1,$$
$$A_2B = I_2.$$

Les vecteurs des forces électromotrices induites dans chaque alternateur seront, dès lors, en grandeurs et en phases :

$$OA_1 = E_1,$$
$$OA_2 = E_2.$$

Connaissant donc, en grandeur et en phase, le courant total fourni au réseau et le courant I, débité par l'un des alternateurs, on déterminera les conditions de débit du second alternateur en joignant A_1 au point M milieu de AB, en prolongeant A_1M de la longueur égale MA_2 et en joignant A_2B : ce dernier vecteur représente l'intensité cherchée.

Le diagramme ainsi établi définit donc, pour chaque état de régime, les conditions relatives de fonctionnement de deux alternateurs en parallèle; précisons les rôles respectifs de ses éléments :

Le vecteur AB figure le courant dont l'intensité serait lue sur un ampèremètre en circuit sur le départ de la ligne;

Chacun des vecteurs A_1B et A_2B représente le courant indiqué par l'ampèremètre de l'alternateur correspondant;

OA_1 et OA_2 figurent les forces électromotrices induites à circuit ouvert dans chaque alternateur. Leurs grandeurs numériques sont données, en fonction des excitations, par les caractéristiques à vide; elles varient dans le même sens que ces excitations. L'angle A_2OA_1 mesure, à un facteur constant près, le calage relatif des deux inducteurs pour l'état de régime considéré; et si l'on imagine un troisième alternateur dont la force électromotrice serait en phase avec V, les angles $A_1OB = \alpha_1$, $A_2OB = \alpha_2$ (*fig.* 2) mesureront les avances angulaires des deux premiers inducteurs par rapport au troisième.

Enfin les puissances effectives développées par chaque groupe électrogène seront mesurées par les segments PP_1, PP_2 (*fig.* 2),

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

projections sur la perpendiculaire à la direction OB des vecteurs A_1B et A_2B. Leurs expressions algébriques seront

$$W_1 = \frac{V}{\omega l} E_1 \sin \alpha_1,$$

$$W_2 = \frac{V}{\omega l} E_2 \sin \alpha_2.$$

Il résulte des considérations précédentes que, si l'on fait varier

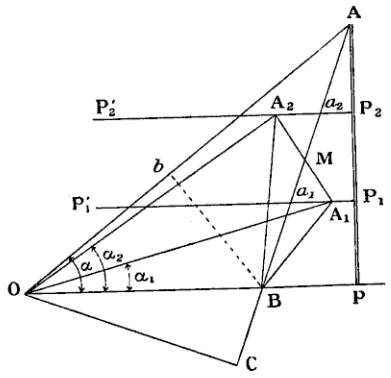


Fig. 2.

les excitations et, par suite, les longueurs OA_1 et OA_2, tout en maintenant la tension V constante, les lieux géométriques des points A_1 et A_2 seront les droites d'égale puissance $P_1P'_1$, $P_2P'_2$.

5. Ceci posé, reprenons les conditions indiquées au § 2. Nous

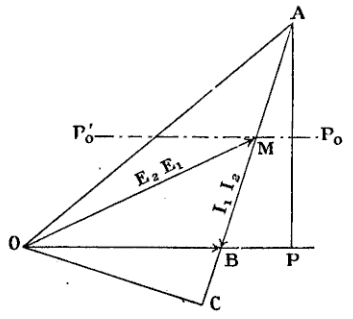


Fig. 3.

supposons les deux alternateurs également excités et débitant des courants d'intensités égales. Le diagramme correspondant à cet état de régime sera dès lors celui de la *fig.* 3 : il montre que le

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

courants seront alors en coïncidence de phases, ainsi que les forces électromotrices induites. Les deux groupes électrogènes fonctionneront ainsi dans des conditions rigoureusement identiques.

Si maintenant on vient à diminuer l'excitation de l'un des alternateurs, le point A_1 (*fig.* 4), primitivement en M, se déplacera

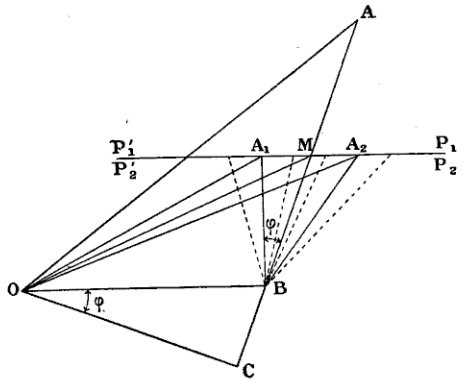


Fig. 4.

dans le sens indiqué sur la droite $P_1P'_1$, le point A_2 restant constamment symétrique du premier par rapport au point M, si l'on règle l'excitation du second alternateur de manière à maintenir constante la tension V. On voit immédiatement que, tandis que l'intensité A_2B débitée par l'alternateur dont on augmente l'excitation variera constamment dans le même sens que celle-ci, par contre, la variation décroissante de l'intensité A_1B sera limitée à un minimum, correspondant au calage à 90° de la direction $P_1P'_1$, calage pour lequel *l'intensité débitée par l'alternateur est en phase avec la tension aux bornes du réseau.* A partir de ce moment, si l'on continue à faire décroître l'excitation, l'intensité ira en croissant tant que le synchronisme se maintiendra.

La valeur de l'intensité minima étant (*fig.* 4)

$$A_1B = MB\cos\varphi,$$

soit

$$I_{1\min} = \frac{I}{2}\cos\varphi,$$

on voit que, dans les conditions moyennes de marche correspondant à un facteur de puissance du courant en ligne égal à 0,8, la plus grande variation décroissante que l'on pourra faire subir, par

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

la seule action des rhéostats de champ, à l'intensité primitivement égale à $\frac{I}{2}$ lui laissera encore les 0,8 de sa valeur initiale.

En second lieu, on vérifie que la modification des champs inducteurs a conduit à attribuer à la somme $A_1B + A_2B$ des débits individuels une valeur plus grande que sa valeur primitive 2MB ou AB : ce qui résulte de ce que les courants, primitivement en phase, se trouvent actuellement décalés. La différence géométrique entre l'une quelconque des intensités actuelles A_1B ou A_2B et l'intensité primitive MB mesure le courant qui se ferme dans le circuit commun aux deux induits, ou *courant de circulation*.

6. Les faits énoncés plus haut se trouvant justifiés de la sorte, cherchons maintenant comment devra être conduit le réglage en cours de marche pour assurer le maximum d'utilisation aux unités électrogènes.

Dans le cas général correspondant aux conditions de régime des diagrammes *fig.* 1 et 2, les induits sont le siège d'un courant de circulation qui les échauffe sans profit, et qui limite d'autant leur utilisation. Le réglage doit donc tendre à annuler ce courant, et ce résultat peut être atteint par la simple manœuvre des rhéostats de champ, car une modification convenable des excitations permettra d'amener les points A_1 et A_2 en a_1 et a_2 sur la ligne AB, et la somme $a_1B + a_2B$ se trouvera dès lors égale à AB.

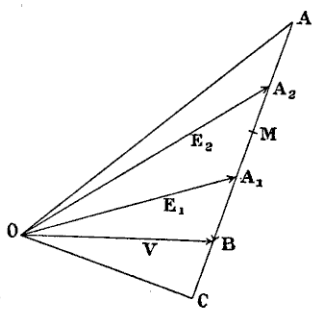


Fig. 5.

La règle à suivre pour réaliser pratiquement ce réglage est la suivante : On amènera d'abord les excitations à être égales. Ceci fait, le diagramme (*fig.* 2) montre que dans les triangles OA_1B, OA_2B, les côtés OA_1 et OA_2 étant dès lors égaux et le côté OB

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

commun, au plus grand angle α_2 sera opposé le plus grand côté A_2B. D'autre part, on a

$$O\alpha_2 > OA_2,$$

et c'est par suite sur l'alternateur qui, les excitations étant égales, débitait le plus qu'il faudra forcer l'excitation pour réaliser la condition ci-dessus. On reconnaîtra qu'elle est remplie lorsque la somme $I_1 + I_2$ aura pris la valeur minima I compatible avec les conditions de charge du réseau, et l'on se trouvera dès lors dans les conditions de régime correspondant au diagramme *fig.* 5.

7. Mais ce nouvel état de choses, tout en réalisant un progrès sur le précédent, laisse encore à désirer en ce sens que, les intensités partielles étant différentes, l'un des alternateurs atteindra son maximum de charge avant l'autre, ce qui ne permettra pas l'utilisation intégrale de l'ensemble électrogène. Pour réaliser cette dernière condition, il faudrait amener les intensités I_1 et I_2 à être égales, tout en les laissant en coïncidence de phase : or, le diagramme de la *fig.* 3 montre que, pour qu'il en soit ainsi, il faut que les puissances respectivement développées soient les mêmes. Nous avons admis que ces puissances étaient, *a priori,* différentes pour un même état de vitesse, et cette hypothèse est conforme à la réalité, tout au moins dans la très grande majorité des cas, parce que, alors même que les machines motrices seraient d'un modèle uniforme et parfaitement réglées à l'origine, les inégalités d'usure arriveront toujours à établir des différences dans leurs conditions de fonctionnement respectif. Il faudra donc se réserver un moyen d'action qui permette de modifier, pour un état de vitesse donné et invariable, la puissance motrice transmise à l'alternateur, c'est-à-dire adjoindre au régulateur automatique de vitesse un second régulateur manœuvrable à la main, directement ou à distance. Cet organe sera le complément *rigoureusement indispensable* du rhéostat de champ : c'est par leur action simultanée que l'on réalisera le réglage rationnel ci-dessus défini, ainsi que le couplage et le découplage de chaque alternateur.

Étant admis que l'on dispose d'un semblable organe, on commencera par égaliser les excitations, ce qui est une des conditions du diagramme (*fig.* 3). Le sens du réglage mécanique complémentaire se déduira de considérations identiques à celles qui ont

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

été exposées précédemment : il faudra réduire la puissance motrice sur le groupe électrogène qui débite le plus, ou l'augmenter sur l'autre, jusqu'à égalisation des débits. Les deux alternateurs se trouveront alors placés dans des conditions de fonctionnement rigoureusement identiques : leurs forces électromotrices induites seront en phase, ainsi que leurs courants respectifs, et l'utilisation de l'ensemble sera aussi complète que possible.

Cette règle est absolument générale, quel que soit le nombre des alternateurs au couplage.

Ce sera toujours une fausse manœuvre que celle qui consisterait à égaliser les débits au prix d'une différence dans les taux d'excitation. Car si, à excitations égales, les débits sont différents, c'est qu'il en sera de même pour les puissances motrices; en admettant que, pour une raison quelconque, on ne puisse modifier celles-ci, le seul réglage rationnel consistera à proportionner les excitations de manière à annuler le courant de circulation, ainsi qu'il a été dit plus haut. Dans ce cas, les débits de chaque alternateur auront des valeurs différentes; en les égalisant par modification des champs

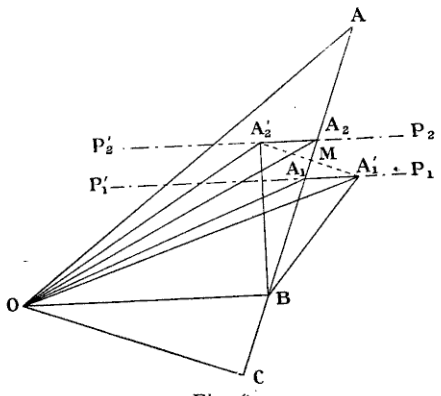


Fig. 6.

inducteurs (*fig.* 6), on établirait un courant de circulation qui n'existait pas précédemment, ce qui reviendrait à substituer à des conditions de fonctionnement relativement bonnes d'autres beaucoup plus défectueuses.

8. Si, au cours de la marche, on veut modifier dans une mesure quelconque la répartition initiale des charges, il faudra manœuvrer

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

parallèlement les rhéostats et les régulateurs de puissance, de manière que les points A_1 et A_2 restent autant que possible sur la droite AB. Cette condition ne peut être réalisée que par tâtonnements : lorsque les débits auront atteint des valeurs voisines de celles que l'on se propose de leur attribuer, on vérifiera si la relation $I_1 + I_2 = I$ se trouve satisfaite, et l'on modifiera les conditions de puissance et d'excitation jusqu'à ce qu'il en soit ainsi. En particulier, si l'on se propose de mettre un alternateur hors circuit, il faudra préalablement ramener son débit à o; or, nous savons que ce résultat ne peut pas être atteint par la seule manœuvre du rhéostat de champ; il faudra combiner les réglages électrique et mécanique de manière à faire décroître la force électromotrice induite jusqu'à une valeur égale à celle de la tension V aux bornes du réseau, et la puissance utilisable jusqu'à la valeur o, conditions pour que le point A_1 du diagramme vienne coïncider avec le point B.

9. *Stabilité de marche.* — Lorsque tous les alternateurs se trouvent dans des conditions de charge identiques, les variations de régime, si brusques qu'elles soient, sur le réseau, n'auront généralement pas d'influence dangereuse sur la stabilité du synchronisme, parce que la variation totale du travail résistant se répartira également sur l'ensemble des machines.

Les causes de désynchronisation accidentelle, survenant au bout d'un temps quelconque de fonctionnement, sont le plus souvent d'ordre intérieur : elles peuvent notamment résulter de conditions motrices défectueuses, et parmi ces dernières il convient de mentionner une sensibilité trop grande du régulateur de vitesse, et un défaut de réglage attribuant à l'une des machines un excès de puissance motrice par rapport aux autres.

Une des conditions les plus importantes pour le maintien de la stabilité est que le régulateur de la machine motrice soit, par un amortissement énergique, rendu suffisamment paresseux pour se trouver soustrait à l'influence des variations momentanées de vitesse, comme celles qui se produisent lorsque, pour une cause quelconque, l'alternateur glisse en avant ou en arrière de son calage initial. Supposons que le régulateur entre en jeu au cours de la période de vitesse variable : si son action pouvait être syn-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

chrone de l'action électrique tendant à limiter le décalage, la valeur finale de ce dernier se trouverait de se fait réduite. Mais, dans le cas général, l'effet de la régulation mécanique suivra à un intervalle de temps quelconque la variation de vitesse qui lui a donné naissance, tandis que l'action électrique synchronisante peut être considérée comme instantanée. La discordance entre ces deux actions pourra amener l'établissement d'un régime oscillatoire extrêmement dangereux pour le maintien du synchronisme, et qui, dans tous les cas, ne pourra que compromettre la régularité de la marche et la fixité de l'éclairage.

Cette raison est suffisante pour exclure, ainsi que nous l'avons fait dans l'étude précédente, toute possibilité pratique d'intervention efficace de la part du régulateur lorsqu'on modifie les conditions de champ.

La nécessité d'adjoindre à cet organe un amortisseur énergique s'impose surtout lorsque la machine motrice développe un couple périodiquement variable, comme c'est le cas pour les machines à vapeur : car le régime est alors naturellement oscillatoire et il faut éviter avec le plus grand soin d'introduire dans le fonctionnement une cause de nature à accroître l'amplitude des oscillations.

Il peut arriver que l'efficacité de l'organe amortisseur se trouve modifiée au bout de quelque temps de fonctionnement, et c'est là une cause assez fréquente de trouble dans la marche; aussi convient-il de veiller de près à l'entretien de cet appareil.

10. Lorsque plusieurs groupes électrogènes fonctionnent en parallèle, un défaut de réglage mécanique, l'usure de certaines pièces, ou encore une modification accidentelle des conditions de distribution, pourront éventuellement attribuer à l'un des groupes une puissance motrice notablement supérieure à celle développée, dans les mêmes conditions de vitesse, par les autres groupes. Ce fait peut compromettre la stabilité du synchronisme. En effet, le couple résistant est limité par la valeur de la plus grande avance angulaire que puisse prendre l'alternateur sans tomber hors de phase; si donc le couple moteur vient à excéder le couple résistant maximum, l'alternateur se décrochera. Mais on sera généralement prévenu, avant que cette limite soit atteinte, par l'établissement d'un régime fortement oscillatoire, et il suffira, pour annuler la

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

cause de trouble, de réduire à une valeur convenable la puissance motrice.

Pareil accident n'est pas à craindre s'il y a insuffisance de travail moteur sur l'un des groupes, car, à la limite correspondant à une puissance nulle, l'alternateur en viendrait simplement à fonctionner comme réceptrice synchrone, les autres prenant dès lors toute la charge du réseau, plus celle nécessitée par l'entraînement du premier.

SUR LES TRANSFORMATEURS STATIQUES;

PAR M. J. ROUTIN.

Le principe des transformateurs statiques se présente avec une admirable simplicité, et, cependant, l'étude d'un transformateur est l'un des problèmes les plus complexes que l'on rencontre dans l'art de la construction électromécanique.

Dès qu'on l'aborde, on se trouve en présence d'un nombre respectable de paramètres variables qui sèmblent n'avoir entre eux aucune relation directe.

C'est ainsi que l'on a à choisir successivement : la section du noyau, sa hauteur, la distance entre deux noyaux voisins, la valeur de l'induction magnétique et le poids de cuivre à employer. Tous ces paramètres sont, *a priori,* indépendants les uns des autres à cette seule condition, qui apparaît avec évidence, que la hauteur des noyaux et leur espacement doivent laisser pour le bobinage une place suffisante.

Il nous faudra, pour les relier entre eux, faire intervenir les conditions de fonctionnement de l'appareil; nous arriverons ainsi, en nous aidant de quelques remarques spéciales qui simplifieront le problème, à un choix judicieux des différents éléments de la construction.

Nous établirons tout d'abord un théorème qui nous fera connaître la répartition la plus économique du cuivre entre le primaire et le secondaire. Notre démonstration prouvera que la loi que l'on admet généralement (et qui consiste à égaliser les pertes au primaire et au secondaire) n'est pas toujours exacte.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Nous étudierons ensuite une épure générale qui nous fournira la solution du problème suivant :

Étant donnée une carcasse magnétique de dimensions déterminées et un poids total de cuivre invariable, quels sont les effets de la variation de l'induction sur les conditions générales de fonctionnement (consommation à vide, chute ohmique de tension, rendement et échauffement des différentes parties)?

L'examen de cette épure nous montrera que la meilleure utilisation industrielle ne correspond pas aux conditions théoriques du rendement maximum. Elle nous fera, de plus, connaître la relation qui existe, pour un poids de matériel actif déterminé, entre les différents éléments de fonctionnement.

Entrant plus avant dans la discussion du problème, nous établirons une relation, entre la hauteur et l'espacement des noyaux, qui correspond au minimum de la perte par hystérésis.

Nous discuterons l'influence des variations des dimensions de la carcasse, puis des variations de la section des noyaux.

Enfin, pour terminer cette étude, nous rechercherons quelle est la forme la plus avantageuse à adopter pour ladite section.

Répartition rationnelle du cuivre.

THÉORÈME DE LA DENSITÉ CONSTANTE.

M. Janet, dans ses *Leçons d'Électrotechnique générale,* a rétabli, pour un cas tout spécial des transformateurs à bobines étagées (qui suppose l'égalité des spires moyennes des deux circuits primaire et secondaire), la loi de Kapp, qui conduit à rechercher l'égalité des pertes au primaire et au secondaire; cette loi se confond alors avec la loi de l'égalité des poids et avec celle de la constance de la densité.

Nous allons établir que cette dernière loi seule est générale et s'applique indifféremment aux transformateurs à bobines étagées et aux transformateurs à bobines concentriques.

Nos formules feront d'ailleurs connaître la valeur à admettre pour cette densité en fonction des données du problème.

Considérons deux circuits de *longueurs invariables* que nous désignerons par L_1 et L_2. Soient I_1 et I_2 les intensités des courants

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans chacun d'eux, et S_1 et S_2 les sections. La perte totale par effet Joule étant supposée constante, proposons-nous de rechercher quelle en est la répartition la plus économique entre les deux circuits.

Pour faciliter l'application du théorème à l'étude des transformateurs, nous désignerons par $\frac{\alpha_1 W}{100}$ et $\frac{\alpha_2 W}{100}$ les pertes en watts dans chacun des circuits (W représentant la puissance du transformateur considéré).

Soit, d'autre part, $\frac{CW}{100}$ la perte totale fixée *a priori*. Nous avons, par définition,

$$\frac{\alpha_1 W}{100} = \rho \frac{L_1}{S_1} I_1^2, \tag{1}$$

$$\frac{\alpha_2 W}{100} = \rho \frac{L_2}{S_2} I_2^2 \tag{2}$$

(ρ résistance spécifique); et, par hypothèse,

$$\frac{\alpha_1 W}{100} + \frac{\alpha_2 W}{100} = \frac{CW}{100},$$

soit

$$\alpha_1 + \alpha_2 = C. \tag{3}$$

De (1) et (2) on tire

$$S_1 = \frac{100\rho}{W} \frac{L_1 I_1^2}{\alpha_1},$$

$$S_2 = \frac{100\rho}{W} \frac{L_2 I_2^2}{\alpha_2}.$$

Le volume total du cuivre est

$$V = L_1 S_1 + L_2 S_2 = \frac{100\rho}{W} \left(\frac{L_1^2 I_1^2}{\alpha_1} + \frac{L_2^2 I_2^2}{\alpha_2} \right). \tag{4}$$

En tirant de (3) la valeur de α_2

$$\alpha_2 = C - \alpha_1$$

et remplaçant dans (4), il vient

$$V = \frac{100\rho}{W} \left(\frac{L_1^2 I_1^2}{\alpha_1} + \frac{L_2^2 I_2^2}{C - \alpha_1} \right).$$

La dérivée par rapport à α_1 est

$$\frac{dV}{d\alpha_1} = - \frac{L_1^2 I_1^2}{\alpha_1^2} + \frac{L_2^2 I_2^2}{(C - \alpha_1)^2}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Le minimum du poids V correspondra à la valeur de α_1 déterminée par l'équation

$$-\frac{L_1^2 I_1^2}{\alpha_1^2} + \frac{L_2^2 I_2^2}{(C-\alpha_1)^2} = 0,$$

soit

$$(C-\alpha_1) L_1 I_1 = \alpha_1 L_2 I_2,$$

ce qui donne

$$\alpha_1 = \frac{C L_1 I_1}{L_1 I_1 + L_2 I_2} \tag{5}$$

et

$$\alpha_2 = C\left(1 - \frac{L_1 I_1}{L_1 I_1 + L_2 I_2}\right) + \frac{C L_2 I_2}{L_1 I_1 + L_2 I_2}. \tag{6}$$

Reprenons maintenant les équations (1) et (2) en mettant en évidence les densités

$$\delta_1 = \frac{I_1}{S_1}, \qquad \delta_2 = \frac{I_2}{S_2}.$$

Il vient

$$\frac{\alpha_1 W}{100} = \rho L_1 I_1 \delta_1, \tag{7}$$

$$\frac{\alpha_2 W}{100} = \rho L_2 I_2 \delta_2, \tag{8}$$

d'où, en divisant membre à membre,

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{L_2 I_2}{L_1 I_1},$$

et, en remplaçant α_1 et α_2 par les valeurs précédemment déterminées,

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = 1. \tag{9}$$

Enfin de (7) et (8), en tenant compte de (9), on tire

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{CW}{100} \frac{1}{\rho(L_1 I_1 + L_2 I_2)}.$$

Conclusion. — Au point de vue théorique, ce résultat est donc acquis : Deux circuits de longueurs L_1 et L_2 étant parcourus par des courants d'intensités données I_1 et I_2, le poids de cuivre à employer, pour une perte totale par effet Joule constante, sera minimum lorsque les densités seront les mêmes dans les deux circuits.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Passant à l'application pratique, si nous considérons un transformateur établi avec des densités différentes au primaire et au secondaire, nous pourrons toujours, *en conservant les mêmes longueurs aux bobinages,* diminuer le poids du cuivre à employer, pour une perte totale par effet Joule constante, en choisissant une densité uniforme déterminée par la formule

$$\delta = \frac{CW}{100} \frac{1}{\rho(L_1 I_1 + L_2 I_2)}.$$

Le cuivre supprimé, laissant pour les isolants une place supplémentaire, se trouve ainsi *utilement supprimé,* et il sera, généralement, toujours possible de loger plus commodément le nouveau bobinage.

Par hypothèse, nous avons admis que les spires moyennes avaient des longueurs invariables. En pratique, l'encombrement total de la section des conducteurs étant diminué, on pourra être, de ce fait, conduit à profiter d'une réduction possible dans les longueurs des spires moyennes (tout au moins pour la bobine extérieure dans le cas d'une disposition concentrique. On réalisera ainsi une nouvelle économie.

En conservant la densité déterminée par la formule

$$\delta = \frac{CW}{100} \frac{1}{\rho(L_1 I_1 + L_2 I_2)},$$

où L_1 et L_2 représentent les valeurs primitives des longueurs, la perte deviendra inférieure à celle que nous avions admise. Les longueurs étant devenues plus petites, on pourra augmenter la densité en procédant par approximations successives. L'_1 et L'_2 désignant les nouvelles longueurs, on prendra

$$\delta' = \frac{CW}{100} \frac{1}{(L'_1 I_1 + L'_2 I_2)}.$$

Pratiquement, ce second calcul sera généralement reconnu inutile. Nous avons cependant tenu à l'indiquer pour la généralisation du procédé, et pour justifier la simplification que nous avons introduite en supposant, dans notre théorème, les longueurs invariables.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Indépendamment de l'économie réalisée, il faut encore remarquer que, par l'application du théorème de la densité constante, les pertes se trouvent réparties d'une façon beaucoup plus rationnelle, puisqu'elles sont alors sensiblement proportionnelles à la surface de refroidissement de chacune des bobines. On a en effet

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{L_1 I_1}{L_2 I_2}.$$

Or, en désignant par n_1 le nombre des spires primaires, par l_1 la longueur de la spire moyenne primaire, par n_2 et l_2 les valeurs correspondantes pour le circuit secondaire, on a

$$L_1 = n_1 l_1, \qquad L_2 = n_2 l_2,$$

d'où

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{n_1 l_1 I_1}{n_2 l_2 I_2}.$$

Et comme

$$n_1 I_1 = n_2 I_2,$$

il vient

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Or, les deux bobines ayant même hauteur, les surfaces de refroidissement σ_1 et σ_2 sont sensiblement proportionnelles aux longueurs des spires moyennes l_1 et l_2.

On a donc à très peu près

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}.$$

On démontrerait de même que le rapport des poids est égal au rapport des longueurs des spires moyennes.

Il faut enfin remarquer qu'on retrouverait encore le théorème de la densité constante si l'on se proposait de rechercher la meilleure répartition du cuivre au point de vue de la chute ohmique de tension.

Considérons, en effet, comme précédemment, deux circuits de longueurs invariables L_1 et L_2 parcourus par des courants d'intensités I_1 et I_2.

Désignons par $\beta_1 \frac{E_1}{100} = \rho \frac{L_1}{S_1} I_1$ et $\beta_2 \frac{E_2}{100} = \rho \frac{L_2}{S_2} I_2$ les pertes ohmiques dans chacun des deux circuits.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La perte $\beta_1 \frac{E_1}{100}$ au primaire donne au secondaire une perte

$$\beta_1 \frac{E_1}{100} \frac{E_2}{E_1} = \beta_1 \frac{E_2}{100}.$$

On aura donc comme perte totale au secondaire

$$\frac{E_2}{100}(\beta_1 + \beta_2).$$

Supposons que cette perte soit constante et désignons-la par $D\frac{E_2}{100}$, on aura par hypothèse

$$(\beta_1 + \beta_2)\frac{E_2}{100} = D\frac{E_2}{100},$$

d'où

$$\beta_1 + \beta_2 = D.$$

On voit de suite qu'on a

$$\beta_1 = \alpha_1 \qquad \text{et} \qquad \beta_2 = \alpha_2, \qquad D = C.$$

On a donc les équations

$$\beta_1 + \beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 = D = C,$$

$$S_1 = \frac{100\rho L_1 I_1}{E_1 \beta_1} = \frac{100\rho L_1 I_1^2}{W\alpha_1},$$

$$S_2 = \frac{100\rho L_2 I_2}{E_2 \beta_2} = \frac{100\rho L_2 I_2^2}{W\alpha_2},$$

et l'on retrouve les mêmes formules que dans le cas des pertes par effet Joule.

Digression. — Le théorème de la densité constante est général et peut s'établir pour un nombre quelconque de circuits.

Nous l'avons, avec intention, réduit au cas où les circuits sont au nombre de deux pour en faciliter la compréhension en vue de son application à l'étude des transformateurs. Nous en donnons ci-après la démonstration complète.

Nous traiterons le cas le plus général d'une distribution par courants alternatifs. Soient (*fig.* 1)

$L_1, L_2, \ldots, L_n, \ldots$ les longueurs des tronçons primaires compris entre deux des transformateurs placés sur le circuit primaire;

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

$L_{1,1}, L_{1,2}, \ldots, L_{1n}, \ldots$
$L_{2,1}, L_{2,2}, \ldots, L_{2n}, \ldots$
$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$
$L_{p1}, L_{p2}, \ldots, L_{pn}, \ldots$
$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$

les longueurs des tronçons secondaires compris entre deux des divers appareils d'utilisation (lampes, moteurs), situés sur le réseau secondaire;

$\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n, \ldots$ les pourcentages des pertes en watts, élémentaires, dans les tronçons primaires;

$\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \ldots, \alpha_{1n}, \ldots$
$\alpha_{2,1}, \alpha_{2,2}, \ldots, \alpha_{2n}, \ldots$
$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$
$\alpha_{p1}, \alpha_{2p}, \ldots \alpha_{np}, \ldots$
$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$

les pourcentages des pertes en watts, élémentaires, dans les tronçons secondaires;

$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_n + \ldots + \alpha_{1,1} + \alpha_{1,2} + \ldots + \alpha_{pn} + \ldots$ le pourcentage de la perte totale consentie sur l'ensemble du réseau;

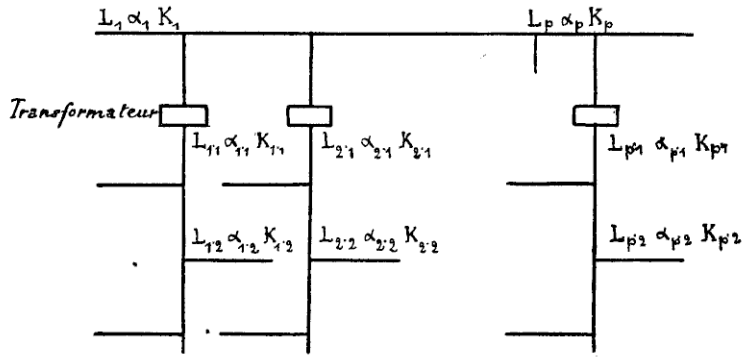


Fig. 1.

$I_1, I_2, \ldots, I_n, \ldots$ les intensités dans les tronçons primaires, pour le régime de la pleine charge;

$I_{1,1}, I_{1,2}, \ldots, I_{1n}, \ldots$
$I_{2,1}, I_{2,2}, \ldots, I_{2n}, \ldots$
$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$
$I_{p1}, I_{p2}, \ldots, I_{pn}, \ldots$
$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$

les intensités dans les tronçons secondaires, pour la pleine charge.

Nous poserons de plus, en général,

$$I_{pn} = \frac{I_{p1}}{K_{pn}}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La quantité K_{pn} ainsi définie est donc le rapport de l'intensité du courant dans le tronçon d'ordre $p1$ à l'intensité dans le tronçon d'ordre pn.

On a, pour le réseau primaire,

$$\alpha_n = \frac{100\rho L_n}{S_n}\frac{I_n^2}{EI_1\cos\varphi_1} = \frac{100\rho L_n I_1}{S_n E\cos\varphi_1 K_n^2}$$

(ρ résistance spécifique, S_n section, $\cos\varphi_1$ facteur de puissance, E tension aux bornes du générateur), d'où

$$S_n = \frac{100\rho I_1}{E\cos\varphi_1}\frac{L_n}{K_n^2\alpha_n}.$$

Pour les circuits secondaires

$$\alpha_{pn} = \frac{100\rho L_{pn}}{S_{pn}}\frac{I_{pn}^2}{EI_1\cos\varphi_1};$$

or

$$I_{pn} = \frac{I_{p1}}{K_{pn}}.$$

D'autre part, en désignant par χ_p le rapport de la puissance du $p^{\text{ième}}$ transformateur à la puissance totale, par η le rapport de transformation, par ζ le rendement du transformateur correspondant au régime de pleine charge et par e et φ_2 la tension et le décalage du secondaire, on a

$$EI_1\cos\varphi_1\chi_p\zeta = eI_{p1}\cos\varphi_2,$$

d'où

$$I_{p1} = \chi_p\zeta\eta\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}I_1;$$

on a donc

$$I_{pn} = \frac{1}{K_{pn}}\chi_p\zeta\eta\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}I_1.$$

Posons pour simplifier

$$\frac{1}{K_{pn}}\chi_p\zeta\eta\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} = \frac{1}{K'_{pn}};$$

il vient

$$\alpha_{pn} = \frac{100\rho L_{pn} I_1}{S_{pn} E\cos\varphi_1 K'^2_{pn}}, \qquad S_{pn} = \frac{100\rho I_1}{E\cos\varphi_1}\frac{L_{pn}}{\alpha_{pn}K'^2_{pn}}.$$

Le volume total du cuivre est

$$\sum L_n S_n + \sum L_{pn} S'_{pn}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Il est donc proportionnel à

$$\sum \frac{L_n^2}{\alpha_n K_n^2} + \sum \frac{L_{pn}^2}{\alpha_{pn} K_{pn}'^2}.$$

La différentielle totale est

$$\sum \frac{L_n^2}{\alpha_n^2 K_n^2} d\alpha_n + \sum \frac{L_{pn}^2}{\alpha_{pn}^2 K_{pn}'^2} d\alpha_{pn}.$$

Le poids sera minimum lorsqu'on aura

$$(1) \qquad \sum \frac{L_n^2}{\alpha_n^2 K_n^2} d\alpha_n + \sum \frac{L_{pn}^2}{\alpha_{pn}^2 K_{pn}'^2} d\alpha_{pn} = 0.$$

Or on a

$$(2) \qquad \alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_n + \ldots + \alpha_{1,1} + \ldots + \alpha_{pn} + \ldots = \beta.$$

Différentiant, il vient

$$(3) \qquad d\alpha_1 + d\alpha_2 + \ldots + d\alpha_n + \ldots + d\alpha_{1,1} + \ldots + d\alpha_{pn} + \ldots = 0.$$

En identifiant (1) et (3) on obtient, en tenant compte de (2),

$$\alpha_n = \frac{L_n}{K_n} \frac{\beta}{\sum \frac{L_n}{K_n} + \sum \frac{L_{pn}}{K_{pn}'}},$$

$$\alpha_{pn} = \frac{L_{pn}}{K_{pn}'} \frac{\beta}{\sum \frac{L_n}{K_n} + \sum \frac{L_{pn}}{K_{pn}'}}.$$

La densité δ_n dans le tronçon primaire d'ordre n est donnée par l'équation

$$\alpha_n = \frac{100 \rho L_n}{E \cos \varphi_1 K_n} \delta_n;$$

d'où

$$\delta_n = \frac{E \cos \varphi_1 K_n}{100 \rho L_n}, \qquad \alpha_n = \frac{E \cos \varphi_1 \beta}{100 \rho \left(\sum \frac{L_n}{K_n} + \sum \frac{L_{pn}}{K_{pn}'} \right)}.$$

Elle est donc indépendante de n.

On trouve de même pour le tronçon secondaire d'ordre pn

$$\delta_{pn} = \frac{E \cos \varphi_1 K_{pn}'}{100 \rho L_{pn}} \alpha_{pn} = \frac{E \cos \varphi_1 \beta}{100 \rho \left(\sum \frac{L_n}{K_n} + \sum \frac{L_{pn}}{K_{pn}'} \right)}.$$

On a donc finalement $\delta_n = \delta_{pn} = \text{const.}$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

De ce qui précède on peut donc déduire la loi suivante :

Étant donné un réseau sur lequel on consent à une perte globale déterminée, la répartition des pertes élémentaires la plus économique exige que la densité du courant reste constante.

Épure générale.

Étant donnée une carcasse magnétique de dimensions déterminées et un poids de cuivre invariable, quels sont les effets de la variation de l'induction magnétique sur les conditions générales de fonctionnement (consommation à vide, chute ohmique de tension, rendement et échauffement des différentes parties), la puissance demandée au transformateur restant constante?

Comme il est indispensable, pour arriver à tirer des conclusions pratiques, de pouvoir suivre les variations concomitantes des différentes grandeurs envisagées, nous nous trouvons tout naturellement conduits à tracer une épure générale donnant les valeurs de ces grandeurs en fonction de l'induction $\mathfrak{B}$, pour le régime de la pleine charge.

Nous avons donc à rechercher, tout d'abord, les moyens d'obtenir les tracés de nos courbes.

Consommation à vide. — Le volume du fer est, par hypothèse, constant. La perte par hystérésis W_h est, comme on le sait, représentée par l'équation

$$W_h = V k_1 \mathfrak{B}^{1,6},$$

où k_1 représente un coefficient dépendant de la qualité du fer.

La perte par courants de Foucault, W_c, par

$$W_c = V k_2 \mathfrak{B}^2$$

(k_2, coefficient dépendant de l'épaisseur des tôles).

Comme il est sans intérêt de distinguer dans la perte totale W_f la partie due à l'hystérésis de celle due aux courants de Foucault, nous nous contenterons de tracer la courbe

$$W_f = V(k_1 \mathfrak{B}^{1,6} + k_2 \mathfrak{B}^2).$$

En pratique, ce tracé se déduira simplement des graphiques usuels donnant la perte par décimètre cube, en fonction de l'induction.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Chute ohmique de tension. — Nous n'envisagerons que la chute « ohmique » de tension, la seule, d'ailleurs, qui puisse se représenter par une équation, et la seule intéressante pour la discussion que nous avons en vue. Pour rendre notre étude indépendante du voltage et faciliter les comparaisons entre divers appareils, nous considérerons, non pas la chute de tension absolue, mais la chute qui correspondrait à une tension invariable de 100 volts.

Nous avons pour le primaire une chute

$$p_1 = R_1 I_1,$$

et pour le secondaire

$$p_2 = R_2 I_2.$$

La perte p_1 donne au secondaire une perte

$$p_1 \frac{E_2}{E_1} = R_1 I_1 \frac{E_2}{E_1}.$$

La perte totale au secondaire sera donc

$$R_1 I_1 \frac{E_2}{E_1} + R_2 I_2$$

pour une tension E_2, et, pour 100 volts,

$$p = \left(\frac{R_1 I_1}{E_1} + \frac{R_2 I_2}{E_2} \right) 100.$$

Dans cette expression, I_1, I_2 (intensités efficaces correspondant à la pleine charge), ainsi que E_1 et E_2, restent constants, tandis que, pour un poids de cuivre invariable, R_1 et R_2 (supposées déterminées de telle façon que les densités restent toujours égales) varient évidemment en raison inverse du carré de l'induction. On a donc, en résumé,

$$p = \frac{K_1}{\mathfrak{B}^2},$$

équation très simple qui permet de construire la courbe représentative de p lorsqu'on connaît l'un de ses points.

Dans les limites compatibles avec la pratique, la perte p reste d'ailleurs, pour une même valeur de l'induction, très sensiblement inversement proportionnelle au poids de cuivre utilisé. Théoriquement, en raison de l'augmentation de la longueur des spires moyennes, la décroissance de cette perte est cependant quelque peu inférieure à celle que donnerait cette loi.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Pertes par effet Joule. — Les pertes par échauffement du cuivre W s'expriment par l'équation

$$W_j = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2.$$

On voit immédiatement, en tenant compte des remarques précédentes (et en supposant toujours la loi des densités égales respectée), que cette équation peut être mise également sous la forme

$$W_j = \frac{K_2}{\mathfrak{V}^2}.$$

Le tracé de la courbe ne présente plus alors aucune difficulté.

Pertes totales. — Des courbes donnant W_f et W_j, on déduira la courbe

$$W_t = W_f + W_j,$$

donnant les pertes totales par hystérésis, courants de Foucault et effet Joule, à pleine charge.

Rendement. — On en déduira la courbe

$$q = \frac{W}{W + W_t},$$

représentant le rendement pour différentes valeurs de $\mathfrak{V}$.

Densité du courant. — Enfin, on pourra encore tracer accessoirement la courbe donnant la densité (commune aux deux circuits) en fonction de $\mathfrak{V}$.

Cette courbe est évidemment représentée par une équation de la forme

$$d = \frac{K_3}{\mathfrak{V}}.$$

Discussion de l'épure générale. — Nous donnons ci-après (voir *fig.* 2), à titre d'exemple, l'épure d'un des nouveaux types de transformateurs que nous avons étudiés pour la maison Grammont.

En examinant cette épure, nous voyons immédiatement que les pertes totales sont minima et, par suite, le rendement maximum, pour une valeur de $\mathfrak{V} = 4500$ environ, et nous constatons que,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

pour cette valeur de $\mathfrak{B}$, les pertes dans le fer et dans le cuivre sont très sensiblement égales.

Ce premier résultat est connu et peut être prévu par un calcul direct (*voir* JANET, *Leçons d'Électrotechnique générale*).

Notre épure nous montre, en outre, et c'est là un point très intéressant, que le rendement reste à peu près le même lorsqu'on

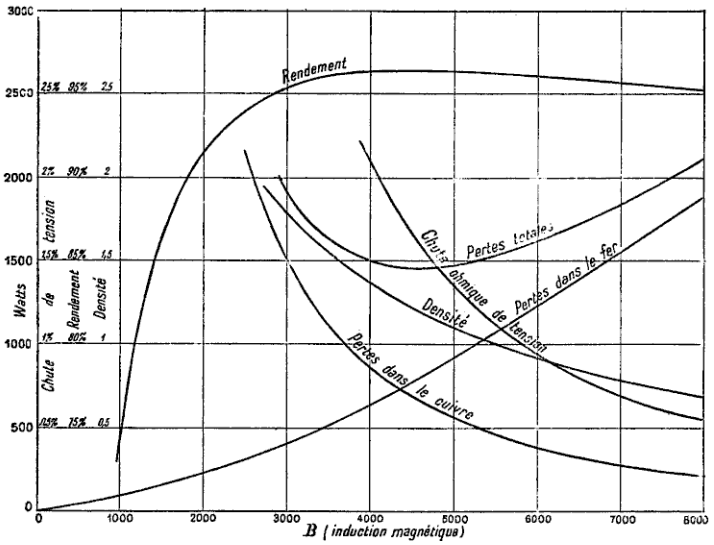


Fig. 2.

porte $\mathfrak{B}$ de 4500 à 6000. Nous avons, pour $\mathfrak{B} = 4500$,

$$q = 96{,}5 \text{ pour } 100,$$

et pour $\mathfrak{B} = 6000$

$$q = 96{,}1 \text{ pour } 100.$$

Mais si nous considérons l'influence de $\mathfrak{B}$ sur la chute de tension, nous voyons immédiatement qu'au point de vue de l'utilisation industrielle on a un très grand intérêt à adopter pour $\mathfrak{B}$ une valeur supérieure à celle qui correspond au maximum absolu du rendement. En conservant les mêmes chiffres que précédemment, nous trouvons, en effet, pour $\mathfrak{B} = 4500$,

$$p = 1{,}7 \text{ pour } 100,$$

et, pour $\mathfrak{B} = 6000$,

$$p = 0{,}95 \text{ pour } 100.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Pour cette dernière valeur de $\mathfrak{B}$, les pertes dans le fer sont beaucoup plus fortes que dans le cuivre.

On a, en effet,

$$W_f = 1215 \qquad \text{et} \qquad W_j = 385.$$

Mais cette différence n'est nullement en désaccord avec les conditions de bon fonctionnement et de conservation de l'appareil, car il est tout à fait logique de tolérer, pour le fer, un échauffement plus élevé que pour le cuivre.

Contrairement à ce qu'indiquent la plupart des théories, il peut donc y avoir intérêt à admettre, en vue d'une bonne utilisation industrielle, une perte dans le fer de beaucoup plus élevée que la perte dans le cuivre.

Conditions de fonctionnement d'un transformateur. — Les remarques que nous venons de faire sur un transformateur déterminé s'appliquent, d'une façon générale, à tous les types industriels. On s'en convaincra facilement en reprenant le tracé de notre épure dans des cas particuliers. Nous avons constaté qu'entre certaines limites les variations du rendement, en fonction de l'induction, sont négligeables par rapport aux variations des pertes dans le cuivre et dans le fer, ou encore par rapport aux variations de la chute ohmique de tension.

Les pertes dans le fer et dans le cuivre suffisent d'ailleurs à définir le rendement; en pratique, il est plus intéressant de substituer à la considération de la perte dans le cuivre celle de la chute ohmique de tension (qui lui est d'ailleurs proportionnelle).

Nous conserverons donc dorénavant pour l'appréciation d'un appareil déterminé ces deux éléments : consommation à vide et chute ohmique de tension.

Dimensionnement en vue d'une consommation à vide minima.

Nous supposons que la section S des noyaux magnétiques est déterminée. (Nous examinerons, par la suite, l'influence que pourrait avoir la variation de cette section.)

Nous supposons également connues la valeur de l'induction et la densité électrique. Il s'ensuit immédiatement que, pour un type de transformateur déterminé, le nombre de spires primaires et

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

secondaires se trouve fixé, aussi bien que la section du cuivre dans chacun des deux circuits.

Désignons par Y la hauteur des noyaux et par X l'espacement de deux noyaux voisins. Soit a la place réservée aux isolants dans le sens de la largeur et b dans le sens de la hauteur.

L'espace disponible pour les bobinages est évidemment

$$(X - a)(Y - b).$$

Cette quantité doit, d'après ce que nous venons de dire, rester constante.

On a donc une première équation

$$(1) \qquad (X - a)(Y - b) = C.$$

Ceci posé, nous considérerons successivement le cas des transformateurs monophasés et celui des triphasés :

1° *Cas des transformateurs monophasés à deux colonnes.*

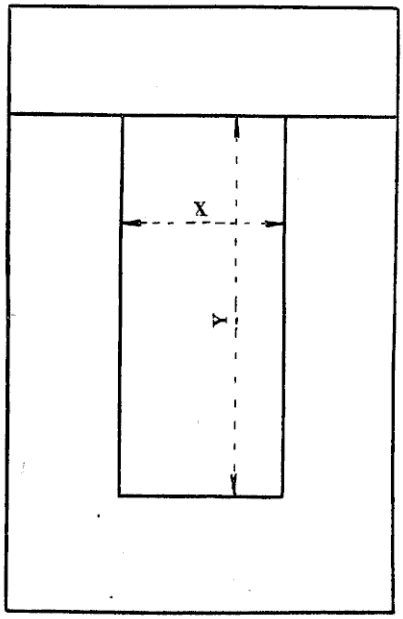


Fig. 3.

Le volume de fer est, d'après le croquis ci-dessus (*fig.* 3),

$$(2) \qquad V = S(2Y + 2X + 4\sqrt{S}).$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'induction étant supposée constante, il s'agit de rendre V minimum.

De (1) on tire

$$X = a + \frac{C}{Y - b}. \tag{3}$$

En remplaçant dans (2) il vient

$$V = S\left(2a + \frac{2C}{Y - b} + 2Y + 4\sqrt{S}\right).$$

En différentiant par rapport à Y, on obtient

$$S\left[-\frac{2C}{(Y - b)^2} + 2\right].$$

Le minimum de V correspond donc à la valeur de Y donnée par l'équation

$$(Y - b)^2 = C.$$

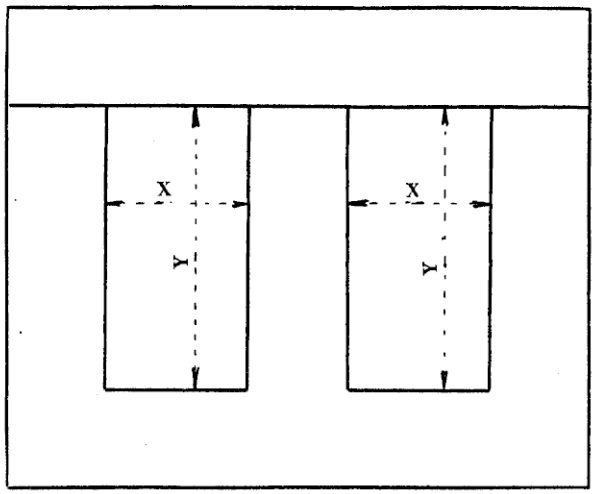


Fig. 4.

En transportant dans (1) il vient

$$(X - a)^2 = C,$$

d'où

$$\frac{X - a}{Y - b} = 1.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

2° *Cas des transformateurs triphasés.* — Nous avons dans ce cas (*fig.* 4)

$$V = S(3Y + 4X + 6\sqrt{S}).$$

En remplaçant X par sa valeur et annulant la dérivée, il vient

$$3 - 4\frac{C}{(Y-b)^2} = 0;$$

d'où

$$(Y-b)^2 = \frac{4C}{3}$$

et

$$(X-a)^2 = \frac{3C}{4},$$

et enfin

$$\frac{X-a}{Y-b} = \frac{3}{4}.$$

INFLUENCE DE LA VARIATION DES DIMENSIONS.

Supposons maintenant que, tout en conservant les autres conditions imposées par nos précédentes hypothèses (c'est-à-dire la section des noyaux, l'induction et la densité électrique constantes), nous fassions varier les dimensions d'un transformateur; il est alors intéressant de rechercher de quelle façon varie la consommation à vide et le poids de cuivre utilisé.

Nous tracerons pour cela (voir *fig.* 5) :

1° La courbe qui donne Y en fonction de X, ces deux quantités étant supposées liées par la relation précédemment établie

$$(X-a)(Y-b) = C.$$

2° La courbe donnant, en fonction de X, la consommation à vide qui est, par hypothèse, proportionnelle au volume

$$V = S(3Y + 4X + 6\sqrt{S})$$

(*dans le cas d'un triphasé*).

3° La courbe donnant le poids du fer.

4° La courbe donnant, en fonction de X, le poids du cuivre

$$P = K_1 + \frac{K_2}{Y-b} = K_1 + K_3(X-a).$$

Cette équation peut s'établir de la façon suivante :

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

On a, pour la longueur de chacun des circuits, la formule générale

$$L_1 = 2\pi\left[r_1 + \frac{\sigma_1}{2(Y-b)}\right]N_1,$$

$$L_2 = 2\pi\left[r_1 + \frac{\sigma_1}{(Y-b)} + e + \frac{\sigma_2}{2(Y-b)}\right]N_2,$$

r_1 désignant le rayon extérieur du tube supportant la bobine

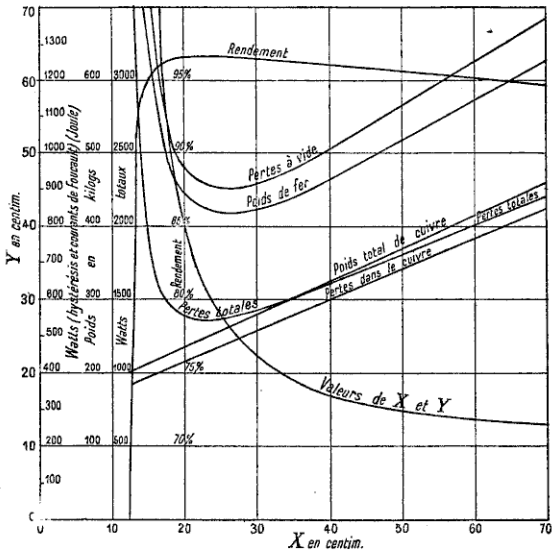


Fig. 5.

intérieure; σ_1 et σ_2, les sections des bobinages, par colonne; et e la distance entre les deux bobinages.

Le poids P s'exprime donc par la relation suivante, où S_1 et S_2 désignent les sections des conducteurs,

$$P = L_1 S_1 + L_2 S_2 = 2\pi\Big[N_1 r_1 S_1 + N_2(r_1 + e)S_2 + \frac{1}{2(Y-b)}(\sigma_1 N_1 S_1 + 2\sigma_1 N_2 S_2 + \sigma_2 N_2 S_2)\Big],$$

qui est bien de la forme annoncée.

5° La courbe donnant, en fonction de X, la perte dans le cuivre. On démontre facilement qu'elle est de la même forme que la précédente : comme les sections restent constantes, les pertes

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans le cuivre sont, en effet, proportionnelles aux poids de cuivre employés.

6° La courbe donnant les pertes totales.

7° La courbe donnant le rendement.

Toutes ces courbes sont très instructives à considérer.

Dans le cas particulier que nous avons envisagé nous pouvons constater :

Que la perte par hystérésis et courants de Foucault est minima pour

$$X = 25,4, \qquad Y = 27,4.$$

Ces valeurs pouvaient être trouvées directement par la formule précédemment établie

$$\frac{X - a}{Y - b} = \frac{3}{4}.$$

On voit immédiatement que, pour une valeur de X supérieure à 25,4, la perte dans le fer, ainsi que les poids de cuivre, augmentent d'une façon concomitante; il n'y a donc pas lieu de rechercher une solution dans cette région.

Pour une valeur de X inférieure à 25,4 on voit, au contraire, que, si la perte dans le fer augmente, le poids de cuivre diminue. En suivant la variation de la perte dans le fer, on remarque encore qu'elle n'augmente pas très rapidement entre $X = 25,4$ et $X = 18$ (valeurs auxquelles correspondent $Y = 27,4$ et $Y = 50$).

Le rendement entre ces deux limites reste bon. Il est, pour $X = 25,4$, de 96,6 pour 100, et pour $X = 18$ de 96,4 pour 100. C'est donc dans cette région qu'il conviendra de rechercher une solution compatible à la fois avec les exigences du fonctionnement et les commodités de la construction. Il convient, à cet égard, de faire remarquer qu'un noyau trop court peut présenter de sérieuses difficultés pour le fractionnement du bobinage dans le cas des hautes tensions et que, d'autre part, on se trouve alors dans de mauvaises conditions pour le refroidissement; car, à poids de cuivre constant, en diminuant la hauteur, on diminue la surface de refroidissement tout en augmentant la perte par effet Joule.

Remarque. — Dans le tracé de l'épure générale, nos hypothèses laissent invariables toutes les données mécaniques et maté-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

rielles, poids du cuivre, poids du fer, dimensions de la carcasse. Dans l'examen de l'influence des variations des dimensions, nous avons, au contraire, supposé constantes les données magnétiques et électriques, l'induction et la densité.

La section des noyaux (supposée constante) est le seul paramètre dont la variation nous restera à analyser; nous verrons par la suite qu'elle est, dans de larges limites, sans influence quant à la question que nous nous posons.

En combinant ces deux analyses, on pourrait arriver à la solution du problème suivant :

La section des noyaux étant connue, et le poids de cuivre invariable, comment doit-on dimensionner le transformateur pour arriver à la meilleure utilisation du cuivre dans les conditions d'une application industrielle? ou, plus explicitement, quelles sont les dimensions qui, pour une perte donnée dans le fer, conduiront à la chute ohmique de tension minima?

Au point de vue économique, il n'y aurait plus qu'à tenir compte, dans le problème, de la variation de poids du fer.

Mais le problème, ainsi posé, revêt un caractère de généralité qui nous a paru mériter l'étude d'une solution directe; c'est pourquoi nous n'insisterons pas sur les réductions qu'il conviendrait de déduire de l'épure générale pour arriver au résultat cherché par voie de combinaison avec le graphique relatif à la variation des dimensions.

DE LA MEILLEURE UTILISATION DE LA MATIÈRE.

Nous supposons, ainsi que nous l'avons dit, que, quelles que soient les dimensions de la carcasse (la section des noyaux, seule, étant donnée), nous nous imposions une perte dans le fer constante et que nous recherchions quelles sont, pour un poids de cuivre donné, les chutes ohmiques de tension correspondantes.

Il n'est pas évident, *a priori,* que dans ces conditions X et Y doivent obéir à la loi, précédemment fixée : $(X-a)(Y-b)=C$. Nous la conserverons cependant, à titre d'hypothèse, sous l'obligation d'avoir à justifier, par la suite, qu'elle est compatible, entre certaines limites, avec les résultats auxquels nous serons conduits.

Soient V le volume d'une carcasse magnétique et W_f la perte

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans le fer consentie. La valeur de $\mathfrak{B}$ à admettre sera déterminée par l'équation

$$W_f = V(k_1 \mathfrak{B}^{1,6} + k_2 \mathfrak{B}^2).$$

La *fig.* 6 donne, en fonction de Y, les valeurs de $\mathfrak{B}$ déduites de

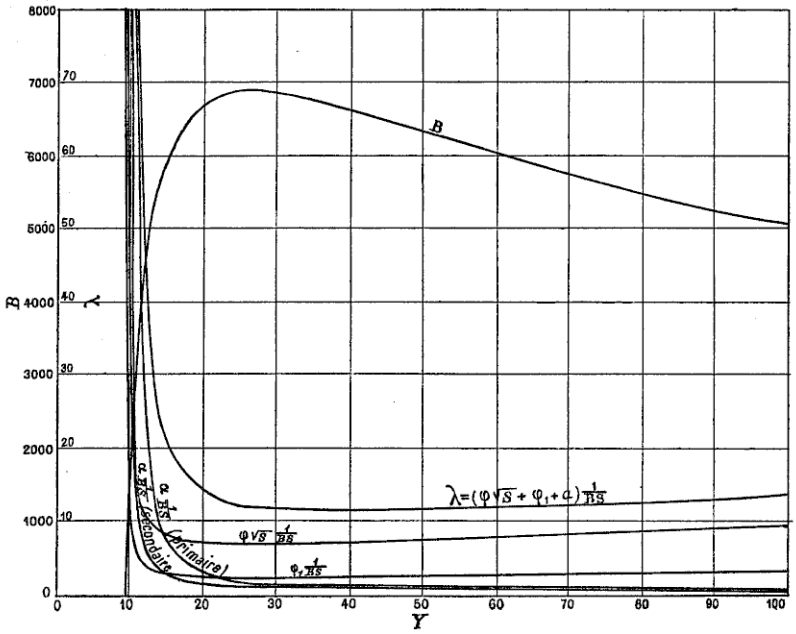


Fig. 6.

cette équation, pour le cas particulier envisagé précédemment. On remarque que $\mathfrak{B}$ est maximum pour $Y = 27{,}4$, valeur que nous avons déjà trouvée pour le minimum de la perte dans le fer à induction constante.

Le nombre de volts engendrés par spire est proportionnel au flux $\mathfrak{B}S$ (S désignant la section du noyau).

La longueur de la spire moyenne s'exprime par la formule

$$\varphi\sqrt{S} + \varphi_1 + a.$$

(Le coefficient φ dépend de la forme de la section; φ_1 représente les isolants et a l'épaisseur du bobinage.)

La longueur du fil λ nécessaire pour avoir un volt sera donc proportionnelle à

$$\frac{\varphi\sqrt{S} + \varphi_1 + a}{\mathfrak{B}S}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Il est évident que l'utilisation du cuivre sera d'autant meilleure que cette longueur λ sera plus petite.

Dans l'exemple particulier que nous présentons on trouve que ce minimum est atteint à très peu près de $Y = 30$ à $Y = 50$, c'est-à-dire précisément dans la région que nous avons été conduits précédemment à considérer comme étant la seule intéressante à l'exclusion de toute autre.

La longueur totale de chacun des circuits restera donc constante dans toute cette région et, pour un poids de cuivre invariable, les sections devront aussi rester les mêmes. Le nombre de spires ne varie d'ailleurs entre les limites envisagées que d'une quantité très faible (inférieure à 9 pour 100), compatible en pratique avec l'hypothèse que nous avons faite sur la constance du produit $(X - a)(Y - b)$ qui se trouve ainsi légitimée.

La meilleure utilisation de la matière (cuivre et fer) correspondrait donc théoriquement à $Y = 30$.

Comme conclusion pratique, nous voyons que, pour choisir une valeur de Y entre les limites auxquelles nous conduit cette étude, les seules grandeurs que nous ayons à prendre en considération sont : le prix du fer, les facilités de construction et les surfaces de refroidissement; le problème étant ramené à ce degré de simplicité, il devient très facile d'établir dans chaque cas particulier un balancement rationnel entre des quantités qui toutes croissent avec Y.

INFLUENCE DE LA VARIATION DE LA SECTION DES NOYAUX.

Il nous reste à déterminer quelle influence peut avoir, sur l'utilisation du cuivre, la variation de la section des noyaux.

Nous pouvons pour cela employer deux procédés :

1° Par déduction de l'épure générale.

Nous nous placerons dans un cas particulier et nous supposerons, par exemple, que l'on choisisse pour chaque carcasse les dimensions correspondant à la perte dans le fer minima. On pourrait évidemment faire toute autre hypothèse, mais nous verrons par la suite que le résultat reste le même.

On aura donc pour chaque carcasse, ainsi que nous l'avons établi,

$$\frac{X - a}{Y - b} = \frac{3}{4} \tag{1}$$

(en supposant qu'il s'agisse de transformateurs triphasés).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons, pour un instant, l'induction constante ainsi que la densité.

Nous serons conduits à poser la seconde équation

$$(2) \qquad (X - a)(Y - b) = \frac{C}{S}$$

(S désignant la section variable des noyaux magnétiques).

De (1) et (2) on tire

$$X = k_1 + \frac{k^2}{\sqrt{S}},$$

$$Y = k_3 + \frac{k_4}{\sqrt{S}}.$$

On donnera à S différentes valeurs, puis on tracera les épures générales correspondant à chaque cas envisagé. On ramènera par les réductions indiquées le poids du cuivre au taux fixé et l'on recherchera, pour une perte dans le fer invariable, quelles sont les valeurs correspondantes de la chute ohmique de tension.

L'application de ce procédé au transformateur auquel se rapportent les Planches I, II et III nous a donné les résultats suivants :

Sections en centimètres carrés.....	150	200	250
Chute ohmique de tension, en pour 100 ...	0,93	0,92	0,92

Nous pouvons en conclure que, pour le cas envisagé, la grandeur de la section est sans influence sur l'utilisation du cuivre.

2° En conservant les mêmes hypothèses que précédemment, nous pouvons arriver plus directement au discernement de la meilleure utilisation du cuivre.

Considérons (*fig.* 7) la courbe représentative de W_f pour une valeur constante de $\mathfrak{B}$, en fonction de S. Nous pouvons en déduire, en fonction de la même variable, les valeurs qu'il conviendra de donner à $\mathfrak{B}$ pour conserver à W_f une valeur constante. Nous tracerons ensuite la courbe représentative du produit $\mathfrak{B}S$. Ses ordonnées seront proportionnelles à la tension engendrée par spire.

D'autre part, la longueur de la spire moyenne peut être représentée par

$$\varphi\sqrt{S} + \varphi_1 + a,$$

φ étant un coefficient qui dépend de la forme de la section des noyaux, φ_1 correspondant aux isolants et a représentant l'épaisseur des bobinages. Cette dernière quantité devra être déterminée

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans chaque cas particulier, pour un poids de cuivre constant.

Le quotient $\frac{\varphi\sqrt{S}+\varphi_1+a}{\mathfrak{V}bS}$ nous donnera la longueur de fil λ nécessaire pour obtenir un volt et son minimum correspondra, comme nous l'avons déjà vu, à la meilleure utilisation du cuivre.

On constate sur l'épure que lorsque S passe de 150 à 250, soit

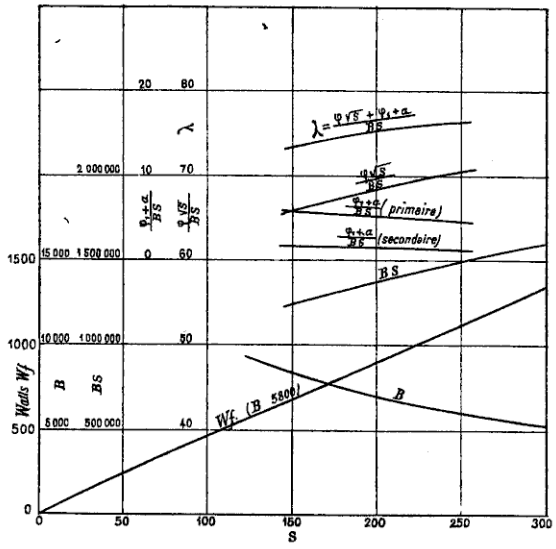


Fig. 7.

une variation de 65 pour 100, λ varie à peine de 4 pour 100.

On pourrait, comme nous l'avons dit, faire toute autre hypothèse sur le dimensionnement des carcasses. Nous examinerons encore, en particulier, un autre cas, simple à traiter, qui suppose Y constant.

Le volume du fer sera, dans ce cas, à très peu près proportionnel à S.

Considérons deux carcasses et désignons par les indices 1 et 2 les valeurs qui s'y rapportent.

Supposons $S_2 > S_1$.

Les volumes V_1 et V_2 seront donnés par l'équation

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{S_1}{S_2}\,a,$$

où a représente une quantité plus grande que 1.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'égalité des pertes par hystérésis nous impose la condition

$$\mathfrak{B}_1^{1,6} V_1 = \mathfrak{B}_2^{1,6} V_2.$$

(En négligeant le terme en $\mathfrak{B}^2$ qui correspond aux pertes par courants de Foucault, nous conservons une approximation bien suffisante pour le but que nous poursuivons.)

On a donc

$$\frac{\mathfrak{B}_1^{1,6}}{\mathfrak{B}_2^{1,6}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{S_2}{S_1 a}. \tag{1}$$

Considérons, d'autre part, la spire qui entourerait directement le noyau. En l'assimilant à la spire moyenne, nous négligeons les isolants et l'épaisseur du cuivre; notre approximation sera donc d'autant plus grande que le transformateur sera plus puissant. La longueur de fil λ à employer par volt sera proportionnelle au quotient de $\sqrt{S}$ par le flux $\mathfrak{B}S$, soit inversement proportionnelle à $\mathfrak{B}\sqrt{S}$. On aura donc

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\mathfrak{B}_2\sqrt{S_2}}{\mathfrak{B}_1\sqrt{S_1}}. \tag{2}$$

Faisons, par exemple, $S_2 = 2\,S_1$.

L'équation (1) nous donne

$$\frac{\mathfrak{B}_1^{1,6}}{\mathfrak{B}_2^{1,6}} = \frac{2}{a}, \tag{3}$$

et l'équation (2)

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\mathfrak{B}_2}{\mathfrak{B}_1}\sqrt{2}. \tag{4}$$

Cherchons quelle valeur il faudrait donner à a pour arriver à l'égalité

$$\lambda_1 = \lambda_2.$$

De (4) on tire

$$\frac{\mathfrak{B}_1}{\mathfrak{B}_2} = \sqrt{2}.$$

Transportant dans (3), il vient

$$(\sqrt{2})^{1,6} = \frac{2}{a};$$

et résolvant

$$1,6\log 2 = \log 2 - \log a.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

d'où

$$\log a = 0,2 \log 2,$$

$$\log a = 0,060206,$$

et enfin

$$a = 1,1487.$$

En pratique, on trouve pour a des valeurs qui se rapprochent beaucoup de ce chiffre. Pour le transformateur pris comme exemple, au cours de cette étude, on a

$$a = 1,1145.$$

On peut donc considérer qu'en doublant la section des noyaux (la hauteur restant constante), on est conduit, pour conserver la même perte par hystérésis, à diminuer $\mathfrak{B}$ dans le rapport de 1 à $\sqrt{2}$. Le flux devient $\sqrt{2}$ deux fois plus grand, mais la spire entourant le noyau étant elle-même $\sqrt{2}$ fois plus grande, les deux circuits conservent les mêmes longueurs.

Au point de vue pratique, nous pouvons donc conclure que la variation de la section est sans grande influence sur l'utilisation du cuivre, et nous sommes à nouveau ramenés à prendre en considération, comme précédemment, le prix du fer, les facilités de construction et les surfaces de refroidissement, toutes quantités qui augmentent avec S.

Forme la plus avantageuse à donner à la section.

TRANSFORMATEURS GRAMMONT, SYSTÈME J.-L. ROUTIN.

La section des noyaux doit être simple, et conduire à une construction facile. Elle doit permettre de fixer d'une manière invariable, par rapport au noyau, la position de la bobine intérieure, tout en ménageant de larges cheminées pour la ventilation. Elle doit enfin, pour une bonne utilisation du cuivre, présenter un périmètre de bobinage aussi réduit que possible.

Nous avons préféré les bobines circulaires, en raison de la commodité du bobinage, et aussi pour la résistance plus grande que cette forme donne aux tubes de support.

Nous devons écarter immédiatement la solution théorique qui conduit à la forme circulaire pour les noyaux magnétiques. Elle présente, en effet, des difficultés de construction presque insurmontables.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Nous avons également écarté, pour la même raison, les solutions qui exigent un grand nombre de bandes de tôle de largeurs différentes, et nous avons choisi la croix régulière inscrite dans un cercle, en déterminant les dimensions des bras de telle façon que sa section soit maxima.

La section ainsi déterminée jouit de propriétés spéciales que nous allons exposer.

Détermination des dimensions de la croix régulière rationnelle. — Désignons par $2x$ la largeur et $2y$ la hauteur des bras,

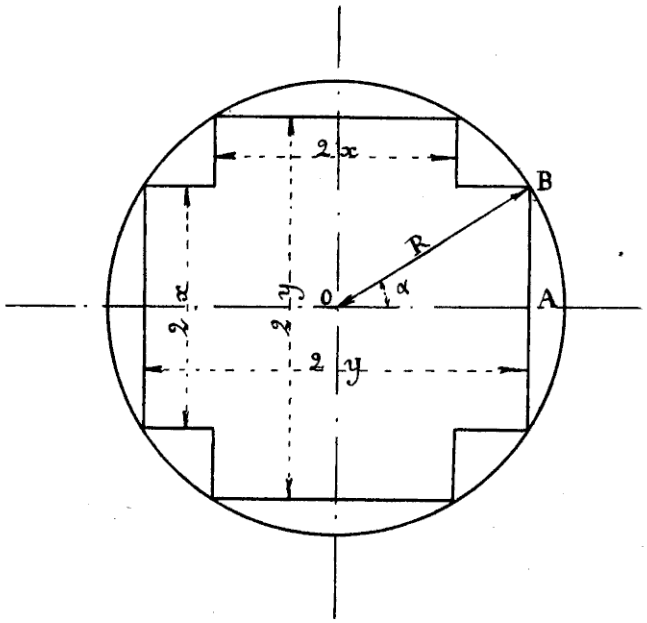


Fig. 8.

et soit R le rayon du cercle circonscrit.

La section U de la croix peut s'exprimer par la formule

$$U = 4(2xy - x^2).$$

Mais on a, en désignant par α l'angle AOB,

$$x = R\sin\alpha, \qquad y = R\cos\alpha,$$

d'où

$$U = 4R^2(2\sin\alpha\cos\alpha - \sin^2\alpha),$$
$$U = 4R^2(\sin 2\alpha - \sin^2\alpha).$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Dérivons par rapport à α. Il vient

$$\frac{dU}{d\alpha} = 4R^2(2\cos 2\alpha - 2\sin\alpha\cos\alpha) = 4R^2(2\cos 2\alpha - \sin 2\alpha).$$

En annulant la dérivée, on est conduit à la condition

$$\operatorname{tang} 2\alpha = 2,$$

qui donne

$$\alpha = 31°43',$$
$$\sin\alpha = 0,5257,$$
$$\cos\alpha = 0,850.$$

Les dimensions x et y devront donc être choisies de façon que l'on ait

$$x = R.0,5257,$$
$$y = R.0,850.$$

La surface U devient alors

$$U = 4(2R^2.0,85.0,53 - R^2.0,53^2) = 2,172R^2.$$

Le coefficient d'utilisation de la surface, défini par le rapport

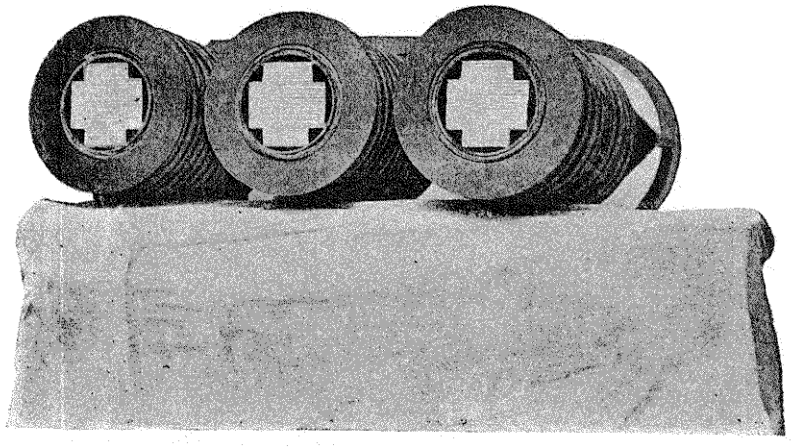


Fig. 9.

de la section du noyau à la surface de la spire qui l'entoure, est donc

$$\frac{2,172R^2}{\pi R^2} = 0,787.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Première remarque. — Le coefficient d'utilisation de la surface est plus élevé, dans les mêmes conditions de ventilation, pour la section en croix rationnelle que pour la section circulaire.

Un noyau circulaire, pour le même coefficient, devrait avoir un rayon r donné par l'équation

$$\pi r^2 = 0,8\,R^2,$$

soit

$$r = 0,886\,R.$$

Il ne resterait donc, pour la ventilation, qu'une lame d'air égale à environ $\frac{1}{10}$ du rayon. On reconnaîtrait, en pratique, notamment

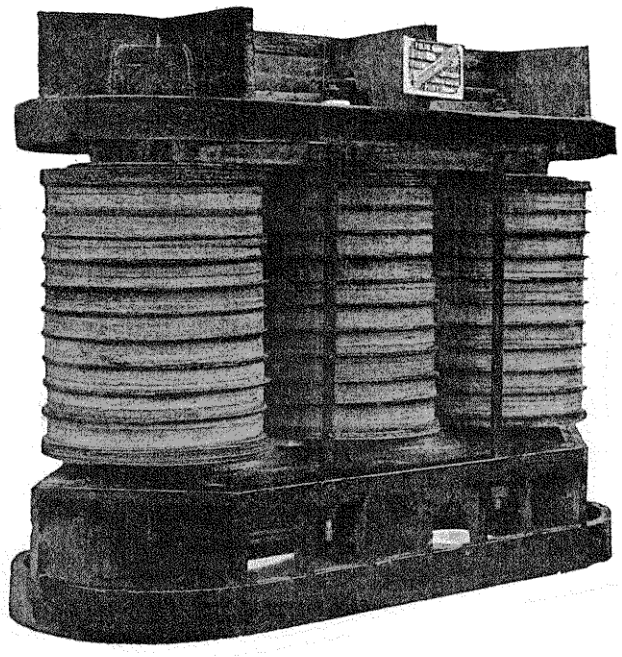


Fig. 10.

pour les transformateurs de faible puissance, que dans ces conditions la ventilation serait mal assurée. La supériorité de la disposition en croix tient, à cet égard, à ce que la ventilation se produit par quatre canaux au lieu de se produire par une lame annulaire étroite.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Deuxième remarque. — Le coefficient d'utilisation de la surface est le même pour une section en croix régulière rationnelle avec ventilation et pour une section carrée sans ventilation.

Considérons en effet le développement de la circonférence circonscrite à la croix régulière rationnelle

$$l_1 = 2\pi R$$

et le développement du carré ayant la même surface. Le côté A de ce carré est donné par l'équation

$$A^2 = 2,472\,R^2,$$

d'où

$$A = R\sqrt{2,472}$$

et

$$l_2 = 4A = R.4.\sqrt{2,472}.$$

En comparant l_1 à l_2 on trouve

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{2\pi}{4\sqrt{2,472}} = 1.$$

Troisième remarque. — La surface de refroidissement est plus

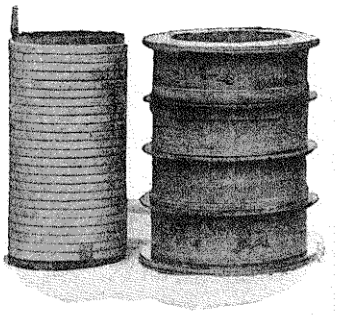


Fig. 11.

grande pour la croix régulière rationnelle que pour les sections circulaires ou carrées.

On a, en effet, en reprenant les notations précédentes :

Pour la section en croix régulière rationnelle, une surface de refroidissement S_1 proportionnelle à $8y$, soit à

$$8.0,85\,R = 6,80\,R;$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Pour la section circulaire, une surface de refroidissement S_2 proportionnelle à

$$0,886\,R.2\pi = 5,56\,R;$$

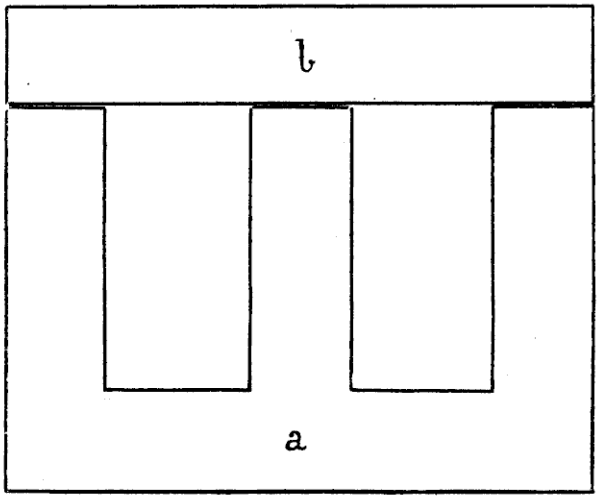


Fig. 12.

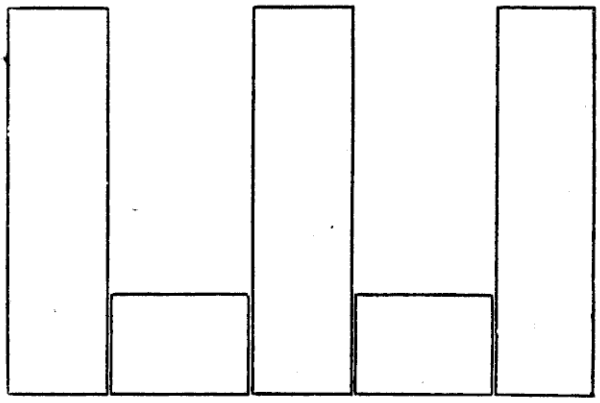


Fig. 13.

Pour la section carrée, une surface de refroidissement S_3 proportionnelle à $4A$, soit

$$4R\sqrt{2,472} = 6,28\,R,$$

d'où

$$\frac{S_1}{S_2} = 1,23, \qquad \frac{S_1}{S_3} = 1,09.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Détails de construction de la carcasse. — Ainsi que le représente la figure schématique ci-contre, la carcasse magnétique se compose, en principe, de deux parties distinctes, l'une *a* en forme de **E**, l'autre *b* en forme de **I**.

Le montage de *a* est indiqué par les *fig.* 13 et 14, qui représentent respectivement deux couches successives.

Les avantages de cette disposition consistent en ce qu'elle ne

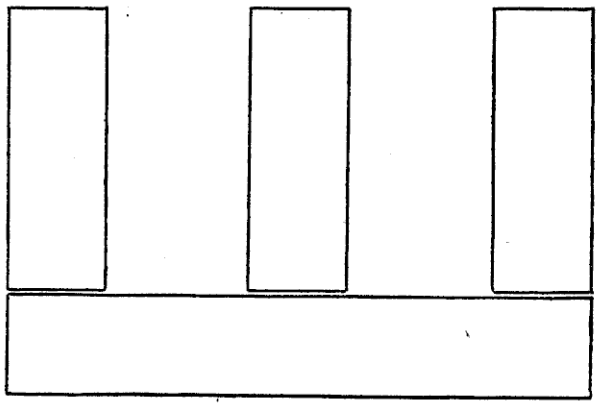


Fig. 14.

comporte que trois joints à dresser. Il en résulte une économie dans la main-d'œuvre, une amélioration du courant de magnétisation, un montage plus commode et plus solide, et un fonctionnement plus silencieux.

SUR LES ALTERNATEURS COMPOUND, SYSTÈME HUTIN ET LEBLANC;

PAR M. J. ROUTIN.

Le groupe électrogène Grammont-Piguet exposé au palais de l'Électricité est constitué par un moteur à vapeur horizontal, monocylindrique, attaquant directement un alternateur triphasé de 600 kilowatts; l'inducteur a été déterminé de façon à servir de volant au moteur.

L'excitatrice spéciale qui permet d'obtenir le compoundage, devant avoir à chaque instant une vitesse proportionnelle à celle

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de l'alternateur, a dû être asservie à ce dernier, à l'aide d'une commande par pignon et roue dentée; contrairement à ce que l'on pourrait croire, c'est, ainsi que nous le démontrerons par la suite, le pignon de l'excitatrice qui entraîne la roue dentée montée à l'extrémité de l'arbre de l'alternateur.

La *fig.* 1 montre l'ensemble des machines exposées par les établissements A. Grammont; nous ne décrirons ici que l'alternateur et son excitatrice spéciale.

I. — Alternateur.

Inducteur. — L'inducteur se compose d'un lourd volant de fonte, coulé en deux parties assemblées par des boulons et des clavettes posées à chaud, sur la jante duquel sont répartis 64 pôles radiaux; ces pôles sont en acier coulé et présentent un noyau à section circulaire surmonté d'une pièce polaire rectangulaire : ils sont reçus à la surface de la jante, dans un logement spécial, et fortement serrés contre elle par des vis qui la traversent. Tout desserrage est d'ailleurs rendu impossible par l'emploi d'un frein spécial. Le bobinage des pôles est fait d'un ruban de cuivre enroulé sur champ; les spires sont séparées entre elles par de simples feuilles de papier. L'isolement ainsi obtenu est largement suffisant, car, toutes ces bobines étant reliées en série, la différence de potentiel entre deux spires atteint à peine 0,02 volt. Du côté de l'induit, les spires sont maintenues contre l'action de la force centrifuge par une solide rondelle de bronze. L'ensemble de l'inducteur présente ainsi un caractère mécanique vraiment constructif.

La section de la jante a été déterminée de façon à augmenter, autant que possible, le moment d'inertie. On a choisi, d'après les diagrammes relevés sur la machine à vapeur, un moment d'inertie tel que la variation instantanée de vitesse angulaire dans un tour, à charge constante, n'atteigne pas $\frac{1}{250}$ de la valeur normale.

Induit. — L'aspect extérieur de l'induit diffère assez sensiblement, comme style, des constructions habituelles. On remarque trois grands anneaux verticaux reliés par des nervures transversales, sans aucun recouvrement extérieur. Dans les cloisonnements,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

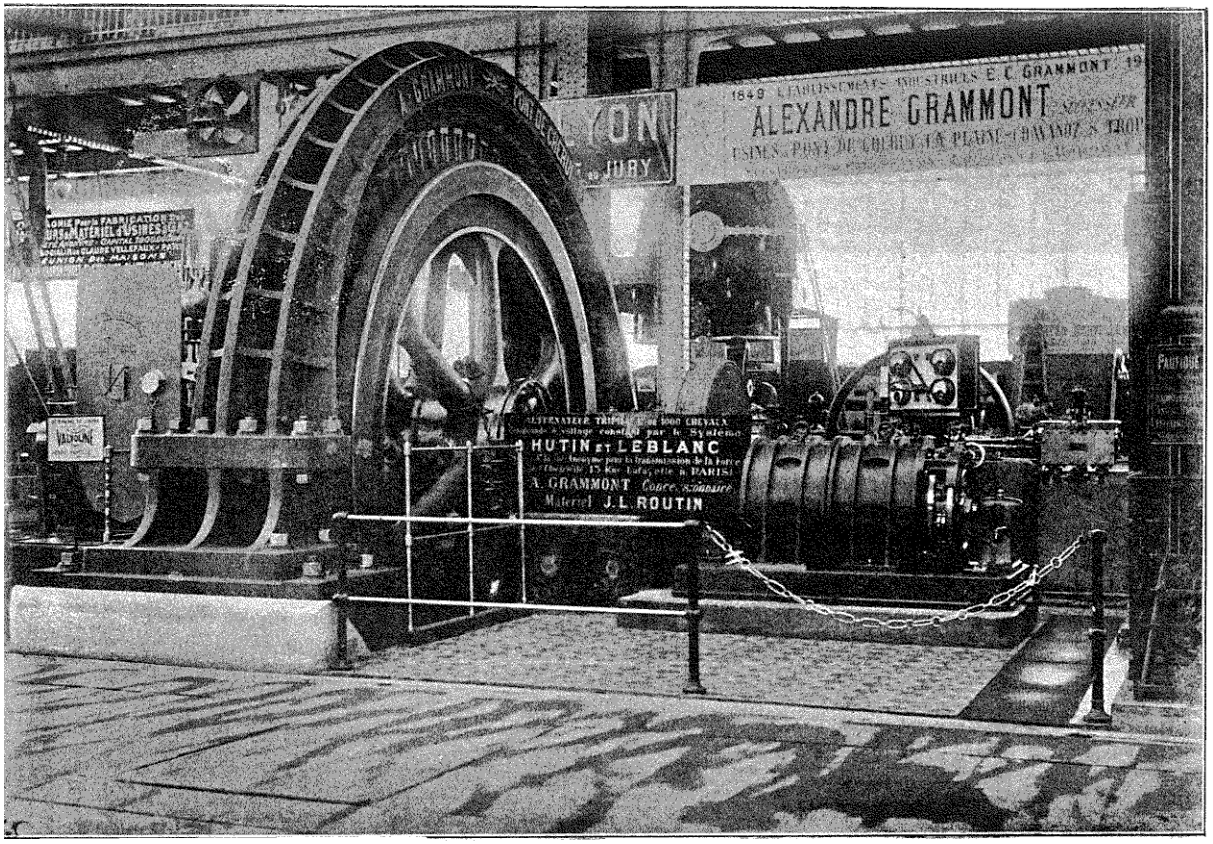


Fig. 1. — Vue d'ensemble du groupe électrogène Grammont–Piguet.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

on a ménagé des ouïes de ventilation pour permettre le refroidissement des tôles de l'induit. Nous avons jugé cette disposition

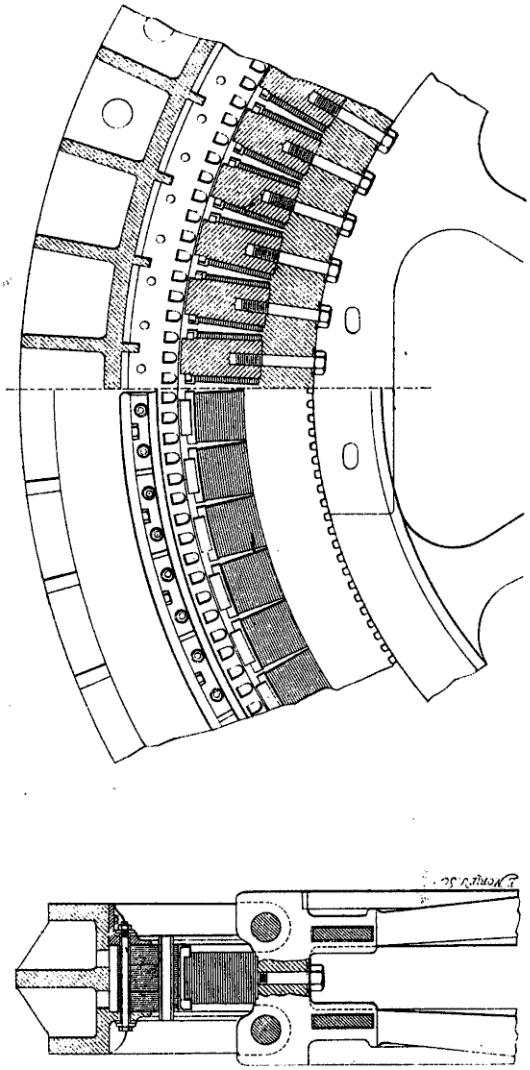


Fig. 2. — Coupes et vue de face de l'alternateur.

plus rationnelle au point de vue de la résistance des matériaux : on a, en effet, à résister, à part les effets de la pesanteur et du couple résistant, à des forces centrales qui tendent à faire travailler

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

l'ensemble à la manière d'un tube de fumée dans les chaudières, et non pas comme une poutre à la flexion.

Les nervures transversales ont pour fonction d'assurer le serrage des tôles; les anneaux, de donner à l'ensemble la rigidité nécessaire et de transmettre aux supports l'effort du couple résistant.

Les tôles de l'induit ont été divisées en trois paquets séparés par des canaux de ventilation. Elles sont assemblées à l'aide d'une cornière en acier coulé et de boulons de serrage.

Le bobinage est logé dans des trous de forme spéciale, rectangle et demi-cercle juxtaposés : l'isolement est obtenu par des tubes en carton et micanite. Chacun de ces tubes a été essayé à 20 000 volts pour une tension normale de 2400 volts.

Il n'a pas été prévu de couvre-bobinage, car nous estimons qu'il n'y a aucune raison pour cacher un travail bien fait.

La *fig.* 2 montre l'ensemble des dispositions de l'alternateur.

Le Tableau ci-dessous en résume les principales données de construction et de fonctionnement.

ALTERNATEUR GRAMMONT.

DONNÉES GÉNÉRALES.

Puissance en kw	600
Fréquence en périodes par seconde	50
Nature de l'enroulement induit	Étoile
Courant en ampères sur chaque fil pour $\cos\varphi = 1$	144
— — $\cos\varphi = 0,7$	206
Différence de potentiel efficace, en volts	2400
Force électromotrice efficace de chaque enroulement, en volts	1390
Nombre de pôles	64
Vitesse angulaire en tours par minute	93,75

INDUCTEURS.

Distance axiale entre deux pôles à la périphérie, en cm	24,6
Induction magnétique dans les moyeux (sans dispersion), en gauss	12 000

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

DÉTERMINATION DU BOBINAGE INDUCTEUR.

	Excitation en ampères-tours.
Pôles	1 660
Culasse	98
Fer induit, entre les trous	180
— derrière les trous	122
Entrefer	7 550
Total	9 610
Réaction d'armature pour $\cos\varphi = 1$	2 020
Nombre de spires sur chaque bobine	70
Épaisseur de l'isolement en papier, en mm	0,5
Résistance en ohms	0,825
Courant en ampères, pour 120 volts	146
Excitation maxima en ampères-tours, pour chaque circuit magnétique sous 120 volts	22 000
Dépense d'excitation, en watts	17 500
Surface de refroidissement d'une bobine inductrice, en cm²	1 610
Surface puissancique de refroidissement, en cm² par watt	5,9
Échauffement calculé, en degrés C	23,3

Effet Joule.

	$\cos\varphi = 1$.	$\cos\varphi = 0,7$.
Excitation, en ampères-tours	11 630	16 410
Courant, en ampères	76	117
Perte, en watts	4 250	11 300

INDUIT.

Diamètre d'alésage, en cm	500
Largeur totale, en cm	28
Largeur des canaux de ventilation, en cm	3
Largeur réelle de l'induit, en cm	25
Nombre de trous (64.3)	192
Nombre de conducteurs dans chaque trou	7
Diamètre du conducteur, en mm	10,5
— couvert, en mm	12
Section, en mm²	65,4
Longueur totale du câble pour chaque circuit, en m	340
Poids total du câble de l'induit, en kg	590
Résistance de chaque circuit, en ohms	0,1
Perte de tension dans chaque fil, en volts, pour $\cos\varphi = 1$	14,4
— — pour $\cos\varphi = 0,7$	20,6
Section de fer utile entre les trous, en cm²	186
— derrière —	180

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Pertes par hystérésis.

Volume entre les trous, en dm^3	107
Perte en watts, à 69 watts par dm^3	7 400
Volume derrière les trous, en dm^3	294
Perte en watts, à 23,75 watts par dm^3	6 650
Perte totale, en watts	14 050

Perte par effet Joule.

Puissance perdue dans l'induit, en watts, pour $\cos\varphi = 1$	6 210
— — $\cos\varphi = 0,7$	12 700

Rendement.

	$\cos\varphi = 1$.	$\cos\varphi = 0,7$.
Pertes par effet Joule dans l'inducteur, en watts	4 250	11 300
Pertes par effet Joule dans l'induit, en watts	6 210	12 700
Hystérésis	14 050	14 050
Frottements mécaniques	6 000	6 000
Total des pertes	30 510	44 050
RENDEMENT, en pour 100	**0,95**	**0,932**

II. — Excitatrice compoundeuse.

DESCRIPTION. — L'excitatrice compoundeuse de MM. Hutin et Leblanc se compose, en principe, d'un induit ordinaire de machine à courant continu A (*fig.* 3), soumis à l'influence de deux champs

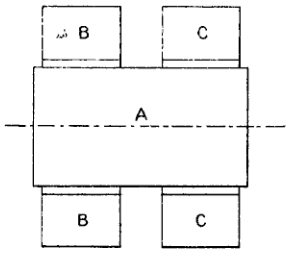


Fig. 3.

tournants indépendants, créés par deux *stators* B et C analogues à ceux employés dans les moteurs asynchrones. Le bobinage du stator B est relié en dérivation aux bornes de l'alternateur, celui de C est en série avec l'induit.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Le point caractéristique de l'invention de MM. Hutin et Leblanc consiste en ce que, grâce au dispositif tout spécial et très ingénieux des connexions, il devient possible, dans une machine à courant continu, de recueillir, avec des balais fixes, le courant engendré par un champ inducteur tournant.

Pour compléter notre description et avant d'aborder l'explication du fonctionnement, il nous reste à définir ce mode spécial de connexion : le bobinage de l'induit correspond toujours à celui d'une machine ordinaire qui utiliserait n lignes de balais (¹) pour n lignes de pôles, mais de l'induit au connecteur ordinaire toutes les connexions sont renversées par rapport à n axes de symétrie et, de plus, le nombre de lignes de balais n'est plus forcément égal au nombre de lignes de pôles (le nombre de touches du collecteur étant modifié en conséquence).

L'un ou l'autre de ces moyens pourrait suffire, ainsi que nous l'établirons plus loin, à obtenir le résultat cherché : leur combinaison facilite, en pratique, la construction de la machine.

Si nous appelons n le nombre de lignes de pôles du champ tournant, k le nombre de lignes de balais, α la fréquence du courant alternatif inducteur et ω la vitesse de l'induit, nous allons établir que la condition nécessaire et suffisante pour qu'on puisse capter le courant continu, à l'aide de balais fixes, sera

$$n + k = \frac{\alpha}{\omega},$$

ou

$$n - k = \frac{\alpha}{\omega},$$

suivant que l'induit tournera dans le même sens que le champ, ou en sens inverse. Comme n et k sont déterminés par la construction d'une manière invariable, cette condition revient à fixer un rapport déterminé entre la vitesse de l'excitatrice et celle de l'alternateur.

Fonctionnement. — Pour expliquer le fonctionnement de cette machine, nous procéderons du simple au composé. Considérons, tout d'abord, une machine ordinaire à courant continu bipolaire.

(¹) Nous appelons *ligne de pôles* ou *ligne de balais* l'ensemble de deux pôles ou de deux balais situés aux extrémités d'un même diamètre.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Son fonctionnement ne dépend évidemment que du mouvement relatif de l'induit par rapport à l'inducteur : on peut donc supposer que l'on donne à l'ensemble, autour de l'axe, un mouvement de rotation de vitesse égale à celle de l'induit et de sens contraire; l'induit se trouve ainsi ramené au repos et l'inducteur tourne *en entraînant les balais avec la même vitesse et dans le même sens.*

Nous allons chercher :

1° A renverser le sens de la rotation qu'il faut donner aux balais, par rapport à l'induit, pour recueillir le courant continu.

2° A faire varier la vitesse de ces balais.

Puis, après avoir établi la formule générale qui donne la vitesse absolue de ces balais, nous verrons à quelles conditions nous pouvons obtenir leur immobilité.

I. *Renversement du sens de rotation par rapport à l'induit, la vitesse des balais restant constante.* — Reprenons nos considérations précédentes. Nous avons déduit directement, d'une machine ordinaire, une machine théorique à induit fixe et à inducteurs et balais tournants.

Nous supposons toujours, pour l'instant, notre machine bipo-

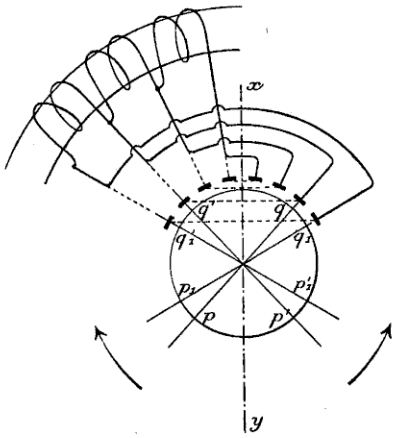


Fig. 4.

laire. Si les inducteurs font α tours par seconde, les balais devront eux-mêmes faire dans le même temps α tours autour du collecteur. Figurons schématiquement (voir *fig.* 4) un anneau Gramme bipo-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

laire et son collecteur. Soit, à un instant donné, p', q' la position de la ligne des balais qui correspondrait à des connexions ordinaires entre l'induit et le collecteur. Considérons un diamètre quelconque xy fixe par rapport au collecteur et supposons, comme nous l'avons dit, que toutes les connexions soient inversées par rapport à ce diamètre. Dans notre schéma, les connexions ordinaires sont indiquées par des traits pointillés et les connexions vraies par des traits pleins. A la position p', q' correspondra évidemment la position p, q, symétrique par rapport à xy. On voit de suite que si p', q' vient en p'_1, q'_1, p, q vient en p_1, q_1 en se déplaçant avec la même vitesse, mais en sens inverse.

Pour une machine à n lignes de pôles, on obtiendra évidemment le même résultat en adoptant n diamètres de symétrie.

II. *Variation de la vitesse des balais.* — Considérons un induit à n pôles supposé, comme précédemment, réduit à l'immobilité. Avec un collecteur à n lignes de balais, ceux-ci devront tourner dans le même sens que le champ inducteur et avec la vitesse de ce champ. Mais, puisque nous admettons (théoriquement du moins) que les balais puissent se déplacer, nous pouvons, à volonté, disposer de leur vitesse en modifiant le nombre des lames

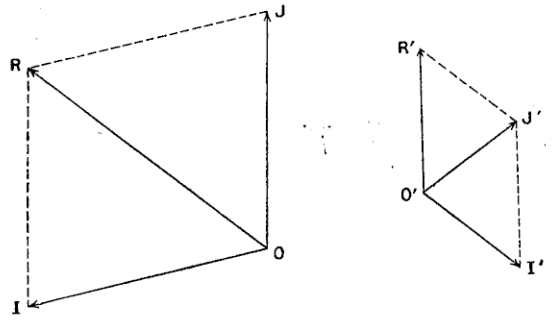


Fig. 5.

du collecteur qui sont en parallèle, n par n. En n'en laissant par exemple subsister qu'un nombre n fois plus petit, il est évident que la vitesse des balais devra être n fois plus grande que celle du champ; et, pour k lignes de balais, cette vitesse deviendra égale à celle du champ, multipliée par le rapport $\frac{n}{k}$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

APPLICATIONS DE CES DEUX PRINCIPES A L'EXCITATRICE COMPOUNDEUSE. — Considérons tout d'abord l'un des deux stators qui entourent l'induit. Désignons par n le nombre de ses lignes de

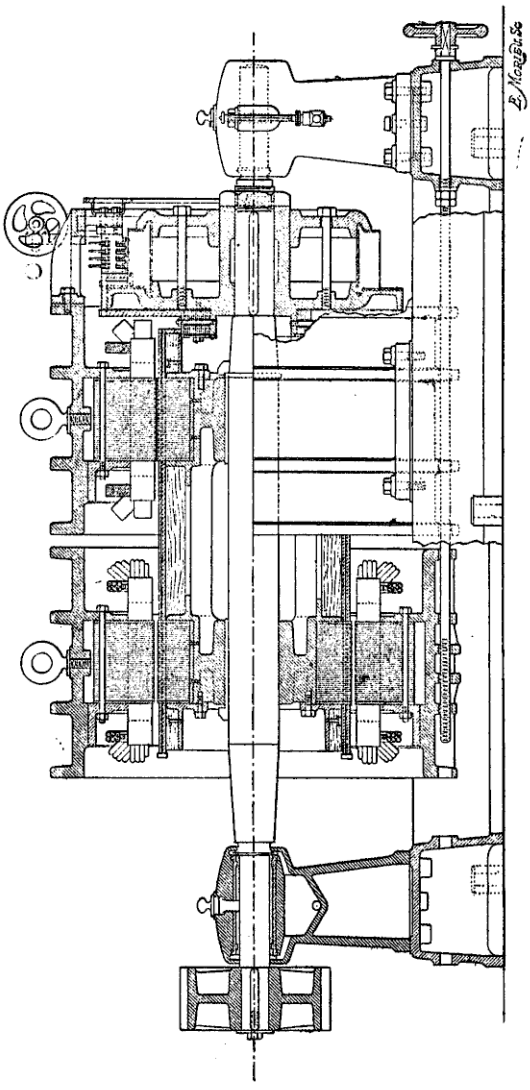


Fig. 6. — Coupe longitudinale de l'excitatrice.

pôles et par α la fréquence du courant qui l'alimente. La vitesse du champ tournant sera évidemment $\frac{\alpha}{n}$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons que l'induit tourne *dans le même sens,* avec la vitesse ω.

La vitesse relative du champ par rapport à l'induit sera $\frac{\alpha}{n} - \omega$.

L'induit multipolaire aura, lui aussi, n pôles. Pour k lignes de balais au collecteur, la vitesse de ceux-ci devra être, ainsi que nous l'avons démontré,

$$\frac{n}{k}\left(\frac{\alpha}{n} - \omega\right),$$

soit

$$\frac{\alpha - n\omega}{k}.$$

L'induit étant relié au connecteur ordinaire par un connecteur spécial à renversement, le sens de cette rotation se trouve inversé par rapport à celui de l'induit.

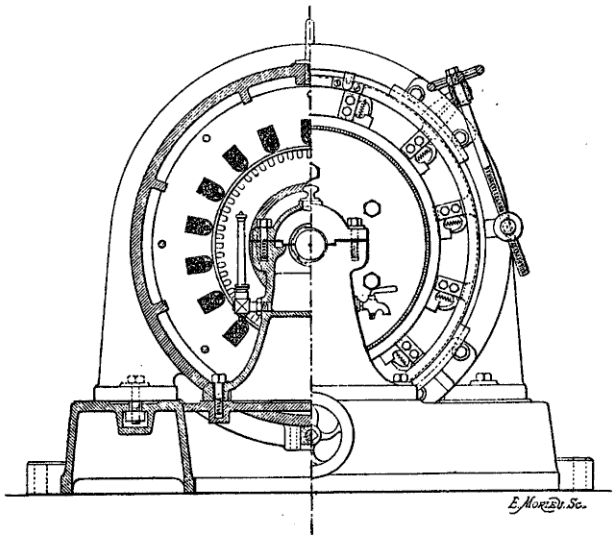


Fig. 7. — Coupe transversale et élévation de l'excitatrice.

La vitesse absolue des balais dans l'espace est donc

$$\frac{\alpha - n\omega}{k} - \omega.$$

Pour avoir des balais fixes on est donc conduit à la première condition annoncée, savoir

$$n + k = \frac{\alpha}{\omega}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

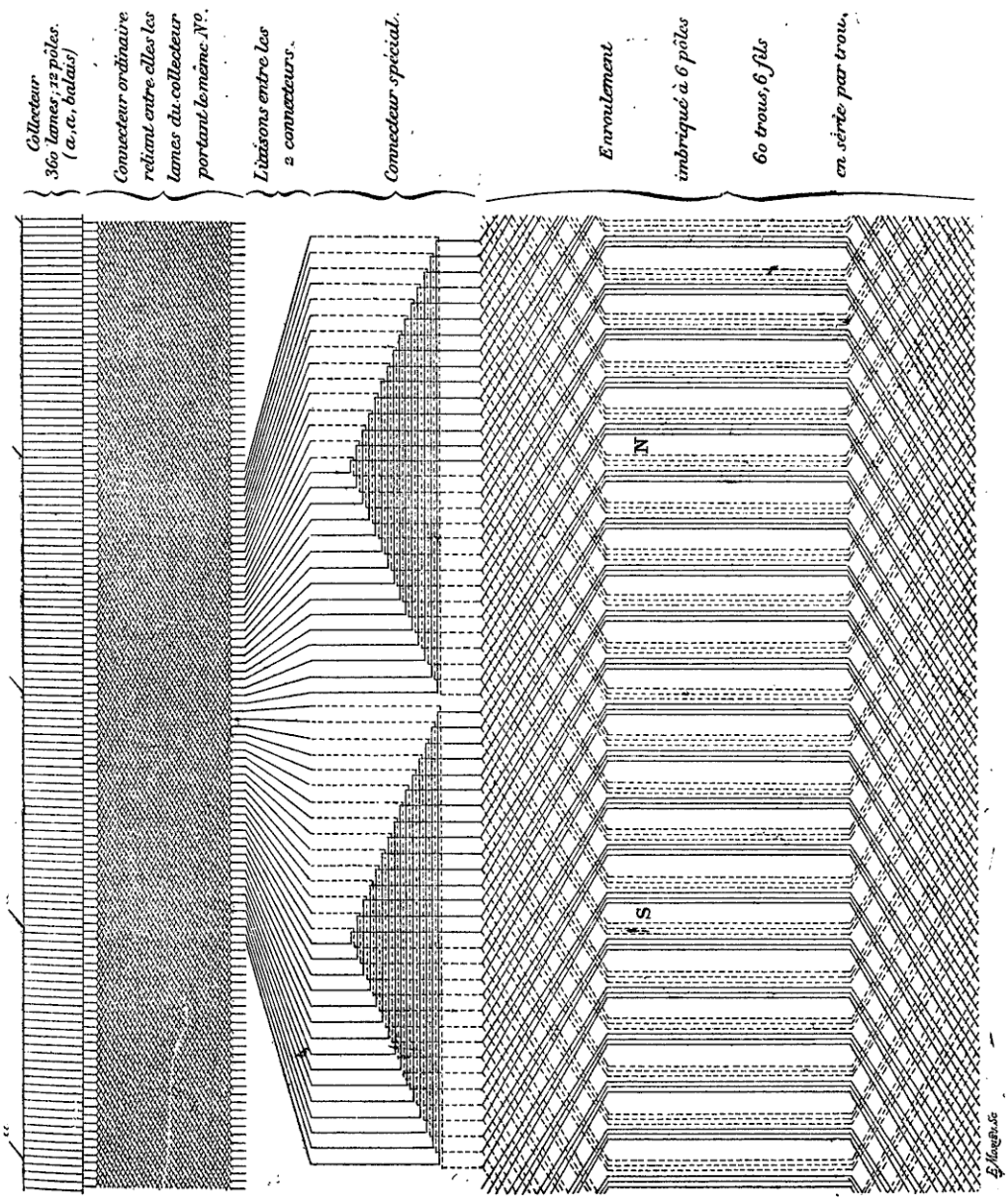


Fig. 8. — Schéma du bobinage et des connexions de l'induit.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

On aurait une autre solution du problème en faisant tourner l'induit en sens inverse du champ. La vitesse relative est alors

$$\frac{\alpha}{n} + \omega.$$

La vitesse des balais, pour k lignes de balais,

$$\frac{n}{k}\left(\frac{\alpha}{n} + \omega\right),$$

soit

$$\frac{\alpha + n\omega}{k}$$

dans le sens du champ.

Il est, dans ce cas, inutile d'employer le connecteur spécial; la vitesse absolue des balais étant

$$\frac{\alpha + n\omega}{k} - \omega.$$

La condition de leur fixité

$$k - n = \frac{\alpha}{\omega}.$$

THÉORIE DU COMPOUNDAGE. — Les dispositifs que nous venons de décrire nous permettent de recueillir avec des balais fixes un courant continu engendré par un champ tournant. On conçoit immédiatement la possibilité d'arriver au compoundage en employant, comme nous l'avons dit au début, pour l'excitation de l'excitatrice, deux stators distincts, l'un d'eux relié en dérivation aux bornes de l'alternateur et l'autre en série avec le circuit induit.

Mais il nous reste à démontrer comment on peut, en disposant convenablement les deux stators, l'un par rapport à l'autre, arriver à un compoundage tenant compte à la fois du débit et du décalage du courant.

Le problème revient à produire dans l'excitatrice un champ résultant, ayant à chaque instant les propriétés caractéristiques suivantes : 1° intensité proportionnelle au courant inducteur nécessaire, et, par conséquent, variable avec les différents régimes de l'alternateur; 2° direction *indépendante* des régimes.

La première condition supprime la manœuvre du rhéostat d'excitation, la seconde le décalage des balais; la machine devient ainsi auto-régulatrice d'une manière absolue.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Pour simplifier le raisonnement et donner plus de clarté aux

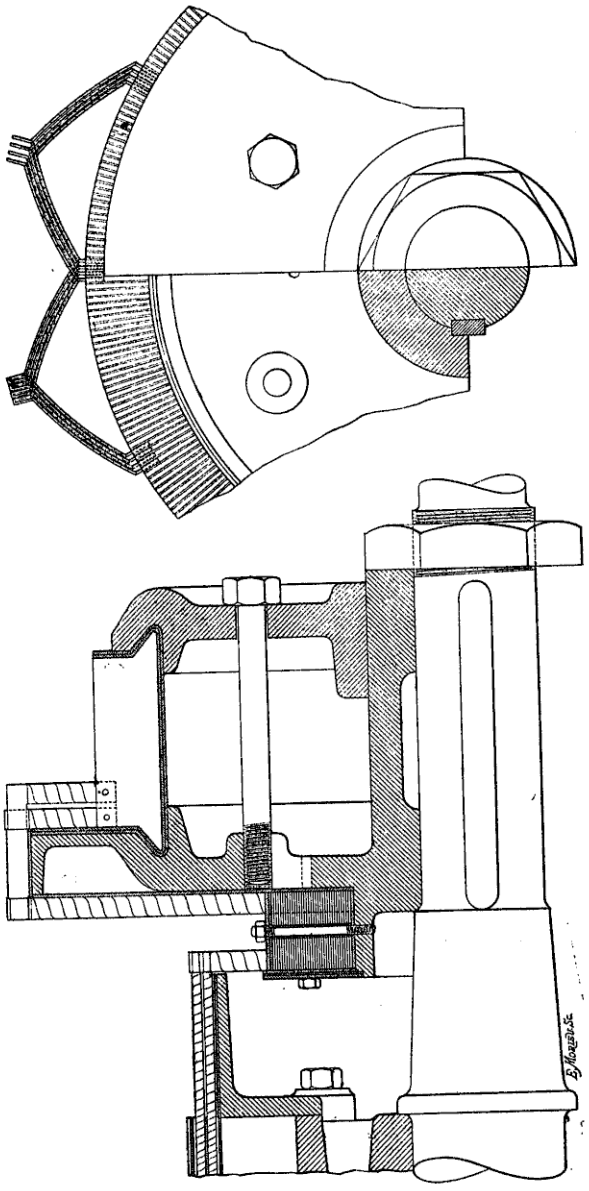


Fig. 9. — Détails des connecteurs.

schémas, nous supposerons dans ce qui suit que l'alternateur n'a que deux pôles et qu'il en est de même pour l'excitatrice.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Nous supposerons, de plus, que cette dernière est constituée par un induit fixe et que les balais tournent avec le champ inducteur. Ces hypothèses ne diminuent en rien la généralité de la démonstration.

Représentons par le vecteur OJ (*fig.* 5) le champ inducteur de l'alternateur. Soit d'autre part OI la réaction d'induit. En composant OJ et OI, on obtient le flux résultant OR.

C'est de la valeur de OR que dépendra la tension aux bornes.

Nous avons, dans le stator en dérivation, un flux O'R' proportionnel à OR et, dans le stator en série, un flux O'I' proportionnel à OI. Il sera toujours facile, en dimensionnant l'excitatrice, d'arriver à l'égalité des deux rapports $\frac{O'R'}{OR}$ et $\frac{O'I'}{OI}$.

Pour obtenir la reconstitution, dans l'excitatrice, d'un flux proportionnel au flux inducteur de l'alternateur (supposé, pour l'instant, excité à la manière ordinaire et réglé à tension constante), il suffira dès lors de disposer les deux stators de telle façon que l'on ait

$$\widehat{R'O'I'} = \pi - \widehat{ROI}.$$

Si l'on suppose les deux axes de l'alternateur et de l'excitatrice placés bout à bout et les deux directions OR et OR' amenées en coïncidence, OJ' viendra se placer sur OJ.

D'ailleurs, si OR ou OI prenaient une avance ou un retard, OR' et OI' se conformeraient immédiatement à ces déplacements. Il y a donc non seulement proportionnalité, mais synchronisme entre OJ et OJ'.

Il en résulte qu'avec l'emploi des dispositifs ci-dessus décrits, la ligne des balais restera fixe dans l'espace, quel que soit le débit et quel que soit le décalage du courant.

Pour que le compoundage soit rigoureux, il faudrait que le coefficient de self-induction de l'armature restât toujours proportionnel au coefficient d'induction mutuelle de l'induit par rapport à l'inducteur. Bien qu'il n'en soit pas tout à fait ainsi, le degré d'approximation que l'on peut obtenir est largement suffisant pour les besoins de la pratique.

Il nous reste à démontrer que, comme nous l'avons annoncé au début de cette étude, l'accouplement par engrenages de l'alter-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

nateur et de l'excitatrice ne sert qu'à limiter la vitesse de cette dernière, de façon à la maintenir dans un rapport constant avec celle de l'alternateur.

Il nous suffira pour cela de reprendre les hypothèses précédentes qui ramènent théoriquement la machine au type d'une dynamo à courant continu à inducteurs et balais tournants. L'action mécanique de la roue dentée de l'alternateur sur le pignon de l'excitatrice tendrait à entraîner son induit avec la vitesse ω. L'action

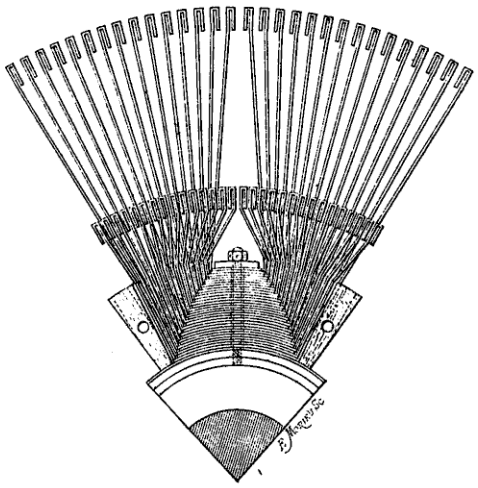


Fig. 10. — Détail des connexions.

électromagnétique des stators sur le rotor produirait l'entraînement avec la vitesse $\frac{\alpha}{n}$. Or, comme on a $\frac{\alpha}{n} > \omega$, cette dernière action devient prépondérante et le *pignon entraîne la roue*. Le travail mécanique ainsi restitué à l'arbre de l'alternateur sera évidemment, au travail électrique total qui lui est demandé, dans le rapport de ω à $\frac{\alpha}{n}$.

Détails de construction. — L'induit et le champ tournant dans le même sens, la condition de fixité des balais est, comme nous l'avons établi, $n + k = \frac{\alpha}{\omega}$. On a pris $n = 3$, $k = 6$, ce qui conduit (avec $\alpha = 50$) à $\omega = 333$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La *fig.* 6 montre une coupe longitudinale et la *fig.* 7 une coupe transversale de l'excitatrice.

La *fig.* 8 donne le schéma du bobinage et des connexions de l'induit.

Les *fig.* 9 et 10 représentent les détails de construction du connecteur, réalisé, comme on le voit, d'une façon très simple.

Nous croyons inutile d'insister sur les avantages que présente le compoundage des alternateurs, tant au point de vue de la construction économique qu'à celui des services d'exploitation (notamment pour la traction polyphasée). Bien des tentatives ont été faites déjà dans ce sens. La solution de MM. Hutin et Leblanc, aussi simple qu'élégante, résout le problème d'une façon complète.

On nous permettra de faire remarquer, en terminant, que toutes les machines (génératrices, transformateurs et moteurs) exposées par la maison A. Grammont ont été étudiées et exécutées par des ingénieurs français.

QUELQUES IDÉES NOUVELLES SUR LE MÉCANISME DE L'ÉLECTROLYSE PAR LES COURANTS DE RETOUR DES TRAMWAYS;

PAR M. G. CLAUDE.

On sait quels phénomènes inattendus sont venus compliquer, à ses débuts, la traction électrique par fil aérien. Conduites d'eau perforées, conduites de gaz anéanties, infrastructure des grandes constructions métalliques compromise, tel fut le bilan des premières manifestations de l'électrolyse provoquée dans les profondeurs du sol par les courants de retour. L'avenir put apparaître sous de sombres couleurs aux partisans de la traction électrique, et les systèmes à retour par la terre, si favorables à l'économie de ce mode de traction, menacèrent de sombrer sous le discrédit.

On ne tarda pas à s'apercevoir, cependant, que, fort heureusement, les craintes du début avaient été exagérées et que, par un meilleur établissement des voies, le danger pouvait être atténué

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans une forte mesure. Effectivement, en dépit des prédictions de la première heure, les installations de tramways électriques, sous la poussée des besoins modernes, purent prendre, sans trop d'inconvénients, cet essor remarquable qui restera comme l'une des caractéristiques de notre époque.

Toutefois, malgré des expériences nombreuses effectuées sur les réseaux de l'un et de l'autre continent, les idées professées aujourd'hui sur le mécanisme de la diffusion des courants dans le sol et sur les actions qu'ils entraînent ne sont pas encore des plus nettes. Les progrès de nos connaissances ont été lents depuis les remarquables travaux de Farnham (1894), et les remèdes efficaces sont restés rares. La seule règle qui ressorte d'une façon à peu près constante des rapports multiples autant que contradictoires présentés sur la question peut s'énoncer en disant que, pour les ingénieurs des Compagnies de gaz ou d'eau, les courants de retour des tramways électriques sont cause des pires méfaits, tandis que la parfaite innocuité de ces mêmes courants apparaît avec limpidité dans les rapports des ingénieurs des Compagnies de traction....

Attaché à la Compagnie française Thomson-Houston, nous ne prétendons pas venir faire à cette règle si naturelle une exception qui ne se comprendrait pas. La simple application de cette règle permettra, sans plus tarder, de préjuger des conclusions auxquelles nous avons l'intention d'aboutir; mais nous espérons que l'on verra de quoi justifier largement ces conclusions, d'abord dans le résumé des essais entrepris dans le cours des deux dernières années sur les divers réseaux installés par les soins de la Compagnie, ensuite, et surtout, dans cette simple constatation que, pendant ces deux années, il n'a pas été donné de constater sur ces réseaux un seul cas de corrosion électrolytique des conduites nettement défini.

Si ces essais, d'ailleurs, nous ont amené à une interprétation du mécanisme des actions électrolytiques quelque peu différente de celle qui a cours aujourd'hui, il ne s'ensuit pas, bien loin de là, que nous ayons la prétention de présenter un travail entièrement original. Sur une question aussi travaillée que celle-là, on trouvera certainement de nombreux points communs entre nos essais et ceux de plusieurs des ingénieurs qu'elle a préoccupés, Kalmann

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

à Berlin, Parshall et Fleming en Angleterre, Herrick aux États-Unis, pour ne citer que ceux-là.

Nous devons aussi ajouter que nous avons été beaucoup aidé dans l'explication de certains faits par les idées émises dans un premier Rapport élaboré en 1895 en collaboration avec M. Meylan, sur la demande de la Compagnie Thomson-Houston.

Lorsque le courant des voitures d'un réseau revient au feeder négatif, il suit naturellement de préférence le chemin le meilleur, c'est-à-dire la voie, supposée bien jointée. Mais le sol dans lequel sont encastrés les rails, lui aussi, est perméable au courant dans une certaine mesure, variable d'ailleurs avec son état d'humidité; en vertu de ce fait, une partie du courant s'écoule dans le sol vers

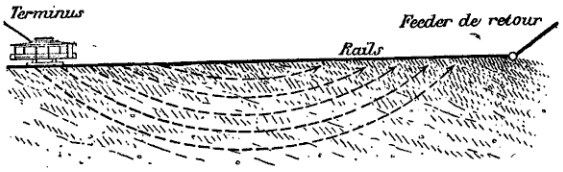


Fig. 1. — Diffusion du courant dans le sol.

le terminus, en A (*fig.* 1) pour rentrer dans la voie en B, au voisinage du feeder négatif.

De ce courant de terre, de ce *courant vagabond,* pour employer l'expression caractéristique des Allemands, une partie [la presque

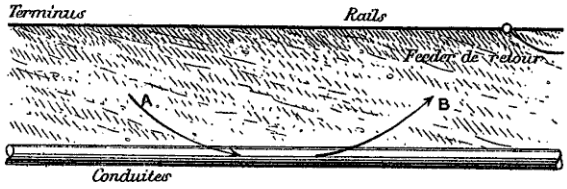


Fig. 2. — Absorption supposée des courants par les conduites.

totalité, croit-on (1)] ne sort des rails que parce qu'elle y est attirée, en quelque sorte, par les conduites métalliques d'eau et de gaz enfouies dans le sol à proximité de la voie (*fig.* 2).

Ce courant entre dans ces conduites vers les terminus pour en

(1) *Voir* A. Blondel et Paul Dubois, *La traction électrique,* t. I, p. 599.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ressortir vers le ou les feeders de retour. Or, on admet actuellement que les courants électriques circulent dans le sol à la faveur d'un mécanisme exclusivement électrochimique, en électrolysant les sels qui y sont contenus, chlorure de sodium par exemple : à l'entrée du courant dans les conduites, en A, comme à sa sortie, en B, ces sels sont donc électrolysés, et du chlore, par exemple, est mis en liberté. En A, ce chlore allant, comme on sait, à l'encontre du courant qui lui a donné naissance, vient ronger les rails, ce qui ne regarde que la Compagnie exploitante, et laisse indemnes les conduites, tandis que l'inverse se produit en B. La région B, voisine du feeder de retour et caractérisée par ce fait que les conduites y sont positives par rapport aux rails, est, en conséquence, la région *dangereuse* pour les conduites (1).

Indépendamment de ce mode d'attaque, un autre danger, généralement moindre, menace les conduites en dehors même de la région dangereuse : celles-ci n'offrent pas une continuité métallique parfaite, mais présentent à chaque joint un accroissement local de résistance qui peut forcer une partie du courant chemi-

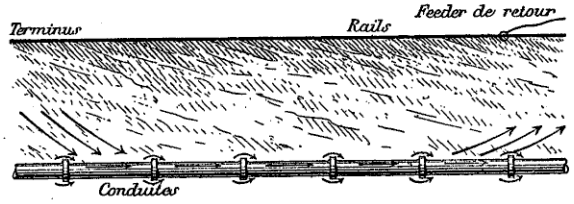


Fig. 3. — Attaque des conduites aux joints.

nant dans la conduite vers le feeder de retour à sauter par-dessus le joint à travers la terre et à attaquer le métal à son point de sortie (*fig.* 3).

(1) D'où l'intérêt, signalé par Farnham, du relevé de la *carte électrique* d'un réseau, ou relevé des différences de potentiel rails-tuyaux sur l'ensemble du réseau, cette carte électrique étant caractérisée par une région avoisinant les feeders de retour, où les tuyaux sont nettement positifs, et qui constitue la région positive ou région dangereuse, une zone *neutre* entourant la première et où les différences de potentiel rails-tuyaux sont faibles et changent continuellement de sens par suite des variations du courant de service, enfin une zone *négative* allant de la zone neutre aux terminus et dans laquelle les tuyaux sont généralement, mais avec des inversions fréquentes cependant, négatifs par rapport aux rails.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En résumé, on considère donc actuellement : d'une part, que les courants vagabonds ne quittent les rails à peu près que parce qu'ils sont immédiatement drainés par les conduites souterraines ; d'autre part, que ces courants sont presque intégralement dangereux, chaque ampère-heure quittant une conduite à travers le sol se traduisant par l'enlèvement de 3,86 gr de métal dans le cas du plomb, de 1,04 gr dans celui du fer.

On conçoit dès lors l'intérêt qu'on a attaché à diminuer ces courants vagabonds et, pour cela, à améliorer le chemin constitué par les rails en augmentant leur poids et soignant leurs connexions. On a même cru qu'on pourrait arriver à supprimer à peu près les courants dans les conduites et leurs dangers en poussant cette amélioration jusqu'à abaisser au-dessous de 5 volts la chute de tension sur les rails ; car ces 5 volts, ayant à vaincre deux fois la force électromotrice du sol, plus la résistance des conduites, ne pourraient forcer dans celles-ci que des courants très faibles.

Telle est l'origine de l'ancien règlement administratif des 5 volts de chute totale, et tel est le rôle prépondérant qu'on attribue à la *polarisation* dans la préservation des conduites, qui effectivement, comme j'ai déjà eu à le faire remarquer, restent indemnes lorsque ce règlement est observé.

Et pourtant, malgré cette apparente vérification, les choses ne se passent pas du tout dans la réalité conformément au programme précédent. Une expérience bien simple va nous en convaincre et nous faire soupçonner deux contradictions importantes entre les idées précédentes et la réalité.

Prenons une batterie de deux ou trois accumulateurs (*fig.* 4) ;

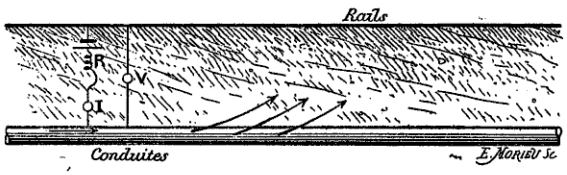


Fig 4.

relions le pôle négatif, après l'arrêt du service, aux rails d'un réseau, et l'autre pôle, à travers un rhéostat variable R et un ampèremètre I, avec une canalisation de gaz ou d'eau voisine. A l'aide du rhéostat variable R, nous pouvons soumettre l'ensemble

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

rails-tuyaux à une différence de potentiel croissante que le voltmètre V permet de mesurer, et en vertu de laquelle un certain courant, mesuré par l'ampèremètre I, va circuler à travers la terre entre conduite et rails.

Si la terre se comportait bien comme un électrolyte à sel de métal différent de celui des électrodes (puisque ce sel est en général un sel de sodium, et que les électrodes sont en fer ou en plomb) le courant devrait rester très faible jusqu'au moment A, correspondant au voisinage de 1 volt, où la différence de potentiel appliquée dépasse la force contre-électromotrice du sol, et à partir de ce moment seulement le courant devrait croître notablement (*voir* note *a*). *En réalité* (*fig.* 5) le courant devient de suite très

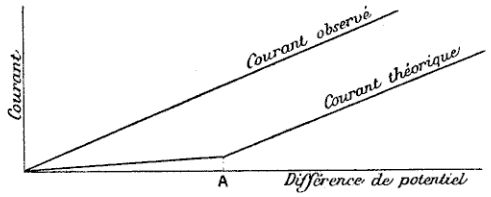


Fig. 5. — Différence entre la théorie et la pratique.

intense, en croissant, à fort peu près, proportionnellement à la différence de potentiel, c'est-à-dire que tout au moins jusqu'à 2 volts, la simple loi de Ohm est applicable au circuit (*voir* note *b*). Dans les divers cas, on a assez prolongé l'essai, vingt minutes quelquefois, sans affaiblissement notable du courant, pour qu'on ne puisse confondre avec un phénomène de charge des tuyaux sous l'influence de la capacité de polarisation.

Donc, première anomalie, il semble qu'*au lieu de se comporter à la manière d'un électrolyte, le sol se comporte comme un conducteur métallique,* de sorte que la polarisation n'y doit jouer qu'un rôle négligeable.

Répétons maintenant le même essai au voisinage du feeder négatif, toujours après l'arrêt du service. Maintenons la différence de potentiel rails-tuyaux créée par la batterie à une valeur égale à la différence de potentiel qui existe en service : nous constatons qu'il nous faut pour cela débiter un courant *très intense,* 28 ampères au Havre, entre gaz et rails, 23 ampères à Rouen, entre rails et eau, etc.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Or un courant si intense est inquiétant : il est inquiétant parce que, ayant pour effet de maintenir entre rail et conduites une différence de potentiel égale à celle qu'y maintient en service le courant vagabond qui circule dans la conduite, il semble donner approximativement la mesure de celui-ci; nous disons approximativement, car dans l'essai en question, le courant rentre plus ou moins sur toute la longueur de la conduite, tandis que le courant vagabond circulant en service dans la conduite ne peut rentrer aux rails que dans la région dangereuse, et doit donc être notablement plus faible, tout en restant cependant du même ordre.

Et ceci n'a pas manqué de nous inquiéter beaucoup lors de nos premiers essais, car des courants aussi intenses circulant dans les conduites devaient ronger celles-ci dans un délai très court (*voir* note *c*).

Nous avons donc été amené à ne plus nous contenter de cette mesure indirecte, et à mesurer *directement* le courant circulant en service dans ces conduites à l'aide d'une méthode d'ailleurs très simple (*voir* note *d*), et nous avons toujours trouvé des courants *dix, vingt, cinquante fois plus faibles* que ceux prévus par la mesure précédente.

Que signifie cette contradiction? Il n'est pas difficile de nous en rendre compte. Dans la mesure du courant dans la conduite en service comme dans celle du courant emprunté à la batterie, ces courants circulent bien entre conduite et rails, sous l'effet d'une

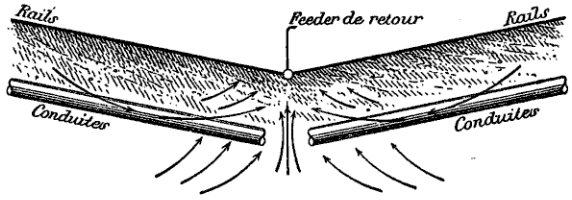


Fig. 6. — Concentration des filets de courant au voisinage du feeder de retour.

même différence de potentiel; mais il existe pourtant entre les deux essais cette distinction essentielle qu'en service cette différence est maintenue par la rentrée aux rails non seulement du courant sorti de la conduite, mais encore des courants vagabonds *terrestres*, tandis que dans l'essai après le service, cette différence de potentiel ne peut être maintenue que par le courant d'essai, seul exis-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

tant. Et comme le courant dans la conduite en service est très faible devant le courant d'essai, il faut bien en conclure que, en service, ce sont les courants terrestres qui ont de beaucoup le rôle prépondérant dans la création de la différence de potentiel rails-tuyaux.

Ainsi, contrairement à la seconde des hypothèses actuellement en vigueur, et conformément à l'opinion de M. Parshall (*fig.* 6), la presque totalité des courants vagabonds, au lieu de passer dans les conduites, va rejoindre directement, à travers la terre, le feeder de retour (*voir* note *e*).

Et il est fort heureux d'ailleurs qu'il en soit ainsi, car la proportion des courants vagabonds totaux présente une importance que peu d'expérimentateurs paraissent avoir soupçonnée. Grâce à des méthodes spéciales (*voir* note *f*), nous avons pu mesurer cette proportion et constater que sur les réseaux les mieux jointés elle ne descend guère au-dessous de 12 à 15 pour 100 pour s'élever à 25 ou 30 sur d'autres moins bien établis.

Au contraire, les courants qui circulent dans les conduites de nos réseaux sont toujours très faibles, 1 à 4 ampères dans le cas le plus défavorable, conduite en fonte de 50 cm de diamètre, bien jointée, placée sous la voie : dans la plupart des cas, ces courants sont de l'ordre des dixièmes ou des centièmes d'ampère.

D'où cette première conclusion déjà rassurante : *les courants de terre sont beaucoup plus intenses qu'on ne le croit en général, mais ceux qui circulent dans les conduites, seuls dangereux, sont au contraire beaucoup plus faibles.*

Quelque faibles cependant que soient ces derniers, on pourrait encore craindre de les voir provoquer à la longue une attaque sérieuse s'ils agissaient intégralement, comme on le suppose, en assimilant les actions dans le sol à celles que nous observons dans le laboratoire. Heureusement, nous avons vu tout à l'heure que la loi du passage du courant à travers le sol suit à peu près celle du passage à travers une résistance métallique. Ceci peut nous faire espérer que la conductibilité du sol est *mixte,* c'est-à-dire qu'une partie au moins du courant y circulerait *inoffensivement* en vertu d'un mécanisme de conduction, et que le reste, seul dangereux, serait véhiculé par un processus électrochimique.

A l'aide de cet instrument remarquable que constitue le comp-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

teur O'Keenan, nous avons effectué sur le terrain des essais qui ont confirmé cette hypothèse dans une mesure inespérée.

En augmentant convenablement la résistance sur laquelle est branché en dérivation le petit moteur de cet appareil, nous avons pu l'approprier à la mesure des courants très faibles passant sous l'influence de différences de potentiel variables dans des plaques de plomb enfouies dans le sol ; en pesant les plaques avant et après, nous étions en mesure de voir si l'attaque était bien égale au produit des ampères-heures passés par l'équivalent électrochimique du plomb. Or l'attaque est généralement inférieure à l'attaque théorique, ce qui suppose effectivement une conductibilité d'ordre en partie métallique. De plus, à quantité d'électricité égale, l'attaque est très faible aux faibles tensions.

Ainsi, une plaque en plomb soumise à une différence de potentiel de 23 volts, par rapport aux rails voisins, a vu son poids diminuer en 5 jours de 100g, au lieu de 230g prévus par la théorie, soit environ $\frac{1}{2}$ de l'attaque théorique, tandis qu'une autre plaque, soumise à une différence de potentiel difficile à évaluer, mais voisine de 1 volt, n'a subi, en 45 jours, qu'une attaque presque négligeable de 20g, alors que son poids aurait dû diminuer de 500g. Ici, par suite de la faible tension, l'attaque est réduite au $\frac{1}{25}$ de sa valeur (*voir* note *g*).

Dans ces essais, nous n'avons eu recours qu'à des plaques de plomb, estimant que, dans le cas du fer, il serait difficile de discerner l'action électrolytique de la simple action de l'air et de l'humidité; nous avons donc été très heureux de la confirmation que des expériences de M. Herrick, relatées dans un récent numéro du *Street Railway* (mai 1900), apportent précisément aux essais précédents dans le cas très important du fer. D'après cet expérimentateur, qui ne paraît pas d'ailleurs s'être préoccupé de l'effet de la grandeur de la différence de potentiel, l'attaque du fer dans ses essais ne s'est élevée qu'à 3,5 pour 100 de l'attaque théorique, probablement sous de faibles différences de potentiel. Quelle que soit sa cause, le fait est donc certain ; on peut essayer de le traduire en disant que le sol se comporte *comme s'il* était constitué par une résistance métallique R shuntée par une cuve électrolytique C (*fig.* 7). On conçoit, en effet, que si l'on soumet un tel ensemble à une différence de potentiel croissante, tant que celle-ci

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sera inférieure à la force électromotrice de l'électrolyte, rien ne passera dans celui-ci et la conductibilité de l'ensemble sera purement métallique. Dès, au contraire, que la force électromotrice sera dépassée, un courant chimique de plus en plus intense circulera, dont le rapport au courant total sera de plus en plus grand.

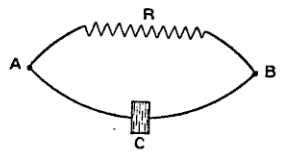


Fig. 7. — Constitution du sol au point de vue analytique.

Ceci n'a d'autre prétention que d'essayer de constituer une représentation schématique des faits : l'explication réelle est peut-être différente. Est-ce, comme le remarquait M. Potier sur notre observation que la plaque soumise à 23 volts sentait fortement le chlore au moment de sa sortie de terre, est-ce qu'une fraction du chlore, variable avec la densité de courant en raison de sa diffusion plus ou moins grande, ne resterait pas inactive au contact de l'électrode? Est-ce que, en raison de la conductibilité spéciale du sol, une partie du chlore ou des composés correspondants ne seraient pas mis en liberté avant d'arriver à l'électrode? Quoi qu'il en soit, il faut noter que dans tous les essais précédents, comme dans la pratique, les densités de courants sont extrêmement réduites, soit de l'ordre des dixièmes d'ampère par mètre carré d'électrodes, et que, dans ces conditions, la polarisation ne doit pas jouer le rôle auquel on est accoutumé.

D'ailleurs, quelques expériences précises seraient encore nécessaires pour fixer, d'une part, le rapport entre les deux espèces de conductibilité, rapport sans doute très variable avec la nature du sol et le degré d'humidité; pour fixer, d'autre part, la valeur moyenne de ce que nous avons appelé la *force contre-électromotrice du sol,* c'est-à-dire la valeur de la différence de potentiel rails-tuyaux au-dessous de laquelle l'attaque électrolytique deviendrait négligeable : ce qu'on peut presque avancer, c'est que si cette différence de potentiel, dans la région dangereuse, ne dépasse pas 1 volt à 1,5 volt, le coefficient d'attaque sera petit.

Or, sur nos réseaux, cette condition est remplie; les différences

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de potentiel, dans la région dangereuse, ne dépassent qu'exceptionnellement 1,5 volt, de telle sorte que non seulement les courants qui circulent dans les conduites sont très faibles, mais que ces courants sont à peu près inoffensifs et que, par suite, le danger y est pratiquement nul.

Par contre, la théorie précédente nous montre que le danger peut devenir très grand si les joints sont négligés (*voir* note *h*) ou si le trafic, la longueur des lignes, etc., dépassent les valeurs auxquelles nous sommes accoutumés, parce que les courants vagabonds augmentent proportionnellement aux chutes sur rails (*voir* fin de la note *b*) et que, jusqu'à une certaine limite, la proportion dangereuse de ces courants augmente beaucoup, de sorte que le danger peut croître plus vite que le carré de la chute de potentiel.

Mais, d'autre part, cette même théorie nous indique pour ces réseaux dangereux, à côté du bon jointage des rails, qui constitue toujours le remède primordial, un nouveau moyen d'atténuer les effets de l'électrolyse : il consiste à diminuer les différences de potentiel rails-tuyaux dans la région dangereuse, puisque ce faisant nous diminuerons, dans une mesure qui pourra être forte, la proportion dangereuse des courants dans les conduites.

Pour y arriver, nous nous rappellerons que la différence de potentiel au voisinage du feeder négatif supposé unique est créée par la concentration (*fig.* 6), dans une région restreinte, des filets de courants venant de tous les points du réseau. Si, au lieu de se concentrer en un seul, ces filets de courants trouvaient à se répartir entre plusieurs centres de rentrée différents, la concentration serait évidemment beaucoup moindre, et les différences de potentiel fortement atténuées, de sorte que le résultat serait atteint.

On voit par conséquent que la solution consiste à multiplier le nombre des feeders de retour. On ne manquera pas ici de faire observer qu'on multiplie déjà autant qu'on peut ces feeders de retour : oui, on les multiplie, mais dans un tout autre esprit; on les multiplie dans le but de diminuer quelque peu les chutes sur rails et par suite les courants vagabonds, ce qui oblige à des feeders longs et coûteux allant rejoindre la voie en des points très éloignés; tandis que, dans l'ordre d'idées qui résulte des considérations ci-dessus, ce n'est pas la proportion des courants vagabonds que nous cherchons à diminuer (car, bien au contraire, nous l'aug-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

mentons plutôt en diminuant la résistance de rentrée), c'est seulement la *densité* de ces courants à la rentrée; de telle sorte que, pour arriver au but, il suffit de faire aboutir nos différents feeders en des points assez rapprochés les uns des autres et de l'usine.

Par exemple, au lieu d'un feeder unique de 200 mm² comme celui que je représente, il y aura intérêt à mettre deux feeders de 100 mm² aboutissant en deux points séparés par quelques centaines de mètres. Il suffirait même, comme me l'a suggéré M. Garfield, d'un feeder unique venant de l'usine et muni de quelques épanouissements d'égale résistance venant se connecter en des points de la voie distants de quelques centaines de mètres. De cette façon, le remède serait acquis au prix d'un supplément de dépense très faible.

J'ai, d'ores et déjà, à vous soumettre une vérification expérimentale de cette conception. A Rouen, la voie est reliée directement à la barre négative au voisinage de l'usine située sur la rive gauche de la Seine. En outre, deux feeders de retour de faible section, alimentés par des survolteurs, sont connectés en deux points de la rive droite de la Seine qui forment avec le premier point un triangle à peu près équilatéral de 400 m de côté. Tant que ces deux feeders sont inactifs, la différence de potentiel, au voisinage de l'usine, se tient aux environs de 0,8 volt. Elle tombe à 0,3 volt dès que les deux feeders sont connectés à la voie, et ceci, non parce que les chutes sur rails sont diminuées, — elles ne le sont que d'à peine 1 volt sur 3 ou 4, — mais parce que les courants de retour trouvent trois points de rentrée. Or, s'il y avait encore quelque danger à 0,8 volt, il n'y en a certainement plus du tout à 0,3 volt d'après la théorie que nous venons de vous exposer.

Un autre moyen encore plus simple d'arriver au même résultat, qui est en somme d'agrandir la zone dangereuse aux dépens de son intensité, consiste tout simplement à renverser la pratique habituelle et à relier le pôle négatif des génératrices, et non plus le pôle positif, au fil aérien. Ce dispositif a déjà été proposé plusieurs fois, mais il emprunte aux considérations précédentes un intérêt plus grand qu'on n'aurait pu le soupçonner.

D'ailleurs, il est évident que tous ces dispositifs n'auront d'effet vraiment efficace que s'ils ont pour effet de faire tomber les différents rails-tuyaux au voisinage immédiat de la force contre-électromotrice du sol, et il faut espérer que, ce que nous n'avons pu

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

encore vérifier, celle-ci est assez grande pour que la chose soit très facilement réalisable.

Pour terminer, quelle conclusion pouvons-nous tirer de l'application des faits précédents au commentaire des règlements administratifs en vigueur dans notre pays? Eh bien! il semble qu'on puisse conclure à l'efficacité de la règle des 5 volts et même peut-être de celle du volt kilométrique, parce que leur application empêche des différences de potentiel très supérieures à 1,5 volt d'être mises en jeu entre rails et tuyaux.

Toutefois, il semble qu'on ferait bien de compléter cette réglementation, en conformité avec la législation du *Board of Trade* anglais, en limitant à une valeur qui pourrait être également de 1,5 volt la différence de potentiel dangereuse entre rails et tuyaux, puisque nous avons vu que cette différence de potentiel constitue l'un des facteurs les plus directs de l'importance du danger, quitte à modifier d'ailleurs dans le sens favorable la clause parfois difficile à réaliser du volt kilométrique. Nous pensons qu'on ferait bien aussi de proscrire légalement une mesure qui est cependant d'une application fréquente en Amérique, mais qui semble plus dangereuse qu'utile, celle de la liaison des tuyaux aux rails dans la région dangereuse (*voir* note *i*).

En somme, nous pourrons condenser en quelques mots la conclusion de ce Travail en disant que, si l'électrolyse peut être effectivement très dangereuse, il semble du moins qu'en France, grâce aux soins apportés dans l'établissement des réseaux, on puisse être parfaitement rassuré à son égard, sans que cependant il faille se départir jamais d'une certaine surveillance.

NOTES.

(*a*) Ci-dessous (*fig. a*) les résultats que l'auteur a obtenus dans des essais de laboratoire effectués en électrolysant une solution de chlorure de sodium à 10 pour 100 à l'aide d'électrodes de même métal. On voit que l'allure du courant en fonction de la différence de potentiel est essentiellement différente de celle des courbes de la note ci-après. On voit en outre qu'il passe toujours un certain courant, si faible que soit la tension : ce fait et quelques expériences *qualitatives* aidant ont été l'origine de la théorie de Jackson, d'après laquelle la crainte des corrosions électrolytiques doit subsister même si les différences de potentiel en jeu sont de l'ordre des centièmes de volt. Au point de vue quantitatif, cette conclusion

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

st absolument erronée, comme le démontrent les essais ici rapportés.

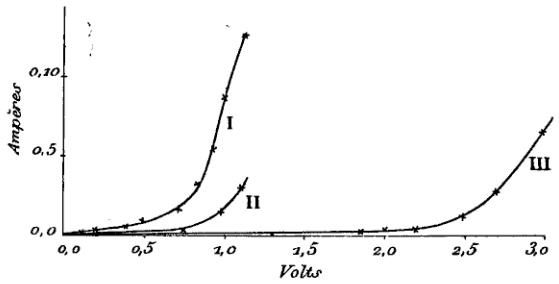


Fig. *a*. — Intensité en fonction de la différence de potentiel appliquée à deux électrodes identiques plongées dans une solution de sel à 10 pour 100.

Courbe I..... deux lames de fer
Courbe II.... deux lames de plomb
Courbe III.... deux lames de charbon

(*b*) Voici quelques-uns des résultats obtenus :

Bastille-Charenton. — Entre conduite d'alimentation d'eau de l'usine et rails :

e appliqué en volts.	I en ampères.	*e* appliqué en volts.	I en ampères.
0,30	0,72	1,56	5,50
0,28	1,00	3,80	12,50
0,59	2,00	5,00	17,00
0,87	3,00	8,00	30,00

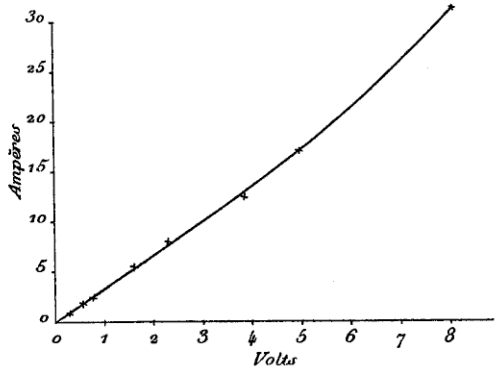


Fig. *b*. — Bastille-Charenton. — Courant entre conduite d'eau et rails.

Résultats traduits par courbe (*fig. b*) qui s'incurve légèrement vers le haut, ce qui tend à indiquer une action électrolytique appréciable. Les autres courbes affecteraient sans doute une allure analogue si les différences de potentiel avaient pu être poussées assez loin.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Amiens. — Entre conduite d'eau, esplanade de Noyon, et rails :

e appliqué en volts.	I en ampères.	Observations.
0,20	0,10	Différence de potentiel initiale
0,45	0,15	de 0,04 volt, eau négative.
0,60	0,20	
0,90	0,29	
1,30	0,40	

L'intensité croît presque exactement comme une droite ne passant tout à fait par l'origine, comme l'indique la *fig. c.*

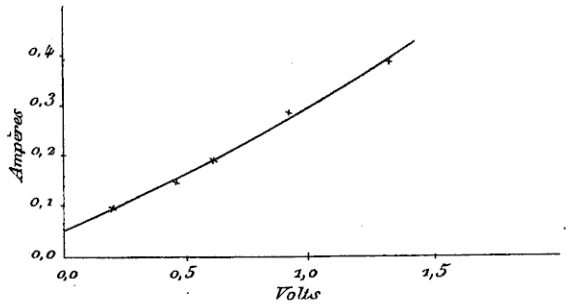


Fig. *c.* — Amiens. — Courant entre eau et rails.

Amiens. — Entre gaz et rails :

e.	I.	*e.*	I.
0,05	0,4	1,25	5,5
0,11	0,7	1,52	7,3
0,52	2,5	1,10	5,0
0,95	4,4		

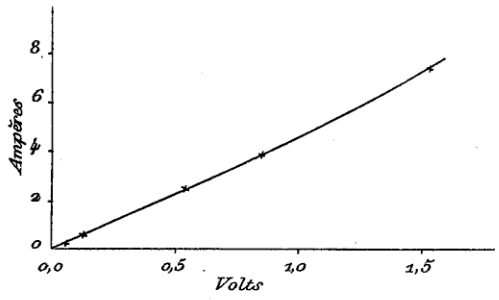


Fig. *d.* — Amiens. — Entre gaz et rails.

Résultats traduits par courbe (*fig. d*). On voit que la canalisation de est beaucoup plus *perméable* que celle d'eau.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Rouen. — Entre canalisation eau de source de l'usine et rails :

e.	I.	Observations.
0,12	2,8	Différence de potentiel initiale
0,20	3,8	de 0,05 volt, eau négative.
0,39	7,0	
0,65	10,8	
0,93	15,0	

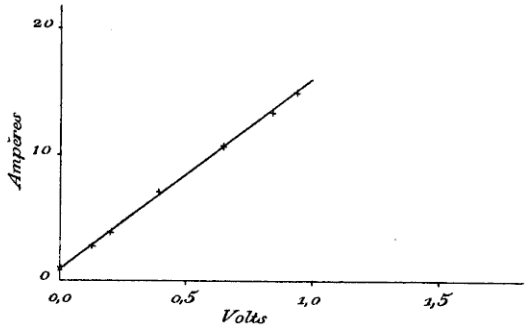


Fig. *e.* — Rouen. — Entre eau de source et rails.

Droite ne passant pas tout à fait par l'origine (*fig. e*) en raison de la faible différence de potentiel initiale.

Rouen. — Entre gaz et rails à l'usine :

e.	I.	Observations.
—0,03	+ 0,7	Différence de potentiel initiale
+0,03	2,8	de 0,05 volt, gaz négatif.
—0,07	4,5	
+0,11	6,5	
+0,22	10,8	
0,50	22,0	

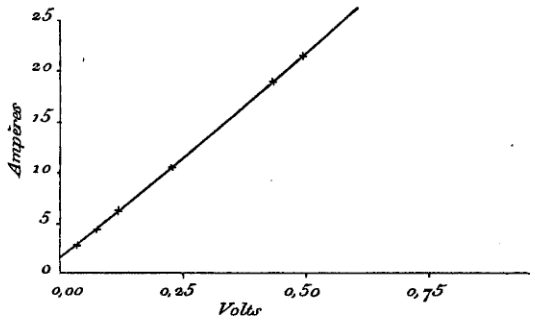


Fig. *f.* — Rouen. — Entre gaz et rails.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Ici encore (*fig. f*) sensiblement une droite. On remarquera l'intensité exceptionnelle des courants sous de faibles différences de potentiel.

Havre. — Entre rails et gaz vers l'usine :

e.	I.
0,20	5
0,40	7
0,56	10
0,96	18
2,08	42

Droite légèrement incurvée vers le haut (*fig. g*).

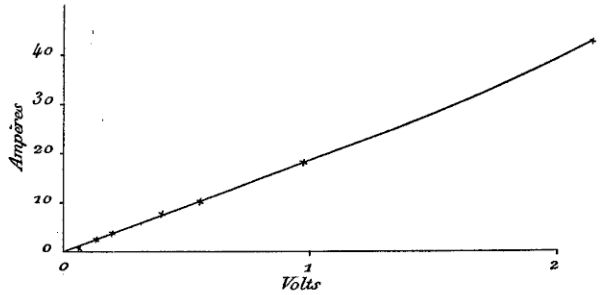


Fig. *g*. — Havre. — Entre gaz et rails.

Havre. — Entre eau et rails :

e.	I.
0,36	0,5
0,80	1
1,20	2
1,76	3
2,40	5

Courbure notable vers le haut (*fig. h*).

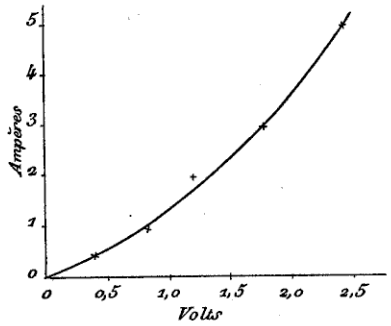


Fig. *h*. — Havre. — Entre eau et rails.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En résumé, ces essais mettent en évidence trois choses intéressantes :

1° Proportionnalité presque exacte des courants entre rails et conduites aux différences de potentiel agissantes ;

2° Grandeur inattendue de ces courants ;

3° Perméabilité plus grande des conduites de gaz, ce qui tient aux joints meilleurs de ces conduites.

Des essais d'un autre genre, effectués à Bastille-Charenton pendant la nuit en lançant sur les voies des courants constants, nous ont également montré que les courants qui circulent dans les conduites d'un réseau en activité, de même que les courants vagabonds totaux, sont très sensiblement proportionnels aux chutes sur rails.

(*c*) En présence de ces deux résultats inattendus, conduction pour ainsi dire métallique du sol, courants très intenses, nous nous sommes naturellement tout d'abord inquiété de savoir s'ils ne proviendraient pas tous deux d'un court-circuit accidentel rails-tuyaux existant à une distance plus ou moins grande du point d'essai. Mais la chose est bien invraisemblable d'une telle circonstance se reproduisant dans tous les cas essayés; d'autre part, la mauvaise conductibilité habituelle des conduites, jointe à la grandeur des courants constatés, nécessiterait que le court-circuit fût tout près du point d'essai, c'est-à-dire du feeder négatif, et il serait dès lors révélé par la carte électrique en service; enfin une mesure faite au Havre pendant l'essai *fig. g* confirme la régularité de celui-ci. Cet essai a consisté, pendant l'application du courant de 18 ampères, à mesurer les différences de potentiel gaz-rails à des distances graduellement croissantes; les résultats en sont traduits par la courbe (*fig. i*) qui montre que les différences de

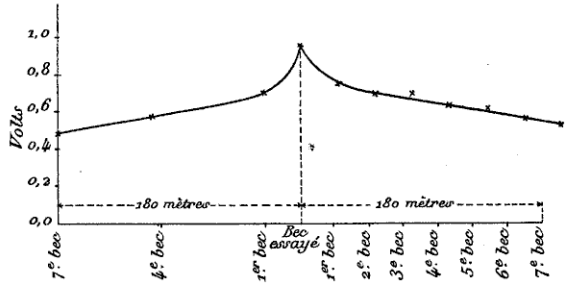


Fig. *i*. — Havre gaz. — Répartition du potentiel sur la conduite.

potentiel baissent très régulièrement et très vite *des deux côtés* du point d'essai.

Un autre essai qui montre que la polarisation rails-conduites ne doit jouer en pratique qu'un rôle négligeable, consiste à installer un voltmètre sensible entre rails et conduites dans la région dangereuse pendant le service, et à arrêter brusquement le service en faisant couper le courant à l'usine. Instantanément l'aiguille du voltmètre revient à zéro.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

(*d*) La méthode que nous avons appliquée a déjà été employée pour la première fois, à ma connaissance, dans les recherches que nous avons effectuées en 1895 avec M. Meylan, pour le compte de la Compagnie Thomson-Houston.

Le principe de la méthode consiste (*fig. j*) à mesurer la différence de

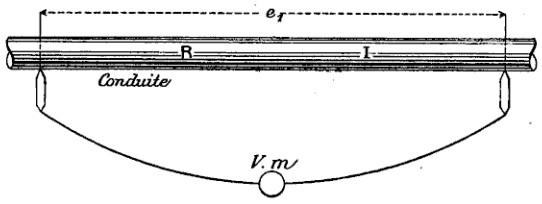


Fig. *j*. — Mesure du courant dans les conduites.

potentiel e_1 existant entre deux points voisins de la conduite (deux becs de gaz A et B par exemple), puis à dériver, au moyen d'un câble de faible résistance comportant un ampèremètre, une partie de ce courant (*fig. k*),

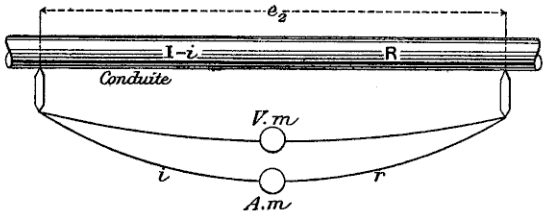


Fig. *k*. — Mesure du courant dans les conduites.

et à constater la nouvelle différence de potentiel e_2 existant entre A et B : soient $e_2 < e_1$ la seconde lecture au voltmètre et i le courant dérivé, on a évidemment, en supposant le régime général dans la conduite non troublé par l'adjonction du câble,

$$\frac{I}{i} = \frac{e_1}{e_1 - e_2} \qquad \text{d'où} \qquad I = i\frac{e_1}{e_1 - e_2}.$$

Cette méthode paraît exiger deux lectures simultanées, ce qui est peu commode, étant données les variations continuelles du courant. On peut s'arranger cependant de manière à ne faire les lectures que successivement; on remarquera pour cela que, quelle que soit l'intensité à l'instant considéré, on aura toujours

$$e_2 = K e_1,$$

K étant une constante pour la station choisie, le facteur de réduction K ne

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dépendant que du rapport des conductibilités de la conduite et du câble de dérivation; d'où

$$\frac{e_1}{e_1 - e_2} = \frac{e_1}{e_1(1 - K)} = \frac{1}{1 - K} = \text{const.}$$

On pourra donc déterminer ce rapport à loisir en faisant des contacts successifs du câble de dérivation, puis on notera ensuite l'intensité maxima donnée par l'ampèremètre. La formule indiquera alors le courant maximum traversant la conduite.

EXACTITUDE DE LA MÉTHODE.

La méthode n'est exacte qu'autant que e_1 et e_2 représentent vraiment les différences de potentiel sur la conduite entre les deux prises de dérivations. Or on ne peut généralement se placer sur la conduite, mais sur des branchements, bouches d'eau ou becs de gaz (*fig. l*). D'où des résis-

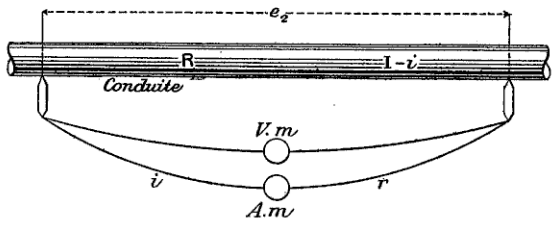


Fig. *l*. — Cause d'erreur de la méthode de mesure du courant dans les conduites.

tances de contact inconnues ρ_1, ρ_2, que nous supposerons réunies en une seule ρ : la lecture de e_1 sera exacte si ρ est faible devant la résistance du voltmètre. Mais en ce qui concerne e_2, on mesurera $e_2 = R(I - i) - \rho i$, au lieu que la quantité qui devrait être mesurée est $R(I - 1)$.

L'erreur relative sera donc

$$m = \frac{\rho i}{R(I - 1)};$$

or

$$\frac{i}{I - i} = \frac{R}{r + \rho},$$

d'où

$$(I - i) = i\frac{(r + \rho)}{R},$$

et en remplaçant dans m

$$m = \frac{\rho}{r + \rho}.$$

Pour que l'erreur soit petite, il faut donc ρ petit devant r.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Mais nous ne le connaissons pas et nous n'avons guère d'autre moyen de contrôle que de forcer à travers la conduite une intensité *connue* par une connexion directe au rail et de vérifier que la méthode indique alors une intensité de cet ordre. Nous n'avons accepté de valeur fournie par cette méthode que lorsqu'elle a été soumise à une vérification de ce genre ou lorsque les contacts du voltmètre ont été pris directement sur la conduite.

En outre, on trouble toujours quelque peu le régime de la conduite par le shuntage de cette conduite sur une longueur qui atteint généralement 80 m ou 100 m; mais on peut se rendre compte que, de ce fait, les valeurs trouvées pour le courant ne pèchent que par excès, ce qui n'est pas un mal.

Très généralement l'application de cette méthode nous révèle immédiatement que le shuntage de conduites même très grosses par un câble de cuivre de 20 mm² de section suffit pour faire tomber énormément la différence de potentiel e_1, ce qui signifie que la conductibilité de ces conduites est en général très mauvaise, que leurs joints soient peu conducteurs naturellement, ou qu'ils le soient devenus par le fait même du passage du courant, suivant la thèse de A. Knudson (*American Electrician,* mars 1900).

Nous indiquons ci-après quelques résultats obtenus sur des conduites de 10 cm à 30 cm de diamètre et, en général, dans la région *neutre* des réseaux, c'est-à-dire dans la région maximum d'intensité pour les conduites.

Amiens. — Gaz place de l'Hôtel-de-Ville :

$e_1 = 5$ millivolts, $e_2 = 4$ millivolts, $i_{max} = 0^{amp},03$, $I_{max} = 0^{amp},15$.

Gaz devant l'église Saint-Leu :

$e_1 = 15$ millivolts, $e_2 = 2$ millivolts, $i_{max} = 0^{amp},01$, $I_{max} = 0^{amp},01$.

Rouen. — Gaz place Saint-Sever :

$e_1 = 10$ millivolts, $e_2 = 0$ millivolt.

Gaz rue Thiers :

$e_1 = 10$ millivolts, $e_2 = 7$ millivolts, $i_{max} = 0^{amp},02$, $I_{max} = 0^{amp},06$.

Saint-Mandé (Bastille-Charenton). — Gaz Demi-Lune :

$e_1 = 1,1$ millivolt, $e_2 = 0,9$ millivolt, $i_{max} = 0^{amp},04$, $I_{max} = 0^{amp},20$.

Eau Demi-Lune :

$e_1 = 1,1$ millivolt, $e_2 = 0,3$ millivolt, $i_{max} = 0^{amp},06$, $I_{max} = 0^{amp},08$.

Havre. — Canalisation de gaz rue Charles-Laffitte :

$e_1 = 0,20$ millivolt, $e_2 = 0,04$ millivolt, $i_{max} = 0^{amp},08$, $I_{max} = 0^{amp},95$.

Aubervilliers. — Conduite d'eau de 50 cm de diamètre placée à 1 m sous la voie :

$e_1 = 2$ millivolts, $e_2 = 2$ millivolts.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Ici la conductibilité est excellente et le shuntage ne provoque pas de baisse sensible. Nous avons eu recours à un artifice consistant à faire passer dans la conduite un courant auxiliaire de 13 ampères qui a déterminé un supplément de chute de 15 millivolts. D'où $I_{max} = 1,7$ ampère avec des maxima exceptionnels de 4 ampères. C'est l'intensité la plus forte que nous avons eu à constater. Or, cette conduite pèse 200 kg par mètre et, en le supposant intégralement dangereux, ce qui n'est pas (*voir* plus loin), le courant qui y circule n'enlèverait pas 5 kg par an dans toute la partie exposée de la conduite.

(*e*) Nous nous étions déjà rendu compte de ce fait d'une tout autre façon dans les essais entrepris en 1895 avec M. Meylan; nous avions constaté que, si l'on relie directement une conduite à la barre négative de l'usine, on pent faire rentrer par ce canal des courants très intenses sans pourtant modifier autrement que *très localement* et sans changer leur sens les différences de potentiel rails-tuyaux, ce que nous expliquions en admettant que la conduite agissait alors comme une plaque de terre de grande surface pour drainer, au voisinage du feeder négatif, tous les filets de courant s'y dirigeant, dont la proportion apparaissait ainsi comme très grande.

(*f*) Pour une ligne particulière d'un réseau, on peut avoir une idée du courant qui sort des rails sur cette ligne en intercalant un ampèremètre vers son milieu et lançant un courant connu à son extrémité. Avec des voies moyennement jointées, nous avons constaté ainsi, à Rouen, des fuites de 30 pour 100 du courant d'essai. Cette mesure ne suffit plus si l'on veut avoir une idée des courants vagabonds dans l'ensemble d'un réseau. Nous avons alors eu recours à la méthode suivante : Nous avons effectué la nuit des essais précis en lançant sur les voies un courant constant et en mesurant le courant qui, dans la région dangereuse, rentre sur des tronçons de voie de longueur connue, complètement disconnectés et reliés aux rails voisins à l'aide d'ampèremètres qui mesurent précisément le courant de rentrée sur ces tronçons; nous avons constaté ainsi que la densité du courant de rentrée en un point de la région dangereuse est sensiblement proportionnelle à la différence de potentiel rails-tuyaux en ce point (cette différence de potentiel, en effet, ne dépend pas autant qu'on pourrait le croire de la position des tuyaux par rapport aux rails, ce qui provient vraisemblablement de ce que la plus grande partie de la résistance de rentrée est localisée au voisinage immédiat des rails). Pour calculer le courant vagabond total d'un réseau, il suffit donc de déterminer, à l'aide d'un ampèremètre, la rentrée sur un tronçon de longueur connue placé au voisinage du feeder négatif et préalablement disconnecté, et de déduire de la valeur trouvée le courant de rentrée total dans toute la région dangereuse en tenant compte des différences de potentiel rails-tuyaux en chaque point fournies par la carte électrique. J'ai trouvé à Saint-Mandé un courant de rentrée atteignant 1,5 ampère sur un tronçon de 100 m de voie simple placé au voisinage du feeder de retour; à Aubervilliers, 2 ampères, etc.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Cette grande perméabilité que, par suite des immenses sections en jeu, la terre présente aux courants de retour se traduit par des effets curieux dont je signalerai quelques-uns. A Aubervilliers, les rails d'une ligne à simple voie de 800 m de long qui se détache du réseau principal perpendiculairement à celui-ci, ayant été sectionnés et reliés au réseau à l'aide d'un ampèremètre, nous avons constaté qu'un courant presque constant de 12 à 15 ampères, sur un débit total de 250 à 300 ampères, revenait par cette ligne, en l'absence de toute voiture.

Au Havre, la ligne de la côte Sainte-Marie, dans les mêmes conditions, ramène jusqu'à 40 ampères. Sur ce même réseau du Havre, nous avons constaté fortuitement qu'un court-circuit de 400 ampères sur la ligne de l'Eure a fait tripler la chute de tension, correction faite du lancé de l'appareil, sur la ligne diamétralement opposée du cap de la Hève, parce que le courant brusquement accru n'a pu trouver dans les rails un chemin suffisant et a dû se frayer un passage à travers la terre pour aller rejoindre des lignes moins chargées. Enfin, il arrive fréquemment, comme la simple application d'un millivoltmètre sensible aux extrémités d'un rail permet de le constater, que dès qu'une ligne se détachant d'un réseau est inactive par suite de l'arrêt simultané de toutes ses voitures, elle est le siège de courants parfois très intenses *remontant vers le terminus* pour s'écouler dans la terre et rejoindre, par ce chemin si détourné en apparence, le feeder négatif.

(*g*) Il semble que l'intensité de ce phénomène soit liée à l'épaisseur de la couche de terre qui sépare les deux électrodes. Nous avons noté une attaque égale à l'attaque théorique, soit 27g, dans le cas de deux plaques en plomb d'un demi-mètre carré enfouies dans un sol humide à 30 cm l'une de l'autre et soumises à 1,7 volt pendant cinq jours; tandis que l'essai ci-dessus relaté d'une attaque de 20 g au lieu de 500 se réfère à une seule plaque de plomb simplement reliée à travers le compteur aux rails terminus de Pantin sur le réseau d'Aubervilliers; de telle sorte qu'ici les courants émanés de la plaque devaient traverser la terre jusqu'à leur rentrée vers le feeder négatif en un point très éloigné.

(*h*) Les joints genre *Chicago* peuvent devenir rapidement mauvais dans certaines circonstances, même quand ils offraient au début une bonne conductibilité. Il n'est pas rare, sur des réseaux en fonctionnement depuis quelques années, de trouver des joints équivalant comme résistance à quatre ou cinq longueurs de rails alors qu'ils ne devraient correspondre qu'à 0,30 à 0,40 rail au plus. La section du type ordinaire est d'ailleurs beaucoup trop faible. Le joint Falk est nettement préférable au point de vue électrique, mais il demande à être fait avec beaucoup de soin.

(*i*) Lorsque aucune liaison métallique n'existe entre rails et conduites, on peut dire que celles-ci ne reçoivent, parmi les courants vagabonds sortant des rails, à peu de chose près que la faible fraction à laquelle leur donne droit l'angle sous lequel ces conduites sont vues des rails. Lorsque,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

au contraire, une liaison métallique même unique est effectuée, le mécanisme de l'entrée des courants dans la conduite est naturellement tout différent; comme conséquence, on augmente dans une mesure énorme, inattendue, les courants qui circulent dans ces conduites : telle conduite qui était le siège d'un courant d'un dixième d'ampère voit ce courant passer à 10 ampères par une liaison dans la région dangereuse, c'est-à-dire *centupler*. Presque toujours, en pareil cas, on peut constater une augmentation supérieure à vingt fois le courant initial. Or, une telle liaison métallique dans la région dangereuse supprime bien, et c'est sa raison d'être, les chances de corrosion latérales dans cette région, mais on voit dans quelle mesure énorme elle augmente les risques d'attaque des joints. Si tous ces joints sont également mauvais, l'inconvénient sera nul parce que la différence de potentiel agissante s'échelonnera en une série de faibles valeurs, inoffensives d'après les théories précédentes, d'autant que le courant sera assez faible, que la presque totalité passera généralement quand même dans le joint sans sortir par la terre, et qu'enfin le peu qui passera dans la terre ne sortira pas seulement au voisinage immédiat de l'obstacle à franchir, comme on se le figure souvent, mais sur une très grande surface en amont du joint; pour des raisons évidentes, l'inconvénient sera nul également dans le cas de joints uniformément bons, mais il subsistera des chances sérieuses d'accidents pour le cas où quelques joints seulement seraient franchement mauvais; et comme on ne peut jamais répondre de la non-réalisation de ce cas, on voit combien on aurait tort de se mettre en frais, au moins sur nos réseaux, pour substituer au *statu quo* actuel — courants dans les conduites très peu intenses et presque inoffensifs — la possibilité de graves accidents. Ici encore, le mieux semble être l'ennemi du bien.

COMMUTATRICES ET TRANSFORMATEURS REDRESSEURS;

PAR M. JANET,

Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris,
Directeur du Laboratoire central et de l'École supérieure d'Électricité.

Le problème de la transformation des courants alternatifs en courants continus ou, plus exactement, des forces électromotrices alternatives en forces électromotrices continues, se trouve à la base même de l'Électrotechnique, car il est résolu par le merveilleux outil qu'on appelle le *Collecteur Gramme;* mais ce n'est que depuis peu d'années qu'il a pris en lui-même une place importante dans les préoccupations des électriciens : il s'est posé d'une

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

manière inévitable le jour où se sont développés les transports à longue distance et, par suite, l'usage des hautes tensions. La facilité de produire ces hautes tensions au moyen du courant alternatif a fait de ce courant la forme par excellence pour la transmission de l'énergie électrique; mais, dans bien des cas, le courant continu est resté la forme par excellence pour l'utilisation de cette énergie; les opérations électrolytiques et la charge des accumulateurs l'exigent absolument; l'éclairage par arc est incomparablement meilleur avec lui. Malgré les remarquables progrès des alternomoteurs, les moteurs à courant continu restent dans bien des cas, la traction par exemple, les plus employés; l'incandescence seule n'a pas de préférence. Dans ces conditions, l'intransigeance, que nous avons connue, des partisans exclusifs du courant continu ou du courant alternatif s'est émoussée; les premiers, tout en continuant à admirer comme il convient les beaux transports réalisés par courants continus à haute tension, ont dû s'incliner devant la puissance incontestable des réseaux polyphasés à longue portée, qui se développent de tous côtés; les seconds, forcés de satisfaire aux exigences légitimes des tramways, des arcs, ou simplement des anciennes usines à courant continu destinées à devenir de simples sous-stations, ont été amenés, par la force des choses, à essayer de transformer leur énergie première alternative en énergie plus marchande, et le résultat de cette évolution, déjà historique, fut la création des appareils dont le Congrès aura à discuter les mérites et les inconvénients.

Nous les rattacherons à quatre groupes principaux :

1° Redresseurs électrolytiques;

2° Appareils de simple commutation;

3° Commutatrices ou convertisseurs;

4° Transformateurs redresseurs.

I. — Redresseurs électrolytiques.

Ces appareils reposent sur les propriétés spéciales des électrodes d'aluminium; lorsque l'une des électrodes d'un voltamètre est formée d'une plaque d'aluminium, l'autre étant faite d'un métal quelconque, le courant passe sans difficulté si l'électrode d'aluminium est négative; il est arrêté presque entièrement si elle est positive; on peut attribuer ce fait à la formation, dans le der-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

nier cas, d'une mince couche d'alumine; un tel voltamètre peut supporter, sans laisser passer le courant, une différence de potentiel de 20 volts en liqueur acide, et cette tension limite peut monter jusqu'à 140 volts en liqueur alcaline. Il est facile d'imaginer immédiatement des dispositions propres à utiliser cette propriété pour le redressement des courants alternatifs, ou, ce qui revient au même, pour la réalisation de véritables clapets électriques.

Jusqu'à quel point cette solution du problème est-elle industrielle? Peut-on, par ce procédé, espérer transformer des puissances un peu notables? Quel serait le rendement de cette transformation? Telles sont les questions qu'il serait intéressant d'examiner.

II. — Appareils de simple commutation.

Un commutateur ordinaire, manœuvré au synchronisme avec le courant qu'il s'agit de redresser, donne évidemment une solution simple du problème qui nous occupe : mais la production d'étincelles abondantes, dès que l'intensité du courant à redresser est un peu notable, constitue la principale difficulté que l'on rencontre dans cette voie. Malgré les artifices ingénieux qui ont été imaginés pour les éviter, comme, par exemple, d'inverser le courant au moment précis où il s'annule, il ne semble pas qu'on puisse espérer beaucoup de cette méthode un peu terre à terre.

III. — Commutatrices ou convertisseurs.

La transformation des courants alternatifs simples ou polyphasés en courants continus peut évidemment s'obtenir par l'accouplement direct d'un moteur à courant alternatif avec une génératrice à courant continu; si le moteur est un moteur synchrone, ses inducteurs sont semblables à ceux de la génératrice à courant continu; il est donc possible de les confondre en un seul système, et de réunir sur un même induit l'enroulement à courants alternatifs et l'enroulement à courant continu. Poussant encore plus loin la simplification, on peut, enfin, confondre en un seul les deux enroulements induits, et nous arrivons ainsi à la commutatrice ou convertisseur dont l'inducteur est excité en courant continu, et

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dont l'induit unique reçoit, d'un côté, au moyen de bagues et de frotteurs, un courant alternatif simple ou polyphasé, et restitue de l'autre, au moyen d'un collecteur et des balais ordinaires, un courant continu. Il est intéressant d'examiner ces machines au point de vue de l'utilisation des matériaux, du rendement et du fonctionnement.

Au point de vue de l'utilisation des matériaux, il est évident que par l'usage des commutatrices on économise un système inducteur sur deux, sans en modifier sensiblement les dimensions, ou même en les réduisant; il y a donc tout avantage de ce côté. En ce qui concerne l'induit, il est évident aussi que le poids du cuivre immobilisé sera certainement inférieur à la somme des poids de cuivre portés par un moteur à courant alternatif et par une génératrice à courant continu; cela provient de ce que les intensités respectives des courants continu et alternatif s'ajoutant *algébriquement* dans le fil induit, la chaleur Joule totale en est diminuée, ce qui, si on le veut, permet une économie sur le cuivre.

Il est intéressant de pousser plus loin la discussion en comparant la puissance maximum d'une même machine fonctionnant successivement comme génératrice à courant continu ou comme commutatrice. L'avantage, très léger d'ailleurs, est à la génératrice à courant continu s'il s'agit d'une commutatrice monophasée; mais, dès qu'il s'agit de courants polyphasés, la commutatrice reprend un avantage très marqué, et d'autant plus marqué que le nombre de phases est plus élevé. C'est ainsi qu'une commutatrice diphasée (ou plutôt à quatre phases) l'emporte sur une commutatrice triphasée, et une commutatrice à six phases sur une commutatrice à quatre phases; l'avantage est tel que, à poids de matière égale, une même machine peut être environ deux fois plus puissante si elle fonctionne comme commutatrice hexaphasée que si elle fonctionne comme génératrice à courant continu; et, dans le même ordre d'idées, une commutatrice hexaphasée peut avoir, à poids de matière égal, une puissance maximum plus grande de près de 50 pour 100 qu'une commutatrice triphasée. On a donc intérêt à augmenter le plus possible le nombre des phases utiles : à ce point de vue, des artifices ingénieux, et qu'il serait trop long de rappeler ici, permettent très facilement de passer de trois phases à six phases, et, s'il était nécessaire, il serait possible de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

pousser encore plus loin cette multiplication des phases au moyen d'appareils purement statiques.

Au point de vue du rendement, il est évident que, à un premier examen, l'avantage est à la commutatrice sur le groupe moteur-générateur : en admettant dans ce dernier cas des rendements de 0,90 pour chacune des deux machines, le rendement total de la transformation sera de 0,81. Une commutatrice pourra avoir un rendement de 0,90; elle sera même dans de meilleures conditions qu'une génératrice, puisque, à puissance égale et à induction égale, le poids de son induit sera plus faible et, par conséquent, plus faibles aussi les pertes par hystérésis. Mais il faut ajouter qu'une commutatrice s'emploie rarement seule; il faut lui adjoindre un transformateur convenable qui ramène à une tension donnée la haute tension du réseau, tandis que, au moins pour des moteurs d'une certaine puissance, on peut leur appliquer directement cette haute tension. Il est donc juste de comparer l'ensemble : transformateur-commutatrice à l'ensemble : moteur-génératrice; mais, étant donné le rendement élevé des transformateurs, même ainsi l'avantage reste à la commutatrice. Cela suppose toutefois que les conditions de fréquence imposées permettent de réaliser une machine suffisamment rationnelle, ce qui n'arrive pas toujours.

Au point de vue du fonctionnement, la commutatrice impose un rapport sensiblement constant entre les tensions alternatives et continues, ce qui peut être parfois une gêne; elle présente l'avantage général des moteurs synchrones au point de vue des avances de phases qu'elle peut produire dans un réseau, mais elle a une tendance à renforcer les harmoniques peu élevés, ce qui pourrait devenir grave si la puissance transformée était une fraction importante de la puissance totale produite, et surtout si la canalisation était souterraine.

La réaction d'induit est peu élevée dans la commutatrice : cela dépend de ce que dans les commutatrices polyphasées, le couple étant nul, les flux propres de l'induit produits par les courants alternatifs et par les courants continus doivent être égaux et opposés et par conséquent se détruisent. Dans les commutatrices monophasées, ceci est encore vrai en partie; mais il subsiste un flux tournant de fréquence 2 qui ondule la tension recueillie aux balais.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

IV. — Transformateurs-redresseurs.

On peut admettre que la commutatrice procède par deux étapes successives : 1° elle transforme des forces électromotrices données, à petit nombre de phases (six au plus dans la pratique), en forces électromotrices à grand nombre de phases dans les sections successives de l'anneau Gramme; 2° le collecteur transforme, à la manière ordinaire, ces forces électromotrices à très grand nombre de phases en différence de potentiel continue. Ces deux *opérations* n'ont pas le même caractère : la première met en jeu des variations de flux dans un circuit magnétique dont les dimensions et, par suite, le poids dépendent de la puissance à transformer; la seconde est une opération de commutation, ou plutôt d'addition, le collecteur Gramme, considéré à un point de vue un peu élevé, étant simplement un organe destiné à réaliser physiquement l'opération algébrique de l'addition de forces électromotrices polyphasées : les dimensions de ce second appareil sont évidemment très réduites par rapport à celles du premier.

Or il est possible de réaliser la première transformation (forces électromotrices à petit nombre de phases en forces électromotrices à grand nombre de phases) au moyen d'appareils entièrement immobiles et tout à fait comparables aux transformateurs statiques usuels. Par cet artifice, la partie tournante sera réduite au collecteur des commutatrices ordinaires. Mais il faudra conduire aux touches successives de ce collecteur les potentiels polyphasés recueillis aux bornes, en nombre égal, du transformateur de phases : d'où la nécessité d'un nombre égal encore de bagues portées sur le même axe que le collecteur et de balais frottant sur ces bagues, à moins que l'on ne consente inversement à laisser le collecteur fixe et à faire tourner les balais.

Nous pouvons considérer ces appareils aux trois mêmes points de vue que les commutatrices.

1° Au point de vue de l'utilisation des matériaux, il est évident que par l'artifice du transformateur-redresseur on supprime purement et simplement les systèmes inducteur et induit de la commutatrice, puisque le transformateur statique doit exister dans tous les cas. Il serait intéressant, à ce point de vue, de comparer un transformateur statique ordinaire avec un transformateur de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

phases; il est bien probable que, pour une même puissance et des conditions de marche analogue, les poids de ces appareils différeraient peu. Pour que la comparaison soit complète, il faut d'ailleurs tenir compte de la nécessité d'un petit moteur synchrone destiné, dans le cas du transformateur-redresseur, à mettre en mouvement le collecteur.

2° Au point de vue du rendement, le système du transformateur-redresseur économise une partie des pertes par hystérésis et par courants de Foucault en supprimant les variations de flux dans un induit tournant; il introduit, il est vrai, un petit moteur en plus, néanmoins il semble que l'avantage doit lui rester.

3° Au point de vue du fonctionnement, il est évident que, pour les mêmes raisons que dans le cas d'une machine à courant continu, il y aura avantage à sectionner le plus possible le collecteur, c'est-à-dire à multiplier le plus possible le nombre de phases. Lorsque les balais sont fixes, cela conduit à multiplier d'une manière exagérée le nombre des bagues et des frotteurs et, par suite, la longueur de la partie tournante : l'avantage, ici, semble rester à la commutatrice, dans laquelle ce sectionnement ne présente aucune difficulté, à moins que l'on ne consente à laisser le collecteur fixe et à faire tourner les balais, ce que la pratique n'a pas encore sanctionné.

En résumé, trois systèmes vraiment pratiques sont en présence pour la solution du problème qui nous occupe : moteurs-générateurs, commutatrices, transformateurs-redresseurs; il serait intéressant d'avoir des données précises permettant la comparaison de ces trois systèmes au point de vue de la pratique.

CONDENSATEURS ÉLECTRIQUES POUR HAUTE TENSION;

PAR M. L. LOMBARDI.

Au premier Congrès des Électriciens Italiens à Como, l'année dernière, j'ai eu l'honneur de communiquer les résultats des premiers essais que j'avais faits, sur la construction des condensateurs électriques pour haute tension.

Cherchant à traiter des substances isolantes facilement fusibles,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

j'avais imaginé une méthode de coulée qui permettait d'avoir des plaques en même temps extrêmement minces et parfaitement homogènes sans y introduire des matières étrangères qui donnent toujours au diélectrique des propriétés mauvaises.

A cette occasion, je présentai au Congrès un petit condensateur qui pouvait fonctionner avec une dépense négligeable d'énergie à une tension alternative de 5000 ou bien de 10000 volts, avec une capacité de $\frac{1}{10}$ ou bien de $\frac{1}{40}$ de microfarad; il avait, en effet, deux sections de $\frac{1}{20}$ de microfarad qu'on pouvait grouper parallèlement ou en cascade. Chaque section était constituée par 50 plaques de paraffine ayant un point de fusion assez élevé, avec 1, 1 mm d'épaisseur et 25 cm et 32 cm pour côtés. Les plaques avaient été essayées par moi à 17000 volts. Le condensateur avait été construit et monté complètement dans mon laboratoire; par conséquent, ce n'était qu'un appareil d'essai; pourtant, il suffisait aux mesures dont il avait été l'objet. Il figure maintenant à l'Exposition universelle dans la section du Musée Royal Industriel Italien.

Pour donner à mon système tous les caractères d'une fabrication industrielle, et pour y introduire tous les perfectionnements dont il était susceptible, il y avait encore beaucoup de degrés à franchir, beaucoup de difficultés à vaincre pour lesquelles était indispensable le concours de moyens plus puissants.

La maison Ingénieur V. Tedeschi et Cie, fabricants bien connus de câbles et conducteurs électriques isolés, a bien voulu se charger, sous ma surveillance, des nouveaux essais, dont les résultats, qui doivent lui être attribués en grande partie, vont être l'objet de ma brève Communication.

La difficulté de fabriquer les plaques isolantes de grande surface et en grand nombre, qui nous préoccupait au début, disparut tout de suite.

Le premier ouvrier qu'on employa à cette besogne, après un travail de quelques heures, sous la direction de M. Tessari, ingénieur de la fabrique, arriva bientôt à tirer, d'un seul appareil, 100 plaques par jour. La surface de ces plaques était double de celle des anciennes; le prix de fabrication était moins élevé que je ne croyais tout d'abord.

Après un mois de fabrication, nous avions 3000 plaques parfaitement homogènes et d'une manipulation aisée, composées de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

cérésine et de paraffine de différentes qualités, dont le point de fusion variait de 40° à 75°.

Pour les essayer, la maison construisit une bobine d'induction à double enroulement, système Ruhmkorff, capable de donner une différence de potentiel de 50 000 volts aux bornes secondaires, avec une tension primaire de 125 volts. En outre, la maison V. Tedeschi et Cie possède une petite installation de transformateurs pour essayer les câbles et les condensateurs jusqu'à 10 000 volts.

Toutes les plaques ont été soumises pendant 20 secondes à 17 000 volts; il fallut en rejeter à peu près 30 pour 100, probablement par suite de la température extérieure qui était, ces jours-là, extrêmement élevée.

Avec les plaques essayées ayant le point de fusion plus élevé, nous commençâmes de suite le montage des condensateurs industriels, dont le premier a l'honneur de figurer depuis quelques jours seulement à l'Exposition universelle, dans la section italienne d'Électricité.

Ce premier condensateur est lui-même divisé en deux de $\frac{1}{2}$ microfarad pour 5000 volts qu'on peut grouper parallèlement ou en cascade de façon à avoir une capacité d'un microfarad pour 5000 volts ou de $\frac{1}{4}$ de microfarad pour 10 000 volts. Chaque condensateur porte aux bornes un parafoudre et des plombs de sûreté qui empêchent toute surélévation dangereuse de potentiel et d'intensité de courant. Il est constitué par cinq sections, qu'on peut séparer et changer en cas d'accident. Chaque section est composée par cinquante plaques de cérésine de 36 cm sur 49 cm, ayant une épaisseur de 1,2 mm et emboîtée dans une caisse de bois paraffiné, fermée hermétiquement avec de la paraffine liquide. Toute connexion est protégée par des feuilles de gutta-percha et par des matériaux isolants fabriqués par la maison.

Les sections séparées ont été essayées pendant trois heures à 9000 volts; le condensateur complet pendant quatre heures à 7000 volts; aussi nous croyons pouvoir garantir la résistance durable du système à une tension moyenne n'excédant pas 5000 volts.

A cet effet nous avons fait des expériences que nous ne croyons pas dépourvues d'intérêt.

Une section de 50 plaques ayant une capacité de $\frac{1}{10}$ de micro-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

farad a été montée comme toutes les autres en y disposant exactement au milieu de la plaque centrale l'extrémité d'un couple thermo-électrique dont l'autre extrémité demeurait au dehors dans la glace fondante; un second couple semblable a été inséré avec une soudure sur la même plaque à 6 cm du bord. Un galvanomètre Thomson donnait pour chaque degré de différence de température 1,25 mm de déviation. La température intérieure pouvait donc être observée avec une approximation de $\frac{1}{10}$ de degré.

Après dix heures de fonctionnement à la tension normale de 5 000 volts, la température du milieu était montée de 1,4 degré C, celle du bord de 3,2 degrés C, pendant que la température extérieure avait augmenté de 2,5 degrés C.

Il est certainement difficile de séparer la quantité de chaleur que la substance mauvaise conductrice a empruntée à l'extérieur de celle qui a été dégagée par les phénomènes électriques. On peut pourtant attribuer la différence des températures intérieures aux aigrettes, qui prennent naissance sur les bords des armatures dans la couche très mince d'air qu'on ne peut pas parfaitement éliminer d'entre les plaques diélectriques; l'électricité cherchant, pour ainsi dire, à s'échapper à cause de la pression électrostatique des conducteurs chargés à très haute tension, lorsque ceux-ci sont noyés dans un milieu isolant.

Heureusement la petite quantité de chaleur dégagée ainsi n'est pas dangereuse pour le condensateur, parce que la température du diélectrique ne s'approche pas d'une façon sensible de celle de la fusion, et ses variations sont beaucoup moindres que celles qu'on peut prévoir dans la température extérieure.

D'autre part, le diélectrique même, s'adaptant aux nouvelles conditions moléculaires, et les feuilles conductrices, adhérant mieux à l'isolant, semblent améliorer graduellement le système, dans lequel on entend peu à peu disparaître le bruit caractéristique des premiers moments de l'insertion.

Cependant il y a, dans le phénomène décrit, une cause qui bornerait peut-être la tension maximum, si l'on songeait à l'élever sans limite dans les condensateurs destinés à fonctionner sans interruption.

Nous avons même répété les mesures avec des tensions de 7000 et de 9000 volts. Dans ces dernières conditions, après deux heures,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

la température s'était élevée au milieu de 0,4 degré C, et près des bords de 2,4 degrés C; variations qui ne diffèrent pas beaucoup de celles qu'on remarquait après dix heures de fonctionnement normal.

L'énergie électrique dissipée pour cause d'isolement imparfait et de l'hystérésis électrostatique a été, dans le condensateur exposé, mesurée par moi d'après la méthode des trois voltmètres et avec des tensions très différentes.

Le courant de charge, avec une fréquence de 50 périodes, donné directement par l'alternateur ou par le transformateur, traversait une résistance d'à peu près 3600 ohms, constituée par des lampes à incandescence et dépourvue de toute self-induction appréciable.

Deux voltmètres électrostatiques de Kelvin, soigneusement calibrés, étaient employés pour donner la mesure de la tension entre les bornes de la résistance et du condensateur; deux autres voltmètres étalons de Weston donnaient, en même temps, la différence de potentiel résultante. La tension du condensateur varia, dans les premières mesures, de 69 à 85 volts; dans les secondes, de 1000 à 1500 volts.

L'angle de décalage du courant produit par la conductivité et l'hystérésis a été le même dans les deux expériences; le sinus qui caractérise la perte d'énergie est de 0,012 et demeure constant aux différentes tensions; c'est-à-dire que le condensateur dissipe un nombre de watts un peu supérieur à 1 pour 100 du produit des volts-ampères.

Un microfarad à 5000 volts 50 périodes absorbera à peu près 100 watts, c'est-à-dire une quantité absolument petite d'énergie, relativement à la masse du condensateur, quantité qui ne pourra produire aucune variation dangereuse de température. Le condensateur est certainement l'appareil industriel qui travaille dans les meilleures conditions économiques.

A ce point de vue, les conclusions de mes premiers essais ont donc été complètement confirmées.

Restait à résoudre la question financière qui, dans les problèmes techniques, joue un rôle prépondérant. Eh bien, en réalité, le prix de revient des nouveaux condensateurs industriels n'excéderait en aucune façon mes prévisions de l'année dernière, s'il n'y avait une forte différence dans le coût des matériaux de construction et sur-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

tout dans les diélectriques, dont le prix pendant les derniers mois a augmenté presque de 50 pour 100.

Maintenant la maison Tedeschi et Cie s'est engagée à monter des pièces pour 10000 volts avec des plaques de 2 mm d'épaisseur essayées à 30000 volts. Je fis remarquer, dans ma première Communication, qu'on peut, à un point de vue théorique, utiliser mieux l'isolant en le partageant en plaques multiples de petite épaisseur séparées par des armatures insérées en cascade, par suite d'une propriété générale des diélectriques, dans lesquels la tension disruptive croît plus lentement que la distance des électrodes. D'un autre côté, la main-d'œuvre et presque tous les frais de construction croissent à peu près dans la mesure du nombre de plaques à fabriquer et même plus rapidement, par suite de la difficulté qu'on éprouve à tirer des plaques très minces. Par conséquent, le prix de revient des condensateurs pour une tension donnée demeure, jusqu'à une certaine limite, plus bas si on les forme avec des plaques simples.

Si l'épaisseur est double, il faut pour la même capacité une surface double et un volume quatre fois plus grand de diélectrique. L'homogénéité plus grande des plaques coulées ajoute par elle-même quelque chose à leur résistance relative, et permet de réaliser sur elles une tension totale presque double.

De cette façon, le prix total croît dans une proportion moindre que la tension et que l'énergie économisée; par exemple, on peut compter maintenant sur un prix peu supérieur à 500^fr^ pour le microfarad à 5000 volts (le premier a coûté davantage), tandis que le prix de la même capacité pour 10000 volts n'atteindra probablement pas 1400 fr. Ce qui revient à dire que dans les conditions ordinaires le prix des appareils à potentiel élevé, rapporté à l'unité du produit de la tension par l'intensité de courant en kilovolts-ampères, peut baisser jusqu'à 50 fr et rester moindre que celui des autres grandes machines industrielles. Dans les installations à courants polyphasés on pourra même avoir un léger bénéfice avec une combinaison de trois condensateurs réunis en un seul, en groupant alternativement les armatures de même potentiel séparées par des plaques isolantes de même nom.

Un condensateur chargé par un courant sinusoïdal de 50 périodes : 5, à une tension de 10000 volts, reçoit 3,14 ampères et absorbe

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

à peu près 300 watts. S'il est inséré au bout d'une ligne de transmission dont la résistance absorbe 10 pour 100 de l'énergie, de façon à donner au courant la même phase que celle du potentiel, et à élever $\cos\varphi$ de 0,8 à 1, il permet d'économiser dans la ligne à peu près 2 kilowatts. On bénéficierait même de 2,9 et 3,9 kilowatts, si $\cos\varphi$ était d'abord de 0,7 ou 0,6, et proportionnellement encore davantage s'il y avait dans la transmission une chute plus grande de potentiel. Ces chiffres ne sont point exagérés, attendu qu'il y a des lignes qui absorbent plus que 10 pour 100 de l'énergie, et que la valeur moyenne de $\cos\varphi$ n'excède ordinairement pas, en charge normale, la valeur de 0,8, excepté dans les réseaux où il existe de nombreux moteurs synchrones surexcités. Lorsque la charge est faible, la chute de potentiel est moindre, mais $\cos\varphi$ descend beaucoup plus bas.

Maintenant (pour juger de l'utilité de l'emploi des condensateurs) il faut ajouter à l'énergie économisée par eux dans la ligne, celle que pourra nous donner en plus le générateur, et qui sera absolument subordonnée au type de la machine.

Un grand alternateur moderne de 1000 kilowatts absorbe à peu près 2,5 pour 100 de l'énergie dans les enroulements excitateurs et dans l'induit lorsqu'il travaille avec $\cos\varphi = 1$. La chute de tension à pleine charge peut être d'environ 7 pour 100. Lorsque $\cos\varphi = 0,8$, la chute de tension devient à peu près 3 fois plus grande; il faut alors augmenter l'excitation; l'énergie dépensée dans le cuivre peut atteindre 4 pour 100. Le réglage se fait lui-même très péniblement; en outre, par suite de la réaction de l'induit, les pertes magnétiques augmentent; le coefficient économique total de la machine peut baisser de 2 à 3 pour 100. M. Kapp, dans ses *Constructions électromécaniques,* calcule même, pour un alternateur de 60 kilowatts, une diminution de rendement de 3,5 pour 100 pour une diminution de $\cos\varphi$ de 1 à 0,8.

De cette manière, le condensateur de 1 microfarad, inséré au bout de la ligne, permettrait d'économiser encore de 1 à 1,5 kilowatt en plus. Si l'on voulait diminuer les résistances des enroulements du générateur et changer ses dimensions de façon à lui donner la même puissance et le même rendement avec $\cos\varphi = 0,8$, il faudrait dépenser en plus dans la machine presque la moitié du

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

prix du condensateur qui est susceptible de donner le même résultat. En tout cas, même si l'on ne fait pas question de rendement, le prix d'un alternateur ayant une puissance donnée avec $\cos\varphi = 0{,}8$ est considérablement supérieur à celui d'un alternateur de la même puissance avec $\cos\varphi = 1$. La différence peut même atteindre 20 pour 100.

En résumé, si l'on tient compte de toute économie réalisée, on voit que l'argent dépensé dans les condensateurs peut bien des fois produire un véritable avantage.

D'ailleurs, ce n'est pas là le seul côté de la question qu'il faut envisager. Nous ne voulons pas attendre que nos sources d'énergie soient épuisées pour songer aux moyens d'améliorer les conditions économiques de nos réseaux. Partout où des phénomènes d'induction pourraient produire des perturbations dans les distributions de courants alternatifs, nous trouvons le remède dans l'emploi des condensateurs, dont l'action complexe se réfléchit sur chaque partie de l'installation, soit en augmentant la puissance des machines, soit en diminuant toute perte d'énergie, soit en rendant le réglage plus aisé et réduisant le fonctionnement à un état normal qui n'est guère différent de celui des installations à courants continus.

Or les phénomènes d'induction sont surtout à craindre dans les réseaux dont l'extension est plus grande, et le potentiel en conséquence plus élevé. C'est pourquoi j'espère que le nouveau condensateur, qui résout, je crois, pour la première fois, le problème de fonctionner avec une dépense négligeable d'énergie à des tensions presque aussi élevées qu'on veut, saura gagner sa place dans l'industrie des courants alternatifs et la garder honorablement.

C'est le souhait avec lequel je l'accompagne après avoir eu l'honneur de le présenter devant vous.

SUR L'EMPLOI DES CONDENSATEURS;

PAR M. P. BOUCHEROT.

Les applications possibles des condensateurs, en dehors de celles ayant trait aux méthodes de mesure de laboratoire, dont nous ne parlerons pas, peuvent se diviser en deux catégories :

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

les applications dans lesquelles les énergies en jeu sont de minime importance, dans lesquelles, par conséquent, le prix de l'appareil n'intervient pas sensiblement, et celles qui, au contraire, exigent des condensateurs emmagasinant des quantités importantes d'énergie, dans lesquelles on est conduit à faire travailler le diélectrique sous une pression intense, de manière à réduire, autant que possible, le prix de l'appareil qui entre en ligne de compte d'une façon sensible dans l'ensemble de l'installation.

Des applications de la première catégorie, nous ne dirons que peu de chose, car elles sont trop connues, quelques-unes célèbres.

Nous citerons seulement l'application qu'en a faite Foucault à la bobine de Ruhmkorff; les applications à la télégraphie, à la télégraphie et téléphonie simultanées, à la télégraphie à distance par induction, à la production des courants de haute faéquence, à la télégraphie sans fils à grande distance, etc.

Toutes ces applications ont pu être mises à exécution sans obstacles du fait du condensateur lui-même, celui-ci étant facile à réaliser dans ces conditions.

Il n'en est pas de même de la seconde série d'applications : les applications aux courants alternatifs industriels, qui, jusqu'ici, n'ont pu se faire en grand par suite de difficultés sur lesquelles nous nous étendrons plus loin.

Toutes les applications des condensateurs aux courants alternatifs industriels peuvent être considérées comme des conséquences de la résonance électrique, et, par conséquent, de la décharge ou de la charge oscillante.

Lorsqu'on décharge un condensateur possédant une certaine charge électrique dans une résistance ayant de la self-induction, le courant de décharge passe par une série de valeurs comparables à celles par lesquelles passe la vitesse angulaire d'un pendule plongé dans un milieu visqueux et revenant à sa position d'équilibre.

Si C est la capacité du condensateur, L le coefficient de self-induction du circuit de décharge, R la résistance du circuit, la décharge est continue pour $R^2 > \frac{4L}{C}$, c'est-à-dire que le courant de décharge qui a, au premier moment de la fermeture du circuit, une certaine valeur, diminue jusqu'à zéro sans passer par des

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

valeurs négatives. Le cas correspond alors à celui d'un pendule de faible inertie dans un milieu très visqueux; le pendule revient à sa position d'équilibre sans la dépasser.

La décharge est, au contraire, oscillante pour $R^2 < \frac{4L}{C}$, c'est-à-dire que le courant de décharge ne devient nul qu'après une série d'oscillations, autrement dit après avoir passé par une série de valeurs positives et négatives. Le cas correspond alors à celui d'un pendule ordinaire dans l'air : il revient à sa position d'équilibre après une série plus ou moins longue d'oscillations.

Le temps périodique de la décharge est constant, c'est-à-dire que le temps qui s'écoule entre deux valeurs nulles de l'intensité est le même au commencement ou à la fin de la décharge; il ne dépend pas, par conséquent, de la valeur propre de la charge électrique et a pour expression analytique

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}.$$

Dans le cas particulier et exclusivement théorique où la résistance du circuit est nulle, le temps périodique devient

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

formule qui rappelle singulièrement celle du temps périodique d'oscillation d'un pendule dans le vide. Dans ce cas, l'énergie emmagasinée primitivement dans le condensateur ne pouvant pas se dissiper, puisqu'il n'y a pas de résistance et, par conséquent, pas de RI^2, la décharge dure indéfiniment, c'est-à-dire que, indéfiniment, il existe dans le circuit un courant alternatif de période $T = 2\pi\sqrt{LC}$. C'est évidemment un cas tout à fait théorique, puisque l'on suppose $R = o$ et que cela est impossible à faire.

Mais, s'il n'est pas possible de faire $R = o$, il est facile de compenser constamment la perte d'énergie RI^2 par l'introduction, dans le circuit, d'une source de courant très faible vis-à-vis de l'énergie en jeu dans le circuit. Cette source d'énergie ou cette force électromotrice, si l'on veut que le courant alternatif soit toujours le même, c'est-à-dire si l'on veut que les amplitudes des oscillations du courant soient indépendantes du temps, devra

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

nécessairement être de même période que le courant alternatif dû au circuit formé par le condensateur et la self-induction, ou circuit résonnateur, c'est-à-dire que le temps périodique de la force électromotrice devra être

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

S'il en est ainsi, il y aura *résonance,* par analogie avec les phénomènes d'acoustique; le circuit ne résonnera que pour le courant de fréquence correspondant à $T = 2\pi\sqrt{LC}$, autrement dit, pour ce courant seul la loi d'Ohm pourra être appliquée sans tenir compte des forces électromotrices d'induction ou de capacité.

Remarquons que cette force électromotrice peut être introduite d'une manière quelconque dans le circuit, soit par l'introduction directe d'induit de la machine, soit par induction mutuelle, soit par variations périodiques d'énergies potentielles, etc. De là toutes sortes d'applications possibles.

Nous examinerons les plus importantes et, pour éviter des répétitions, nous dirons dorénavant qu'un condensateur et une self-induction sont ajustés lorsqu'il y aura entre eux la relation

$$\frac{4\pi^2}{T^2} LC = 1.$$

1° *Condensateur en série.* — Ouvrons notre circuit résonnateur et relions aux extrémités libres une source de courant alternatif, par exemple un alternateur dont la période soit justement $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Dans ces conditions, l'intensité qui passera dans le circuit sera exactement celle qui passerait s'il n'y avait que la résistance, c'est-à-dire si la self-induction et la capacité se trouvaient supprimées tout simplement. C'est ce que l'on traduit aujourd'hui couramment en disant que la capacité annule les effets de la self-induction, lorsqu'elle est convenablement ajustée avec celle-ci. Et, détail curieux, alors que nous aurons, par exemple, 100 volts aux bornes de notre circuit, c'est-à-dire reproduits par l'alternateur, nous pourrons parfaitement avoir 1000 ou 10000 volts aux extrémités de la bobine de self-induction ou entre les armatures du condensateur, par suite de la grande quantité d'énergie qui peut être emmagasinée dans chacun de ces appareils en comparaison de celle fournie par l'alternateur pendant une période.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Le condensateur peut donc servir à annuler les effets de la self induction dans un circuit. Veut-on, par exemple, faire passer dans un circuit une intensité plus grande que celle que sa self-induction laisse passer avec la tension dont on dispose; il suffit d'intercaler un condensateur convenable.

Cette propriété a été appliquée dans certains moteurs à courant alternatif simple pour l'excitation des inducteurs et peut être appliquée utilement chaque fois que l'on veut produire un champ magnétique alternatif sans que la puissance apparente fournie à l'appareil dépasse de beaucoup la puissance réelle dépensée par l'effet Joule, et sans être obligé d'avoir une force électromotrice plus grande que celle correspondant à la chute ohmique du circuit d'excitation.

2° *Condensateur en dérivation.* — Refermons notre circuit résonnateur comme il était primitivement et plaçons maintenant une autre source de courant en dérivation sur le condensateur, par exemple. Cette source devra être de même fréquence que la première. Dans ces conditions, l'intensité que débitera l'alternateur dans le condensateur, et celle qu'il débitera dans la self-induction et la résistance pourront être, chacune, très supérieures à leur somme, c'est-à-dire au courant total débité par l'alternateur dans les deux circuits; celui-ci sera strictement égal à celui qui, sous la tension de l'alternateur, donnerait une puissance égale à l'effet Joule, alors que chacun des courants dérivés sera plus grand, par suite de la superposition à celui-ci du courant de résonance.

Cette autre propriété peut recevoir de nombreuses applications.

Elle permet de réduire au moyen des condensateurs les courants magnétisants absorbés par tous les appareils qui ne produisent pas eux-mêmes leurs champs magnétiques, tels que transformateurs, bobines de réaction, moteurs asynchrones.

Si le condensateur prenait définitivement la place qui peut lui revenir dans l'industrie des courants alternatifs, c'est probablement ce mode d'application qui serait pour cet appareil le plus important motif à développement.

Les transformateurs branchés sur une station centrale sans sous-stations représentent toujours, comme puissance, deux ou trois

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

fois la puissance de la station; or chacun de ces transformateurs absorbe à vide, pour son aimantation, un courant *magnétisant* égal à environ 10 pour 100 du courant de charge; il en résulte que, dans le jour, une telle station débite 30 ou 40 pour 100 du courant qu'elle débite pendant l'éclairage, bien que ces 30 ou 40 pour 100 d'intensité ne correspondent qu'à peine à 10 pour 100 d'énergie consommée. De là l'obligation de faire marcher des groupes électrogènes importants, sans faire recette, pendant toute la journée. Bien que cet inconvénient soit de moindre importance dans les distributions de force, où l'on fonctionne toujours avec un facteur de puissance voisin de 0,8, il serait intéressant tout de même de pouvoir, moyennant une dépense raisonnable, annuler le courant magnétisant des moteurs asynchrones.

Dans l'application aux transformateurs et aux moteurs asynchrones, les condensateurs peuvent être placés en dérivation, soit sur le primaire, soit sur le secondaire; il suffit que la résonance se produise dans l'un ou l'autre de ces circuits pour que la source d'énergie n'ait pas à fournir de courants d'excitation. On peut même la produire dans un circuit tertiaire qui, dans le moteur asynchrone, peut être enroulé soit sur la partie fixe, ou inducteur, soit sur la partie mobile. Ces différentes combinaisons ont été proposées et expérimentées sur les transformateurs, moteurs asynchrones polyphasés et moteurs asynchrones à courant alternatif simple.

3° *Bissection d'un courant alternatif.* — Nous arrivons à d'autres applications des condensateurs dans lesquelles les effets produits paraissent découler d'une façon moins évidente de la résonance; il en est cependant encore ainsi, et si cela semble moins évident, c'est que, dans ces applications, il se superpose au courant de résonance proprement dit d'autres courants de même importance qui compliquent le phénomène.

En tête de ces applications doit figurer la bissection d'un courant alternatif en deux courants décalés de 90°.

En branchant sur une source de courant alternatif deux dérivations, l'une contenant une résistance ρ et une self-induction de réactance ρ, l'autre contenant une réactance ρ et un condensateur de réactance $-\rho$, les deux dérivations sont le siège de courants

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

alternatifs décalés de 90°. Telle que, cette disposition ne présenterait aucun intérêt; mais si l'on remplace chacune des résistances par un circuit inducteur d'un moteur asynchrone diphasé, et si l'on modifie les réactances en circuit de manière à tenir compte des réactances des circuits du moteur, on peut ainsi alimenter le moteur asynchrone avec un courant alternatif simple.

Cette application serait, avec celle des condensateurs en dérivation, une de celles présentant le plus d'intérêt, mais elle rencontrerait, même si le condensateur industriel était au point, de sérieuses difficultés de réalisation de ce fait que la capacité devrait varier à chaque instant avec la charge.

4° *Dispositifs à intensité constante. Résonnateurs.* — Les condensateurs peuvent encore servir, combinés avec des bobines de self-induction, à l'obtention de circuits à intensité constante au moyen de forces électromotrices constantes, et inversement. Ils permettent donc de faire de la distribution en série, dans un nombre quelconque de circuits branchés sur une source de tension constante (réseau ordinaire, alternateur ordinaire).

Il suffit pour cela de brancher chaque circuit à intensité constante en dérivation sur un condensateur placé en série avec une bobine de self-induction, sur la source de tension constante. Le condensateur et la self-induction doivent être ajustés et constituent un résonnateur.

Le même résultat est obtenu en substituant la self-induction au condensateur, et *vice versa*.

Naturellement, chaque résonnateur peut être intercalé sur le réseau à tension constante avec interposition d'un transformateur, et ce transformateur ayant de la self-induction, la bobine de self-induction du résonnateur peut être supprimée et le système réduit à un transformateur et un condensateur.

Le même résultat peut encore être obtenu plus avantageusement par l'emploi d'un résonnateur double ainsi constitué :

On groupe deux bobines de self-induction et deux condensateurs ajustés, de manière à former un quadrilatère ACBD dans lequel les appareils semblables sont dans des côtés opposés. En reliant alors deux sommets opposés AB du quadrilatère à une source de force électromotrice constante, on recueille dans un

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

circuit placé entre les deux autres sommets D et C un courant dont l'intensité est constante, quelles que soient la résistance et la réactance, autrement dit, l'impédance de ce circuit.

Nous n'insisterons pas sur ces applications; nous signalerons seulement que l'emploi de deux résonnateurs ou, plus exactement, de deux condensateurs et une bobine de self-induction (ou de deux bobines de self-induction et un condensateur) permet de coupler deux alternateurs en tension, et aussi de réaliser un appareil équivalant au transformateur ordinaire, c'est-à-dire transformant un courant de tension constante en un autre courant de tension constante différente.

5° *Excitation d'alternateurs.* — De même que les condensateurs peuvent fournir les courants d'excitation aux transformateurs et moteurs asynchrones, ils peuvent servir à l'excitation des alternateurs et des différents systèmes de génératrices à courants alternatifs pouvant être imaginés, en vertu du mécanisme suivant, qui est d'ailleurs tout le secret de la résonance.

D'une façon générale, dans une machine à induction, une force électromotrice est la dérivée changée de signe d'un flux par rapport au temps; elle est donc en retard d'un quart de période sur le flux; si cette force électromotrice débite sur des condensateurs, l'intensité du courant est en avance d'un quart de période sur la force électromotrice, donc en phase avec le flux, et par conséquent peut produire le flux.

Des condensateurs, placés en dérivation sur l'induit d'un alternateur ordinaire, peuvent, par des dispositions convenables dudit alternateur et en le modifiant dans ses proportions, servir à la production du champ de cet alternateur.

De même s'ils sont placés en dérivation sur l'inducteur d'un moteur asynchrone à champ tournant susceptible de fonctionner en génératrice. (On ne voit cependant pas, dans ce cas, ce qui déterminerait exactement la fréquence.)

Nous citerons encore deux systèmes de machines génératrices pouvant être excitées par condensateurs.

Dans le premier il n'y a pas d'inducteur; un induit fixe et un induit mobile, identiques comme nombre de pôles, nombre de phases et nombre de spires, sont tous deux le siège de courants

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

induits de même fréquence et de même tension, par suite de la rotation d'un champ magnétique qui se déplace dans les deux avec une vitesse moitié de celle de l'induit mobile, et qui est produit par le débit des forces électromotrices obtenues sur les condensateurs.

Dans le second, il y a seulement deux circuits fixes ayant chacun un coefficient de self-induction variable périodiquement et de la forme $\lambda(1 \pm \sin 2\omega t)$, et entre eux un coefficient d'induction mutuelle $-\lambda \cos 2\omega t$.

Mais, ce qu'il y a de particulièrement intéressant avec toutes ces génératrices excitées par condensateurs, c'est que l'on peut réaliser ainsi avec ces machines les mêmes modes d'excitation qu'avec les machines à courant continu.

Si les condensateurs sont placés en dérivation, la caractéristique de la machine est la même que celle d'une dynamo shunt à courant continu.

La force électromotrice est maxima à vide, diminue quand on charge la machine, et il y a désamorçage si l'on dépasse une certaine charge.

Si les condensateurs sont placés en série, la caractéristique est celle d'une machine série à courant continu; c'est-à-dire que la force électromotrice de la machine est nulle à circuit ouvert et croît quand on diminue la résistance du circuit extérieur.

Enfin, en combinant les deux modes d'excitation qui précèdent, on peut réaliser une machine dont la caractéristique est celle des machines compound à courant continu. Comme dans celles-ci, l'excitation dérivée peut être prise avant ou après l'excitation série.

On peut également hypercompounder la machine.

Nous arrêterons là la nomenclature des plus importantes applications du condensateur. Par ce rapide exposé l'on voit quelle importance pourrait acquérir cet appareil dans la grande industrie des courants alternatifs, si deux raisons principales ne s'étaient opposées jusqu'ici à son développement.

Ces deux raisons sont, d'une part, son prix, qui n'a pas pu descendre jusqu'ici au-dessous d'un certain chiffre trop élevé pour la *généralité* des applications, et, d'autre part, les phénomènes de résonance eux-mêmes, qui, d'utiles, deviennent, dans certains cas, nuisibles et détériorent le diélectrique des condensateurs.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Des produits assez divers ont été essayés pour la constitution du diélectrique : parmi les corps solides, le verre (Jablochkoff, 1880), le mica, qui ne semblent avoir donné que des résultats médiocres, le papier paraffiné, l'ébonite, le papier huilé, le papier enduit de cire, et plus récemment le stéarate de plomb et la paraffine pure sans support. Quelques diélectriques liquides ont été aussi essayés.

De tous ces diélectriques, il nous semble que c'est le papier paraffiné qui a été le plus éprouvé. En tout cas, nous n'avons pas trouvé de renseignements bien détaillés au sujet des autres corps.

Il y a cependant lieu de reprocher à la paraffine son point de fusion peu élevé et sa facile inflammabilité, et il serait à souhaiter que l'on trouvât un diélectrique ayant les qualités d'isolement et de capacité inductive spécifique de la paraffine, mais moins fusible et moins inflammable.

Il semble qu'à l'heure actuelle, le prix des condensateurs appliqués dans des conditions normales, pour les fréquences ordinaires de 40 à 50 périodes par seconde et pour des tensions comprises entre 600 et 3000 volts, est compris entre 80 fr et 150 fr le kilowatt, en appelant condensateur de *un* kilowatt celui pour lequel le produit $\frac{2\pi}{T} E_{eff.}^2 C$ est égal à 1000. Ce prix est sensiblement proportionnel à la puissance, un condensateur de 100 kilowatts, par exemple, ne pouvant qu'être constitué par 100 condensateurs de 1 kilowatt. Il en résulte que ce prix, peu élevé en regard de celui des petites machines (200 fr, 300 fr, 500 fr le kilowatt), est, au contraire, très élevé en regard de celui des grandes (70 fr à 80 fr le kilowatt), ce qui, jusqu'ici, restreint l'application des condensateurs aux petites puissances.

Mais la deuxième raison qui s'oppose jusqu'ici à l'emploi des condensateurs dans les installations de grande puissance est peut-être plus importante. Elle tient à la production accidentelle de tensions très élevées résultant, par l'intermédiaire des effets de résonance, de variations brusques de charge, de courts-circuits par défaut d'isolement, en un mot des multiples incidents de l'exploitation d'une station centrale.

Il est certain que les phénomènes de surélévation de tension

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

qui ont été constatés maintes fois par le percement des câbles, par exemple, ne se produisent pas partout et ne paraissent se produire que dans les grandes installations à haute tension ayant de la capacité en dérivation sur la ligne.

Il semble donc que, même si leur prix ne s'y opposait, l'adoption de condensateurs dans les grandes installations soit dangereux à la fois pour ces condensateurs et pour l'ensemble de l'installation. Mais nous croyons que ce n'est là qu'une apparence et qu'il doit y avoir une capacité pour laquelle les effets nuisibles passent par un maximum, et au delà de laquelle une augmentation de capacité a plutôt un effet bienfaisant, modérateur des coups de bélier et des surélévations de tension. Nous ne serions pas surpris que certaines installations soient dans le voisinage de ce maximum, grâce à la capacité de leurs câbles, et que pour ces installations l'adjonction de condensateurs de grande puissance, le jour où leur prix sera plus abordable, soit un bienfait, non seulement par l'amélioration de leur facteur de puissance, mais eu égard aux conditions de sécurité.

Il ne nous reste que quelques mots à dire des appareils pouvant jouer le rôle de condensateurs dans une certaine mesure.

Les moteurs synchrones surexcités employés uniquement dans ce but ne nous paraissent pas devoir être une solution avantageuse, à cause de leur prix presque aussi élevé que celui des condensateurs, de la perte d'énergie qu'ils occasionnent, de la nécessité de les mettre en marche, de les entretenir et de les surveiller, eux et leurs excitatrices. Il est préférable dans ce cas, croyons-nous, d'ajouter des unités génératrices à la station centrale. Nous croyons, au contraire, qu'ils peuvent être avantageux lorsqu'on en a le placement, en même temps, comme *moteurs,* et qu'il ne faut pas négliger les occasions de les appliquer dans ces conditions.

Les condensateurs électrolytiques (capacité de polarisation) constitués par des électrodes plongées dans une solution de carbonate de soude absorbent beaucoup d'énergie; leur résistance est sensiblement égale à leur réactance pour la fréquence de 40 périodes. Ce n'est donc que dans des circonstances toutes particulières, telles que le démarrage des moteurs monophasés, qu'elles peuvent être appliquées. On ne peut pas songer à les laisser en service dans un circuit.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En résumé, nous pensons que ces appareils ne peuvent pas être ubstitués au condensateur proprement dit, et que c'est surtout ur celui-ci qu'il y a lieu de porter ses efforts pour en faire un ppareil moins coûteux et vraiment industriel.

SUR LES MÉCANISMES ÉLECTROMAGNÉTIQUES;

PAR M. SILVANUS-P. THOMPSON.

Dans toutes les applications mécaniques du courant électrique, il intervient des mécanismes électromagnétiques dont les principes sont assez bien connus.

Le premier de ces principes est la loi du circuit magnétique. Entrevue par Joule il y a soixante ans, formulée par Rowland il y a seize ans, elle a été enfin mise en pleine clarté en 1886 par Kapp et par les frères Hopkinson. Dans son application à la construction des machines dynamos, cette loi a reçu les confirmations pratiques les plus frappantes. Dès cette époque-là, le calcul de ces machines est devenu une partie des Sciences exactes.

En second lieu vient la loi de l'induction des forces électromotrices par le mouvement relatif des aimants et des circuits électriques, loi découverte par Faraday en 1831. De cette loi on peut déduire (en intégrant par rapport au temps écoulé le produit du courant et de la force électromotrice de réaction) la quantité d'énergie électrique absorbée dans un mécanisme électromagnétique dans son mouvement.

A ces lois ajoutons-en une troisième, encore plus générale, qui domine tous les mécanismes électromagnétiques de quelque espèce qu'ils soient. Tous ces mécanismes peuvent être regardés comme constitués de parties séparées assemblées dans un système mobile. Toujours on y trouve des spires ou conducteurs dont la fonction est de conduire un courant électrique. Toujours on y trouve des noyaux ou des masses de fer ou de quelque autre matière magnétique, à moins que celles-ci ne soient remplacées par un deuxième système de spires également traversées par un courant (cas des phénomènes dits *électrodynamiques*, découverts par Ampère). Toujours ces organes se trouvent assemblés, avec une configuration

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

quelconque, dans un milieu ambiant, soit dans l'air, soit dans un autre milieu d'une perméabilité magnétique beaucoup plus basse que celle du fer. Considérons le cas le plus général où la configuration, soit simple, soit compliquée des organes est quelconque. Alors on peut poser la loi suivante :

Dans tout système électromagnétique, d'une configuration quelconque, parcouru par un courant électrique, il y a toujours des forces mécaniques qui tendent à changer cette configuration dans un sens tel que le flux de force magnétique soit rendu maximum.

Ce principe peut être posé en plusieurs formes; par exemple les suivantes : Dans tout système électromagnétique il y a toujours une tendance à agir d'une telle façon que la *réluctance* (ou résistance magnétique) soit rendue minimum. Dans tout système électromagnétique les divers organes tendent à changer leur configuration d'une telle manière que les spires magnétisantes embrassent autant que possible des lignes de force magnétique. Ou encore, dans tout système électromagnétique il existe des forces telles que les mouvements qu'elles produisent font augmenter le produit du courant par le flux de force magnétique avec lequel il est entrelacé. Soit I le courant dans un conducteur. Si par un changement de la configuration du système le flux de force entouré par le circuit s'augmente de Φ_0 à Φ_1, le travail produit aura évidemment la valeur de $I(\Phi_1 - \Phi_0)$; ou, si S est le nombre de spires, le travail sera $IS(\Phi_1 - \Phi_0)$. Ce travail, effectué par une dépense correspondante d'énergie électrique, tend toujours vers un maximum. Si, dans le mouvement où cette énergie est dépensée, le déplacement relatif des organes est d'une longueur l, la force f moyenne exercée entre les organes sera donnée par l'équation

$$f = \frac{IS(\Phi_1 - \Phi_0)}{l}.$$

Ou, plus généralement, quand un déplacement dx produit une augmentation $d\Phi$ du flux magnétique, la force qui tend à produire ce déplacement aura une valeur, par spire du circuit, de

$$f = I\frac{d\Phi}{dx}.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Toutes les formes extrêmement variées de mécanismes électromagnétiques sont régies par ce principe fondamental. Un électro-aimant tend toujours à agir comme s'il cherchait à raccourcir la longueur de son circuit magnétique. Considérons un électro-aimant en fer à cheval, ses deux noyaux entourés chacun par une bobine excitatrice, son armature, en fer, séparée des pôles par un entrefer convenable. Quand le courant est lancé, les masses de fer s'attirent mutuellement. Si l'une ou l'autre est mobile, un mouvement se produit, et la largeur de l'entrefer est réduite. Par la réduction de la largeur de l'entrefer il y a une réduction, presque proportionnelle, de la réluctance ou résistance magnétique, et une augmentation correspondante du flux de force magnétique. Toujours le circuit magnétique tend à se condenser.

C'est l'inverse de ce qui se passe pour le circuit d'un courant électrique. Celui-ci a toujours une tendance à s'étendre de manière à embrasser le plus d'espace possible, tandis que le circuit magnétique tend toujours à devenir aussi compact que possible. Les deux phénomènes dérivent d'ailleurs du même principe, parce que le circuit électrique, en s'élargissant, fait augmenter la section du circuit magnétique dans le milieu ambiant et, par conséquence, la valeur du flux de force.

Nous savons que dans tous les systèmes physiques les principes de l'énergie dominent les actions mécaniques, et que dans tous il y a une tendance à l'accroissement de l'entropie, que l'énergie potentielle d'un système tend toujours à une valeur minimum. Cette tendance des masses de fer, dans un système électromagnétique, à se mouvoir afin de devenir aimantées aussi fortement que possible, nous démontre qu'une masse de fer aimantée possède moins d'énergie potentielle que ne possède la même masse non aimantée. Il en résulte que la chaleur spécifique d'aimantation doit avoir une valeur négative.

Revenons au principe que le travail effectué par un changement dans la configuration d'un système électromagnétique peut être représenté par l'expression $IS(\Phi_1 - \Phi_0)$. Appliquons-le au cas de l'appareil que nous désignons par abréviation sous le nom de *bobine à plongeur*, c'est-à-dire du système dans lequel un noyau de fer est attiré à l'intérieur d'une bobine tubulaire ou *solénoïde*. Ici encore le principe fondamental formulé plus haut nous suffit

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

comme guide. Le système est soumis à des forces qui s'exercent entre ses parties, la bobine et le plongeur, forces qui tendent toujours à changer sa configuration de manière que le flux de force magnétique embrassé par les spires du courant devienne aussi grand que possible.

La position d'équilibre stable du plongeur, vers laquelle il tend toujours à revenir, est la position symétrique par rapport à la bobine, en faisant une égale saillie de part et d'autre (du moins s'il est cylindrique) par ses extrémités, cette position étant celle pour laquelle le circuit magnétique est le mieux complété.

Les forces exercées dans chaque position du plongeur peuvent s'obtenir par des considérations pareilles à celles que nous avons exposées plus haut. Un cas paradoxal se présente quand la longueur du plongeur est réduite à un minimum; cela se présente quand, au lieu du noyau cylindrique, on se sert d'une petite balle de fer ronde pour explorer l'intérieur d'une longue bobine tubulaire.

On arrive à ce résultat curieux que le seul point où un effort quelconque s'exerce sur la balle est juste celui où elle entre dans l'ouverture de la bobine ou la quitte. Pas de force à l'intérieur, ni à l'extérieur. A l'intérieur, à part quelque réduction vers les extrémités, le champ magnétique, qu'il soit fort ou faible, est presque uniforme; et dans un champ uniforme une balle de fer ne subit aucune action. A l'extérieur, sauf dans le voisinage immédiat de l'embouchure, il n'y a pas de champ magnétique, et la balle n'est pas attirée non plus. C'est à l'entrée même du tube que le rapport $\frac{d\Phi}{dx}$ a sa valeur maximum. Un déplacement très petit peut déterminer si la balle sera fortement aimantée ou si elle ne le sera pas sensiblement. Elle tend toujours à se mouvoir vers la position où elle est le plus aimantée; et elle est soumise à des forces dont la valeur en chaque point dépend de l'accroissement de son aimantation quand elle est déplacée d'une quantité infiniment petite.

Il serait bien facile de multiplier des exemples de systèmes électromagnétiques, et de démontrer que dans tous c'est le même principe qui régit leurs actions. Même dans le cas des moteurs électriques c'est la même chose. Dans les bobines rotatives des moteurs nous trouvons que les spires qui conduisent le courant sont successivement soumises à des forces motrices qui les déplacent

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans un sens tel que, si le fonctionnement du commutateur n'intervenait pas, à un instant donné, pour changer le sens de ces courants, le flux de force magnétique embrassé par la spire prendrait une valeur maximum.

Dans mon Traité sur l'*Électro-aimant* (1), qui est paru en Angleterre en 1887, j'ai ébauché une exposition des principes du circuit magnétique et de ses applications aux phénomènes et à la construction des électro-aimants; et j'y ai consacré un Chapitre au sujet de la Mécanique électromagnétique. J'ai ajouté une simple énumération, par catégories, des nombreuses espèces connues de mécanismes électromagnétiques, en remarquant que l'heure n'est pas encore arrivée de pouvoir grouper en un système logique et synthétique — dans une véritable *électro-cinématique* — toutes les variétés de ces mécanismes. Dans ce Rapport sur l'état actuel de cette branche de l'Électrotechnique, je propose de reproduire cette classification, si imparfaite qu'elle soit, un peu revue et augmentée.

MÉCANISMES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

I. — Électro-aimants.

A. *Bobine et noyau fixes; armature mobile.*

1. Circuit magnétique court et compact, pour action au contact (force portante).
2. Circuit allongé et bobine plus lourde pour action à distance (attraction).
3. Types spéciaux : cuirassés, boiteux, feuilletés, à pôles conséquents, multipolaires, électro-aimant Hughes, etc.

B. *Noyau et armature fixes; bobine mobile.*

1. Deux bobines reliées ensemble.

C. *Armature et bobine fixes; noyau mobile.*

1. Deux plongeurs reliés par une culasse commune (électro-aimant Brush).

---

(1) Traduction française par M. E. Boistel. Paris, 1895.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

II. — Bobines a plongeur.

A. *Bobine tubulaire ou solénoïde fixe et plongeur mobile.*

1. Plongeur plus long que la bobine.
2. Plongeur plus court que la bobine.
3. Balle de fer au lieu de plongeur.
4. Types spéciaux de plongeurs : coniques, feuilletés, etc.
5. Bobine établie en sections pour action successive (marteau-pilon Marcel Deprez).

B. *Plongeur ou noyau fixe, bobine mobile.*

1. Appareil Bain.

III. — Formes intermédiaires entre les précédentes.

1. Bobines à buttée (électro-aimant Borelli).
2. Électro-aimants tubulaires cuirassés (électro-aimants Roloff, Timmis, Holroyd Smith, Ayrton et Perry, etc.).

IV. — Bobine fixe et bobine mobile.

1. Bobines concentriques, mouvement axial.
2. Bobines non concentriques, mouvement transversal.

V. — Électro-aimants combinés avec des appareils antagonistes.

1. Réaction par poids.
2. Réaction par ressorts.
3. Réaction magnétique (par aimants permanents).

VI. — Égalisateurs pour électro-aimants.

1. Égalisateurs électriques (réglage automatique par divers circuits ou par dérivations).
2. Dégagement de ressorts (égalisateur Callaud).
3. Leviers à embecquetage ou à rochet (répartiteurs Robert Houdin et Froment).
4. Combinaisons de leviers articulés (égalisateurs Froment, Serrin, etc.).
5. Égalisateurs à came avec surfaces polaires de conformation spéciale (entrefer en V, de Froment; électro-aimant Elihu Thomson à pièce polaire conique et armature à œil).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

VII. — Cames électromagnétiques.

Dispositions dépendant de l'approche latérale d'une surface polaire de forme spéciale. (Principe de rapprochement oblique de Wheatstone et de Froment.)

VIII. — Chaines électromagnétiques.

Dispositions basées sur l'action réciproque de deux ou plusieurs électro-aimants distincts.

1. Galets électromagnétiques.
2. Verrouillages électromagnétiques.

IX. — Échappements électromagnétiques.

1. Roue dentée en fer et levier en ancre (échappement Elisha Gray).
2. Déclenchements électromagnétiques (déclenchement Hughes).

X. — Robinets électromagnétiques.

1. Relais ordinaires de télégraphie.
2. Relais électropneumatiques (orgue électrique Hope-Jones).
3. Relais électrohydrauliques (relais Willans).

XI. — Appareils basés sur la répulsion d'électro-aimants.

1. Répulsion mutuelle de noyaux parallèles.
2. Extension de noyaux à joints ou tubulaires.

XII. — Dispositions électromagnétiques polarisées.

1. Électro-aimant à armature parallèle polarisée.
2. Électro-aimant à armature transversale polarisée.
3. Bobine à plongeur polarisé.
4. Électro-aimant polarisé à ressort équilibrant (électro-aimant Hughes pour déclenchement très rapide).
5. Aimant permanent fixe avec bobine mobile.

XIII. — Vibrateurs électromagnétiques.

A. *Non polarisés.*

1. A rupture de circuit.
2. A court-circuit.
3. A enroulement différentiel.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

B. *Polarisés.*

1. A simple action.
2. A partie mobile polarisée.
3. A partie fixe polarisée.

XIV. — Dispositions électromagnétiques rotatives.

1. Bobine fixe, aiguille mobile. (Expérience d'Œrsted.)
1 *a*. Bobine fixe, aiguille en fer doux disposée obliquement.
2. Aimant fixe, bobine mobile. (Disposition Bain, d'Arsonval, etc.)
3. Bobine fixe, bobine mobile. (Électrodynamomètre de Weber.)
4. Électro-aimant avec armature articulée obliquement.
5. Fil tournant autour d'un pôle magnétique.
6. Pôle tournant autour d'un fil conducteur.
7. Disque tournant entre les pôles d'un aimant. (Roue de Barlow.)
8. Aimant tournant sur lui-même en portant un courant.
9. Bobine tubulaire incurvée et plongeur en S.
10. Rapprochement oblique d'armature. (*Voir* n° VII.)

XV. — Adhérence électromagnétique.

1. Entraînement par friction magnétique. (Appareil Nicklès, Bovet, etc.)
2. Freins électromagnétiques. (Frein Achard.)
3. Trieurs magnétiques.
4. Enclenchements et embrayages magnétiques. (Embrayeur Achard, coupleur Willans.)

XVI. — Freins magnétiques.

Dispositions basées sur l'induction de courants parasites (dits courants de Foucault).

1. Disque en cuivre pour amortisser un aimant mouvant. (Expérience d'Arago.)
2. Disque en cuivre rotatif entraînant un aimant pivoté.
3. Aimant rotatif entraînant un disque pivoté. (Expérience de Babbage et Herschel.)
4. Disque en cuivre tournant entre les pôles d'un aimant fixe. (Expérience de Foucault. Compteur Elihu Thomson.)

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

5. Amortisseurs en cuivre. (Dispositions pour galvanomètres, etc.)

XVII. — Dispositions a courants alternatifs.

1. Conducteur en cuivre repoussé par le pôle d'un électro-aimant alternatif. (Expériences d'Elihu Thomson.)
2. Rotation virtuelle d'un champ magnétique sous l'action de deux ou trois courants alternatifs différant en phase. (Moteurs polyphasés.)
3. Déplacement virtuel du champ alternatif par interposition d'un écran recouvrant la moitié d'un pôle.
4. Transport virtuel d'un pôle magnétique dû à l'interposition d'anneaux en cuivre fonctionnant comme amortisseurs.

Dans cette énumération, nous avons omis quelques dispositions purement magnétiques, comme, par exemple, la suspension dite *pivot sans frottement* de M. Evershed. D'autre part, elle comprend des appareils, par exemple, les trieurs pour la séparation des particules de fer de matériaux non magnétiques, dans lesquels, malgré l'emploi habituel des courants, l'action est purement magnétique.

Les dispositions à courants alternatifs données au n° XVII ne font point d'exception à la loi générale qui régit tous les autres mécanismes électromagnétiques, quelque différents que paraissent leurs modes de fonctionnement. Un disque ou un anneau en cuivre est repoussé par le pôle d'un électro-aimant alternatif, parce que les courants parasites induits dans sa masse, étant des courants inverses (un peu décalés, il est vrai), tendent à diminuer le flux de force dans le circuit magnétique. Selon la loi fondamentale qui reconnaît une tendance à faire augmenter ce flux jusqu'à sa valeur maximum, on doit trouver des forces mécaniques entre les diverses parties du système, telles qu'elles tendent à chasser ces courants inverses. En effet, il y a une répulsion entre le noyau et l'anneau, et aussi entre ce dernier et la bobine excitatrice. En tout cas, la loi générale est satisfaite.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SOUS-SECTION B.

LES PROGRÈS DES LAMPES ÉLECTRIQUES;

PAR M. ANDRÉ BLONDEL,

Ingénieur des Ponts et Chaussées, attaché au Service central des Phares;
Professeur d'Électricité appliquée à l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

Il serait oiseux aujourd'hui de rappeler les origines de l'éclairage électrique, et ses prodigieux développements. A vrai dire, il ne date guère, au point de vue pratique, que de vingt ans (1); mais, comme toutes les inventions qui sont entrées définitivement dans le patrimoine de l'humanité, cette découverte nous paraît déjà lointaine et c'est de son avenir que doit se préoccuper le Congrès des Électriciens bien plus que de son passé. L'histoire en a été faite du reste magistralement par quelques-uns de ses premiers pionniers jusqu'à l'Exposition de 1889, et, depuis lors, peu de changements vraiment importants dans la technique des lampes se sont produits, si l'on en excepte ceux qui sont encore dans la période d'études et que nous aurons à examiner.

Mais la situation est loin d'être la même qu'il y a dix ans pour l'éclairage électrique.

D'une part, grâce précisément au débouché créé par cette application, l'outillage de production et de distribution de l'énergie électrique s'est considérablement perfectionné par d'incessantes améliorations de la construction et du rendement des machines

(1) La machine Gramme date de 1870, et le premier éclairage d'atelier de 1873, mais l'éclairage à arc n'a pris pied réellement sur la voie publique et dans les magasins qu'après l'invention de la bougie Jablochkoff en 1877. L'ère de l'éclairage privé ne date que de l'apparition des lampes Swan et Edison (1880), qui ont été l'événement capital de l'exposition d'Électricité de 1881; la première section de distribution d'éclairage n'a été créée qu'en 1882 à New-York. Depuis cette époque des stations ont été construites en grand nombre dans tous les pays civilisés; les pays neufs, tels que l'Amérique, où l'éclairage au gaz était moins développé qu'en Europe, sont ceux où l'éclairage électrique a pris la plus grande importance.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

génératrices, transformateurs, accumulateurs, etc., par l'emploi d'unités puissantes actionnées directement par des moteurs économiques, par l'accroissement des tensions de distribution, etc. Il en résulte un certain abaissement du prix de revient de l'énergie, et surtout une complète sécurité de fonctionnement de l'éclairage électrique, auquel on ne peut plus, comme jadis, reprocher quelquefois des extinctions malencontreuses. L'éclairage électrique n'est plus une nouveauté plus ou moins discutable; c'est une réalité connue et appréciée de tous, entrée dans nos mœurs aussi bien que l'éclairage au gaz et dont personne n'oserait plus maintenant mettre en doute la valeur pratique et le confort. Il a pénétré dans les villages les plus pauvres et l'on ne compte plus aujourd'hui les petites distributions rurales où, grâce à une petite chute d'eau, on éclaire la commune presque gratuitement et les habitants à des prix modiques, de 20 fr à 50 fr par lampe-année de 16 bougies.

En même temps, tous les détails de l'appareillage, depuis les interrupteurs, coupe-circuits, rhéostats et compteurs, jusqu'aux attaches de lampe aux bronzes artistiques qui les portent et à leur lustrerie spéciale, ont été l'objet d'incessantes améliorations. Grâce à des spécialistes pleins de goût, un art nouveau s'est formé et a permis de tirer parti de l'éclairage électrique pour des effets nouveaux et séduisants, impossibles à réaliser avec les autres illuminants. L'élégance, la commodité et l'hygiène de cet éclairage sont aujourd'hui reconnus et lui conquièrent chaque année de nombreux adeptes; c'est ainsi que, dans les grandes villes, toutes les maisons neuves des beaux quartiers, tous les hôtels ou restaurants modernes sont munis d'une distribution électrique ; les architectes la prévoient dans leurs devis au même titre que la distribution d'eau.

Dans les théâtres, les ministères, les grandes administrations, les banques, magasins, ateliers, les conditions de sécurité et d'hygiène ont fait presque partout remplacer le gaz par les lampes à arc ou à incandescence.

Les grands navires de commerce ou de guerre ont trouvé dans l'éclairage électrique la solution d'un problème autrement presque insoluble. Et nous ne parlons pas ici des emplois spéciaux des gros foyers à arc dans les phares, les projecteurs, les éclairages des chantiers, où ils permettent seuls d'atteindre les résultats merveil-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

leux auxquels nous sommes maintenant trop accoutumés pour nous en étonner.

Mais, d'autre part, pendant qu'elles obtenaient ce droit de cité, les lampes électriques ont vu se dresser contre elles la redoutable concurrence de nouveaux modes d'éclairage, très économiques et très brillants : l'incandescence par le gaz ou les liquides gazéifiants et l'acétylène, que l'on ne connaissait pas en 1889. L'invention du manchon d'oxydes incandescents par Aüer von Welsbach a complètement modifié les bases de la comparaison entre le gaz et l'électricité, et a produit, on ne saurait le dissimuler, sinon un arrêt, du moins un certain ralentissement dans l'accroissement de l'éclairage électrique, surtout de l'éclairage par lampes à incandescence (1). Mais l'écart des prix de revient sera sans doute bientôt comblé, grâce à des inventions nouvelles, telles que la lampe Nernst, et les avantages de la lumière électrique qu'on vient de signaler sont tels qu'à côté d'eux la question d'économie peut paraître secondaire.

Classification des lampes électriques. — En 1889, l'éminent rapporteur M. Fontaine, l'un des ingénieurs qui ont le plus contribué au succès de l'éclairage électrique en France, distinguait quatre espèces de lampes : les lampes à arc à crayons opposés, les bougies à charbon parallèles, les lampes à incandescence ordinaires et celles de grande intensité. On peut dire aujourd'hui qu'il n'y en a plus que deux, les lampes à arc et les lampes à incandescence ordinaires, les deux autres ayant pratiquement disparu, bien que quelques rares industriels emploient encore des bougies Jablochkoff jusqu'à l'usure de leur matériel; on ne fabrique plus guère, du moins en Europe, où l'énergie est chère, de lampes à

(1) Tandis qu'avec les becs anciens il ne fallait pas moins de 10 l à 15 l de gaz de houille par bougie-heure, ou 5 l pour les récupérateurs grand modèle, le bec Aüer consomme seulement 1 l à 2 l, suivant qu'on prend les types plus ou moins perfectionnés, et le renouvellement du manchon ne revient pas à plus de $\frac{6}{100}$ à $\frac{10}{100}$ de centime. La bougie-heure par bec Aüer peut s'abaisser ainsi au prix minimum de 0,003 fr à 0,005 fr avec du gaz à 0,20 fr le mètre cube, tandis que la lampe à incandescence, consommant 2,5 à 3,5 watts par bougie, coûte environ 0,015 fr à 0,021 fr par bougie-heure avec l'énergie à 0,60 fr le kilowatt-heure, et la lampe à arc, consommant 0,5 à 1,5 watts par bougie, 0,003 fr à 0,009 fr, sans compter le remplacement des charbons, ni l'entretien des canalisations.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

incandescence de grande intensité; peut-être y reviendra-t-on avec la lampe Nernst, mais il n'y aura plus lieu d'en faire une catégorie spéciale.

L'objet de ce Rapport est de passer en revue les résultats actuels et les perfectionnements désirables des lampes à arc et des lampes à incandescence.

PROGRÈS DES LAMPES A ARC.

Depuis dix ans, les applications de la lampe à arc se sont extraordinairement multipliées, non seulement parce qu'elle est puissante et économique, mais aussi parce qu'on est arrivé à lui donner une grande perfection de fonctionnement. De grands progrès ont été réalisés tant au point de vue de la théorie que de la construction.

Progrès de la théorie de l'arc électrique. — Bien qu'il n'entre pas dans le cadre de ce Rapport d'examiner les propriétés de l'arc électrique, qui sont aujourd'hui surtout du domaine du physicien pur, on doit signaler de notables accroissements de nos connaissances au sujet de ce phénomène curieux, bien que la vraie nature nous en échappe encore.

Les beaux travaux de M. Violle ont donné, avec une précision suffisante, les températures maxima que l'arc réalise, 3500° pour le positif, 2700° pour le négatif, et montrent que, dans une enceinte fermée, l'éclat et la température du cratère sont des constantes.

Après une discussion de plusieurs années, à laquelle ont pris part notamment Edlund, V. Lang, Arons, Stenger, Luggin, Blondel, etc., il semble établi aujourd'hui, conformément aux conclusions de l'auteur, qu'il n'existe pas, dans l'arc, de force contre-électromotrice au sens ordinaire du mot, mais seulement une résistance au passage, qui peut être considérablement modifiée par les substances ajoutées dans la mèche des charbons.

De nombreux auteurs avaient en vain cherché une loi simple pour relier les divers éléments du régime de l'arc; dans une série d'admirables travaux, Mme Ayrton a résolu pour la première fois ce problème d'une manière complète; elle a montré en particulier que l'énergie consommée est une fonction linéaire, pour chaque diamètre de crayon. Les courbes qu'elle a tracées mettent en évidence toutes les conditions de production de l'arc court et de l'arc long, ainsi que la région d'instabilité qui les sépare.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La résistance apparente qui caractérise le régime de l'arc varie non seulement avec le diamètre des charbons et la longueur de l'arc, mais aussi, comme l'ont étudié entre autres MM. S.-P. Thompson, Ayrton, Marks, etc., avec la nature des charbons et des gaz dans lesquels les charbons sont placés. M. E. Wilson, reprenant une expérience déjà exécutée, il y a près de vingt ans, par M. Cailletet, a montré que l'éclat du charbon positif décroît quand on augmente la pression; par la détente des gaz un nuage de carbone apparaît. M. Guillaume voit là un phénomène de dissolution du carbone, et M. Le Chatelier attribue la fixité de la température du cratère dans une enceinte à la constance du point de fusion du carbone. D'après des expériences de l'auteur, exécutées avec M. Letheule, et d'autres continuées en collaboration avec M. Rey, l'éclat à l'air libre croît avec l'intensité du courant et passe de 150 bougies par millimètre carré pour les plus petits, à plus de 220 bougies pour les arcs puissants des projecteurs. On constate également que l'addition d'une âme saline abaisse l'éclat en même temps que la force électromotrice.

L'effet le plus inattendu de l'atmosphère ambiante est celui qu'a découvert Mme Ayrton dans l'étude du phénomène de l'arc sifflant; d'après son analyse pénétrante, ce phénomène si longtemps discuté, accompagné d'une lueur verte déjà signalée par l'auteur, serait dû à l'arrivée de l'oxygène de l'air au contact du cratère; il ne se produit pas dans les autres gaz, ni au-dessous d'une certaine densité de courant; il est précédé du phénomène de Trotter, qui consiste dans une rotation très rapide de l'arc sur lui-même.

Les phénomènes de l'arc alternatif, sur lequel on ne savait que peu de chose après quelques notes de Joubert, Tobey et Walbridge, ont été également l'objet de recherches fructueuses. De 1891 à 1893, l'auteur a donné une analyse détaillée des périodes d'allumage et d'extinction de l'arc, et de ses courbes périodiques de courant et de force électromotrice, dont la forme explique, en l'absence même de tout décalage, une réduction du facteur de puissance; il a mis en évidence les rôles de la composition du circuit (résistance ou self-induction), de la nature plus ou moins conductrice de la mèche, de la forme de la courbe de la force électromotrice de la machine génératrice. Ces résultats ont été

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

confirmés par des essais intéressants de MM. Frith, Fleming et Petavel, Görges, Barr, Burnie et Rogers, etc., et, par une étude analogue et étendue de MM. Duddell et Marchant.

Il semble établi que la forme de la courbe de force électromotrice et la self-inductance en circuit peuvent modifier un peu le régime, c'est-à-dire la relation entre la force électromotrice efficace et l'intensité efficace, mais que l'effet de la self-induction est prépondérant; celle-ci accroît la stabilité, en même temps que, dans une faible mesure, le rendement dans le cas des charbons homogènes, mais elle réduit le facteur de puissance.

En pratique, toutes les courbes sont arrondies par suite de l'influence de l'âme conductrice des charbons employés, ce qui permet d'atteindre des facteurs de puissance voisins de l'unité.

Stabilité de l'arc électrique et du mode de réglage des lampes. — L'arc électrique ne suit pas la loi d'Ohm, car l'augmentation du courant amène un accroissement de la section de l'arc, et, par suite, une diminution de sa résistance. Il y a aussi tendance à un régime instable, et l'arc s'éteindrait bientôt si l'on ne prenait des précautions spéciales, et, en particulier, sur les distributions à potentiel constant, l'addition d'une résistance en série, qui fait varier le potentiel aux bornes en sens inverse de l'intensité du courant. L'auteur a indiqué, en 1891, comment les conditions de stabilité peuvent être étudiées en traçant la courbe *caractéristique d'extinction* de l'arc pour l'écart et les charbons donnés, c'est-à-dire la courbe des tensions aux bornes en fonction de l'intensité du courant quand on fait varier celle-ci; ces courbes instantanées qu'il a relevées, avec le concours de M. Letheule, par deux oscillographes croisés, présentent des formes analogues à celles des courbes de Mme Ayrton, mais non identiques, car le cratère n'a pas ici le temps de se modifier; presque horizontales aux environs du régime normal, elles se relèvent rapidement quand l'intensité tend vers zéro.

La caractéristique d'alimentation aux bornes doit les couper sous un certain angle pour que la stabilité soit assurée *indépendamment de tout mécanisme*. Outre ce rôle, la résistance ajoutée en a deux autres moins importants : elle réduit l'intensité maxima du courant si la lampe vient au collage; elle permet sur les distri-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

butions en dérivation d'employer, au lieu de bobines de réglage en série, des bobines shunt, qui facilitent l'uniformité des types.

Au point de vue du mode de réglage, tout le monde est à peu près d'accord aujourd'hui pour reconnaître la supériorité du système différentiel qui règle à résistance constante.

Tandis qu'une lampe en simple dérivation exige une perte supplémentaire de 30 pour 100 de sa tension dans une résistance de stabilité (hors charbons), la lampe différentielle n'exige que 15 pour 100 (par exemple, une lampe de 30 volts en demande 39 en simple dérivation et 34,5 en différentiel); ces chiffres dépendent aussi du nombre de lampes en série.

Avec une résistance absorbant 15 pour 100 les variations du courant sont limitées à 8-10 pour 100.

L'arc à courants alternatifs se contente encore d'une moindre résistance de stabilité à cause de la plus grande sensibilité du mécanisme sous l'influence des vibrations.

On peut admettre comme chutes minima supplémentaires 10 pour 100 pour le continu, 5 pour 100 pour l'alternatif, et comme tension minima 30 volts pour l'alternatif avec 1,50 en plus dans une résistance, soit 31,50 par lampe, et 33 volts pour le continu (avec charbons spéciaux) avec 3,5 à 4 volts supplémentaires dans la résistance, soit 37 volts par lampe. Pour les courants alternatifs, on préfère d'ailleurs avec raison employer, au lieu du rhéostat, des bobines de self-induction, comme on l'a dit plus haut, ou monter les arcs par 3 ou même 4 (avec des charbons 23 volts) sur des transformateurs ou des compensateurs munis de bornes appropriées, suivant un système employé d'abord par les Compagnies Ganz et Hélios.

Cependant les lampes à arc à électro en simple dérivation présentent quelques avantages sérieux, qui leur conservent des partisans : elles sont plus simples; elles ne risquent pas d'être brûlées par un courant exagéré; elles permettent de modifier par un réglage facile l'intensité de régime dans de grandes limites, ce qui n'est pas possible avec les lampes différentielles. Ces dernières introduisent du reste dans le circuit une résistance qui joue le rôle d'un vrai rhéostat et qui explique, dans une certaine limite, la plus grande stabilité.

L'étude oscillographique des extinctions de l'arc, signalée ci-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dessus, montre d'autre part que l'extinction spontanée d'un arc sans résistance additionnelle est un phénomène relativement lent, qui se produit en un temps appréciable de l'ordre du $\frac{1}{10}$ de seconde et même davantage, et d'autant plus lent que les charbons employés ont une âme plus riche en matières salines conductrices. On peut donc chercher à maintenir constamment le régime à sa valeur normale, en corrigeant les écarts par un mécanisme rapide qui éloigne assez promptement les charbons dès que le courant augmente, et les rapproche au contraire dès qu'il diminue. Cela explique qu'on ait pu construire, comme on le dira plus loin, des lampes marchant avec des résistances additionnelles très faibles ou même nulles, en leur donnant un mécanisme, non seulement très sensible pour régler le rapprochement lent des charbons, mais encore permettant un mouvement de recul rapide toujours prêt à agir. Ce dispositif amènerait, par suite de l'inertie des pièces en mouvement, des oscillations longues de régime (pompage), si l'on n'amortissait le mécanisme de recul; cet amortissement est obtenu dans toutes les bonnes lampes modernes par des pompes à air.

L'application du recul rapide a été portée à sa plus grande perfection dans la lampe différentielle Vigreux et Brillié et explique sa propriété de marcher sans rhéostat, concurremment avec l'emploi de charbons à âmes salines très conductrices qui présentent une marge de fonctionnement très étendue et abaissent le point de sifflement et la tension nécessaire pour une longueur d'arc donnée.

Construction des lampes à arc. — La lampe à arc présente de sérieuses difficultés de construction, car elle doit être à la fois précise et aussi rustique que possible. Elle est exposée en effet, le plus souvent, dans les grands chantiers et ateliers, les gares, les ports ou voies publiques, à toutes les variations de température et d'humidité, à des condensations de vapeur, à l'oxydation, à la poussière qui encrasse le mécanisme, souvent à des fumées ou vapeurs corrosives. Elle doit pouvoir être mise entre les mains les moins expérimentées et les moins soigneuses et cependant ne donner lieu qu'à de rares dérangements, et les réparations doivent en être faciles et rapides.

Aussi, toutes les lampes de première marque ne sont-elles arri-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

vées à la réputation que grâce à une grande simplicité d'organes, à l'absence de risques de rupture ou à la facilité du démontage.

Aux États-Unis ces qualités ont jusqu'ici paru suffisantes. En Europe on exige, en outre, une fixité absolue de la lumière grâce à un fonctionnement parfaitement continu du mécanisme, et à une excellente qualité des charbons, et il est peu probable qu'on renonce à ces desiderata. C'est grâce du reste à ces exigences qu'on est arrivé à une grande perfection dans la construction.

Pendant longtemps les efforts des constructeurs se sont portés sur les dispositifs sans mécanisme d'horlogerie (et c'est à ceux-ci que doivent leur succès les excellentes lampes Brush, Pilsen, Bardon, Brianne, Sautter-Harlé, etc., pour n'en citer que quelques-unes.

Cependant, on constate dans les lampes les plus récentes un certain retour aux mouvements d'horlogerie à échappement, à cause sans doute de leur plus grande sensibilité et de leur faible consommation d'énergie. Quant aux mécanismes à moteurs, ils ne sont plus guère employés dans les lampes à courant continu, à cause de la complication du collecteur, si ce n'est pour les grosses lampes des projecteurs. Au contraire, sur les courants alternatifs plusieurs constructeurs réalisent d'élégants régulateurs à moteurs asynchrones, réduits dans certaines lampes à de simples disques de cuivre ou d'aluminium embrassés par des électro-aimants de phases différentes.

On possède du reste aussi de très bonnes lampes à arc à courants alternatifs à déclenchement ou à frein; mais il a fallu aux constructeurs d'assez longues recherches pour les mettre au point.

Le mécanisme des lampes à courants alternatifs présente en effet une difficulté spéciale. Non seulement la self-inductance réduit l'intensité du courant dans les bobines en dérivation, ce qui rend difficile d'obtenir le même nombre d'ampères-tours avec la même intensité de courant, mais encore cette self-induction varie avec l'enfoncement du noyau ou le rapprochement de l'armature, de façon à compenser en grande partie la variation de courant qui tend à produire dans la bobine une variation de la tension aux bornes. Cette variation, dans les types usuels, est ainsi réduite au $\frac{1}{5}$ ou au $\frac{1}{10}$ de ce qu'elle devrait être. Il en résulte une diminution de sensibilité qui exige l'emploi de mécanismes plus délicats

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et a rendu longtemps difficile l'obtention de bonnes lampes à courants alternatifs.

M. Claude a eu l'idée ingénieuse de corriger cet effet par l'emploi de condensateurs en série annulant la self-induction de la bobine en fil fin, et il a montré qu'il suffisait, sous de faibles tensions, d'un appareil très simple et peu encombrant; on peut regretter que ce dispositif n'ait pas encore fait l'objet d'applications industrielles.

Cependant, il convient de remarquer que la grande self-induction a un avantage : c'est de rendre l'impédance à peu près indépendante des variations de température des bobines de réglage en dérivation. Dans les lampes à courant continu l'échauffement produit au contraire une variation de résistance du shunt assez notable pour modifier sensiblement le régime de fonctionnement de la lampe. Certains constructeurs, tels que Körting et Mathiesen, ont supprimé ce défaut par l'addition d'ingénieux compensateurs à dilatation agissant sur l'organe de déclenchement du mécanisme. Malheureusement, ils n'ont pu encore compenser une autre importante variation provenant de la diminution de la résistance des charbons au fur et à mesure de leur usure; il en résulte des variations de longueur de l'arc qui dépassent souvent 1^{mm}.

Lampes à deux paires de crayons. — Parmi les perfectionnements du mécanisme, il convient enfin de citer la réalisation de bonnes lampes à deux paires de crayons, fonctionnant non plus alternativement, comme les anciens régulateurs de la Compagnie P.-L.-M., mais successivement, de façon à doubler la durée du fonctionnement, ou à réduire le diamètre des charbons pour augmenter le rendement lumineux. On peut signaler, parmi les meilleurs dispositifs de ce genre, les lampes de Crompton-Pochin, Brockie-Pell, qui sont depuis longtemps employées en Angleterre pour l'éclairage public; la lampe Roumazeilles employée par la Compagnie des Chemins de fer d'Orléans, celle de Körting et Mathiesen en Allemagne, etc. L'auteur a depuis longtemps recommandé ces lampes pour la meilleure utilisation de l'énergie. Elles présentent au point de vue pratique d'autres avantages non moins importants qu'a fait bien ressortir, par exemple, l'expérience de la Compagnie d'Orléans : c'est la réduction de la main-d'œuvre et des

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

déchets de charbon, dont le prix n'est pas négligeable dans une installation qui produit elle-même son énergie électrique. Enfin ces lampes, mises en série, donnent une solution assez simple du problème de l'échange des lampes à arc sur les réseaux où l'on change la tension de 110 volts en 220 volts.

Groupement des lampes à arc. — L'emploi des arcs isolés, considéré autrefois comme une nécessité, n'est plus aujourd'hui qu'une exception très rare, qu'on rencontre dans les phares ou les projecteurs; et encore sur les navires alimente-t-on maintenant ces appareils en dérivation simple. Dans l'industrie, on ne rencontre plus celle-ci que dans d'anciennes installations à 80 volts; les distributions normales sont à un ou plusieurs ponts de 100 à 120 volts.

Pour ces ponts, on se trouve aujourd'hui en présence de trois systèmes concurrents. L'ancien système, qui est encore le plus répandu, consiste dans l'emploi de deux lampes en série, absorbant chacune environ le tiers de la tension de 110 volts, le dernier tiers étant consommé par une résistance de stabilité; cette proportion de la résistance à la tension utile remonte à l'emploi, autrefois général, des mécanismes à bobines en dérivation, dont la régulation ne peut s'effectuer que grâce à une chute de tension assez importante dans une résistance; celle qu'on vient d'indiquer est celle qui rend minima les variations de régime de ces lampes. Les constructeurs se sont efforcés depuis plusieurs années de réduire l'importance de la résistance de stabilité. Ils ont introduit dans ce but l'emploi des lampes différentielles; grâce à leurs propriétés, la résistance de l'arc reste constante et les variations de l'intensité lumineuse sont sensiblement indépendantes de la valeur de la résistance additionnelle. Aussi peut-on, avec ces lampes, monter la tension utilisée sans inconvénient jusqu'à 40 volts pour les arcs de 9 à 10 ampères, jusqu'à 45 volts pour les arcs de 20 ampères.

Dans ces dernières années, deux tendances opposées se sont manifestées :

Les uns, à la suite de M. Marks, préoccupés de simplifier les installations et d'assurer l'indépendance complète de toutes les lampes, ont abandonné la préoccupation du rendement et préconisé l'emploi de l'arc enfermé à haute tension fonctionnant directe-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ment sur 110 volts. Mais ce système est loin d'éviter toute résistance; on ne peut même pas dire qu'il la réduise sensiblement, puisque la lampe n'absorbe que 80 volts et qu'elle présente déjà par elle-même une assez forte résistance.

D'autres, au contraire, persévérant dans la voie primitive, ont cherché à augmenter l'utilisation en groupant les lampes, mais par trois en série dont chacune absorbe de 30 à 35 volts.

Lampes à basse tension. — Cette idée n'est pas précisément nouvelle; car, dès 1889, la maison Sautter employait ce dispositif et la maison Schuckert publiait des résultats d'essais à ce sujet avec des lampes Pilsen. Mais ce n'est qu'à partir de 1897, date de l'apparition du système Hegner (lampe Volta), que la réalisation de cette idée est entrée réellement dans la pratique industrielle, et tous les constructeurs rivalisent aujourd'hui pour le mettre en œuvre.

Plusieurs dispositions sont préconisées concurremment. Les uns, comme Siemens et Halske et plus récemment Körting et Mathiesen, etc., se contentent d'ajouter à des lampes différentielles très bien construites un rhéostat réglable, à touches, à l'aide duquel on intercale pour l'allumage une grande résistance, qu'on réduit progressivement jusqu'à l'annuler même.

Une fois mises ainsi en marche, les lampes munies de charbons spéciaux continuent de bien fonctionner, mais on peut craindre que la mise de l'une d'elles au collage se produise malgré la perfection du mécanisme et donne lieu alors à une augmentation de courant dangereuse.

Un second dispositif imaginé par M. Hegner et qui a fait beaucoup de bruit, sous le nom de *lampe Volta,* a pour but d'éviter ce second inconvénient. Ses lampes différentielles, munies de charbons spéciaux, ne présentent encore aucune particularité de mécanisme, mais chaque série de trois est accompagnée d'un rhéostat automatique à quatre touches, dont toutes les sections s'intercalent à l'allumage et s'éliminent successivement en marche; la mise en court-circuit d'un des foyers est sans danger et la stabilité est convenablement assurée.

Enfin, plus récemment, MM. Vigreux et Brillé ont imaginé un mécanisme spécial qui permet de supprimer tout rhéostat fixe ou

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

automatique. Ce régulateur est du système différentiel et à frein; ce qui le caractérise, c'est d'une part que le réglage, rendu indépendant de tout ressort, poids, frottement, etc., est indéréglable et, d'autre part, que le mécanisme peut produire à tout instant un recul très rapide et très considérable. D'après la théorie exposée plus haut, c'est à cette dernière propriété qu'il faut attribuer entièrement le succès obtenu.

Bien que ces combinaisons aient déjà fait leurs preuves et donné lieu à de nombreuses applications, la discussion est encore ouverte sur leurs mérites respectifs et sur la supériorité qu'elles présentent par rapport au système classique. La base de toute comparaison, c'est la tension absorbée aux bornes de chaque lampe. Sur le réseau à trois fils, chaque lampe d'une série de trois peut absorber 36 à 37 volts, mais en pratique ce chiffre se réduit à 35 volts par suite de la résistance du conducteur, tandis qu'il peut atteindre 40 à 45 volts pour les lampes groupées par deux.

Les avantages des lampes à basse tension sont l'augmentation du nombre des foyers qui assure une meilleure répartition de la lumière, et, dans une certaine mesure, comme on le verra plus loin, l'amélioration du rendement lumineux ou l'économie de consommation. Leurs inconvénients sont l'augmentation des frais d'achat et d'entretien, la complication et la délicatesse du mécanisme, l'emploi de crayons spéciaux et de qualité tout à fait irréprochable.

Le groupement par trois n'a d'ailleurs de raison d'être que sur de très courtes canalisations dont la résistance est insignifiante. Dans les distributions sur de grands espaces, la résistance de stabilité des groupements par deux arcs en série étant ordinairement constituée pour la plus grande partie par la résistance même des conducteurs, le groupement par trois ne serait possible qu'à condition d'accroître la section du cuivre et le prix des canalisations d'une façon souvent tout à fait disproportionnée au résultat qu'on peut en attendre (1).

L'emploi des lampes à arc à faible tension ne semble, en tout

(1) Cette question a été traitée récemment devant la Société des Électriciens dans une intéressante discussion à laquelle ont pris part MM. Gosselin, Hegner, Aliamet, Bochet, Sartiaux, etc. (décembre 1899, janvier 1900).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

cas, avoir de raison d'être que sur des réseaux à 110 volts, à moins qu'on ne le considère comme un procédé pour augmenter le morcellement de la puissance lumineuse entre un plus grand nombre de foyers, résultat qu'on peut atteindre aussi, du reste, par l'emploi de lampes de plus faible intensité.

Mais quand la distribution se fait à des tensions de 220 volts et au-dessus, et surtout quand il s'agit de substituer la tension de 220 volts à celle de 110 sur un réseau existant, comme le font un grand nombre de distributions, surtout en Angleterre, la question se présente à un point de vue presque opposé, et l'on peut dire que dans ce cas on doit chercher plutôt à diminuer le nombre des foyers sous une tension donnée. C'est de ce dernier problème que les lampes à arc enfermé donnent la solution.

L'*éclairage par arcs en série,* qui permet des canalisations très économiques, continue à être très répandu aux États-Unis, où l'on a amélioré le rendement des premières machines spéciales Brush, Thomson-Houston à induit ouvert, destinées à cet usage; on a même créé des types à induit fermé à haute tension fonctionnant sans étincelle, tels que la machine Wood, etc. Les arcs alternatifs en série alimentés directement ou par des transformateurs-série sont également assez répandus. En Europe, au contraire, la distribution en série a été presque complètement abandonnée à cause du peu d'indépendance qu'elle procure et des dangers des hautes tensions. On ne peut signaler qu'une application nouvelle intéressante : l'éclairage par arcs en série et courants redressés au moyen des transformateurs à courant constant et des redresseurs Ferranti. Cette méthode, employée avec succès pour l'éclairage public dans plusieurs villes anglaises ayant une station à courants alternatifs, permet d'employer des arcs de meilleur rendement que les arcs alternatifs et des lampes très sensibles, tout en utilisant le courant même de l'usine; mais le courant redressé pulsatoire qu'elle emploie est aussi dangereux que du courant alternatif. Aussi n'a-t-elle pas pénétré sur le continent, où l'on préfère franchement transformer le courant en courant continu par commutatrices ou employer des arcs alternatifs avec réflecteurs.

Lampes à arc enfermé. — L'idée d'enfermer l'arc dans un

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

récipient de verre pour réduire l'usure des charbons est des plus anciennes. Déjà Staite l'avait réalisée en 1846 et Varley et André l'avaient reprise en 1878 et 1879. De 1880 à 1884 surtout, de nombreux chercheurs, en particulier Werdermann, avaient utilisé la même idée; encore au Congrès de Chicago en 1893, MM. Marks et Howard exposaient les essais plus scientifiques, mais également infructueux au point de vue pratique, qu'ils avaient exécutés dans la même voie que leurs devanciers.

L'insuccès de tous provenait de ce qu'ils voulaient simplement mettre à l'abri de l'air un arc ordinaire. Dans ces conditions le récipient se couvrait rapidement d'une couche opaque de poussière de charbon. C'est en 1894 seulement qu'a paru l'arc enfermé moderne, qui est caractérisé par l'emploi d'un arc très allongé fonctionnant sous une tension de 75 à 80 volts, double de la tension ordinaire, dans une enceinte imparfaitement close. Des brevets ont été pris pour ce dispositif à peu près simultanément par M. Marks et M. Jandus, mais c'est au premier de ces deux inventeurs que les cours américaines ont reconnu la priorité. Depuis cette époque, presque toutes les grandes maisons de construction ont imité plus ou moins servilement leurs dispositifs.

La lampe Marks ou Jandus consiste en principe en un arc voltaïque enfermé dans un double globe dont le second, fermé par un obturateur de forme spéciale (*check-gas-plug*), permet la dilatation de l'air sous l'action de la chaleur développée par l'arc et ne permet qu'un échange très faible entre les atmosphères intérieure et extérieure. Le grand globe extérieur fermé par une soupape constitue lui-même une seconde enceinte préservatrice qui se remplit des gaz brûlés dans le petit globe. La combustion des charbons placés dans ces conditions se trouve extrêmement retardée et leur renouvellement ne se fait, suivant leur longueur, que toutes les 150 à 200 heures. Les dispositions de l'obturateur et du mécanisme de rapprochement diffèrent un peu d'un constructeur à l'autre.

L'arc obtenu dans le mélange de gaz peu favorable à la combustion des charbons présente un aspect tout spécial : le charbon positif supérieur est à peine creusé, parce que l'arc tourne constamment autour de son extrémité, le charbon négatif inférieur est presque plan; leur distance normale est environ 8 mm pour un arc

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de 80 volts. Le mécanisme de toutes ces lampes est des plus rudimentaires : il comporte seulement un solénoïde monté en série avec l'arc et la résistance qui absorbe le reste de la tension disponible, agissant sur le charbon supérieur par un système de coincement ou d'enclenchement des plus simples.

Le charbon supérieur seul avance en vertu de son poids, tandis que le charbon inférieur est fixe; mais l'usure en une heure est si faible (pour le positif et même pour le négatif) que le point lumineux se déplace peu. Après usure du charbon positif, le charbon négatif est repris pour former charbon positif, tandis qu'on replace un négatif neuf; on ne renouvelle ainsi qu'un seul charbon à chaque opération.

Les avantages des arcs enfermés sont : l'indépendance des foyers, leur montage en simple dérivation sur 110 volts ou par paire en série sur 220 volts, l'extrême simplicité du mécanisme, l'emploi de crayons de qualité médiocre, la consommation très réduite de charbons, la réduction de la main-d'œuvre (d'après la *Brooklyn Edison C°*, cette double économie atteindrait 75 fr par lampe-an). Leurs inconvénients, par contre, sont la teinte bleue de la lumière, les variations d'éclat qui ne peuvent être atténuées que par l'emploi d'un petit globe diffuseur absorbant une partie de la lumière; l'encrassement de celui-ci, par suite d'un dépôt ocreux de silice chargée d'un peu d'oxyde de fer (dépôt qu'on pourrait supprimer) pendant la combustion, et, comme on le verra plus loin, le rendement lumineux médiocre avec de gros charbons.

Quant à la répartition de la lumière, dont le maximum a lieu vers 15° ou 20° au-dessous de l'horizon au lieu de 45°, il peut être considéré comme un avantage ou un inconvénient suivant qu'il s'agit d'éclairage en plein air ou dans les intérieurs.

Les arcs enfermés se sont très vite répandus aux États-Unis, grâce à leur simplicité et aussi aux moindres exigences du public au sujet de la fixité et du rendement de l'éclairage. En trois ans ce système est devenu plus répandu que les lampes à arc ordinaire.

Aussi a-t-on eu l'idée d'en faire l'application même aux courants alternatifs et l'on est arrivé, en effet, à obtenir des arcs de ce genre, suffisamment stables, qui ont permis de réaliser des distributions par arcs en dérivation et même en série. Dans certaines villes telles que Hartford, on emploie des circuits de 25 à 100 lampes

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de ce genre, alimentées en série par des transformateurs à courant constant analogues à ceux de Ferranti, signalés plus haut. Malheureusement le rendement de ces arcs ne justifie pas, jusqu'à présent du moins, cette solution, comme on le verra ci-dessous.

Charbons. — En même temps qu'on perfectionnait le mécanisme des lampes, on a amélioré la fabrication des charbons qu'elles utilisent et dont la qualité a une si grande influence sur la régularité et sur le rendement en lumière.

Le desideratum est de concilier un bas prix de revient avec la production de crayons parfaitement homogènes, ne donnant lieu à aucun à-coup, ayant une longue durée et une résistance aussi faible que possible (1), un point de sifflement très bas et une grande marge de fonctionnement.

L'ancienne fabrication, à laquelle M. Carré était resté seul fidèle jusqu'à sa mort, et qui consistait à recuire plusieurs fois les charbons après les avoir trempés dans certains sirops, donnait des produits admirables, mais bien trop chers. On arrive aujourd'hui à des résultats certainement moins bons, mais suffisants pour l'industrie, au moyen de charbons cuits une seule fois.

Certaines maisons ont cependant une seconde qualité plus chère, faite avec des matériaux de choix plus fins et cuits deux fois.

La base essentielle et dominante des charbons européens est le graphite de cornue à gaz soigneusement trié, séparé à la main de la gangue siliceuse (2) et mélangé avec des proportions variables de noir de fumée, de goudron et de certaines substances chimiques ajoutées pour accroître soit la durée, soit la puissance lumineuse (on n'obtient en général l'accroissement de l'un de ces facteurs qu'au détriment de l'autre). La pâte formée de ces matières, réduite en poudre et purifiée, est, après de nombreux malaxages, filée sous pression et cuite à la plus haute température possible; elle est souvent imprégnée d'acide borique.

---

(1) L'effet fâcheux de la résistance n'est pas de perdre de l'énergie qui serait consommée sans cela par un rhéostat, mais de faire varier la tension disponible entre les pointes des crayons, comme on l'a dit plus haut.

(2) On a renoncé pour ces matières aux traitements par les acides, trop coûteux; et, quant à l'anthracite en poudre ainsi traité, il ne donne que des charbons inférieurs.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Tous les fabricants européens ajoutent au charbon positif, suivant le dispositif inventé par Siemens frères, une mèche à base de charbon mélangé de silicates ou de borates, qui émettent des vapeurs conductrices favorables à la conductibilité et à la stabilité de l'arc. C'est grâce à la mèche qu'on a pu abaisser le point de sifflement au-dessous de 35 volts et réaliser un arc stable entre des limites de tension très espacées; la mèche est le secret du bon fonctionnement des lampes modernes.

Grâce à la concurrence des constructeurs et au perfectionnement de l'outillage et des procédés, le prix des charbons n'est guère aujourd'hui que le $\frac{1}{10}$ de ce qu'il était il y a dix ans (0,15 fr à 0,20 fr par mètre pour des charbons de 12 mm), et comme leur durée a été en même temps doublée, leur prix ne joue plus qu'un rôle assez secondaire dans l'éclairage par arc en comparaison du prix de l'énergie consommée sur les secteurs du continent. Les charbons européens sont d'un usage très répandu aux États-Unis; mais on y fabrique aussi pour la consommation américaine seule des qualités filées ou moulées de charbons inférieurs, à base de pétrole, purifié par traitement à l'acide, et de noir de fumée. Ces charbons homogènes et très peu conducteurs conviennent bien aux lampes de longue durée à arc long, mais pour les lampes à basse tension on est obligé de les faire très tendres et de les cuivrer. Le cuivrage est abandonné en Europe, sauf quelquefois pour les lampes de projecteurs, car les gouttes de cuivre fondu qui se détachent amènent des extinctions ou des dérangements du régime.

L'auteur a cherché en vain un bon critérium pour reconnaître la qualité des charbons d'après leurs propriétés physiques, leur structure moléculaire ou leur analyse chimique. Il a constaté seulement que toutes les qualités usuelles présentent des données analogues : densité apparente 1,30 à 1,35, réelle 1,50 à 1,85; résistivité de 0,005 à 0,01 ohm-centimètre, et généralement aux environs de 0,008 à 0,0095, tandis que les anciens charbons Carré descendaient jusqu'à 0,0039 seulement; la pâte formée de carbone presque pur (98 à 99 pour 100) avec très peu de cendres [0,20 à 0,50 pour 100 (silice, alumine, oxyde de fer)] et d'humidité.

Les mèches comprennent en général 80 à 85 pour 100 de carbone, 5 à 6 pour 100 d'eau et le reste en silicates ou borates. On

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

avait espéré beaucoup, il y a quelques années, des crayons de charbon graphités, suivant l'ingénieux procédé de MM. Girard et Street, qui réduit énormément la résistance électrique (jusqu'à 0,001); mais il a fallu reconnaître que la conductibilité calorifique est aussi accrue d'une manière fâcheuse, et que l'arc perd toute stabilité et se déplace constamment.

En dehors de la résistance électrique, dont on a signalé l'intérêt, le seul moyen de vérifier la qualité d'un échantillon est de le faire brûler, de mesurer l'usure et la production de poussière, de vérifier par des enregistreurs la régularité du régime et de déterminer le rendement photométrique comme on le verra ci-dessous.

Dans les lampes à courants alternatifs, on emploie généralement deux charbons égaux, tous deux à âme très minéralisée, ce qui a permis d'abaisser beaucoup le voltage nécessaire, comme on l'a vu plus haut. Les fabricants Schiff, Jordan et Cie et Siemens frères sont arrivés, les premiers, à l'abaisser au-dessous de 25 volts. Mais les essais de l'auteur et de M. Jigouzo ont montré qu'on peut obtenir des rendements supérieurs en mettant en bas un charbon homogène.

Pour réduire l'usure du charbon supérieur, on emploie quelquefois avec succès des protecteurs ou économiseurs en matières réfractaires, entourant le charbon supérieur au voisinage de l'arc, système imaginé d'abord par Hardtmuth. Il est encore préférable, surtout avec l'arc alternatif, d'employer un réflecteur émaillé, dont le centre en matière réfractaire est percé pour le passage du charbon supérieur.

Utilisation de l'arc électrique. Réflecteurs et globes. — Les accessoires ajoutés aux lampes à arc pour mieux répartir ou diffuser la lumière ont été aussi l'objet de quelques perfectionnements. L'un des plus importants est l'addition du réflecteur dont on vient de parler.

Ce réflecteur, imaginé d'abord par Cörper, et employé aujourd'hui dans toutes les lampes à arc à courants alternatifs, a permis à celles-ci de lutter avec moins de désavantages contre les lampes à courant continu, et a réalisé à ce point de vue un grand progrès dans l'utilisation des courants alternatifs. Certaines maisons, telles que l'*Allgemeine E. Gesellschaft,* l'adaptent même aux lampes

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

à courant continu pour rejeter tout le flux lumineux vers le bas. La tôle émaillée ne le réfléchit pas davantage, mais l'effet désiré est obtenu avec une perte de lumière (8 à 10 pour 100) plus faible qu'avec n'importe quel réflecteur. L'accroissement de l'intensité moyenne hémisphérique atteint 10 pour 100 pour le courant continu et près de 50 pour 100 pour l'alternatif. Malheureusement, toute la lumière doit traverser un globe opalin entourant la lampe et subit là une grande absorption; celle-ci atteignait autrefois 50 à 60 pour 100, mais les progrès dans la fabrication des globes l'ont réduite à 15 ou 25 pour 100. Une autre méthode plus parfaite, qui concilie les exigences d'une grande diffusion avec la répartition de la lumière la plus favorable, est celle des globes holophanes, imaginés par l'auteur et Psaroudaki en 1893, après d'intéressants essais de Raffard et de Trotter, et qui, depuis cette époque, ont reçu de grands perfectionnements entre les mains de la *American holophane Glass C°,* qui les fabrique en grand; ces globes, à doubles cannelures prismatiques, dirigent la lumière tout en l'étalant de façon à paraître uniformément brillants.

D'autres dispositifs ont été imaginés pour cacher à l'œil la vue de l'arc et diffuser la lumière par de grandes surfaces (diffuseurs Elster, Hrabowski, etc.). Le plus répandu et le plus intéressant est le dispositif de l'éclairage par le plafond au moyen de lampes à arc renversé, déjà exposé par Jaspar en 1881, puis longtemps délaissé. Depuis quelques années, on en fait un grand usage dans les ateliers, bureaux, salles de dessin, soit avec des lampes à mécanisme placé au-dessous de l'arc, ce qui est disgracieux, soit préférablement avec des lampes ordinaires à longues tiges; au lieu d'un plafond blanchi, on emploie souvent des toiles tendues au-dessus des lampes ou mieux encore de larges réflecteurs en tôle émaillée attachés au-dessus de celles-ci. Cette dernière solution est la plus élégante et peut-être la plus avantageuse façon d'utiliser l'arc pour l'éclairage intérieur.

Les lampes à charbons inclinés et arc dégagé par le bas, proposées déjà autrefois par Rapieff, semblaient aujourd'hui abandonnées; cependant cette solution vient d'être reprise par M. Bremer, avec une coloration analogue à celle de la lampe Soleil, et peut-être cette innovation lui vaudra-t-elle un succès comme celui que retrouvent l'arc enfermé et la lampe à filament de magnésie.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Photométrie des lampes à arc. — La définition photométrique des lampes à arc a donné lieu à bien des confusions, car les auteurs ne considèrent pas moins de quatre intensités différentes : l'intensité horizontale, l'intensité maxima, l'intensité moyenne sphérique et l'intensité hémisphérique, sans compter souvent une intensité *nominale* qui n'a rien de commun avec la réalité. L'étude d'un type de lampe n'est complète que si l'on trace la courbe de répartition de la lumière dans un plan méridien. Le dispositif le plus commode pour ce genre de travail est celui du miroir à 45° monté sur un axe, imaginé autrefois par Hefner-Alteneck. L'auteur en a étendu l'emploi à l'étude des globes diffuseurs par l'emploi de très grands miroirs, et M. Wedding et M. Laporte l'ont utilement perfectionné par l'emploi simultané de deux miroirs symétriquement placés; l'appareil du Laboratoire central de Paris, construit d'après ces principes, est un modèle digne d'être imité. Un autre perfectionnement intéressant et utile de cette méthode, appliqué en Amérique, notamment par M. Matthews, est l'enregistrement des mesures photométriques au moyen d'un crayon qui se déplace sur un cylindre enregistreur placé sur le banc photométrique. On fait de cette manière tous les pointés nécessaires en un temps très court; on fait ensuite à loisir le tracé de la courbe. Mais il suffit de faire la courbe dans certains cas typiques pour connaître *grosso modo* la loi relative de répartition, et ce tracé laborieux n'a pas de raison d'être pour des mesures de rendement lumineux ou d'intensité moyenne sphérique; il donne d'ailleurs, en général, une précision tout à fait insuffisante par suite des variations incessantes de la position de l'arc; pour remédier à ces inconvénients, l'auteur a imaginé, et la maison Sautter-Harlé a réalisé, sous le nom de *lumenmètres,* divers appareils répondant aux divers cas de la pratique et qui donnent, en une seule lecture, la mesure du flux lumineux émis dans deux fuseaux opposés de la sphère (1). On obtient ainsi des mesures à la fois rapides et bien concordantes

(1) On rappellera à cette occasion que l'adoption par le Congrès de Genève, en 1896, d'une unité de flux dite *lumen,* a permis d'évaluer le flux total ou le flux hémisphérique inférieur des lampes à arc sous une forme concrète et pratique. Aussi l'usage s'est-il introduit, dans les contrats d'éclairage, notamment ceux de la Ville de Paris, de spécifier les lampes à arc par le flux lumineux hémisphérique qu'elles envoient au-dessous de l'horizon.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

qui offrent infiniment plus de garantie que les méthodes usuelles; aussi l'emploi des lumenmètres devrait être prescrit pour toutes les études de rendement, afin qu'elles soient comparables.

Un autre cause très importante de la difficulté de comparer les résultats de plusieurs expérimentateurs différents réside dans l'insuffisance de définition du régime de l'arc. Il ne suffit pas, en effet, pour qu'un arc soit défini, d'indiquer l'intensité du courant et la tension aux bornes de la lampe; il faut spécifier le diamètre des crayons, la tension entre leurs pointes et, autant que possible, la longueur de l'arc entre celles-ci et le genre de mèches employé.

Il serait désirable que, dans tous les pays, les expérimentateurs fussent d'accord pour rédiger ainsi leurs résultats d'essais. On ne saurait trop insister en particulier sur la nécessité de mesurer la tension non pas aux bornes de la lampe, mais entre les pointes des crayons pour éliminer les chutes de tension très variables que produit la résistance des crayons. Enfin la différence des étalons de lumière employés par différents observateurs peut amener aussi de grandes inégalités dans leurs appréciations; il serait donc utile d'établir un accord sur la teinte, l'étalon employé et l'intensité d'éclairement sous laquelle on opère. Comme l'auteur l'a montré dans son Rapport présenté au Congrès des Électriciens de Genève en 1896 et auquel il renvoie pour plus de détails, la cuve de M. Crova ou les artifices analogues ne donnent pas du tout une solution de ce problème si complexe de la photométrie hétérochrome, malheureusement peu connue de la plupart des expérimentateurs.

Rendement lumineux des lampes à arc. — Comme pour l'intensité lumineuse, il convient, pour éviter les confusions, de spécifier si le rendement est sphérique ou hémisphérique, c'est-à-dire s'il représente le quotient par la consommation en watts du flux lumineux total ou seulement du flux lumineux hémisphérique inférieur.

La consommation est du reste souvent encore rapportée, suivant l'usage prévalant, à l'intensité moyenne sphérique ou hémisphérique.

Il ne faut pas être exclusif dans la considération des valeurs sphérique ou hémisphérique, mais les appliquer rationnellement

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

suivant les cas; pour l'éclairage des espaces découverts, la seconde est évidemment la seule intéressante, mais dans les intérieurs munis de plafonds blancs qui diffusent la lumière avec une très faible perte, c'est au contraire le rendement sphérique qui doit intervenir.

Le rendement lumineux de l'arc électrique dépend de trois éléments principaux : la force électromotrice disponible entre charbons, la longueur de l'arc et le diamètre des charbons, qui influent sur l'enfouissement des cratères et l'occultation des rayons qu'ils émettent. Les deux premiers éléments dépendent directement de la qualité de la mèche et le dernier de la durée d'éclairage désirée, comparée à l'usure des charbons.

En dépit de nombreuses expériences et des travaux de Nakano, Nichols, Schreihage, Voit, Uppenborn, etc., on était jusqu'ici très imparfaitement renseigné sur l'influence de ces divers éléments. L'auteur, en collaboration avec M. Jigouzo, a cherché à combler cette lacune par une étude systématique de l'arc à courant continu et de l'arc à courants alternatifs au moyen du lumenmètre : les résultats nombreux, traduits en courbes, montrent que le rendement est accru par une réduction du diamètre des crayons, mais suivant une loi en général moins simple que celle de Schreihage; qu'il croît avec la tension jusqu'à un certain maximum qui dépend de la densité du courant, puis décroît ensuite.

Ce maximum dans les essais a varié de 10 à 25 lumens ou de 0,8 à 2 bougies (Hefner) moyennes sphériques par watt pour le courant continu et de 5 à 17,5 lumens, ou 0,4 à 1,40 bougies (Hefner) sphériques pour le courant alternatif.

Dans une autre série d'essais, datant aussi de 1896 mais non encore publiés, les mêmes auteurs ont comparé les arcs continu et alternatif dans leurs conditions *pratiques* d'emploi et ont trouvé, en prenant comme crayons types les crayons Siemens appropriés à chaque lampe, les formules suivantes moyennes, en appelant I l'intensité moyenne sphérique en bougies Hefner, et P la puissance électrique en watts entre 300 et 1500 watts :

Courants continus..... $I = 1{,}75$ watt
Courants alternatifs..... $I = 0{,}9$ watt

On peut du reste améliorer ce dernier chiffre en accroissant le

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

voltage. Ces résultats feront l'objet d'une Communication détaillée devant le Congrès. Ils montrent bien l'infériorité des courants alternatifs, déjà signalée par d'autres expérimentateurs, notamment Fleming et Pétavel. L'accroissement du rendement avec la puissance des lampes tient tout d'abord à l'accroissement de l'éclat intrinsèque signalé plus haut et, d'autre part, à l'accroissement de la densité de courant, admise plus grande dans les grandes lampes que dans les petites. Accessoirement il convient d'ajouter que l'énergie consommée dans le shunt du régulateur a une valeur relative décroissante quand la puissance consommée augmente.

Des études analogues exécutées, d'un autre côté et par d'autres méthodes, par M. Wedding, de 1897 à 1899, sur les arcs à courants alternatifs, conduisent à des résultats assez concordants avec les précédents en ce qui concerne l'influence du diamètre et de la longueur de l'arc. Mais elles ont montré en outre l'influence du diamètre sur la forme de la courbe photométrique; la direction d'intensité maxima se relève vers l'horizon, par suite de l'épanouissement des parties incandescentes hors des cratères, lorsque la densité de courant augmente; en même temps, le rapport de l'intensité horizontale à l'intensité maxima croît d'environ $\frac{4}{5}$ à environ $\frac{1}{2}$, ce qui réduit dans une certaine mesure, pour l'éclairage des espaces découverts, les avantages du meilleur rendement. Le rendement lumineux hémisphérique pratique des lampes usuelles munies de réflecteurs avec leurs charbons normaux et leurs bobines en dérivation croît avec la puissance, très vite au-dessous de 200 watts, puissance au-dessous de laquelle on ne devrait jamais descendre, puis plus lentement. D'après les expériences faites avec un réflecteur du type connu, dans les limites usuelles, l'intensité lumineuse hémisphérique I′ est en fonction linéaire de la puissance électrique P en watts

$$I = 1,4\,P - 102.$$

Si l'on tient compte de ce que le réflecteur augmente, en général, de 50 pour 100 l'intensité moyenne sphérique, on voit que ces chiffres concordent assez bien avec ceux donnés ci-dessus pour l'intensité sphérique.

En comparant ces résultats à ceux de Voit et de Wedding pour les lampes à courants continus, on constate que la consommation

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

par bougie Hefner d'intensité hémisphérique est d'environ 1,1 watt pour les lampes à courants alternatifs de 200 watts ou les lampes à courants continus de 60 watts, et de 0,68 watt pour les lampes alternatives de 1100 watts ou continues de 150 watts; entre ces limites le rapport des consommations à puissance égale varie de 2 à 1,5 environ, c'est-à-dire que le rendement (hémisphérique) de la lampe à arc varie par rapport à celui de la lampe à courant continu de même puissance de $\frac{1}{2}$ à $\frac{2}{2}$ dans les conditions usuelles d'emploi. Cette différence est, en général, partiellement compensée, il est vrai, par la suppression du rhéostat de stabilité, remplacé par une bobine de self-induction; mais elle apparaît tout entière quand on emploie les lampes à courant continu par trois en série sans rhéostat.

En ce qui concerne ces lampes à arc à basse tension, elles doivent la plus grande partie de leurs succès, comme on l'a dit plus haut, à l'emploi de *charbons spéciaux,* donnant des régimes très réguliers et qui sont simplement des charbons à mèche minéralisée très conductrice.

En augmentant la teneur saline de l'âme, on peut abaisser la tension autant qu'on veut, mais il semble résulter de nos essais, déjà cités, que c'est généralement au détriment du rendement lumineux. Peut-être les charbons actuels sont-ils meilleurs que n'étaient à cette époque les charbons Siemens 23 V; mais, en tout cas, on peut déclarer fausses *a priori* certaines mesures invoquées par les partisans de ces lampes et qui conduisent à attribuer à ces arcs des rendements *supérieurs* à ceux des arcs ordinaires avec crayons de même diamètre de bonne marque.

En attendant le résultat d'expériences plus précises et plus nombreuses, on se rapprochera sans doute bien davantage de la vérité en pensant, avec M. Gosselin, qu'à faible tension, l'usure des charbons étant moindre à égale intensité de courant, les nouvelles lampes peuvent employer des crayons de moindre diamètre, qui compensent en partie (d'après notre étude, cette compensation serait insuffisante) la perte de rendement due aux mèches conductrices. Si l'on obtient ainsi l'égalité de rendement des lampes à haut et à bas voltage, l'emploi de ces dernières, qui transforment en lumière une plus grande fraction de l'énergie empruntée aux réseaux à 110 volts, est évidemment avantageux toutes les fois que

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

l'amélioration du rendement obtenue n'est pas rendue illusoire, d'autre part, par l'accroissement du prix d'achat des lampes et surtout par l'accroissement de section des canalisations nécessaires.

L'étude photométrique de l'arc enfermé a été faite également par plusieurs expérimentateurs. Dans ces lampes, alimentées sous une différence de potentiel entre crayons de 75 à 80 volts, les charbons s'usent droit, l'arc se déplace constamment et, dans chaque direction, l'intensité lumineuse varie incessamment, souvent du simple au double, mais le flux lumineux total varie peu.

Le globe diffusant employé pour l'uniformiser en absorbe 30 à 40 pour 100 (1). Aussi le rendement final est-il médiocre. D'après les essais de l'auteur et de M. E. Jigouzo en 1897 sur une lampe Marks de 4,5 ampères avec charbons de 12 mm (usure 1,65 mm par heure), les consommations seraient de 1,17 watt environ par bougie ou 1,6 en tenant compte du rhéostat. Le rendement de l'arc enfermé est environ les $\frac{2}{3}$ de celui d'une bonne lampe à arc libre de même puissance ou presque égal à celui de deux lampes de 4,5 ampères à l'air libre montées en série. Ces rapports s'abaissent à 0,50 et 0,70 si l'on emploie dans les arcs à l'air libre des crayons Siemens, marque A.

M. Wedding a trouvé pour la moyenne hémisphérique des consommations *moyennes* bien plus élevées, 2,90 watts par bougie pour une lampe Jandus de 3 ampères avec crayons de 10 mm et 2,81 pour une lampe de 4 ampères avec crayons de 13 mm (moyennes pendant une durée normale de fonctionnement), tandis qu'une lampe à arc libre de même consommation, avec un globe opale absorbant 30 pour 100, ne consomme, rhéostat compris, que 1,83 watt (soit un peu moins des $\frac{2}{3}$) ou deux lampes en série de même puissance totale, 2,1 watts. MM. E. Gerard et de Bast ont trouvé de même 2,4 à 3 watts par bougie hémisphérique et de 2,9 à 3,7 par bougie sphérique pour une lampe de 4,5 ampères. L'arc enfermé ne serait donc pas plus économique qu'une lampe à incandescence.

Mais ces consommations sont certainement exagérées si on les

(1) Pendant la combustion, il se forme à l'intérieur de la capsule un dépôt pulvérulent jaune d'ocre, formé d'oxyde de fer et d'alumine ou de silice, qui réduit un peu l'intensité lumineuse, mais qui heureusement reste au-dessus du point lumineux pendant qu'il s'abaisse peu à peu.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

compare aux chiffres précédents; il semble même qu'en réduisant le diamètre des crayons on puisse les abaisser beaucoup; car avec des charbons de 8,5 mm (usure 1,8 mm au positif, 0,7 mm au négatif), MM. Friedman, Burrow et Rapaport trouvent pour l'intensité hémisphérique des consommations de 0,5 à 0,6 watt par candle, suivant que l'ampoule est claire ou opaline, ou 0,69 et 0,82 en tenant compte du rhéostat.

On voit que l'arc enfermé à courant continu, bien que notablement inférieur à l'arc à l'air libre, présente encore une notable supériorité sur la lampe à incandescence ordinaire, et que ses grands avantages pratiques cités plus haut peuvent le faire préférer dans bien des applications à l'arc à l'air libre; aussi, aux États-Unis, où l'on se préoccupe beaucoup de simplifier la main-d'œuvre et d'économiser les charbons, qui sont chers relativement à l'énergie, l'arc enfermé a-t-il rapidement pris le pas sur l'arc libre.

Il ne saurait en être de même de l'arc enfermé à courants alternatifs, car, d'après des essais récents de MM. Matthews, Thompson et Hilbish, son rendement est plus faible que celui des lampes à incandescence ordinaire; la consommation atteint en effet de 3 à 4,35 watts par bougie Hefner aux bornes de la lampe, et 3,7 à 5,8 sur le réseau, au lieu de 2 pour l'arc enfermé à courant continu essayé comparativement.

PROGRÈS DES LAMPES A INCANDESCENCE.

La lampe à incandescence a continué de progresser aux points de vue de la régularité de la fabrication, du rendement, de la durée et du prix de revient; de nombreux essais ont été faits pour en modifier le principe, mais ce n'est que depuis peu de temps qu'on est arrivé à des résultats encourageants.

On examinera donc ici d'abord les lampes à filaments de carbone, puis les nouveaux filaments proposés pour les remplacer.

Lampes à filaments de carbone. — Les lampes à incandescence jusqu'à présent seules en usage sont les lampes à filaments de charbon. Elles sont employées ordinairement de 8 à 32 bougies ou 36 bougies; exceptionnellement on va à 50 ou 100, ou l'on descend de 3 à 5 bougies pour des groupes de petites lampes. Elles doivent leur succès à leur commodité d'installation et d'allumage,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

supérieure à celle de tous les autres brûleurs, aux effets d'illumination variés qu'elles permettent, à leur éclat bien constant et à l'absence de tous produits de combustion capables de vicier l'air. On peut être tenté de leur reprocher aujourd'hui leur teinte moins blanche que celle des brûleurs à incandescence par le gaz auxquels notre œil est accoutumé; mais la composition spectrale de leur lumière, étudiée par divers expérimentateurs, principalement par M. Nichols, est au contraire beaucoup plus favorable à la vision, parce qu'elle est riche surtout en rayons jaunes, qui donnent le maximum d'acuité visuelle, et pauvre en rayons très réfrangibles qui fatiguent l'œil.

Progrès de la théorie. — Il est regrettable, au point de vue précédent, que la définition du régime des lampes par leur degré d'incandescence, proposée par M. Crova en 1889, ne soit pas entrée dans la pratique industrielle (1). On aurait pu, par cette méthode, rendre aisée la détermination de la température du filament. Mais divers expérimentateurs ont étudié cette température par d'autres procédés et sont arrivés à d'intéressants résultats. D'après le professeur Weber, qui a fait une savante théorie de l'incandescence, la température atteinte dans les lampes à incandescence est de 1565° à 1588° et atteint 40° de plus pour les lampes à plus gros filaments. M. Le Chatelier, à l'aide de son pyromètre optique, a trouvé des chiffres bien élevés, voisins de 1800°, en même temps qu'il constatait une diminution de résistance de 49 pour 100, M. Janet, qui a fait les mesures les plus précises à l'aide d'une très ingénieuse méthode fondée sur l'étude du refroidissement d'un filament, a trouvé des chiffres de 1610° à 1720°, pour des lampes de 16 bougies à 65 volts.

La seconde de ces méthodes, fondée sur la mesure de l'éclat intrinsèque, peut être rendue illusoire par une erreur qui figure dans tous les traités et qui consiste à admettre que l'éclat d'un filament dépend uniquement de sa température et de la nature de la surface. On oublie ainsi que les épaisseurs des filaments ordinaires, inférieures à $\frac{1}{10}$ de millimètre, sont plus faibles que l'épaisseur limite de rayonnement du carbone solide; la preuve en est

(1) D'après M. Crova, ce degré varie de 1,05 à 1,23 pour les lampes à incandescence, au lieu de 1,5 à 1,7 pour les lampes à arc.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans le fait que les filaments incandescents sont transparents et paraissent ainsi plus brillants aux croisements des boucles. L'éclat intrinsèque à température donnée croît donc avec le diamètre du filament, et celui-ci doit être considéré comme rayonnant par sa masse et non pas par sa surface.

L'éclat i va en diminuant du centre au bord du filament, comme on le vérifie aisément au microphotomètre, et le flux émis par un élément de surface $d\sigma$ du filament n'est plus égal à $\pi i_0 d\sigma$, comme on l'a admis jusqu'ici.

Pour les gros filaments, dont le diamètre dépasse beaucoup l'épaisseur limite, la diminution de l'éclat ne se produit que très près des bords et la loi usuelle peut être conservée à titre d'approximation. On pourrait être tenté de croire que l'accroissement d'éclat avec le diamètre entraîne un accroissement de rendement lumineux, mais il ne faut pas oublier que toutes les radiations sont accrues en même temps et il est vraisemblable que l'épaisseur limite varie peu suivant leur réfrangibilité.

Un autre point sur lequel les idées acquises ont reçu un démenti au moins relatif, c'est la variation de la résistance des filaments en fonction de la température. Dès 1887, M. Anthony avait observé dans certaines lampes un changement de signe du coefficient de température; dernièrement, M. Howell, par une étude systématique, a montré que l'âme des filaments décroît bien de résistance quand la température croît, mais que le carbone déposé par nourrissage se comporte, au contraire, comme du graphite pur et augmente de résistance. Suivant la proportion de l'âme et du carbone déposé, les filaments peuvent donc présenter des variations de sens opposées et même des variations presque nulles.

Les deux phénomènes qu'on vient de signaler présentent un intérêt immédiat pour le choix de filaments dans la fabrication des lampes; c'est pourquoi on les signale ici, sans insister sur les autres questions théoriques qui se rattachent aux lampes à incandescence.

Progrès de la fabrication. — Dans son ensemble, les méthodes de la fabrication des lampes à incandescence n'ont pas subi de changements essentiels depuis dix ans, et cependant les perfectionnements de détails et la concurrence ont réalisé une amélioration considérable.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Une bonne lampe de 16 bougies (110 volts) qui, en 1889, coûtait 3 fr, se vend aujourd'hui en France 0,50 fr à 0,60 fr; son vide est meilleur, son filament plus solide et plus durable, son rendement supérieur.

On fait aujourd'hui des filaments très fins parfaitement homogènes et uniformes, grâce à l'emploi de la cellulose dissoute filée sous pression. Ces procédés, analogues à ceux de la soie artificielle et qui ont de nombreuses variantes, suivant le dissolvant employé pour la cellulose (chlorure de zinc, alcool-éther, acide sulfurique, etc.) et le mode de solidification, ont aujourd'hui presque complètement remplacé tous les autres, même ceux d'Edison et de Swan, pour les filaments ordinaires. Seulement ils se prêtent mal à la fabrication des filaments de gros diamètre, pour lesque's on obtient des filaments plus sûrement exempts de bulles et plus denses par filage de poudre de carbone agglomérée sous pression, comme pour les charbons des lampes à arc.

Ces filaments modernes sont par eux-mêmes assez durs et assez homogènes pour que le nourrissage par dépôt de carbone ne soit plus nécessaire pour les uniformiser comme autrefois. Cependant la carburation par incandescence dans les vapeurs hydrocarbonées reste une opération essentielle à un autre point de vue (1) : le carbone déposé à haute température forme sur le filament un revêtement plus dense et moins facilement vaporisable par arrachement; il retarde le noircissement de l'ampoule tout en permettant d'élever la température; il permet en outre de modifier dans une certaine mesure la résistance électrique du filament, grâce à la grande conductibilité du carbone déposé, qui atteint huit ou dix fois celle de l'âme.

Malheureusement ce changement de résistance est rapide et difficile à régler (2) : pour le faciliter on emploie aujourd'hui des procédés automatiques.

La production du vide dans les ampoules a été également beau-

(1) Certains fabricants carburent *en outre* leurs produits pendant la cuisson.

(2) La structure moléculaire du carbone et peut-être son état de pureté (il peut se déposer des hydrocarbures) dépendent de la température et de la pression : la première est difficile à évaluer; la seconde, qui ne dépasse pas quelques millimètres de mercure, varie pendant l'opération par l'effet de l'élévation de température.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

coup plus perfectionnée par l'emploi de pompes à mercure très puissantes dont l'action est précédée d'un premier vide (à 0,5 mm de mercure) fait rapidement par des pompes mécaniques. Certaines fabriques remplacent le second vide par un *vide chimique* (procédés Magliani, etc.) obtenu en introduisant préalablement dans les ampoules une substance chimique secrète (à base de phosphore, dit-on) qu'on chauffe après un deuxième vide effectué après introduction d'un hydrocarbure gazeux; les vapeurs produites se précipitent en enlevant toute trace d'air et le vide est à la fois plus parfait et plus rapide (deux minutes au lieu de dix ou quinze) qu'avec les pompes à mercure. Le vide est très régulier, facile à vérifier par essai à la bobine, et la lampe a été comme d'habitude portée pendant l'opération à un degré d'incandescence bien plus élevé que celui auquel elle est destinée, mais on n'opère ainsi que sur une seule lampe à la fois, au lieu d'un groupe de cinq à dix.

Les soudures du filament aux fils d'attache, obtenues autrefois par précipitation de carbone dans un hydrocarbure liquide, sont faites aujourd'hui le plus souvent dans un but d'économie, mais un peu au détriment de la solidité, à l'aide d'une pâte de charbon et de goudron portée à haute température dans une étuve. Les fils d'attache sont en nickel ou ferro-nickel; divers procédés, notamment l'emploi de ferro-nickel à 45 pour 100 de nickel, d'émaux conducteurs, etc., ont été employés pour supprimer le platine au passage du verre; mais on se contente, en général, de réduire au minimum (12 mm) la longueur de cette partie en platine.

Grâce à tous ces perfectionnements, et souvent à la division du travail entre plusieurs fabricants spécialistes, le prix de la lampe de 16 bougies, qui était encore de 3 fr en 1889, s'est abaissé à 0,50 fr environ, dont 0,05 fr pour l'ampoule et autant pour le platine (1). Quelques inventeurs proposent de le réduire encore en remettant à neuf les lampes brûlées, mais, d'après ce qui précède, le bénéfice ne peut être que bien faible.

Montures et culots. — Au début des lampes à incandescence, chaque fabricant ayant breveté le culot qu'il adaptait à sa lampe,

(1) Malgré cette faible consommation de platine, comme on ne le récupère pas, il se perd environ chaque année 2500 kg de platine, valant plus de 6 millions, et ce métal deviendra bientôt rare.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

il existait autant de culots que de systèmes : Edison, Swan, Siemens, etc., et l'on devait changer ses douilles en même temps que son fournisseur. Les plus compliqués ont été éliminés, et aujourd'hui l'on peut dire qu'il n'existe plus que deux systèmes de culots généralement employés, la vis Edison et la baïonnette Swan; l'ampoule est scellée dans une virole métallique par du plâtre. Cette matière, facile à adapter, mais peu solide et gonflant au séchage, et hygroscopique, a été réduite au minimum; on l'a supprimée dans l'intervalle entre les attaches pour éviter l'électrolyse et les courts-circuits; ses défauts ont même conduit plusieurs constructeurs à essayer des culots à scellement métallique; mais ceux-ci, bien que souvent très ingénieux, ne sont pas entrés dans la pratique générale, à cause du supplément de main-d'œuvre qu'ils exigent. Plus récemment, on a imaginé des types de têtes de lampes utilisables sans scellement.

Rendement lumineux. Lampes poussées. — Le point sur lequel il a été fait le moins de progrès, c'est le rendement lumineux, que l'on rapporte généralement à l'intensité horizontale maxima. D'excellents résultats sont annoncés par les fabricants, mais il sont obtenus généralement sur des batteries d'accumulateurs. En pratique sur les secteurs on ne peut guère abaisser la consommation moyenne de 3,5 par bougie décimale (1), car dans ces conditions une variation de 10 pour 100 sur la tension suffit à faire passer l'intensité d'une lampe de 16 bougies de 10 bougies à 20 bougies et la consommation spécifique de 4 à 2,6; une lampe plus poussée normalement est donc rapidement détruite. Les lampes ordinaires elles-mêmes baissent rapidement d'intensité sur les secteurs.

Aussi n'a-t-on pu tirer parti jusqu'ici de lampes plus poussées, bien qu'on en connaisse les avantages théoriques et que plusieurs fabricants essaient d'en mettre sur le marché.

Une solution nouvelle, imaginée par M. Weissmann avec la collaboration de l'auteur, permet d'accroître le rendement par un artifice en abaissant préalablement la tension à 15 ou 22 volts pour

(1) Il convient de ne pas oublier que la bougie Hefner n'est que les 0,88 de la bougie décimale, d'après les récentes mesures de M. Laporte, et que les lampes allemandes *paraissent* ainsi avoir un meilleur rendement que les autres.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

pouvoir employer des lampes spéciales de basse tension; les gros filaments de ces lampes, grâce à leur solidité mécanique et à leur revêtement épais de graphite, peuvent être poussés plus haut que les autres et leur masse fait un volant de chaleur qui réduit les effets des variations de tension. Ces lampes et les petits transformateurs individuels qui les alimentent réalisent ainsi des consommations de 2,5 watts par bougie sans perdre plus de 25 pour 100 en cent heures. Au prix ordinaire de l'énergie sur les réseaux, l'économie de $\frac{1}{2}$ ou de $\frac{1}{3}$ réalisée sur l'énergie est assez considérable relativement à la petite dépense supplémentaire des renouvellements (1). La lumière est beaucoup plus blanche. Enfin, par ce moyen, on peut employer avec un bon rendement des lampes de 1 à 2 bougies, irréalisables sous les tensions usuelles.

Filaments à haute tension. — La tension normale de 100 à 120 volts a été longtemps considérée comme un maximum pratique pour les filaments en carbone. Mais depuis quelques années il s'est fait une active propagande, surtout en Angleterre, pour l'emploi d'une tension double, 220 volts, en vue d'accroître la capacité de distribution des réseaux existants qui jouent un rôle prépondérant dans les frais d'établissement d'une distribution urbaine.

Plusieurs stations allemandes, et quelques-unes en France (Amiens, etc.), ont essayé cette solution. Les fabricants ont été amenés ainsi à faire des lampes doubles ou à double filament, puis des lampes à un seul filament très fin à plusieurs boucles fonctionnant directement sur 220 volts. Le succès ainsi obtenu reste cependant discutable, car, bien que le revêtement graphitique (dont l'épaisseur ne peut descendre au-dessous d'un certain minimum) soit, relativement à l'âme amorphe, plus épais que dans les lampes à 110 volts, ces filaments, très ténus et très longs, sont mécaniquement peu solides, ce qui ne permet pas d'élever leur température aussi haut qu'il serait désirable pour un bon rendement; le fait même que leur résistivité est plus faible que celle des filaments plus gros exagère encore leur longueur et nécessite, par

(1) L'économie sur une lampe de 16 bougies pendant cent heures serait, d'après M. Weissmann, au moins de 15 à 20 hectowatts-heures, ou 1,50 fr à 2 fr au prix de 0,10 fr l'hectowatt-heure, tandis que les lampes ne coûtent que 0,50 fr à 0,60 fr.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

conséquent, des ancrages qui constituent des points faibles; ils résistent moins bien aux variations de tension, faute de masse suffisante; enfin leur fabrication est plus difficile.

Aussi, malgré les efforts de nombreux constructeurs et les essais tentés en vue de réduire l'épaisseur du revêtement ou même de la supprimer complètement, les lampes à 220 volts sont-elles inférieures comme durée et comme rendement aux lampes de même puissance à 110 volts, et équivalentes plutôt à des lampes de puissance moitié moindre (par exemple, au lieu de 50 à 55 watts, une lampe de 16 bougies sous 220 consomme 65 à 80 watts, voire même 90); en outre, la consommation spécifique croît très vite avec le temps; enfin, il est difficile de réaliser des lampes à 220 volts de faible intensité, et l'on ne peut guère descendre au-dessous de 16 bougies.

La vraie solution de ces lampes et, *a fortiori,* des lampes à 500 volts, dont la création serait fort désirable, paraît donc devoir être cherchée plutôt dans l'emploi de filaments de plus grande résistivité électrique que le filament de carbone ordinaire.

Filaments en matières autres que le carbone. — Les inconvénients des filaments de carbone sont leur volatilisation trop facile et leur trop grande conductibilité spécifique. De nombreux chercheurs ont donc été amenés à essayer d'autres substances réfractaires simples présentant une résistance analogue, mais supérieure à celle du carbone. On a essayé notamment les carbures de bore, d'aluminium, de silicium (*carborundum*), etc. Ce dernier corps, le carborundum, a pu être obtenu en filaments élastiques et homogènes, mais le noircissement de l'ampoule était extrêmement rapide et accompagné fréquemment de rupture aux attaches; le carbure de calcium a donné d'un peu meilleurs résultats; ces carbures semblent devoir être plus volatils que le carbone ou être décomposés par le passage du courant.

Le même inconvénient se présente encore pour les mélanges de poudre de carbone avec d'autres corps tels que le bore, le silicium, des oxydes réfractaires, etc. Langhaus a essayé sans succès de recouvrir une âme d'oxydes d'un dépôt de bore ou de silicium par nourrissage.

Les deux seuls procédés de ce genre qui paraissent employés

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

actuellement dans l'industrie sont dus à Langhaus et à Maxim. Le premier (filament *Premier*) consiste dans un filament de cellulose dissoute, filé sous pression avec addition de poudre de bore ou silicium, puis calciné au four électrique. Le second filament (filament *Maxim*) consiste dans un filament formé d'un carbone en poudre cristallisé, très dur, réfractaire et très résistant électriquement, obtenu par un procédé de précipitation spécial, aggloméré par du goudron, puis filé à la presse. D'après les fabricants, ces lampes noircissent moins vite et donneraient une amélioration de rendement de 25 pour 100 environ. Ils sont encore trop récents pour qu'on puisse en parler avec plus de précision.

Il en est de même des filaments en osmium de M. Auer von Welsbach, dont on a beaucoup parlé depuis quelques mois, mais qui n'ont pas encore été présentés au public : ces filaments s'obtiennent par divers procédés, notamment par nourrissage d'un fil de platine dans une atmosphère d'hydrocarbure, de vapeur d'eau et d'anhydride osmique; le filament d'osmium, débarrassé de son âme de platine par un coup de feu préalable, est placé dans le vide et porté à une température supérieure à celle des filaments de carbone, et réalise, paraît-il, un rendement double. Les inconvénients de ce produit semblent être le prix plus élevé de la fabrication et la trop grande conductibilité de la substance employée, qui ne permet pas d'alimenter les lampes à plus de 20 ou 30 volts. Il en est de même des filaments, très réfractaires aussi, à base de tungstène, chrome, etc., proposés par d'autres inventeurs.

Filaments à base d'oxydes de terres rares. — Un second procédé tout différent, pour améliorer le rendement, consiste à employer comme corps incandescents les corps présentant une loi de radiation plus favorable que le carbone, en particulier les oxydes de terres rares déjà employés dans les manchons des brûleurs à incandescence par le gaz, grâce à la belle découverte de M. Auer von Welsbach. A ce point de vue il n'importe pas moins aux électriciens qu'aux gaziers de connaître les véritables causes du rendement remarquable de ces brûleurs. Certains auteurs ont invoqué un effet de luminescence (Nichol et Snow), un pouvoir émissif exceptionnel (John), d'autres (Bunte), une température très élevée de 2000° et un effet catalyptique dû à la présence d'une

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

petite quantité d'oxyde de cérium ($\frac{1}{2}$ à 1 pour 100) distribué à la surface de la carcasse d'oxyde de thorium; mais en réalité, et d'après les lois de Kirchhoff, les belles expériences de MM. Le Chatelier et Boudouard ont renversé toutes ces hypothèses et établi qu'il s'agit simplement de corps colorés ayant une loi de radiation plus favorable que les corps noirs à la même température (qui ne dépasse pas 1650°); grâce à un pouvoir émissif voisin de l'unité pour les radiations bleue, verte et jaune, et bien plus faible pour les radiations rouges et calorifiques, l'énergie rayonnée par unité de surface est plus faible qu'avec le carbone, mais sa composition est meilleure. Il suffirait donc de porter par le courant électrique ces oxydes à la même température que les filaments actuels pour réaliser une grande amélioration de rendement. Aussi de nombreux inventeurs ont-ils cherché à appliquer un revêtement de ces oxydes sur des âmes en carbone soit par application de pâte, soit par dépôt électrochimique (Langhaus), soit par application de tissu imprégné (Thowley), etc. Jusqu'ici ces procédés n'ont pas réussi, à cause des différences du coefficient de dilatation et de la température excessive à laquelle l'âme devrait être portée. Pour obvier à cette dernière difficulté, d'autres inventeurs ont remplacé l'âme de carbone par un fil d'une spirale de métal très réfractaire (chrome, tungstène, platine, iridium, rhodium, etc.).

M. Auer von Welsbach, en particulier, a annoncé la réussite d'un filament en thorine (la plus réfractaire des terres rares) déposée par nourrissage sur un filament de platine ou d'osmium; la consommation dans une ampoule à vide s'abaisserait à 2 et même 1,5 watt par bougie, sans que l'âme fonde; les inconvénients seraient les mêmes que pour les filaments d'osmium du même inventeur.

Une autre catégorie de filaments qui a été également essayée par de nombreux expérimentateurs, dont l'auteur, dès 1889, consiste dans un mélange d'oxydes et d'un corps conducteur (carbone ou métal réfractaire, tel que l'iridium, l'osmium, etc.) ajouté au moment du filage à la presse, ou déposé après coup par imprégnation et décomposition. Mais les mélanges à base de carbone se décomposent par réduction et à haute température; la stabilité des autres dans le vide n'est pas encore établie.

Jablochkoff en 1877 et Nernst en 1897 ont supprimé toute addi-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

tion de ce genre, en utilisant la propriété, déjà indiquée par M. Le Roux, qu'ont les oxydes et corps analogues, que M. Nernst appelle *conducteurs de seconde espèce,* de devenir conducteurs à haute température. Dans la lampe exposée en 1881 par Jablochkoff, le filament était en kaolin, chaux ou magnésie, et le chauffage préalable obtenu par un brûleur ou une mèche conductrice en pâte de charbon. M. Nernst a imaginé l'allumage automatique par une spirale de platine voisine du filament, et l'emploi d'oxydes beaucoup plus conducteurs que tous ceux connus jusque-là, grâce au mélange de deux oxydes jouant les rôles de base et d'acide. Grâce à ces importants perfectionnements et à ceux apportés par la Compagnie *Allgemeine Electricitäts Gesellschaft* dans la fabrication, le montage du filament, etc., la lampe Nernst paraît avoir été amenée à un point industriel; elle figure à l'Exposition et est, dit-on, déjà en usage sur le réseau d'éclairage de Göttingue, en Allemagne.

Grâce à la température assez élevée qu'elle atteint, et surtout aux propriétés de la radiation des oxydes, cette lampe réalise une belle lumière très blanche avec une consommation très faible (1,75 watt par bougie pour 25 bougies, 1 watt par bougie pour 100 bougies), malgré l'infériorité résultant de son emploi à l'air libre. La présence d'une atmosphère oxydante est, en effet, nécessaire pour retarder la décomposition du filament par électrolyse. La durée pratique n'est pas encore établie, mais on peut craindre que le filament déjà très poussé soit fragile et très sensible aux variations de tension; on est en tout cas obligé d'ajouter en série une résistance à fort coefficient de température pour empêcher un trop rapide accroissement de courant quand la tension augmente : jusqu'ici on n'a pu construire de lampes de moins de 25 bougies, ni de moins de 110 volts; mais il est très facile d'obtenir des lampes de 220 volts et même davantage, fonctionnant avec allumage à la main ou automatique.

Le résultat d'expériences officielles et d'essais de durée pratique sur les réseaux permettra seul d'apprécier l'avenir réservé à cette solution, si séduisante à bien des égards; si elle tient toutes ses promesses, cet avenir sera des plus brillants et annulerait l'écart qui existe entre le prix de revient des éclairages au gaz et à l'électricité.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ÉTALONNAGE DES LAMPES A INCANDESCENCE.

Nous ne saurions quitter le sujet des lampes à incandescence sans dire un mot de leur étalonnage, car il serait fort opportun d'arriver à un accord international sur ce sujet.

On a vu déjà plus haut que l'adoption d'unités différentes (en France, la *bougie décimale,* en Allemagne et en Amérique, le *hefner,* qui n'en est que les $\frac{88}{100}$) crée un avantage apparent aux lampes étrangères sur les lampes françaises.

Il n'y a pas moins de désaccord sur la définition de la puissance lumineuse des lampes et la façon de la mesurer.

En France, jusqu'ici, on prend l'intensité horizontale dans une direction perpendiculaire au plan moyen du fer à cheval ou de la boucle. Mais, à l'étranger, on déclare que les essais, pour être utiles, doivent comprendre la mesure de la puissance lumineuse dans plusieurs directions. D'après une récente décision de l'*American Institute,* ni la moyenne horizontale, ni la moyenne sphérique, ni la puissance lumineuse dans une direction quelconque ne définissent une lampe suffisamment pour prouver qu'elle est conforme au modèle étalon, et un récent règlement de cette Association exige que les lampes à incandescence soient conformes à la fois à une valeur étalon pour la puissance lumineuse moyenne normale et à une moyenne sphérique mesurée lorsque la lampe tourne à une vitesse très lente, avec son axe incliné à 45°. Il recommande que les limites pour la première moyenne soient de 15 bougies au minimum et de 17,5 bougies au maximum. (Si le minimum était plus bas, il y aurait certainement tendance à produire les lampes voisines de ce minimum.) La puissance à 45° doit être égale à au moins 85 pour 100 du minimum.

De même, en Allemagne, la question de l'étalonnage a été traitée récemment par une Commission de l'Association électrotechnique de Berlin qui a fixé des règles uniformes pour les lampes normales de 10, 16, 25 et 32 hefners consommant 3 à 4 watts par hefner aux tensions de 60 à 70 volts et 95 à 125 volts.

Les lampes doivent porter l'indication de la puissance et du voltage correspondant, avec une tolérance de 2 pour 100 à la livraison. Aux essais de réception, la tolérance est de 6 pour 100 en dessus ou en dessous pour la puissance lumineuse aussi bien

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

que pour la consommation. Quand plus d'un quart des lampes sort de ces limites, la fourniture peut être refusée. La durée de service utile est définie la durée après laquelle l'intensité lumineuse est tombée de 20 pour 100; elle doit être indiquée par le fabricant.

Les essais doivent avoir lieu dans le mois de l'envoi et à condition que 2 pour 100 de la fourniture et en tout cas au moins 20 lampes soient fournis à cet effet. En cas de désaccord sur le laboratoire de contrôle, les parties s'en rapportent à l'Institut Physico-technique. On recommande l'emploi de la monture Edison.

En ce qui concerne les essais photométriques, l'Association allemande a borné son étude au cas des lampes en fer à cheval, ou à boucle simple. Après avoir déclaré (à tort, croyons-nous) qu'il n'était pas possible de mesurer commodément le flux lumineux total, elle a adopté une singulière disposition photométrique qui consiste à placer la lampe au milieu de deux miroirs de 13 cm de côté et de 2 mm à 5 mm d'épaisseur ayant leur bissectrice dirigée vers l'écran du photomètre; l'axe de la lampe est à 9 cm de l'arête du dièdre ainsi formé; cet axe doit être vertical et les points d'attache des filaments dirigés dans le plan perpendiculaire au banc photométrique. Celui-ci est un banc ordinaire de 2,50 m portant directement une graduation en bougies et dixièmes de bougie.

Toute lumière étrangère doit être évitée par des écrans de velours. Une source auxiliaire, placée à 60 cm environ, doit être une bonne lampe de 10 bougies ayant déjà brûlé vingt à trente heures. On opère par doubles pesées en remplaçant la lampe à étudier par l'étalon et en réglant en conséquence la distance de la source auxiliaire au photomètre dont on la rend ensuite solidaire. Comme étalon, on emploie des lampes d'à peu près mêmes intensités et tensions que la lampe à étudier, et consommant 3,5 à 4,5 watts par hefner.

Les avantages d'employer comme étalon secondaire une lampe à incandescence analogue à celles à étudier sont bien connus en France, où le mode opératoire est analogue, sauf en ce qui concerne l'emploi du miroir.

On ne saurait dissimuler que toutes ces règles sont tout à fait arbitraires et n'ont rien de satisfaisant pour l'esprit, sauf la règle française, qui, comme a montré en 1889 M. Potier, peut donner

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

une évaluation du flux, si l'on a affaire à des filaments de gros diamètres (on a vu plus haut que cette règle est en défaut pour les filaments minces ordinaires).

Il n'y a en réalité qu'une façon rationnelle de photométrer les lampes à incandescence, surtout maintenant qu'on rencontre des formes très variées et pas du tout comparables entre elles (sur la lampe Nernst); c'est de mesurer leur flux total. L'auteur a indiqué dans ce but une méthode qui consiste à faire tourner la lampe très vite sur elle-même autour de l'axe d'un lumenmètre; tout dernièrement, M. Ulbricht a indiqué un autre dispositif de lumenmètre encore plus simple, qui consiste dans une sphère parfaitement blanchie intérieurement; l'éclat intrinsèque est le même sur toute la surface intérieure et donne par proportionnalité une mesure du flux lumineux de la lampe qu'on y enferme.

Le moment paraît donc venu d'exiger, au moins pour les mesures de précision ou les expériences de comparaison un peu complexes, la définition des lampes par leur flux lumineux total, en même temps que par leur tension.

Quant à la règle à adopter pour fixer la durée utile, on est à peu près d'accord pour la définir, en France comme en Allemagne, par une baisse de 20 pour 100 sous potentiel constant. On pourrait en faire la base d'un accord international.

La tolérance à faire sur la tension et l'intensité lumineuse lors de la réception paraît devoir être laissée, au contraire, en dehors de cet accord, et au gré des cahiers des charges des diverses entreprises d'éclairage.

On signale à ce propos la méthode qui s'introduit depuis quelque temps en Amérique, en Angleterre et en Allemagne, de laisser aux Compagnies d'éclairage le soin de fournir et remplacer les lampes à forfait; cela ne constitue qu'une charge très faible pour ces Compagnies, et leur permet de réaliser des économies d'énergie et de supprimer pour l'abonné l'ennui de s'approvisionner, souvent fort mal.

CONCLUSIONS.

Nous espérons avoir montré, par cet exposé rapide, que de sérieux progrès ont été réalisés ou sont à la veille de l'être.

Nous avons aussi cherché à faire ressortir l'intérêt capital qu'il y

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

aurait, pour uniformiser les mesures de puissance lumineuse et de rendement, à faire voter par le Congrès un vœu recommandant la vulgarisation des mesures directes du flux lumineux total et l'adoption provisoire d'un étalon de lumière médiocre commun aux divers pays jusqu'à la réalisation d'un étalon pratique parfait.

L'INTENSITÉ LUMINEUSE DE L'ARC A COURANT CONTINU;

PAR Mme HERTHA AYRTON.

Parmi les courbes que M. Ayrton a montrées à Chicago en 1893, il y en avait plusieurs qui reliaient l'intensité lumineuse moyenne sphérique de l'arc à l'intensité du courant, étant donnés des écarts différents mais constants entre un charbon de 13 mm à mèche et un autre de 11 mm homogène. Au moyen de ces courbes, il a constaté que, pour un même courant, l'intensité lumineuse augmente avec l'écart jusqu'à un certain point et puis diminue; de même, étant donnés les charbons, il y a pour chaque courant un écart définitif avec lequel on a une intensité lumineuse maxima. Ce fait nouveau et inattendu a été confirmé par M. Carhart, qui l'avait déduit, indépendamment de ses propres expériences, et qui l'a annoncé à la même séance, mais en partant d'un point de vue assez différent. Il avait trouvé qu'avec un courant constant l'intensité lumineuse atteignait le maximum pour une certaine différence de potentiel entre les charbons. Or, avec des charbons et un courant donnés, la différence de potentiel entre les charbons ne dépend que de l'écart; donc les deux découvertes avaient rapport au même fait, lequel n'a pas eu jusqu'ici d'explication.

Pour mieux étudier ce phénomène, j'ai tracé des courbes donnant l'intensité lumineuse moyenne sphérique en fonction de l'*écart entre les charbons* au régime de courant constant, en me servant des expériences de M. Ayrton. Et j'ai trouvé que non seulement ces courbes avaient le point maximum annoncé par M. Ayrton, mais que celles qui avaient rapport à des courants plus intenses que 10 ampères avaient en outre des points minima, pour un écart d'environ 2 mm. Les courbes avaient la forme indiquée *fig.* 1.

Pour bien m'assurer que, pour les points minima avec de forts

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

courants, les expériences de M. Ayrton étaient confirmées par les recherches d'autres observateurs, j'ai examiné la remarquable série d'expériences de M. Blondel, publiée en 1897. M. Blondel a tracé les courbes, qui pour un courant constant, relient le flux lumineux non à l'écart des charbons, mais à leur *différence de potentiel.*

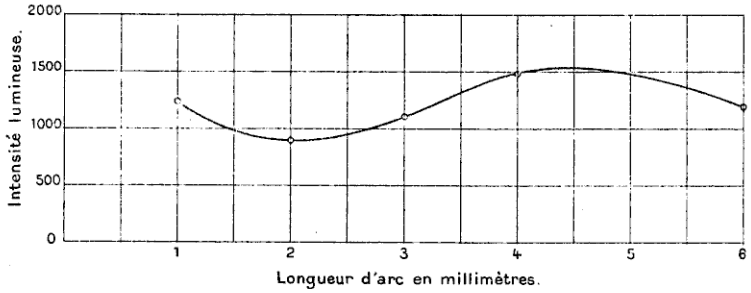


Fig. 1. — Courbe représentant la relation entre l'intensité moyenne sphérique et l'écart des charbons, le courant étant constant supérieur à 10 ampères.

Comme il n'a pas employé de courant supérieur à 10 ampères, les indications que donnent ses courbes d'une diminution dans le flux total de lumière avec des arcs de 2 mm environ ne semblaient être que des erreurs d'observation. Néanmoins le fait était réel; et en traçant, d'après les tableaux admirables de M. Blondel, les courbes qui relient le flux de lumière à la longueur de l'arc, j'y ai trouvé toute une série de nombres qui montraient des résultats identiques (les longueurs d'arc étant de 2 ou 3 mm) et deux spécialement où il y avait de vrais points minima.

Les expériences de M. Blondel ont été très complètes. Elles comprennent tous les écarts à partir de 0 mm jusqu'à ceux de 11 mm, 12 mm, et même quelquefois de 16 mm, et nous donnent la forme entière de la courbe depuis l'arc de 0 mm jusqu'à celui où l'intensité lumineuse ne change guère en allongeant l'arc. Cette courbe entière a, ordinairement, pour des courants intenses, la forme ci-après (*fig.* 2), que j'ai tirée des expériences de M. Blondel. Cette forme nous montre qu'en écartant les charbons, le courant étant constant et d'une grandeur suffisante, on arrive d'abord à un maximum d'intensité lumineuse A (*fig.* 2); ensuite, avec un écart un peu plus grand, à un minimum (B), puis avec un écart beaucoup plus grand à un second maximum (C).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Pour vérifier le premier point maximum (A) et le minimum (B), MM. Newton et Good ont fait spécialement pour moi, au *Central Technical College,* des expériences qui ont tout à fait confirmé

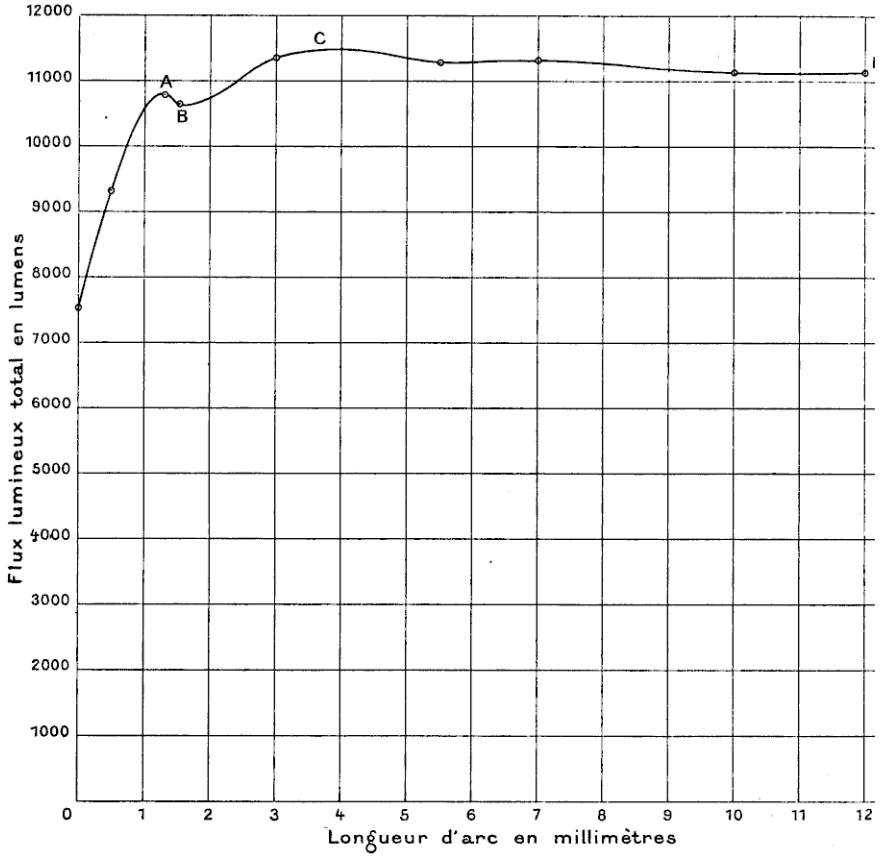


Fig. 2. — Variation du flux lumineux d'un arc à courant constant en fonction de l'écartement des charbons.

celles de MM. Ayrton et Blondel. Ils ont comparé l'intensité lumineuse de deux arcs de 30 ampères, l'un de 1 mm et l'autre de 2 mm, entre des charbons de 13 mm à mèche et 11 mm homogène, identiques à ceux de M. Ayrton. L'expérience a duré quatre jours, et des précautions minutieuses ont été prises pour s'assurer que les conditions étaient absolument les mêmes pour les deux arcs, même au point d'échanger les positions des deux arcs. Pour 17 des 18 expériences qu'ils ont faites, l'arc de 1 mm avait une inten-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sité lumineuse plus grande que celui de 2 mm, ce qui paraît assez conclusif.

Pour bien voir s'il aurait été possible de prédire ce fait si singulier, il faut examiner en détail les différentes sources de lumière dans l'arc. Il y en a cinq, que je range dans l'ordre de leur importance :

1° Le cratère ;
2° La tache blanche à l'extrémité du crayon négatif;
3° La vapeur;
4° } Les parties rouges des charbons.
5° }

C'est au cratère, comme on sait, que l'on doit la plus grande partie de la lumière de l'arc; seulement tout ce qui y est produit ne réussit pas à franchir le crayon négatif, de sorte que, quand les charbons sont très peu écartés, presque toute cette lumière est occultée. Plus on écarte les charbons, plus la lumière du cratère peut s'échapper; et l'arc n'a pas besoin d'être bien long pour qu'en effet toute la lumière trouve moyen de passer. Ainsi, en supposant que l'éclat intrinsèque du cratère (le flux de lumière émis par millimètre carré) ne diminue pas, et que son étendue ne diminue pas non plus, la quantité de lumière émise par le cratère et qui peut franchir le crayon négatif pour être utilisée doit s'accroître d'une manière continue quand l'arc est allongé, mais de plus en plus lentement.

Or, déjà en 1881, le capitaine Abney (à présent Sir W. Abney) a trouvé que l'éclat intrinsèque du cratère était tout à fait constant pour des charbons donnés, ne dépendant ni du courant, ni de la longueur de l'arc. Et en 1896, j'ai signalé à Toronto que, loin de diminuer, l'étendue du cratère augmente un peu quand l'arc est allongé à courant constant. Par conséquent, on peut dire que la courbe qui représente la relation entre cette portion de la lumière du cratère qui est utilisable et la longueur de l'arc a la forme donnée par la *fig.* 3.

Quant aux quatre autres sources de lumière, j'ai constaté que la tache blanche a une surface constante avec un courant constant; donc sa lumière utile doit augmenter avec la longueur de l'arc. Car elle aussi s'échappe de plus en plus facilement en écartant les

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

charbons davantage. La quantité de lumière émise par la vapeur doit aussi augmenter avec la longueur de l'arc, puisque la surface d'émission croît en même temps. La lumière émise par les parties rouges des charbons ne compte pas beaucoup, mais, telle qu'elle est, j'ai constaté qu'elle croît quand on allonge l'arc, puisque la longueur rouge du charbon positif au moins croît.

Ainsi, la lumière fournie par chaque source dans l'arc augmente en même temps que l'écart des charbons, et la courbe qui représente la relation entre l'intensité lumineuse de l'arc et l'écar-

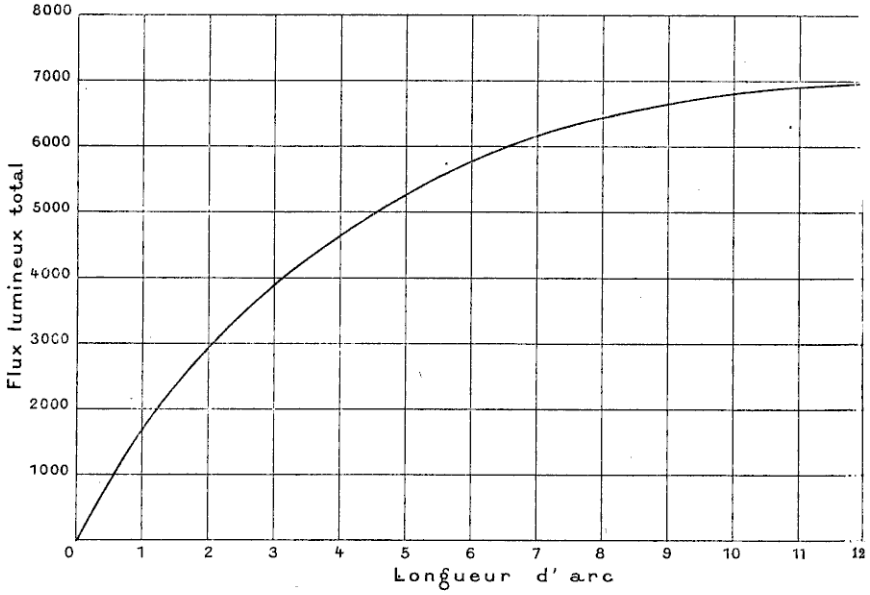


Fig. 3. — Flux lumineux d'un arc en fonction de l'écartement des charbons.

tement des charbons doit, alors, prendre une forme semblable à celle déjà donnée dans la *fig.* 3.

Comment se trouve-t-il donc que la courbe ne prend pas du tout cette forme, quand elle est déterminée expérimentalement? Que, au lieu de s'accroître constamment, elle montre deux points maximum et un point minimum d'intensité lumineuse? Cherchons d'abord la raison du premier maximum et du minimum. Pour cela, il faut considérer de nouveau l'obstacle offert à la lumière du cratère par le crayon négatif.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Dans la considération que nous lui avons déjà donnée, nous n'avons pas tenu compte des différentes formes que prend ce crayon suivant l'intensité du courant et la longueur de l'arc. Or j'ai démontré en 1895 que les formes des deux charbons varient beaucoup, lorsque ces deux variables changent, et qu'il se produit même une espèce de pointe supplémentaire très aiguë à l'extrémité du négatif, avec de grands courants et des arcs courts, pointe qui disparaît entièrement, lorsque l'arc est allongé.

La *fig.* 4 montre quatre dessins des arcs et des charbons qui font

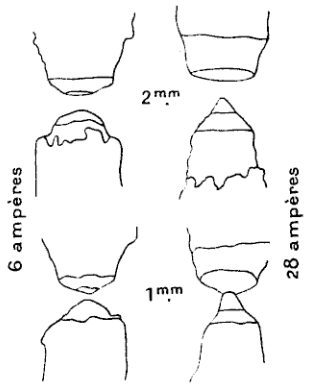


Fig. 4.

voir clairement la différence de forme du crayon négatif, avec des arcs de même longueur, selon l'intensité du courant. A gauche sont des arcs de 1 mm et de 2 mm respectivement fournis par un courant de 6 ampères, et les deux arcs de droite sont des arcs des mêmes longueurs donnés par un courant de 28 ampères. La pointe supplémentaire ne se montre pas du tout dans les deux premiers, mais elle se voit très bien dans l'arc de droite de 2 mm, et mieux encore dans celui de 1 mm. C'est surtout la distance entre la base de cette pointe et la bouche du cratère qui détermine la quantité de la lumière du cratère qui franchira le négatif; car la pointe elle-même n'arrête que très peu la lumière. Or, la distance entre la base de la pointe et le cratère dans les deux arcs de 28 ampères est à peu près égale. Ajoutons à cela que toute l'extrémité du négatif est plus longue et plus mince pour l'arc de 1 mm que pour celui de 2 mm, et l'on trouve assez de raisons pour que l'intensité lumineuse

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

du premier soit plus grande, ou du moins aussi grande que celle du dernier.

Enfin, en écartant les charbons d'un arc à courants intenses, la quantité de la lumière du cratère qui franchit le crayon négatif est réglée par deux tendances opposées. L'accroissement de la distance entre les charbons tend à l'augmenter, mais l'épointement de l'extrémité du négatif qui s'ensuit tend à l'amoindrir. Quand, en passant d'un écart à un autre, à courant constant, l'augmentation gagne sur l'amoindrissement, l'intensité lumineuse de l'arc s'accroît. Quand les deux tendances se contre-balancent, elle reste constante, et quand l'amoindrissement gagne sur l'augmentation elle diminue. Le premier cas s'est produit avec les arcs de 1 mm et moins, et le dernier avec les arcs de 2 mm environ dans les expériences de M. Ayrton et de M. Blondel.

Il n'y aurait peut-être pas grand intérêt à donner tant d'attention à la possibilité d'avoir plus de lumière avec un arc bien court qu'avec un arc plus long, s'il ne s'ensuivait pas la conséquence véritablement pratique que voici :

La différence de potentiel entre les charbons à courant constant est moindre avec de petits écarts qu'avec de grands. La puissance dépensée dans l'arc court est moindre, donc, que dans un arc long avec les charbons et les courants dont il s'agit. Ainsi, l'arc de 1 mm environ donne plus de lumière avec moins de puissance que l'arc de 2 mm environ, c'est-à-dire que le petit arc ne donne pas seulement le plus de lumière, mais il a aussi actuellement le meilleur rendement.

Outre cela, j'ai démontré en 1896 que le rapport

$$\frac{\text{puissance dépensée dans l'arc}}{\text{puissance développée par le générateur}}$$

augmente quand on diminue l'écart entre les charbons à courant constant. Par conséquent le rapport

$$\frac{\text{intensité lumineuse}}{\text{puissance développée par le générateur}}$$

est aussi plus grand avec un fort courant, pour l'arc de 1 mm que pour celui de 2 mm. Donc, avec des courants intenses constants, l'arc court à négatif bien effilé a tous les avantages sur l'arc un peu plus

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

long à négatif épointé; non seulement il donne plus de lumière, mais il a un meilleur rendement. Voyons s'il donne un meilleur rendement, non seulement que les arcs un peu plus longs que lui, mais aussi que les arcs de toutes longueurs pour une même intensité de courant.

Au point de vue économique deux choses sont essentielles dans l'arc. Premièrement il faut que la plus grande quantité possible de l'énergie fournie à l'arc soit convertie en lumière, et secondement il faut s'arranger pour que la plus grande partie possible de cette lumière puisse être utilisée. Eu égard à la première considération, j'ai démontré ailleurs que la puissance fournie à un arc de l mm, entre des charbons homogènes de 11 mm et 9 mm, avec un courant de I ampères, est

$$[(38,88 + 2,07\,l)\mathrm{I} + 11,66 + 10,54\,l]\,\text{watts}.$$

De cette puissance, comme il s'ensuit de ce que j'ai constaté à Bristol en 1898,

$$(38,88\,\mathrm{I} + 11,66 + 3,1\,l)\,\text{watts}$$

sont dépensés aux jonctions des deux charbons avec l'arc gazeux et

$$(2,07\,\mathrm{I} + 7,44)\,l\ \text{watts}$$

sont dépensés dans l'arc gazeux lui-même.

Ainsi, pour chaque augmentation de l'écart de 1 mm, il y a une augmentation de 3,1 watts seulement dans la puissance fournie à la seule jonction du cratère, car le terme $3,1\,l$ appartient au crayon positif, et une augmentation de $(2,07\,\mathrm{I} + 7,44)$ watts dans la puissance dépensée dans l'arc gazeux.

Avec un courant constant de 10 ampères par exemple, l'augmentation de puissance demandée au cratère pour chaque allongement de 1 mm de l'arc n'est que 3 watts, pendant que l'arc gazeux, qui ne fournit qu'une minime fraction de la lumière totale, exige 25 watts, huit fois autant. Il est donc évident que la méthode la plus économique pour convertir la puissance en lumière consiste à employer un arc aussi court que possible.

L'arc court donc, pour n'importe quel courant, est doublement économique en ce qui concerne la *production* de la lumière. Il est économique, comme je l'ai déjà signalé, parce qu'il s'approprie une grande partie de la puissance développée par le générateur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Il est économique parce qu'il transforme une grande partie de cette puissance en lumière.

Cependant, les propriétés de l'arc si court de 1 mm ou environ n'ont pas, jusqu'ici, été bien reconnues; elles ont été obscurcies, comme la lumière du cratère, par le crayon négatif. A quoi bon toute cette économie dans la *création* de la lumière, si, après tout, elle est enfermée comme dans une boîte? C'est ici qu'intervient l'arc très court *à courants intenses*. Dans cet arc, la lumière créée n'est pas enfermée entre les deux charbons; la pointe bien effilée du négatif laisse passer plus de lumière que si l'arc était deux ou trois fois plus long, avec un négatif épointé. Non seulement l'arc court transforme la plus grande partie possible de la puissance du générateur en lumière, mais s'il est en même temps à courant intense il nous permet d'utiliser la plus grande partie possible de cette lumière. En somme l'arc très court à grand courant réunit toutes les conditions du maximum d'économie.

Pour prouver que ce que je dis là est autre chose qu'une théorie, nous pouvons de nouveau consulter cette mine de richesses expérimentales que sont les recherches de M. Blondel.

Dans ses recherches à courant constant, M. Blondel a employé, entre autres, quatre paires de charbons de la même qualité, les positifs à âme et les négatifs homogènes, avec des diamètres de 18-14, de 14-12, de 10-10 et de 8-6 mm.

J'ai déduit des chiffres qu'il a donnés dans ses Tableaux, pour chacune de ces paires de charbons, les courbes qui reliaient le rendement et la longueur de l'arc, pour des arcs de 0 mm jusqu'à 10 mm et pour un courant constant de 10 ampères. Pour l'une des paires (10-10), le rendement maximum était mal défini, mais, pour les trois autres, il se réalisait avec des arcs de 1 mm, de 0,7 mm et de 1,25 mm respectivement. Ainsi, même avec des charbons aussi grands que 18 mm et 14 mm, et un courant aussi petit que 10 ampères, c'est l'arc si court de 1 mm qui est le plus économique.

Il y a une autre considération qui explique l'économie réalisée avec les arcs courts : c'est que le crayon négatif, sinon les deux crayons, se consume moins vite que dans l'arc long pour une même intensité de courant. Il y a deux raisons à cela : D'abord, l'arc court s'étend plus loin le long du négatif et ainsi le protège mieux de l'air. Ensuite, le charbon qui est rejeté du crayon positif,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

au lieu de se répandre et d'être perdu, reste sur la pointe du négatif et y forme même, je crois, cette pointe supplémentaire qui est la cause principale de l'économie des arcs courts à courants intenses.

L'aiguisement du charbon négatif avec les grands courants et une petite longueur a donc une valeur véritablement pratique. Elle nous permet d'approcher des conditions idéales pour l'arc quant à l'économie. Ces conditions idéales sont :

1° Que l'écart entre les charbons soit nul;

2° Que l'extrémité du crayon négatif soit infiniment mince.

Il est vrai que cet idéal ne peut jamais se réaliser, mais il est toujours utile de connaître l'idéal, car il nous montre la direction du progrès. Le progrès le plus évident dans ce cas serait :

1° D'employer avec des charbons donnés les arcs les plus courts et les courants les plus intenses possible sans approcher trop près du sifflement;

2° De trouver un crayon négatif qui aurait dans l'arc une extrémité plus longue et plus mince que celle des charbons employés à présent, et qui brûlerait néanmoins beaucoup plus lentement.

Nous arrivons maintenant au second point d'intensité maximum des courbes qui relient l'intensité lumineuse de l'arc à sa longueur (C, *fig.* 3). Ce point-ci, comme nous l'avons déjà vu, ne dépend ni des changements dans les formes des charbons, ni des variations d'intensité dans les quatre sources les moins intenses de l'arc. C'est donc à la quantité de lumière provenant du cratère qu'il faut attribuer les variations de lumière qui produisent cette seconde diminution d'intensité au delà d'une certaine longueur d'arc. Cette diminution diffère de la première dont nous avons parlé, en ce qu'elle se produit avec les courants de n'importe quelle intensité.

La quantité de lumière reçue du cratère ne peut dépendre que de trois causes : 1° l'étendue du cratère; 2° son éclat intrinsèque; 3° les obstacles offerts au passage de sa lumière par le crayon négatif ou autre chose. Pour ce qui est de son étendue, j'ai déjà démontré qu'elle *augmente* avec l'écartement des charbons. Quant à son éclat intrinsèque, nous avons vu que Sir William Abney l'a trouvé absolument constant.

Il est vrai que M. Blondel a cru trouver que l'éclat maximum du cratère variait, dans une de ses expériences, de 163 bougies déci-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

males par millimètre carré, avec un courant de 5 ampères, jusqu'à 210 bougies : mm^2 avec un courant de 25 ampères. Mais, comme il l'a remarqué en même temps, ce genre de mesures est bien difficile à faire, à cause du changement continuel de la position du cratère : donc il ne faut pas trop s'y fier; du reste, même si les mesures avaient pu être exactes, il est impossible de croire que les variations observées dénotent des changements de l'éclat intrinsèque du cratère; car, si cet éclat n'est pas constant, la température du cratère ne peut être constante non plus. Or les expériences de Rossetti, de Nakano et de plusieurs autres observateurs, mais surtout celles de Violle, prouvent d'une façon concluante que la température du cratère est absolument constante à la pression de l'atmosphère. Donc, ce n'est pas à de vraies variations de l'éclat du cratère que l'on peut attribuer ses variations apparentes, et, par conséquent, ce n'est pas une diminution de l'éclat intrinsèque du cratère qui peut être la cause de l'amoindrissement de l'intensité lumineuse de l'arc au delà d'une certaine longueur.

Il ne reste qu'une seule manière d'expliquer cet amoindrissement : c'est par un empêchement quelconque, autre que celui qui est présenté par le crayon négatif; car celui-ci, comme nous l'avons vu, arrête la lumière du cratère de moins en moins à partir d'une longueur d'arc de 3 mm environ. Nous avons donc à chercher quelque autre obstacle à la lumière du cratère.

En songeant à toutes les causes qui pourraient contribuer à un tel empêchement, il m'est venu l'idée que quoique la lumière *émise* par millimètre carré du cratère soit nécessairement constante, à cause de la constance de sa température, il n'en est pas du tout de même avec celle qui rencontre les yeux ou l'écran du photomètre. Car, en passant du cratère aux yeux, la lumière traverse nécessairement une région pleine d'une substance qu'on appelle la *vapeur de charbon*. Si donc cette substance pouvait, par exemple, absorber une quantité de lumière perceptible, en allongeant l'arc on augmenterait la quantité de substance absorbante que les rayons auraient à traverser, et l'on diminuerait ainsi la quantité de lumière qui en sortirait.

On pourrait objecter à cette théorie qu'il n'y a jamais assez de vapeur pour absorber la lumière au point de causer la diminution d'intensité dont il s'agit. Il n'en serait probablement pas ainsi si

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

c'était de la vapeur pure et simple. Mais, loin de là, déjà en 1822 Silliman, éditeur du journal de ce nom, a observé (fait parfaitement reconnu depuis lors) qu'il y avait toujours un courant continu de *particules solides* de charbon rejeté du pôle positif vers le négatif.

En 1897 également, Herzfeld, à la suite d'une belle expérience, a réussi à attirer ces particules hors de l'arc, sur une plaque bien isolée et chargée à un haut potentiel, placée à 8 cm de l'arc.

Nous voyons donc que l'arc ne peut pas être composé de *vapeur* seulement; tout au contraire, il doit avoir une composition très complexe : vapeur, gaz et particules de charbon solide. Or, les particules solides, puisqu'elles sont chauffées à blanc, doivent certainement réfléchir une partie de chaque rayon qui les frappe, en réfractant et absorbant d'autres parties. Par conséquent, cet arc, dit *gazeux*, mais qui n'est pas du tout purement gazeux, doit projeter une ombre. Donc en faisant passer la lumière du cratère d'un arc à travers un autre arc, l'ombre du second devra se montrer sur l'écran qui recevra la lumière.

Pour vérifier ce raisonnement, M. Mather a eu la bonté de faire l'expérience pour moi, et à coup sûr l'ombre du second arc se projette bien nettement sur l'écran. Elle avait la forme donnée par la *fig.* 5, qui est la copie d'une photographie prise pour moi par

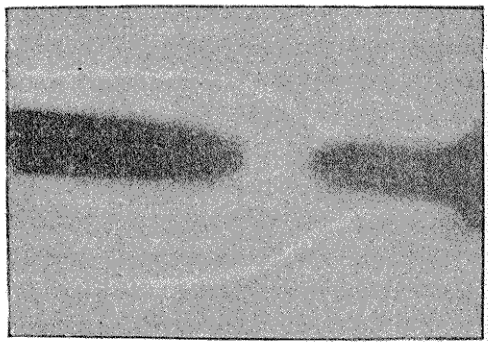


Fig. 5.

MM. Fithian et Denny, deux des étudiants du *Central Technical College*. Il était bien difficile de photographier une ombre si changeante et si délicate entre crayons si noirs, et malheureusement

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

les nuances de l'ombre sont perdues. Mais on voit bien sa forme et la ligne de lumière qui l'environne. Cette ligne, M. Mather a été le premier à l'observer, et il a tout de suite vu sa signification. C'est que l'arc est une lentille qui réfracte ainsi la lumière qui la traverse.

De la forme de cette lentille on peut déduire que l'arc est moins dense que l'air chaud qui l'environne, car elle est d'une forme doublement convexe et cylindrique, et, si elle était plus épaisse que l'air, avec cette forme-là, son ombre aurait une tache blanche de lumière *au centre*. L'arc se conduit donc comme une lentille divergente.

Si l'arc ne faisait que réfracter la lumière du cratère, ou si, même, il la réfractait et la réfléchissait seulement, il n'y aurait pas besoin, pour cela, qu'une partie de cette lumière fût perdue. Cela ne pourrait changer la *disposition* de la lumière sans en changer la quantité.

Il est vrai qu'en réfractant la lumière du cratère l'arc courbe, de façon à les faire absorber par le crayon négatif, quelques rayons qui, sans cela, auraient atteint l'œil. Mais, après l'examen géométrique de plusieurs images fournies par des arcs de différentes longueurs avec le même courant, je me suis convaincu que cette absorption, qui est toujours assez petite, en effet, diminue quand l'arc s'allonge. Ainsi, pour ce qui concerne cette réfraction, l'intensité lumineuse de l'arc doit *augmenter* quand on écarte de plus en plus les charbons. Non, ce n'est pas avec une absorption dans les charbons que nous avons affaire, c'est avec une perte actuelle de lumière par absorption dans l'intervalle des charbons. Voyons maintenant ce qui doit arriver quand la lumière du cratère traverse cet espace plein de vapeur, de gaz et de particules solides de charbon qu'on appelle l'*arc gazeux*.

Il est convenu que la lumière du cratère est en partie réfléchie et en partie réfractée par chaque particule de charbon solide qu'elle rencontre. Donc nul rayon qui rencontre une particule ne passera droit à travers l'arc. Beaucoup n'en rencontreront peut-être pas du tout, d'autres n'en rencontreront que quelques-unes, mais d'autres seront réfléchis et réfractés, de particule en particule, de long en large; et à chaque réflexion et réfraction un peu de leur lumière sera absorbée. Plus il y aura de particules dans l'arc, plus

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

la lumière du cratère sera absorbée. Si donc il y a plus de ces particules dans l'arc long que dans celui qui est court, c'est tout ce qu'il faut pour que l'intensité lumineuse de l'arc diminue au delà d'une certaine longueur. Car en écartant les charbons (quand il n'y a plus de pointe supplémentaire au négatif), on aura un accroissement de l'intensité lumineuse à cause de l'augmentation de l'écart entre les charbons et une diminution à cause de l'absorption de la lumière du cratère par les particules solides dans l'arc. Ainsi quand, en allongeant l'arc, l'accroissement de lumière sera moins grand que l'amoindrissement, l'intensité commencera à diminuer.

Il ne reste plus qu'à démontrer qu'il y a plus de particules solides dans l'arc long que dans l'arc court. C'est ce que j'essaierai de faire.

Le charbon s'évapore à la surface du cratère, tout le monde le reconnaît. Mais comment se trouve-t-il que l'on est d'accord aussi pour croire qu'il reste à l'état de vapeur, même à une distance de 1 cm du cratère ou plus? La vapeur d'eau, quand elle quitte le bec d'une bouillotte, ne reste à l'état de vapeur que jusqu'à une très petite distance, et plus loin elle devient du brouillard. Qu'est-ce qui empêche la vapeur de charbon de se transformer en brouillard de charbon à une petite, une très petite distance du cratère? Car il y a beaucoup plus de différence entre les températures de la vapeur de charbon et de l'air qui environne l'arc qu'il n'y en a entre les températures de la vapeur d'eau et de l'air qui environne le bec de la bouillotte. Il est vrai que le courant, en traversant l'arc, doit le chauffer; mais il le chauffe également tout du long, tandis que l'air doit refroidir beaucoup plus la partie de la vapeur qui est loin du siège de vaporisation, le cratère, que celle qui en est tout près. Donc, il faut que la température de l'arc aille sans cesse en diminuant quand on va du cratère jusqu'au crayon négatif.

Il y a une petite expérience que j'ai faite assez souvent et qui démontre bien que la température de l'arc, tout près du cratère, est plus haute qu'en tout autre point. En mettant l'extrémité d'un petit crayon de charbon, bien mince, dans l'arc, près du cratère, on peut le courber assez pour obtenir un angle perceptible en le pressant contre le crayon positif; mais il n'y a aucune autre partie

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de l'arc où cela puisse se faire. Si, par exemple, on introduit deux de ces petits charbons dans l'arc, et qu'on les presse l'un contre l'autre, il est impossible de les courber. C'est la même chose en pressant l'un d'eux contre le négatif. Il ne fléchit pas le moins du monde. Cela prouve, je crois, que, tout près du cratère, l'arc est si chaud qu'il peut amollir le charbon, mais que, plus loin, il est trop froid pour le faire. Il est donc plus que probable que la vapeur de charbon, en quittant le cratère, agit tout à fait comme la vapeur d'eau en quittant le bec d'une bouillotte. Jusqu'à une toute petite distance, elle reste à l'état de vapeur, et, plus loin, elle devient du brouillard de charbon se refroidissant de plus en plus à mesure qu'elle s'éloigne de plus en plus du cratère.

Si la couche de vapeur étendue sur le cratère était fort mince, et si elle avait (comme toutes les vapeurs) une résistance spécifique très grande, la résistance de cette couche pourrait être assez forte pour expliquer au moins partiellement la grande différence de potentiel que l'on trouve toujours entre le charbon positif et l'arc. Le brouillard, au contraire, qui serait mêlé de gaz brûlants n'aurait qu'une résistance relativement médiocre, et par conséquent la résistance de l'arc gazeux serait relativement petite, comme cela se trouve en réalité.

Quoi qu'il en soit, si la vapeur de charbon se transforme en brouillard à une petite distance du cratère (et les particules solides de charbon rejetées par le positif en aideraient la transformation), en allongeant l'arc on augmente la quantité de ce brouillard, et l'on force la lumière du cratère à traverser une plus grande partie de milieu absorbant; de sorte que la quantité de cette lumière qui est absorbée par l'arc s'accroît avec la longueur de l'arc.

Il n'est guère probable que les rayons de toutes couleurs soient également absorbés par la vapeur de l'arc, et, en effet, il y a des indications que, tout au contraire, l'absorption est bien élective.

Le Dr Russell et Sir W. Abney ont constaté que la lumière du cratère ressemble beaucoup à celle du soleil, à cela près que la première a un peu plus de rayons orangés et verts, et un peu moins de rayons bleus. Ils ont mesuré la lumière du cratère seulement, et pour cela ils l'ont mesurée dans les directions où l'arc apparaissait aussi peu que possible entre le cratère et le spectroscope.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite, la lumière du cratère, quand elle est vue à travers une couche mince du brouillard de l'arc, est *plus jaune* que la lumière du soleil; mais quand elle a traversé le brouillard d'un arc long, cette même lumière a une teinte tout à fait violette, comme on peut facilement le déduire de la couleur des globes qui entourent les lampes à arc dans les rues, lorsque les arcs sont longs. Ces globes ont une teinte violette plus ou moins foncée selon la longueur de l'arc, et cette couleur-là ne dépend nullement, comme on l'a dit, du fait qu'on est accoutumé, la nuit, à ne voir que la lumière jaune du gaz et des lampes à incandescence. En plein jour, ces globes ont la même teinte violette quand ils entourent des arcs longs; j'ai vu, en effet, l'intérieur d'une boîte, qui entourait un arc long, inondé d'une lumière violette comme s'il était éclairé par un verre de couleur, *la boîte conservant sa couleur même quand elle était ouverte au grand jour*. Il n'y a donc aucun doute que la lumière du cratère prend une teinte violette en traversant l'arc, et que la teinte se fonce quand l'arc s'allonge. Quand la lumière prend une teinte semblable en traversant un verre coloré, on dit que le verre *absorbe* quelques rayons et *laisse passer* les autres. Pourquoi n'admettrait-on pas la même explication quand la lumière traverse le brouillard de l'arc?

Voici ce qui arrive, selon toute probabilité. L'arc entier, excepté une couche de vapeur très mince et voisine du cratère, se compose de gaz incandescents où des particules de charbon solide se forment et tombent continuellement. La vapeur et les gaz doivent n'absorber qu'une partie, très petite probablement, de la lumière qui sort du cratère. Sous l'influence de cette cause, la lumière de l'arc ne diminuerait probablement pas à partir d'une certaine longueur; mais il y a aussi des particules de charbon solide dans le brouillard de l'arc. Ces particules doivent, comme je l'ai déjà dit, réfléchir chaque rayon qui les rencontre, de sorte que beaucoup des rayons émis par le cratère doivent être réfléchis de particule en particule, de long en large, en éprouvant un changement de couleur et une diminution d'éclat à chaque rencontre. Les rayons qui ont éprouvé beaucoup de ces réflexions intérieures doivent donc sortir de l'arc dans un état bien différent de celui où ils ont quitté le cratère.

Supposons, maintenant, que les particules de charbon soient

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

capables d'absorber la lumière orangée et une certaine quantité de lumière verte, mais qu'elles laissent passer toute la lumière violette. Alors, après chaque réflexion, la lumière devient de plus en plus violette, et celle qui rencontre beaucoup de particules est tout à fait violette. Les gaz incandescents ne donnent jamais de lumière éblouissante; il s'ensuit que, quand on regarde le brouillard de l'arc seul, en couvrant les deux charbons, la partie de la lumière du cratère transmise aux yeux par les particules solides noie la lumière émise par les gaz, et l'on n'aperçoit qu'une lumière violette ou pourpre.

Il y a une expérience très simple qui démontre parfaitement que la lumière émise par le brouillard de l'arc est violette, tandis que celle qui est émise par le cratère et la tache blanche du charbon négatif est blanche. On prend une plaque de métal peu épaisse, percée d'une fente *a* (*fig.* 6) de 3 cm ou 4 cm de longueur et

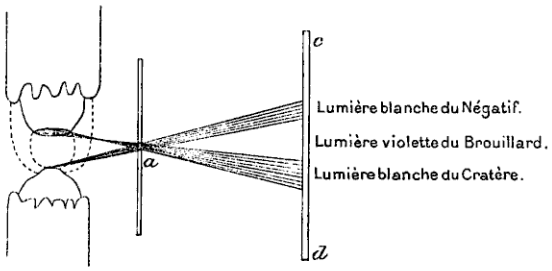


Fig. 6.

de 1 mm ou 2 mm de largeur, et on la tient verticalement près de l'arc dans une position telle que la fente soit horizontale et à égale distance des bouts des deux charbons. La lumière de l'arc qui traverse la fente est reçue sur un écran blanc vertical *cd* (*fig.* 7) placé à 30 cm ou 40 cm de l'arc. Cette lumière forme trois bandes horizontales sur l'écran, celles d'en haut et d'en bas étant blanches et celle du milieu ayant une teinte violette très vive.

Il va sans dire que la fente n'est qu'un trou d'épingle allongé horizontalement; dans ces conditions la lumière d'en haut vient du charbon négatif, celle d'en bas est émise par le cratère, et celle du milieu par l'arc lui-même, c'est-à-dire par le brouillard de l'arc.

Une expérience plus simple encore consiste à intercepter le

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

charbon positif et la partie supérieure de l'arc par quelque chose d'opaque, la main par exemple. L'ombre sur l'écran se trouve alors bordée d'une large bande d'un violet rouge; cette bande étant la portion de l'écran qui est éclairée par le brouillard et le crayon négatif seuls (la partie rouge du dernier donne une teinte rose au violet). Au-dessous de la bande se trouve la partie de l'écran qui est éclairée par les trois sources de lumière à la fois : le cratère, la tache blanche et le brouillard de l'arc, et cette partie-là a naturellement l'air d'être tout à fait blanche par contraste avec la bande violette. Un schéma de cette expérience est donné *fig.* 7, où *ab*

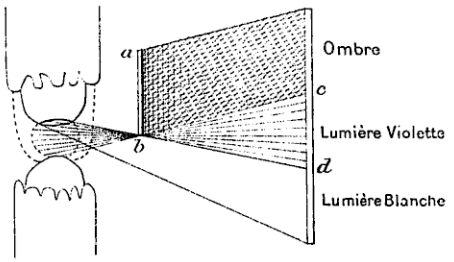


Fig. 7.

est une plaque de métal et *cd* l'écran blanc qui reçoit la lumière. La partie de l'écran qui est au-dessus de *c* est entièrement dans l'ombre, celle qui est entre *c* et *d* est éclairée par le brouillard et le crayon négatif seulement, et celle qui est au-dessous de *d* est éclairée par le cratère aussi bien que par les deux autres sources.

Nous avons donc trois faits à concilier les uns avec les autres :

1° Le brouillard de l'arc émet une lumière violette, tandis que celle du cratère et de l'extrémité du négatif est, en effet, blanche.

2° La lumière de toutes les parties de l'arc, toutes les sources comprises, devient de plus en plus violette quand on allonge de plus en plus l'arc.

3° La quantité de lumière totale provenant de toutes les sources de l'arc diminue quand l'arc dépasse une certaine longueur.

S'il n'y avait que les deux premières conditions, on pourrait très bien les expliquer en supposant que l'espace compris entre les charbons est rempli de vapeurs et de gaz incandescents qui émettent

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

une lumière violette assez brillante pour donner à la lumière blanche du cratère une teinte violette assez forte. Cependant, puisqu'il a été démontré plus haut que la lumière émise par chaque source de l'arc augmente constamment avec la longueur de l'arc, cette hypothèse n'explique pas la diminution de la lumière quand les arcs sont allongés au delà d'une certaine longueur.

Si, au contraire, on suppose qu'il y a une absorption des rayons autres que les rayons violets dans le brouillard de l'arc, les trois conditions énumérées plus haut se concilient parfaitement. On voit pourquoi la teinte de l'arc entier devient de plus en plus violette quand on allonge l'arc de plus en plus, et l'on voit aussi pourquoi le flux de lumière total commence à diminuer à partir du moment où l'arc est assez grand pour que l'augmentation de lumière provenant de son allongement soit plus que contrebalancée par l'augmentation de l'absorption de la lumière.

L'absorption et la réflexion intérieures dans l'arc expliquent une particularité très curieuse signalée par M. Swinburne dans la discussion d'une Communication que M. Trotter a faite en 1892 sur la lumière de l'arc. M. Trotter a montré des courbes publiées par Sir W. Abney, lesquelles démontrent que la lumière du cratère ne diffère de celle du soleil que par un petit excès de rayons orangés et verts et un léger défaut de rayons bleus. M. Swinburne a signalé que, puisque la couleur de la lumière du cratère ressemble tant à celle de la lumière du soleil, le cratère et le soleil doivent avoir à peu près la même température; mais que, puisque le soleil a un éclat intrinsèque plus de dix fois plus grand que le cratère, le pouvoir émissif du soleil doit être dix fois plus grand que celui du cratère, ce qui est peu croyable. Cette objection serait parfaitement valable si la lumière du soleil et la lumière *émise* par le cratère se ressemblaient vraiment autant par la couleur. Mais Sir W. Abney n'a pu mesurer la lumière provenant du cratère qu'après qu'elle eut traversé une certaine quantité de brouillard de charbon, car il est impossible à la lumière du cratère de sortir sans traverser un peu de ce brouillard. Supposons donc que la lumière émise par le cratère soit beaucoup plus jaune que celle du soleil, mais qu'en traversant le brouillard elle soit privée d'une partie assez considérable de ses rayons orangés et verts; alors en atteignant le photomètre, sa couleur sera beaucoup plus voisine de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

celle de la lumière du soleil que quand elle quitte le cratère; elle sera plus bleue et paraîtra être émise par une surface d'une température beaucoup plus haute que la vraie température du cratère. Ainsi, si le brouillard absorbe vraiment une partie considérable des rayons orangés et verts, l'objection de M. Swinburne n'existe plus, car la vraie couleur de la lumière du cratère est beaucoup plus jaune qu'elle ne paraît quand elle est mesurée par le photomètre.

RENDEMENT LUMINEUX DES LAMPES ÉLECTRIQUES A INCANDESCENCE A FILAMENT DE CARBONE

(Système permettant d'accroître ce rendement);

PAR M. GUSTAVE WEISSMANN,

Ingénieur des Constructions civiles,
Ancien Élève de l'École des Ponts et Chaussées.

Dans son remarquable Rapport sur les lampes électriques, mon excellent maître M. Blondel fait justement ressortir qu'en pratique, sur les secteurs, on ne peut guère abaisser au-dessous de 3,5 watts par bougie décimale la consommation moyenne d'une lampe à incandescence à filament de carbone.

Il est à propos de rapprocher de cette moyenne la consommation spécifique de ces lampes à incandescence en se reportant à leur puissance lumineuse. Un article paru récemment dans la *Revue pratique d'Électricité* du 20 mars 1900 mentionne sous le titre de *Recherches sur les lampes à incandescence électrique* quelques renseignements fort intéressants relativement à cette question :

« Lorsqu'il a été question d'installer l'éclairage électrique à la » Chambre des députés, à Paris, une commission d'électriciens » et d'ingénieurs, faisant autorité en la matière, a été chargée de » préparer un cahier des charges de l'entreprise. Après de labo- » rieuses études poursuivies en 1894 et 1895, cette commission, » composée de MM. Mascart, Potier, Bougarel, Hospitalier, » Michel-Lévy, Monnier et Seligmann-Lui, a fixé la dépense » d'énergie électrique des divers types de lampes destinées à pro- » diguer la lumière dans les recoins les plus secrets du Palais de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

» nos représentants. Nous avons admis, depuis lors, comme con-
» sommations-types :

100 watts	pour la lampe de	32 bougies
50	—	16 —
35	—	10 —
22	—	5 —

» soit, en prenant les extrêmes, de 3,1 à 4,4 watts par bougie.
» Toutefois, par un sentiment de tolérance, les auteurs du cahier
» des charges avaient eu le soin de spécifier que « toute lampe
» dont le pouvoir éclairant par watt serait inférieur de 15 pour 100
» au pouvoir éclairant spécifique prévu, serait refusée », ce qui
» ramenait en réalité à 3,5 et 5 watts par bougie les limites pra-
» tiques extrêmes de consommation. »

Ce rapport est fort adroitement tourné, car il donne une idée fort nette de la situation en matière de lampes à incandescence. Les fabricants annoncent bien des lampes de consommation inférieure à 3,5 watts, mais lorsqu'il s'agit d'une fourniture officielle ils réclament une tolérance de 15 pour 100 sur le pouvoir éclairant par watt, ce qui ramène en réalité et indirectement à 3,5 watts toute consommation spécifique soi-disant inférieure.

Il ressort de l'examen des chiffres ci-dessus :

1° Que la consommation moyenne pratique d'une lampe à incandescence ordinaire serait plutôt supérieure à 3,5 watts par bougie décimale;

2° Que cette consommation spécifique décroît dans des proportions très grandes avec le pouvoir éclairant de la lampe.

Elle passe de 3,5 watts à 5 watts lorsqu'on passe de la lampe de 32 bougies 100 volts, par exemple, à celle de 5 bougies 100 volts, ce qui représente un abaissement énorme de 40 pour 100 environ sur le rendement lumineux.

On doit déduire de cette seconde remarque que la lampe de 200 volts, malgré les espérances de quelques-uns, doit être condamnée *a priori*. Le filament de la lampe de 200 volts 16 bougies n'est, en effet, que la combinaison de deux filaments 100 volts 8 bougies, et la consommation spécifique de ceux-ci étant comprise entre 4 et 5 watts, on ne peut attendre de la lampe de 200 volts un rendement lumineux acceptable.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Des expériences personnelles m'ont permis de constater que sous diverses tensions autres que 100 volts, le rendement lumineux décroissait avec le pouvoir éclairant de la lampe. Il faut en conclure que sous une tension *quelconque* constante, le rendement lumineux décroît avec le pouvoir éclairant.

Il était rationnel de rechercher s'il n'était pas possible d'obtenir le même rendement pour toutes les lampes, quel que fût leur pouvoir éclairant. L'expérience m'a prouvé que c'était parfaitement réalisable et que la valeur du rendement ne dépendait, dans de certaines limites, que de la valeur de la tension.

Pour le prouver il suffit de se rappeler que le filament d'une lampe de forte intensité lumineuse, dont le rendement est bon, lampe de 100 volts 50 bougies, par exemple, n'est en somme que la combinaison de cinq filaments de lampes de 10 bougies 20 volts et que la lampe qu'on établirait avec un seul de ces cinq filaments élémentaires ne serait autre qu'une lampe de 10 bougies, à laquelle on aurait conservé sensiblement le même rendement qu'à celle de 50 bougies dont il est question ci-dessus.

La nécessité de faire varier la tension résulte de cette observation; et à la suite d'autres et nombreux essais sur des lampes d'intensité lumineuse différente, je suis arrivé à mettre en évidence cet autre principe, à savoir : que pour tirer le maximum de rendement des lampes à incandescence il fallait *approprier la tension à ces lampes, selon leur intensité lumineuse respective,* et non, ainsi qu'on l'a fait à tort jusqu'à ce jour, adapter tant bien que mal et telles quelles, les lampes sur la tension de distribution.

Les recherches auxquelles je me suis livré dans ce sens, depuis bientôt trois ans, m'ont fait étudier tout spécialement les lampes de très basses tensions et m'ont permis, en dehors des considérations ci-dessus, de reconnaître que ces lampes à filaments gros, 20 volts par exemple, étaient bien supérieures aux lampes à filaments fins usitées généralement. On verra plus loin quelles faibles consommations spécifiques on peut atteindre avec ces lampes. Elles sont très économiques et ont certaines propriétés qui les font très favorablement apprécier par les intéressés, notamment celles de donner une lumière d'un éclat et d'une blancheur remarquables et aussi une lumière qui se maintient blanche jusqu'à la mort de la lampe.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Bien des arguments peuvent encore être présentés en faveur de ces lampes de basses tensions.

Les filaments gros, dit M. Blondel dans son Rapport, grâce à leur solidité mécanique et à leur revêtement épais de graphite, peuvent supporter une température plus élevée et leur masse fait un volant de chaleur qui réduit les effets des variations de voltages.

M. Blondel fait remarquer aussi que, d'après le professeur Weber, qui a fait une savante théorie de l'incandescence, la température atteint, dans les lampes à incandescence, de 1565° à 1588°, et atteint 40° de plus pour les lampes à plus gros filaments. Or, on sait combien s'augmente vite le rendement lumineux avec la température.

On sait aussi que l'éclat intrinsèque à température donnée croît avec le diamètre du filament.

Des différences notables existent encore entre les filaments gros et les filaments fins.

« Pour les filaments fins, l'éclat va en diminuant du centre au bord du filament. Pour les gros filaments, au contraire, dont le diamètre dépasse de beaucoup l'épaisseur limite de rayonnement du carbone, la diminution de l'éclat ne se produit que très près des bords. »

Toutes ces propriétés caractéristiques des lampes à gros filaments, ces différences qu'elles présentent comparativement aux lampes ordinaires, propriétés et différences pleinement confirmées par l'expérience, portent à conclure que les lampes à gros filaments de basses tensions sont des lampes tout à fait spéciales, et qu'il serait désirable qu'une classification fût faite entre toutes ces lampes qui, tout en étant de même essence, présentent des propriétés aussi différentes.

Par un choix judicieux de l'épaisseur des filaments selon les cas, on peut très certainement obtenir des rendements lumineux, incomparablement meilleurs que ceux forcément acceptés aujourd'hui. Mais un semblable choix des filaments est rendu impossible par la nature même de nos systèmes de distribution. On s'est, en effet, arrêté à la tension de 100 volts pour les besoins de la canalisation et cette tension, qui n'a même pas l'avantage de satisfaire actuellement les sociétés exploitantes, puisque celles-ci cherchent

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

à la doubler, a par contre le regrettable désavantage de paralyser complètement l'amélioration des lampes.

C'est à la nature de nos systèmes de distribution actuels que nous devons de ne pouvoir, depuis de si longues années, enregistrer aucun progrès sur le rendement lumineux des lampes à incandescence à filament de carbone.

La tension de 100 volts est une tension critique pour la fabrication des lampes.

A 100 volts déjà certaines lampes, celles de très faible pouvoir éclairant, sont irréalisables; à 200 volts ce sont les lampes les plus courantes qui ne peuvent être obtenues convenablement.

Aux tensions inférieures à 100 volts, au contraire, toutes les lampes de tel pouvoir éclairant proposé deviennent faciles à établir, et je tiens à votre disposition, comme preuves, des lampes de deux bougies et une bougie même, qui peuvent l'emporter comme rendement lumineux sur celles de seize bougies ordinaires.

Me basant sur toutes ces considérations que je viens de rappeler, j'ai imaginé, ainsi que le signale M. Blondel, — j'ajoute avec sa collaboration, — un système nouveau de distribution et d'utilisation des courants électriques pour l'éclairage, système qui me paraît concilier les *desiderata* de sens opposés des secteurs et des consommateurs.

J'en ai obtenu déjà les meilleurs résultats et le succès que j'obtiens auprès du public à l'Exposition me fait augurer quelques importantes et intéressantes applications pour cet hiver, c'est-à-dire l'entrée très prochaine du système dans le domaine de l'exploitation.

Ce système extrêmement simple d'application consiste à placer chez le consommateur, entre chaque groupe de lampes et l'interrupteur qui le commande, un tout petit transformateur à circuit magnétique fermé qui abaisse la tension du courant distribué au degré voulu pour ce groupe de lampes. L'interrupteur est sur le primaire du transformateur de telle sorte que le transformateur fonctionne automatiquement avec la lampe, ne travaille jamais à vide et toujours à pleine charge. Le rendement de ces petits transformateurs variant de 85 pour 100 pour le type d'une seule lampe à 96 pour 100 pour un groupe de cinq lampes, le rendement moyen de la transformation pour une installation complète peut

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

être évalué, en raison des divers groupages de lampes, de 92 à 93 pour 100.

Ces petits transformateurs sont d'un volume tellement réduit qu'ils peuvent être dissimulés avec la plus grande facilité, soit dans le pied d'une lampe de bureau, soit dans le pavillon d'un lustre ou sur tout emplacement quelconque d'un mur. Leur prix de revient est si minime, qu'ils peuvent être distribués à profusion dans l'installation même la plus modeste.

Les lampes que j'emploie sont du type de 20 volts et au-dessous. Elles sont de toutes les intensités lumineuses, depuis une bougie jusqu'à plusieurs centaines de bougies.

M. Blondel a probablement cru, en raison de certains résultats obtenus tout récemment, *hors ma présence,* devoir être réservé dans son Rapport quant aux chiffres de consommation et de baisse de lumière de mes lampes. Les chiffres qu'il indique ne peuvent se rapporter qu'à des types anciens de ces lampes. Celles que j'applique depuis plusieurs mois déjà accusent des rendements bien supérieurs à ceux ainsi signalés.

Mes derniers résultats obtenus ont été, pour une lampe de 22 volts, 16 bougies, les suivants :

16,5 bougies	au départ.....	Consommation de	1,67	watt	par	bougie (1)
15,5	— après 100 heures.	—	1,77	—	—	
14	— après 200 heures.	—	1,93	—	—	

Soit une consommation spécifique de 1,79 watt à 2,07 watts par bougie, transformation comprise, de 0 à 200 heures de durée avec une baisse de lumière de 6 pour 100 après 100 heures et de 15 pour 100 après 200 heures.

Il me serait facile d'indiquer quantité d'autres résultats se rapprochant de ceux-ci. Ceux que je viens d'indiquer ont l'avantage de se rapporter à une lampe qui fonctionne encore actuellement sur le secteur de la rive gauche de l'Exposition et qui peut être vérifiée par les intéressés dans mon stand.

Ainsi qu'on peut en juger par ces quelques chiffres cités à titre d'exemple, mon système permet d'accroître considérablement le rendement lumineux pratique des lampes à incandescence.

---

(1) Bougie allemande de paraffine égale, d'après les récents travaux de M. Ladorte, à 1,05 bougie décimale.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La consommation spécifique des lampes de très basses tensions dont il permet l'emploi est en effet environ moitié moindre que celle des lampes à filaments fins.

Il convient de faire remarquer que l'application de ce système ne nécessite aucun changement dans les canalisations intérieures, que les lampes qu'il comporte coûtent sensiblement le même prix que les lampes ordinaires.

J'ajoute que par de nombreuses expériences sur les lampes ordinaires *fonctionnant sur le secteur* j'ai constaté que celles-ci devraient être changées toutes les 300 heures ou 400 heures au maximum. Ces lampes, en raison de la finesse de leurs filaments, sont, en effet, très sensibles aux fluctuations de la tension du courant, et comme ces fluctuations atteignent jusqu'à 10 pour 100 et au delà, la baisse de lumière que l'on constate après 300 heures est au moins de 15 à 20 pour 100.

Les valeurs relatives pratiques des consommations totales atteintes, par exemple pour une lampe de 16 bougies après 400 heures de fonctionnement, peuvent être évaluées comme suit :

Pour une lampe de 100 *volts,* 16 *bougies*, à raison de 3,5 watts par bougie et 0,10 fr l'hectowatt-heure :

	fr
$56 \times 4 \times 0{,}10$	22,40
Prix d'une lampe.....	0,50
Total.....	22,90

Pour une lampe de 22 volts, 16 bougies, transformation comprise :

	fr
$28{,}8 \times 4 \times 0{,}10$	11,52
Prix de 2 lampes.....	1,00
Total.....	12,52

On économise donc par mon système, renouvellement de lampes et transformation compris, 10,38 fr sur 22,90 fr, soit 45 pour 100 environ. Cette économie peut être augmentée un peu en se contentant par exemple d'une durée moindre pour la lampe et en la faisant marcher à un régime plus économique encore, c'est ce qui m'a fait annoncer à l'Exposition 50 pour 100 d'économie sur les systèmes d'éclairage électrique existants.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

D'autres grandes applications non moins importantes sont encore possibles avec ce système.

Il offre notamment pour la canalisation à 200 volts au lieu de 100 une solution inattendue. Il permet en effet d'amener le courant chez l'abonné sous cette tension double de la tension ordinaire, en évitant la lampe de 200 volts et en procurant au contraire à l'abonné l'avantage d'une économie considérable de consommation.

Enfin, ce système crée à l'éclairage même un essor tout nouveau en permettant, par l'emploi des lampes de 2 et 1 bougie, la diffusion pratique de la lumière électrique et les effets décoratifs les plus variés irréalisables par les procédés ordinaires.

CONCLUSIONS.

S'il n'a pu être réalisé à ce jour aucun progrès relativement au rendement lumineux des lampes à incandescence à filament de carbone, cela ne tient uniquement qu'à la nature de nos systèmes de distribution d'énergie.

Pour accroître le rendement lumineux, la tension doit être abaissée bien au-dessous de 100 volts (de façon à permettre l'emploi de lampes à gros filaments) et appropriée au pouvoir éclairant respectif des lampes.

Mais ces conditions essentielles dont dépend le rendement sont en opposition absolue avec celles exigées par les besoins de la canalisation. Il conviendrait donc d'appliquer un système nouveau qui rendrait dans de certaines limites — et si je puis m'exprimer ainsi — les lampes indépendantes de la canalisation. Avec un tel système, on pourrait à la fois abaisser *ad libitum* la tension pour les lampes et rehausser la tension dans les câbles. Un système de ce genre est celui que j'ai décrit plus haut. Il est conçu dans une voie nouvelle et donne des résultats pratiques très importants; déjà très favorablement agréé par le public, il mérite à ce titre d'être pris en sérieuse considération.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

PROPOSITION D'UN NOUVEAU MODE DE TARIFICATION DE COURANT ÉLECTRIQUE;

PAR M. ÉTIENNE DE FODOR,
Directeur de la Société générale d'Électricité de Budapest.

La concurrence acharnée que la lumière électrique doit subir en ce temps a amené la plupart des stations à baisser le prix de vente du courant électrique, ou à accorder des rabais considérables sur le prix normal. Mais, malgré toutes ces concessions, on ne réussit pas à affaiblir la concurrence, et le résultat est que beaucoup de clients, qui autrefois introduisaient chez eux la lumière électrique, l'abandonnent pour un autre moyen d'éclairage. Ni les rabais les plus élevés, ni d'autres offres ne peuvent décider ces clients à rester fidèles à la lumière électrique, puisqu'ils trouvent ailleurs un éclairage meilleur marché, et ils le trouvent à un prix avec lequel toute concurrence de notre part est presque impossible.

Je suis donc d'avis qu'il faut en prendre son parti, et qu'il faut arriver à la conclusion que la lumière électrique n'est pas faite pour soutenir une concurrence effrénée avec d'autres modes d'éclairage, mais qu'elle est faite exclusivement pour les gens qui savent apprécier sa valeur et qui en useront sans en regarder le prix. Je ne crois pas que l'on puisse augmenter de beaucoup l'usage de la lumière électrique en accordant des rabais à l'infini, puisque le client, qui ne considère pas les avantages, mais seulement le *prix* de la lumière électrique, se montrera insatiable en fait de rabais. Mieux vaut donc le laisser s'en aller. D'un autre côté, il faut que nous facilitions au client qui veut décidément de la lumière électrique, l'accomplissement de son désir, en établissant un prix modéré de vente, et l'on devra se borner à cette clientèle, dont le nombre s'accroît lentement mais sûrement, au lieu de chercher à gagner à tout prix des clients qui vous abandonnent au premier moment où ils voient qu'ils trouveraient meilleur compte ailleurs.

S'il y a maintenant des *rabais* à accorder, il faudrait les mettre sur une base *juste* et équitable. Si nous donnons par exemple du rabais après un certain nombre de lampes-heures par an, il se peut très bien que ce nombre est atteint dans l'hiver, dans une période de l'année où nous avons beaucoup à faire, tandis que pendant l'été

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ce même client ne consommera rien. Il aura donc eu du rabais après une consommation qu'il aurait faite dans tous les cas, puisque la lumière électrique lui est une nécessité, et il l'aurait faite même s'il n'avait pu compter sur aucun rabais. Il se peut aussi qu'un client qui préfère brûler du gaz en hiver, use de la lumière électrique seulement en été, et celui-là n'aura pas de rabais, parce que, avec sa consommation restreinte, il n'atteindra pas le nombre de lampes-heures annuelles demandées. Pourtant ce dernier client a rendu service à l'entreprise électrique, en lui prenant du courant dans une période où l'usine travaille à perte. Pour être juste, il faudrait donc accommoder les rabais non à un nombre déterminé de consommation annuelle, *mais il faudrait les mettre en rapport avec la période de l'année dans laquelle cette consommation a eu lieu.*

Étant donnée la totalité de lampes-heures, fournies par une station centrale à ses abonnés, et en divisant cette somme par le nombre des lampes installées, on trouve pour chaque lampe une moyenne annuelle de fonctionnement qui reste assez constante.

En comparant les résultats de six années nous avons trouvé, par exemple, pour notre station de Budapest, que la moyenne était

En 1894.....	440	heures	par an pour	chaque lampe installée
1895.....	454	—	—	—
1896.....	462	—	—	—
1897.....	420	—	—	—
1898.....	418	—	—	—
1899.....	448	—	—	—

Je peux donc compter, presque avec certitude, que chaque lampe ajoutée à notre réseau me fournira environ 440 heures de fonctionnement par an, et c'est sur cette moyenne que je dois baser mon prix de vente du courant. Puisque cette moyenne ne varie pas beaucoup, je l'appelerai la *moyenne assurée* de fonctionnement.

Si maintenant nous subdivisons cette moyenne en douze parts, en faisant le pourcentage de chaque mois, nous trouvons que le fonctionnement se comporte dans les différents mois de la façon suivante :

En Janvier.....	13,6	pour 100	de la moyenne totale
Février.....	11,4	—	—
Mars.....	8,2	—	—

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En Avril.....	6,6	pour 100 de la	moyenne totale
Mai.....	4,3	—	—
Juin.....	2,8	—	—
Juillet	2,2	—	—
Août.....	3,2	—	—
Septembre.....	6,6	—	—
Octobre.....	11,4	—	—
Novembre.....	14,5	—	—
Décembre.....	15,2	—	—

Ce pourcentage moyen peut, dans certains cas, sensiblement différer du pourcentage réel. Il y a, par exemple, des particuliers consommant beaucoup plus de courant en février qu'en janvier, et qui ne consommeront presque rien en décembre. Il y a des commerçants qui n'usent pas de la lumière électrique en été, et il y en a d'autres qui en consomment plus en été qu'en hiver. Mais il est absolument impossible de prendre en considération toute la variété de ces cas anormaux, et nous devons nous en tenir à des circonstances normales, à une moyenne ordinaire, en un mot à notre moyenne assurée.

Si l'on veut être très scrupuleux, on peut ranger les clients en différentes classes, par exemple : appartements privés, boutiques, restaurants, cafés, et l'on pourrait établir, pour chaque classe séparément, le pourcentage mensuel. Mais on trouvera que le pourcentage ne varie pas beaucoup et qu'il compliquerait inutilement le système en y introduisant trop de variables. Restons donc à une seule et unique moyenne.

Je sais donc, par elle, que chaque nouvelle lampe ajoutée à notre réseau, va me fournir 59 heures de fonctionnement en janvier, 50 heures en février, 36 en mars, etc.

Sur ce nombre d'heures je peux compter en toute sécurité, c'est mon revenu assuré, et là-dessus je n'accorde aucun rabais sur mon prix de vente.

Mais je considère tout ce que j'obtiens en plus sur cette moyenne, pour ainsi dire comme une bonne fortune, comme une recette en surplus, que j'ai intérêt à augmenter dans la mesure du possible. Je ne peux l'augmenter qu'en accordant des rabais considérables sur ces extras.

L'usine n'a presque rien à faire en juin, juillet, août, je peux donc pendant ces trois mois accorder les rabais les plus élevés,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

frisant presque le prix de revient. Je ne peux accorder le même taux aux mois d'avril, mai et septembre, puisque dans ces mois la demande de courant est déjà plus sensible, et je devrais logiquement ne donner que peu de rabais aux consommateurs ordinaires pendant les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier et février, puisque dans cette période je ne peux satisfaire toutes les demandes de consommation qui m'affluent.

Je peux donc établir *trois classes de rabais* pour le surplus de consommation en dehors de la moyenne assurée :

1° *Rabais pendant la période de la plus grande consommation :* octobre, novembre, décembre, janvier et février;

2° *Rabais pendant les mois de consommation moyenne :* mars, avril, mai et septembre;

3° *Rabais pendant les mois de la saison morte :* juin, juillet et août.

L'établissement du taux de ce rabais dépend naturellement des circonstances locales et du prix de vente. A plusieurs stations il sera facile d'accorder en été des rabais sur le surplus de consommation, allant jusqu'à 60 pour 100 du prix normal de vente. On pourra accorder 40 pour 100 pour la période de consommation moyenne, et 20 pour 100 pour les mois d'hiver.

Exemple : Un client aura déclaré 20 lampes installées.

En prenant, par exemple, 440 lampes-heure pour la moyenne assurée, ce client devra fournir en :

Janvier	$20 \times 60 = 1200$	lampes-heure	le surplus sera compté avec 20 pour 100 de rabais.
Février	$20 \times 50 = 1000$	—	
Mars	$20 \times 36 = 720$	—	le surplus sera compté avec 40 pour 100 de rabais.
Avril	$20 \times 29 = 580$	—	
Mai	$20 \times 19 = 380$	—	
Juin	$20 \times 12 = 240$	—	le surplus sera compté avec 60 pour 100 de rabais.
Juillet	$20 \times 10 = 200$	—	
Août	$20 \times 14 = 280$	—	
Septembre	$20 \times 29 = 580$	—	le surplus sera compté avec 40 pour 100 de rabais.
Octobre	$20 \times 50 = 1000$	—	le surplus sera compté avec 20 pour 100 de rabais.
Novembre	$20 \times 64 = 1280$	—	
Décembre	$20 \times 67 = 1340$	—	
	$20 \times 440 = 8800$	—	

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'idée sur laquelle se base ma proposition est de mettre le rabais en proportion avec les différents stages de la production. Le client qui me prend du courant dans un temps où il y a peu de preneurs aura, dans ce temps, un rabais beaucoup plus élevé que s'il me demandait le même courant dans une époque où les preneurs ne manquent pas. Je considère le courant comme une marchandise, dont le prix doit différer suivant l'affluence des demandes. J'en exclus une certaine quantité : la moyenne assurée qui trouvera toujours acheteurs; mais ce qui est *en plus* de cette moyenne doit être vendu avec rabais, et ce rabais doit varier selon la densité des demandes.

Mon système ne demande l'aide d'aucun instrument enregistreur; il se base sur les chiffres donnés par l'exploitation annuelle. Le client sait d'avance sur quel rabais il peut compter et quelle consommation il doit fournir pour avoir droit aux rabais différents. En variant les rabais selon les quatre temps et en accordant des rabais très élevés en été, on réussira à amener des clients qui, pendant neuf mois, n'useront pas de lumière électrique, mais qui, en hiver, en prendront parce qu'elle leur devient une nécessité. Si nous accordons carrément à cette classe de clients des rabais très élevés sans leur demander aucune autre garantie annuelle, nous augmenterons avec cela la rentabilité de nos stations centrales qui, en été, est très souffrante.

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE ET LA FORCE MOTRICE DANS LES THÉATRES;

PAR M. L. MORNAT.

DES CAUSES PRINCIPALES QUI PEUVENT OCCASIONNER L'INCENDIE.

Lorsqu'il se produit des incendies dans les théâtres ou concerts, comme il en arrive malheureusement trop souvent, les commissions chargées des enquêtes sur les causes des incendies concluent le plus souvent que le sinistre est dû à un court-circuit.

Un court-circuit n'est pas si dangereux que l'on pourrait bien le croire, surtout lorsqu'on marche à basse tension, 110 volts, comme on marche dans la presque totalité des théâtres.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Un court-circuit se produisant sur une ligne occasionne la fusion d'un plomb qui se trouve placé sur un appareil appelé *coupe-circuit;* cet appareil, qui est monté sur porcelaine, marbre ou ardoise, est par cela même incombustible; il est de plus protégé du toucher par une boîte ou couvercle le plus souvent vitré, ce qui permet de vérifier si les plombs sont bien intacts ou si rien d'anormal ne se produit.

Les coupe-circuits sont généralement placés dans des endroits très accessibles et par conséquent éloignés de toutes matières inflammables.

Avec un coupe-circuit de 100 ampères, 110 volts, il nous sera facile de faire intentionnellement un court-circuit; le plomb fondra et tombera dans le coffret qui protège le coupe-circuit, mais il ne peut pas occasionner d'incendie.

Ce n'est donc pas toujours les court-circuits qui sont cause des sinistres; il faut alors attribuer la cause à d'autres phénomènes.

Si nous examinons de près l'installation d'un théâtre, nous verrons tout de suite, que ce que l'on attribue aux court-circuits est dû à autre chose.

LES VICES DE CONTACT.

Dans l'installation de lumière des théâtres, nous avons des canalisations un peu partout; si par les trépidations ou autres raisons quelconques sur une canalisation desservant une assez grande partie du théâtre, les vis ou boutons d'un des coupe-circuits placés sur cette ligne ou même le coupe-circuit principal se trouvent desserrés, il se produira un mauvais contact qui déterminera un échauffement du fil ou câble à un tel point que, par conductibilité calorique, il enflamme l'enveloppe de caoutchouc qui l'entoure et deviendra un tison pour l'incendie.

Ces mêmes inconvénients pourront aussi être imputés aux épissures, lorsque les deux extrémités d'un fil ou câble épissés ensemble ne sont pas bien homogènes, nous aurons aussi des défauts de contacts et d'échauffements, etc.

Il arrive même parfois (et ceci si le défaut n'est pas constaté) que par suite de l'échauffement et du refroidissement simultanés du câble, par suite de l'allumage ou de l'extinction des circuits, le fil finira par se rompre à l'épissure; lorsque le courant sera mis sur

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

la ligne il n'y aura point de fusion entre les deux extrémités qui seront toujours maintenues sous la même gaine par leur enveloppe commune, ce qui empêche de voir la cassure.

Le point de fusion, en se produisant, établit un arc entre les deux extrémités; cet arc enflamme le caoutchouc, *matière très inflammable,* et communique le feu à toute la ligne et aux boiseries avoisinantes avec une grande rapidité. Ce qui se produit sur un circuit principal pourra se produire de la même façon sur un circuit de dérivation, et lorsque ce circuit se trouvera en moulure le danger sera plus grand.

De l'installation. — Lorsque les câbles sont dans un endroit humide ou à proximité d'une canalisation d'eau ou de gaz, il se constitue une sorte de pile, *soit un effet d'électrolyse,* qui fait déposer sur les câbles des couches de sels rongeurs qui les rongent complètement. Lorsque les câbles commencent par s'attaquer, ils diminuent de section; et la section n'étant plus suffisante pour l'intensité normale qui doit y passer, il arrive ce qui nous arrive avec les mauvais contacts, c'est-à-dire échauffement et inflammation de l'enveloppe qui fait le foyer de l'incendie.

Des appareils à lumière. — Nous avons vu que les mauvais contacts et les défauts d'installation pouvaient occasionner des incendies. Nous ne parlerons pas des défauts d'isolement; il en est pour les théâtres comme pour toutes les autres installations électriques, les dangers en sont les mêmes, sinon plus dangereux, à cause des décors.

Mesures nécessaires. Les contacts. — Pour obvier à tous les inconvénients, il faudrait n'admettre aucun coupe-circuit interrupteur ou autres appareils supérieurs à 5 ampères, que munis d'un double écrou pour empêcher les trépidations de le desserrer.

Vérifier très souvent les contacts des coupe-circuits interrupteurs, boîtes de branchement et de jonction et divers appareils employés.

Faire passer dans ces appareils, lorsqu'on les vérifie, le maximum de débit et voir s'ils chauffent.

Installations. — Tous les câbles et principaux fils de dériva-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

tion devront être montés sur des isolateurs en porcelaine, marbre ou autre matière isolante et incombustible.

Les circuits devront être isolés le plus possible du mur et environ à 20 cm de toute canalisation de gaz et d'eau.

Employer de préférence des fils très bien isolés et surtout avec guipure d'amiante. Les épissures devront être soudées; pour les souder, on ne devra, sous aucun prétexte, se servir, pour décaper, de l'esprit de sel, qui ronge le fil et finira par le casser; si l'on doit décaper le fil, on emploiera de la résine dissoute dans de l'alcool à brûler ou alors la bougie.

On devra de préférence, et lorsque ceci sera possible, employer des boîtes du type *Edison*, et pour les petits fils, où l'on ne peut que souder difficilement, des petits serre-fils. Il sera toujours plus facile de vérifier les boîtes de jonction ou les serre-fils que de vérifier une épissure qui serait recouverte de caoutchouc et toile chatertonnée.

Les circuits devront être bien apparents et surtout bien distincts. Les circuits principaux seront tous amenés à un tableau en marbre ou ardoise, placé dans une salle spéciale, dont les gens du service électrique auront seuls l'accès. Cette cabine sera construite de façon à être incombustible (tapissée de carton d'amiante).

Les circuits principaux seront pourvus :

1° D'un coupe-circuit à l'un des pôles;

2° D'un coupe-circuit magnétique de maxima à l'autre pôle.

Le tableau devra être monté de façon à pouvoir vérifier le débit de chaque circuit, au moment où l'on voudra pour cette opération, on aura un ampèremètre apériodique et une fiche que l'on mettra à volonté sur chaque circuit ceci; n'empêchera pas d'avoir un ampèremètre pour le débit total.

Le tableau sera pourvu :

1° D'un indicateur de terre;

2° D'un parafoudre.

Les sections seront calculées de façon à ne faire passer que 2 ampères par millimètre carré de section.

Les tableaux secondaires seront placés en des endroits accessibles et aussi aérés que possible. Pour l'éclairage de l'intérieur du théâtre on placera les tableaux autant que possible à chaque étage.

A ces tableaux secondaires seront placés des indicateurs d'échauf-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

fement qui correspondront par une sonnerie d'alarme à la cabine du tableau principal.

JEUX D'ORGUE.

Pour les jeux d'orgue, partie des plus intéressantes dans un théâtre, il importe surtout d'y apporter un grand soin ; on ne saurait être trop exigeant. La partie électrique comprenant les jeux de commutateurs, interrupteurs, résistances, sera surtout à examiner.

Un soin tout spécial sera apporté au choix des appareils, surtout au point de vue des contacts et du maniement.

Les résistances liquides seront surtout rejetées pour les mauvaises odeurs qu'elles répandent et pour les désagréments du fonctionnement.

On prendra de préférence des résistances métalliques en fil argentan; le ferro-nickel sera repoussé par suite du trop grand dégagement de chaleur et de la variation des résistances qu'elle produit à section égale.

Les résistances et contacts avec bains de mercure seront aussi repoussés : le mercure se volatilise au contact de l'air, dégage une odeur qui est très malsaine et désagréable; de plus, lorsque les fils de maillechort trempent dans le mercure, il peut se produire des étincelles et très souvent des projections de mercure, ce qui est très dangereux.

Le fil de maillechort après avoir trempé un certain laps de temps dans le mercure, finit par diminuer de section et même par se couper complètement, par la raison que le mercure attaque tous les métaux, *sauf le fer;* de là, rupture du fil et projection du mercure dont nous parlions plus haut.

Le ferro-nickel ne sera pas aussi vite rongé par le mercure, qui a moins deprise sur lui que sur le maillechort, par suite de sa composition; mais il s'oxyde bien plus vite que ce dernier, et alors par suite de l'oxydation nous tomberons dans les mêmes inconvénients.

Le maillechort ou argentan paraîtrait seul pouvoir répondre aux exigences demandées, à la condition toutefois que l'on observe bien les règles des sections, c'est-à-dire de ne pas faire passer plus de trois ampères par millimètre carré de section.

L'installation des résistances aura besoin d'un grand soin; on devra y apporter toute son attention pour éviter les contacts à la

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

masse et à la terre, et leur assurer une grande surface de refroidissement.

Un indicateur de terre devra être placé de façon à prévenir aussitôt qu'une terre se produira.

Avec du soin et de l'entretien, une installation faite de la sorte ne présente aucun danger.

SOUS-SECTION C.

PRISE DE COURANTS POUR TRAMWAYS;

PAR M. POSTEL-VINAY.

Dans ce colossal débouché qu'est devenue pour l'industrie électrique la traction sur voies ferrées, il n'est pas de petits détails. Les points les plus secondaires, les accessoires en apparence les plus indifférents ont dû faire l'objet d'études sérieuses et bénéficier de la sanction d'une longue expérience pour cesser d'être le grain de sable qui compromet l'édifice.

Quoi de plus simple, par exemple, que d'amener le courant des conducteurs qui suivent une voie de tramway aux véhicules qui y circulent? Pourtant, voici soixante ans que le problème est posé, que l'ingéniosité des chercheurs s'y applique, et il n'y a pas plus de quelques années que des dispositifs vraiment pratiques ont vu le jour; tant il est vrai qu'en les choses les plus simples la perfection est malaisée.

Soixante ans, ai-je dit? Ceci sera pour surprendre ceux qui se rappellent en quel état rudimentaire sommeillait hier encore l'électricité industrielle, lorsque l'intervention de Gramme vint lui donner l'impulsion définitive. Et cependant telle est la réalité : c'est qu'ici, comme en tant d'autres circonstances, la voie a été ouverte par d'audacieux chercheurs qui, par delà l'horizon borné de leur époque, ont su pressentir l'avenir; qui ont mis *dans l'air,* suivant une expression plus imagée qu'exacte, des idées dont la réalisation immédiate a été facile du jour où les moyens d'action sont devenus plus puissants.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Parmi ces précurseurs, une des figures les plus originales dans l'ordre d'idées qui nous occupe est à coup sûr celle de l'Américain Pinkus. Venu en Europe vers 1820, curieux de tous les problèmes industriels alors à l'étude, cet inventeur émérite se signalait dès 1827 par des travaux intéressants, mais dont les rapports avec notre industrie sont, à vrai dire, quelque peu lointains. De 1834 à 1839, il se passionnait pour un mode de traction encore inédit et qui devait faire, lui aussi, son chemin dans le monde, la traction par l'air comprimé.

D'un autre côté, reprenant sur une nouvelle base les travaux de Davy, notre inventeur se préoccupait d'assurer sans danger l'éclairage des houillères, et aboutissait à l'incandescence des composés du zirconium par la combustion du gaz et de l'air : conception remarquable, bien digne d'être rappelée à l'heure où les procédés de Clamond et d'Auer ont reçu de la pratique une si éclatante consécration.

A cette époque, aux environs de 1840, le succès des expériences de Jacobi sur la Néva provoquait le plus vif enthousiasme : on avait vu avec stupéfaction le cours du fleuve remonté par un bateau lourdement chargé auquel les seules forces alors connues du vent et de la vapeur étaient étrangères. La question de l'électricité considérée comme force motrice s'en était du coup trouvée inscrite à l'ordre du jour; et en dehors de Jacobi, Davenport en Amérique, Davidson en Écosse, Wagner en Allemagne, Froment dans notre pays, s'étaient lancés dans la voie du perfectionnement des moteurs électriques. Familiarisé par ses études antérieures sur l'air comprimé avec le problème de la traction, Pinkus fut amené à l'envisager dans le cas de l'électricité sous un aspect assez particulier. Dans son système de propulsion par l'air comprimé, auquel nous avons fait allusion, il était inutile de charger les véhicules d'une énorme quantité d'air, puisque des conduites amenaient celui-ci le long de la voie et permettaient son renouvellement à mesure des besoins : de même il lui parut que les lourdes batteries galvaniques de Jacobi et de Davidson pourraient être reléguées dans une *station centrale* et leur courant envoyé le long de la voie à l'aide d'une ligne de doubles conducteurs aériens contre lesquels se déplacerait un double contact glissant, en relation électrique avec chaque voiture. On trouve nettement formulé cet

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ensemble d'idées, qui contient en germe presque toute la traction électrique moderne, dans une série de brevets français et anglais datés de 1840 et 1841, brevets d'autant plus remarquables que les vues de l'auteur ne s'y arrêtent pas à la seule traction, mais s'étendent à tout ce que nous faisons tenir aujourd'hui sous le vocable général de *distribution d'énergie*.

L'inventeur italien major Alexandre Bessolo est un peu moins éclectique que son confrère américain, mais sa conception du problème de la transmission de l'énergie électrique est tout aussi nette et à peu près aussi méritoire, puisqu'elle remonte à 1855, qui appartient encore un peu à l'époque de la préhistoire de l'Industrie électrique.

De ce problème général de la transmission à distance de l'énergie mécanique, un cas spécial préoccupe Bessolo : c'est celui où le moteur récepteur est mobile, disposé qu'il est sur un véhicule: et l'inventeur est conduit à ce propos à l'idée d'amener le courant de la station génératrice aux appareils d'utilisation, soit *par les rails de la voie* eux-mêmes, soit par *un* conducteur isolé du sol et supporté à la manière des fils télégraphiques, ce qui suppose le retour par la terre. A vrai dire, la description de ses brevets est quelque peu réservée sur le chapitre qui nous intéresse surtout, celui de la liaison mobile entre les conducteurs et les voitures; mais il semble qu'il y ait là plutôt l'effet d'une inadvertance qu'un point systématiquement écarté.

Si Bessolo, de même que Pinkus, s'était contenté d'exprimer sur le papier des idées remarquables, il avait été devancé au point de vue même de leur réalisation pratique.

Sans parler de Farmer, qui dès 1847 exhibait en public une petite locomotive tirant une voiture et deux hommes sous l'action d'un moteur actionné par 48 éléments Grove, nous avons à citer, avec la minuscule machine de Hall (1851), le premier exemple pratique de traction électrique avec station d'énergie distincte. Le moteur était constitué par des électro-aimants tournant entre les pôles d'un aimant. Le courant de deux piles Grove placées à distance était transmis par les rails eux-mêmes d'une voie de 15 m de long et de 0,12 m de large, et les roues de la locomotive, isolées les unes des autres par de l'ivoire, collectaient le courant pour l'amener au moteur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Le rôle des inventeurs français est bien effacé dans cette période de lente incubation : pourtant, neuf années après les travaux de Bessolo nous voyons apparaître dans cette question le nom d'un compatriote, Henri Cazal, qui revendique un système de traction électrique dans lequel le moteur est directement calé sur les roues du véhicule et qui utilise, lui aussi, les rails comme conducteurs.

Tous ces efforts ne pouvaient d'ailleurs engendrer aucun résultat immédiat, puisque la base indispensable, la source de courant, puissante et économique, faisait encore défaut. Ce dont on peut s'étonner, par exemple, c'est qu'après l'invention de Gramme, alors que le point de départ semble acquis, l'émulation des inventeurs paraît se ralentir. En fait, il nous faut arriver jusqu'en 1898 pour qu'un autre Français, Boué, songe à utiliser pour la traction le fait de la réversibilité des dynamos découvert par Hippolyte Fontaine dès 1893, et décrive un système à conducteur aérien et *à trolley* fort remarquable pour l'époque. De cette même année 1898 date un autre brevet dans lequel l'un des auteurs des célèbres expériences de labourage électrique de Sermaize, M. Chrétien, décrit un système où les rails sont utilisés comme conducteurs.

A partir de cette époque, les efforts vont enfin aboutir. C'est d'abord Werner Siemens, de Berlin, qui, préoccupé de la question depuis 1867, mais rebuté pendant longtemps par l'échauffement des machines, offre en 1879 à l'admiration des visiteurs de l'Exposition de Berlin le premier tramway électrique connu : un rail central amène le courant, collecté sur les deux faces verticales du rail par deux brosses en fil de cuivre pressées par des ressorts. Les rails de roulement servent au retour.

Satisfait de son essai, Siemens simplifie encore et, pour l'installation de Gross-Lichterfelde, la première ayant un caractère définitif, supprime le rail central : il fait l'aller et le retour du courant par les rails de roulement, sous une différence de potentiel de 90 à 100 volts, sans précautions d'isolement spéciales. Pourtant, peu certain de la réussite de ce système, Siemens prévoit, en cas d'échec, un dispositif formé de deux câbles aériens sur lesquels vient poser un chariot remorqué par le câble de liaison et constitué par quatre roues à gorge roulant deux par deux sur les câbles.

Ce dernier dispositif devait présenter en vitesse des trépidations

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et provoquer des interruptions fréquentes du courant; aussi, pour la ligne qu'ils sont appelés à installer à l'Exposition d'Électricité de 1881 à Paris, et où l'emploi des rails comme conducteurs ne peut être toléré en raison du danger pour la circulation, MM. Siemens et Halske ont-ils recours à un dispositif plus perfectionné. Les conducteurs d'aller et de retour, tous deux aériens, sont constitués par des tubes fendus; dans l'intérieur de chacun de ceux-ci glisse (*fig.* 1) une navette munie à ses extrémités de deux bras

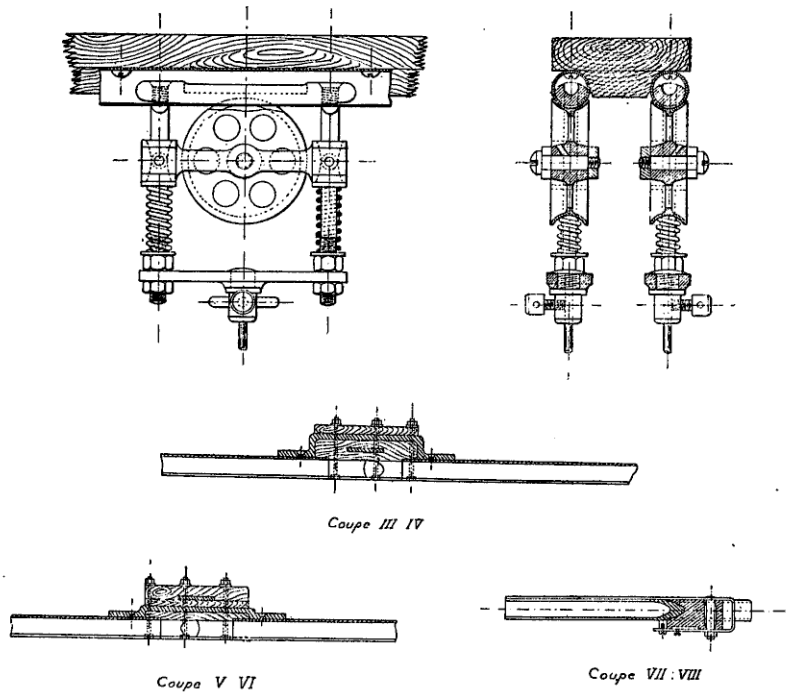


Fig. 1.

passant par la fente et servant de support à un galet qui, sous l'action de ressorts à boudin, presse le long du tube conducteur et assure le contact de la navette. Il faut croire que, malgré le succès de l'installation, ce dispositif ne donne pas encore satisfaction entière à ses auteurs, car, dans une ligne installée à Modling, près Vienne, ceux-ci compliquent notablement le système précédent : quatre navettes reliées les unes aux autres, et non plus une seule, courent à la file dans chaque tube fendu (*fig.* 2), pressées sur la

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

partie inférieure des cylindres creux conducteurs par des galets extérieurs et des ressorts, comme à l'Exposition de Paris; en outre, chacune de ces navettes est constituée par deux demi-cylindres tendant à s'ouvrir sous l'effet de ressorts à boudin, de manière à frotter non seulement dans le bas, mais aussi dans le haut du tube conducteur.

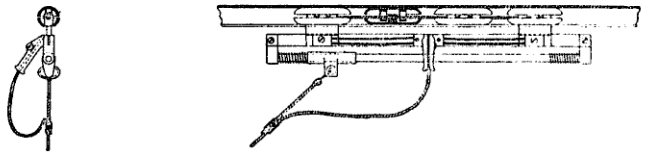


Fig. 2.

Sur cette ligne de Modling, on n'avait d'ailleurs plus affaire à une voie unique, et l'une des principales difficultés de ces systèmes à navettes apparaît, celle des aiguillages aériens aux croisements de voie. On la résout de façon assez satisfaisante, cependant, par un système dont la *fig.* 3 montre la complication. D'ailleurs, la

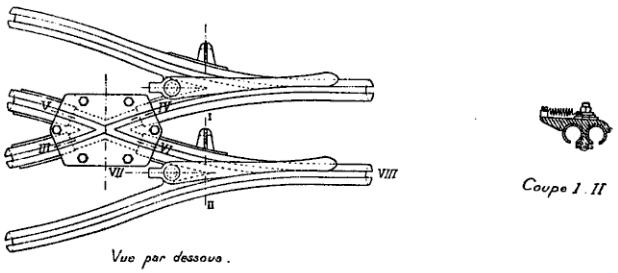


Fig. 3.

grosseur et le poids des conducteurs tubulaires donnent à la ligne un aspect disgracieux qu'on peut encore retrouver aujourd'hui dans l'antique tramway de Vevey-Montreux, et l'on conçoit que ces premiers essais aient enveloppé le fil aérien, au point de vue esthétique, d'une atmosphère défavorable que la simplicité actuelle ne justifie plus guère.

Cette même année 1883, la maison Siemens et Halske a à participer à une nouvelle exposition. Mais, à Vienne, on se montre plus accommodant qu'à Paris, et la distribution par les rails de la voie sous 150 volts réapparaît.

Nous retrouvons encore cette disposition simpliste sur la ligne

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

équipée la même année par M. Volk à Brighton, tandis qu'à Portrush, en Irlande, première application à la traction de la force motrice hydraulique, la maison Siemens de Londres recourt, pour l'amenée du courant, à un rail latéral en T placé un peu au-dessus du niveau de la voie ferrée, isolé, et sur la face supérieure duquel se déplacent les frotteurs.

Aux mines de Hohenzollern, autre installation de Siemens et Halske. Ces constructeurs abandonnent la navette : un rail en T renversé (*fig.* 4) est fixé au ciel des galeries par des isolateurs à

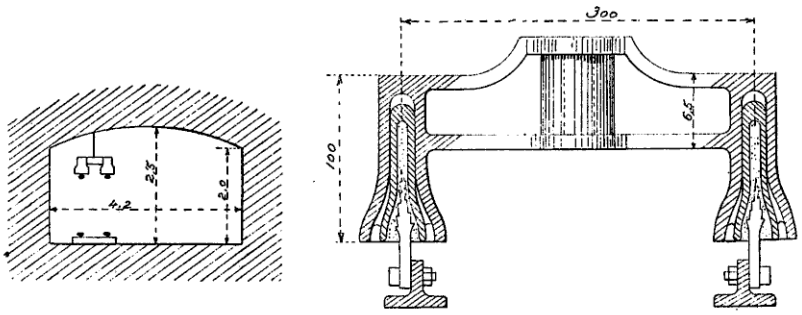


Fig. 4.

cloche et une prise de courant compliquée, représentée par la figure, glisse sur le rail, remorquée par le câble d'alimentation.

Il nous faut ici signaler le contraste remarquable entre l'activité des ingénieurs européens, à l'époque où vient de nous amener ce bref historique, et la quasi-indifférence qui est de règle dans le futur pays d'élection de la traction électrique, et nous n'avons presque rien à citer aux États-Unis en dehors des travaux de Field et d'Edison. Ceux-ci, par contre, sont doublement intéressants par les discussions auxquelles ils donnent lieu. Depuis 1868, M. Field s'était adonné à l'idée de la traction électrique; mais une incroyable malechance l'avait poursuivi, et il n'avait pu effectuer ses premiers essais qu'en 1879. Fort heureusement pour lui, il aboutissait assez à temps pour déposer ses brevets en mars 1880. Quelques mois de retard, et il était précédé par Edison, dont les essais, exécutés à Menlo-Park sur une voie dont les deux rails isolés constituaient les deux conducteurs, avaient parfaitement réussi.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Malgré l'antériorité légalement établie de Field, des discussions épineuses surgirent, qui aboutirent à un arrangement d'où sortit, en 1883, l'*Electric Railway C°*.

C'est à partir de ce moment que l'émulation des Ingénieurs américains commence à se donner carrière. A côté des fondateurs de l'Electric Railway C° apparaissent trois des plus célèbres pionniers en matière de traction électrique : Van Depoele, Daft et, en dernier lieu, Sprague ; de nombreuses installations sont édifiées où la nécessité se fait jour de plus en plus d'enlever les différences de potentiel agissantes de la surface du sol, où elles créent des dangers pour la circulation, surtout pour les chevaux, que de faibles tensions incommodent énormément, que des différences de potentiel alternatives de *cinq volts* suffisent à faire tomber sur les genoux. Les systèmes à deux rails conducteurs ou à troisième rail disparaissent donc progressivement, tandis que les préférences vont lentement au fil aérien unique avec retour par la terre. Presque toujours cependant, jusqu'en 1887, les installations sont à double fil aérien. Quant aux prises de courant, les systèmes des

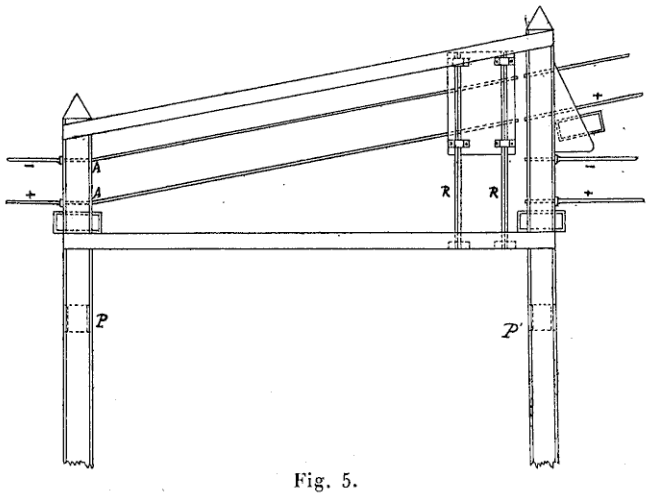


Fig. 5.

premiers jours, navettes, chariots glissants, commencent à être rejetés comme trop compliqués et comme déterminant une usure trop rapide des conducteurs aériens ; mais l'hésitation sur le système définitif subsiste longtemps. Dans la plupart des installations

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de cette époque, on rencontre un trolley constitué par un chariot à quatre roues roulant sur les conducteurs et à peu près identique à celui prévu par Siemens pour l'installation de Gross-Lichterfelde. Mais les difficultés du croisement et des aiguillages sont toujours très grandes avec de semblables trolleys combinés avec le double fil. La *fig.* 5, empruntée à l'Ouvrage de MM. Blondel et Dubois, montre comment cette difficulté est résolue sur la ligne de Los Angeles : les deux potences voisines de l'aiguille sont reliées par des entretoises qui portent deux rails courts transversaux RR′; sur ces rails se meut une petite glissière à laquelle sont fixées les extrémités mobiles des fils de trolley, qu'on peut ainsi placer à l'aide de cordes en regard de l'une ou l'autre des voies aériennes.

Petit à petit, un perfectionnement nouveau s'affirme comme très important; les trolleys glissant ou roulant *sur* les fils exercent sur ceux-ci, tant par leur poids que par la traction du câble d'alimentation, une forte pression; ils exigent, en conséquence, un appareillage aérien plus complexe, des fils plus gros, nuisibles à l'aspect : de là l'idée d'appliquer le trolley *en dessous* des fils à l'aide de ressorts,

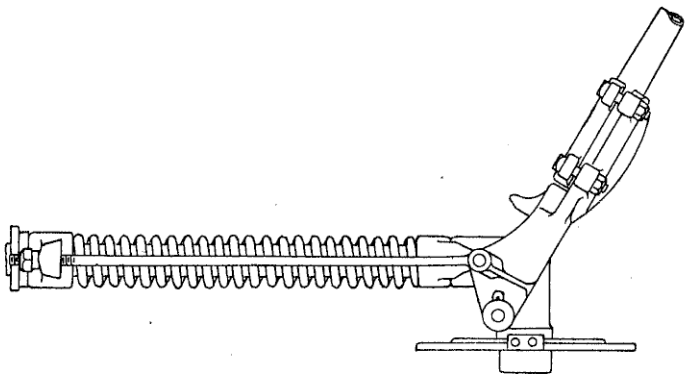


Fig. 6.

de manière, au contraire, à les soulager : telle est la caractéristique importante des tentatives de Daft à Baltimore, de Van Depoele à Toronto, où des perches portant à leur partie supérieure des balais métalliques vont faire sous le fil aérien la collection du courant. Nous touchons de bien près au trolley moderne : il ne faudra plus que la disparition à peu près complète du double fil

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

pour que le trolley simple, faisant son contact à l'aide d'un galet roulant sous le fil, n'écrase sous sa supériorité tous les autres systèmes et n'arrive rapidement, grâce aux efforts des Sprague et des Van Depoele, à la forme définitive qu'il a conservée sur la plupart des lignes et dont la *fig.* 6 reproduit l'aspect bien connu.

Parallèlement à ces progrès, le matériel générateur, le matériel roulant, les moteurs, les méthodes de réglage et de distribution se perfectionnent sous les efforts des ingénieurs américains. Car les rôles de jadis sont renversés, et à son tour la vieille Europe se désintéresse pour ainsi dire de la question. Lorsque arrive 1888, tout est prêt, y compris les puissantes organisations qui ont nom *Compagnie Thomson-Houston, Compagnie Westinghouse, Compagnie Edison,* pour la formidable poussée qui va répandre le tramway électrique et les *toiles d'araignée* à des milliers d'exemplaires sur le sol des États-Unis.

Et il faut que les préoccupations esthétiques, quelque peu négligées dans les quelques centaines d'installations américaines primitives, commencent à reprendre leurs droits pour que vers 1890-1892 nous enregistrions de nouveaux progrès du trolley.

Le principal reproche adressé au système à trolley aérien consiste, on le sait, non pas tant dans la présence en l'air du fil conducteur lui-même, mais dans la multiplicité des fils tendeurs, qui forcent le fil conducteur à épouser aussi exactement que possible les sinuosités de la voie : car la flexibilité du trolley ordinaire dans le sens transversal est médiocre, et, dès que le fil s'écarte un peu de l'axe de la voie, la roulette le coince et déraille. Si le trolley ne présentait pas cette exigence, si la roulette pouvait se déplacer latéralement dans une certaine mesure, cette sujétion de maintenir le fil dans l'axe serait superflue; le nombre des fils tendeurs pourrait être réduit énormément et l'aspect de la voie s'en trouverait infiniment amélioré.

Il y avait donc là une question de première importance à résoudre en présence des exigences esthétiques de nombreuses municipalités. Deux moyens différents ont permis d'y atteindre avec une simplicité remarquable : le trolley à chape tournante et l'archet, ce dernier imaginé par J. Hopkinson et appliqué dès 1885 sur la ligne anglaise de Bessbroock-Newry sous la forme de barres métalliques horizontales fixées sur le toit des voitures.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Le trolley à chape tournante est trop connu aujourd'hui et d'un fonctionnement trop simple pour que nous nous attardions à le décrire. Son seul inconvénient est qu'il est assez difficile de remettre la roulette sur le fil lorsqu'elle l'a quitté pour une raison quelconque. Une modification ingénieuse de ce système, fondée sur le principe de la suspension à la *Cardan,* a été appliquée récemment sur la ligne Romainville-Opéra, où elle semble donner de bons résultats.

Quant à l'archet, qui a été préconisé plus particulièrement par la maison Siemens (*fig.* 7), son fonctionnement est encore plus

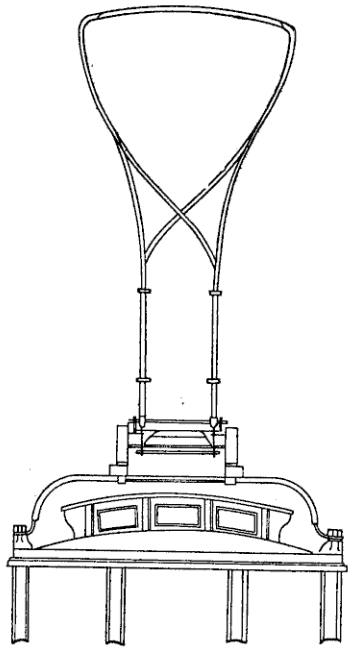


Fig. 7.

facile à comprendre, mais il n'est pas sans avoir donné lieu à quelques désillusions : s'il permet dans le sens horizontal une souplesse suffisante, il n'en est pas de même dans le sens vertical, ce qui oblige à des soins particuliers dans la pose des fils aériens. En outre, le type primitif déterminait une usure assez rapide du fil de trolley : on y a remédié en le constituant en un alliage anti-friction ou en un autre alliage qui tend à céder du métal au fil de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

trolley au lieu de lui en arracher. On a aussi pratiqué à la face supérieure de l'archet des rainures que l'on remplit de graisse. Enfin, une modification qui paraît en voie de succès consiste à le munir d'une roulette qui présente sur la roulette du trolley ordinaire la supériorité de pouvoir se déplacer transversalement, tout en supprimant l'usure du fil aérien par l'archet.

Depuis ces derniers perfectionnements, qui remontent déjà à quelques années, à peu près plus rien n'est à signaler, ce qui semblerait indiquer que la prise de courant aérienne est arrivée bien près de la perfection. On peut en dire à peu près autant, d'ailleurs, de l'ensemble du matériel des lignes aériennes, et certes les cri-

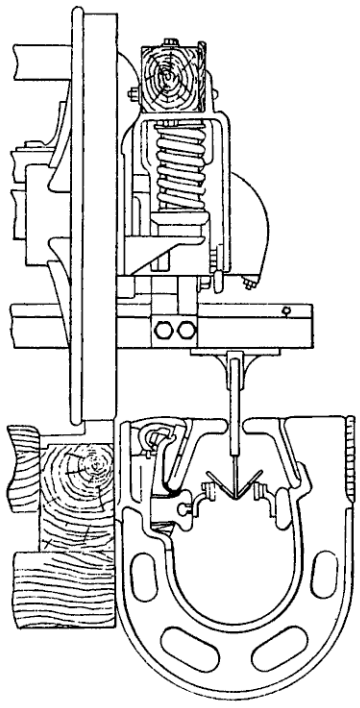


Fig. 8.

tiques acerbes jadis prodiguées au trolley ont perdu aujourd'hui la plus grande partie de leur raison d'être. Pourtant, les résistances qu'il a trouvées sur sa route ne se sont pas toutes évanouies. Dans plusieurs grandes villes, les perfectionnements du trolley n'ont pu

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

lui faire trouver grâce, au moins pour les plus beaux quartiers. Mais, comme la traction électrique paraît maintenant à tout le monde indispensable et que les accumulateurs jouissent d'une faveur restreinte que justifient leurs inconvénients, il en est résulté un renouveau de vogue pour un système d'adduction de l'énergie qui remonte aux premiers temps de la traction électrique et qui était resté à peu près démodé par suite de son coût d'établissement élevé. Je veux parler du système à caniveau souterrain, dont on faisait dès 1883 à Toronto et à Blackpool les premières applications et que, l'année suivante, MM. Bentley et Knight essayaient sans succès à Cleveland. La *fig.* 8 donne une idée de ce dernier système et permet de comprendre sans autre explication le mécanisme de la prise de courant.

Une autre ligne anciennement équipée et qui, au contraire de la précédente, a fonctionné avec un succès remarquable, est celle de Budapest, établie par la maison Siemens et Halske. La *fig.* 9

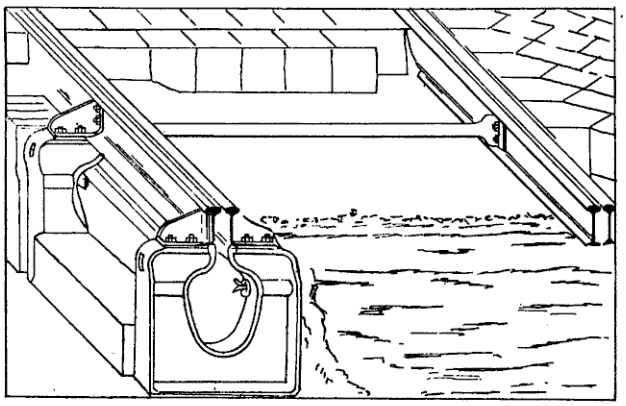


Fig. 9.

montre qu'elle ne présentait cependant pas de différence très essentielle avec le système Bentley Knight; mais un des grands éléments de succès d'un caniveau tient à une cause indépendante qui réside dans la perfection du système des égouts dans la localité considérée; il est possible que MM. Bentley et Knight aient été moins favorisés sous ce rapport. Quant à la prise de courant de Budapest, elle ne présente pas non plus de particularités dignes d'être notées. D'ailleurs, en thèse générale, la prise de courant

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans les conduites souterraines ne présente pas les difficultés qu'on a rencontrées à l'origine dans la prise de courant aérienne. Les conducteurs sont rigides, absolument rectilignes; on n'a à craindre ni de les user ni de les fatiguer en exerçant sur eux la pression

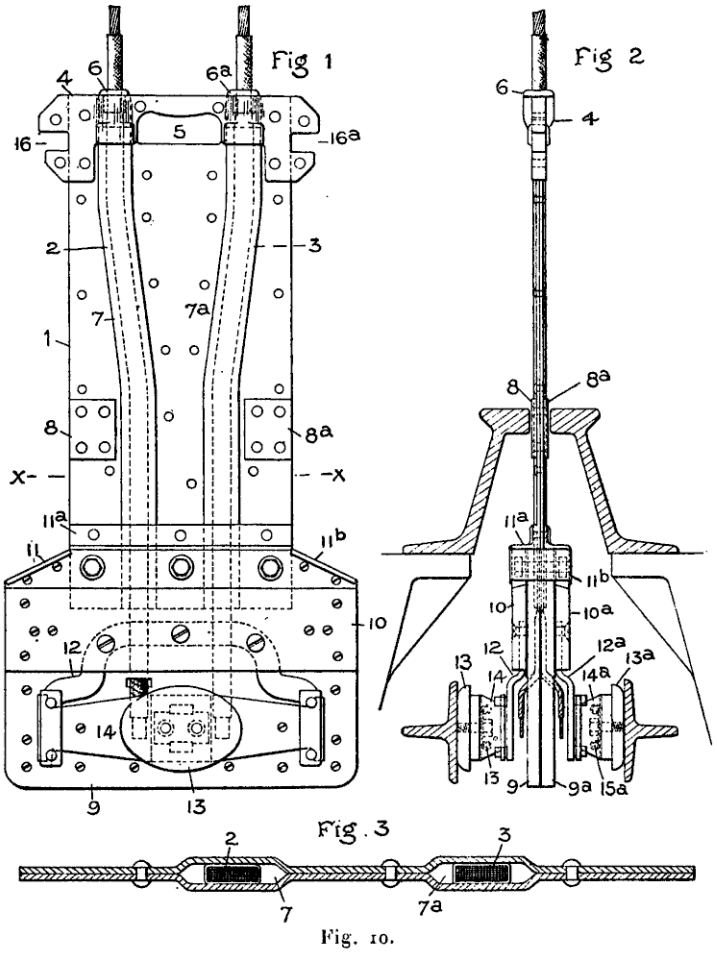


Fig. 10.

nécessaire; on n'a pas à se préoccuper de disposer la prise de courant de manière à restreindre au minimum le diamètre du conducteur. La fente des conduites est étroite, il est vrai, et il pourrait en résulter des difficultés au point de vue de la solidité de la prise de courant et de l'isolement, — car le caniveau com-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

porte toujours les deux pôles isolés, — mais ce qu'on n'a pas en épaisseur pour la prise de courant, on le gagne sur la longueur, que l'on peut faire très grande sans inconvénient.

Aussi nous contenterons-nous d'indiquer le système appliqué avec succès dans les caniveaux établis par la Compagnie Thomson-Houston à Paris, Lyon, Nice, etc. L'âme de la prise de courant (*fig.* 10) est constituée par deux flasques d'acier I présentant au niveau de la fente du caniveau, en vue de l'usure, un renforcement 8, 8*a*. Dans ces feuilles d'acier, des logements rectangulaires 7, 7*a* ont été réservés pour le passage des câbles conducteurs 2, 3 aplatis pour ne pas dépasser l'épaisseur compatible avec la fente. Les deux feuilles d'acier se terminent à la partie inférieure par un assemblage 9, 9*a*-10, 10*a* en bois et fibre, recouvert d'étain vers le haut pour éviter l'action de l'humidité et sur lequel sont boulonnés les sabots collecteurs 13, 13*a* par l'intermédiaire de blocs de matière isolante et de ressorts 14, 14*a*. On obtient ainsi un ensemble rigide malgré sa faible épaisseur, et que des chaînes fixées en 16 et 16*a* maintiennent sous la voiture; ces chaînes permettant en outre le relèvement de la prise de courant par des trappes ménagées à cet effet, si la ligne comporte une partie du parcours en fil aérien.

Notons encore que, dans les caniveaux établis par l'Union Elektricitäts Gesellschaft, le contact se fait par en dessus sur des conducteurs à T.

Restent les systèmes à contacts superficiels, qui fournissent, comme on sait, un moyen d'amener le courant au niveau du sol en évitant, en principe, le danger des premiers systèmes à rails de roulements conducteurs. On sait que l'idée de ces systèmes remonte également aux premiers temps de la traction électrique et qu'elle a été formulée dès 1882 par Hopkinson, puis par Ayrton et Perry; mais leur réalisation pratique s'est fait attendre jusque vers 1897, époque à laquelle Claret et Vuilleumier établirent, lors de l'Exposition de Lyon, la ligne qui devait servir de type à l'installation parisienne de Romainville-Place de la République.

Pour tous ces systèmes, le problème de la prise de courant est encore moins complexe que dans le cas du caniveau : un frotteur placé sous la voiture, quelquefois deux si le système comporte

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

deux rangées de *plots,* frotteurs assez longs pour couvrir à la fois deux ou trois pavés consécutifs de la même rangée, suspendus à l'aide de ressorts permettant, dans le sens vertical, un léger déplacement pour parer aux petites irrégularités dans le niveau des plots : tel est le type commun adopté, quel que soit le système (*fig.* 11).

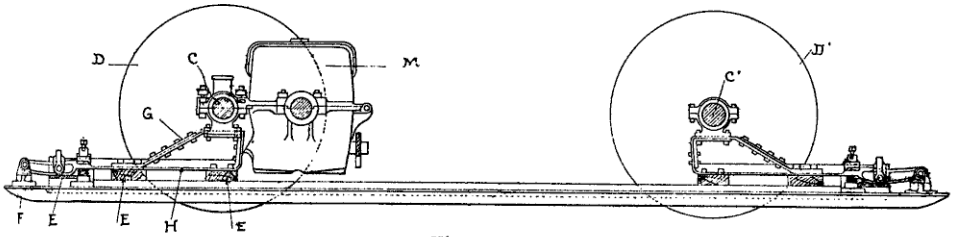


Fig. 11.

Il nous faut faire une exception cependant pour le système Diatto, où la mission dévolue au frotteur n'est pas seulement de collecter le courant, mais encore de provoquer l'électrisation successive des plots par l'attraction de leurs *clous* respectifs, et qui est dans ce but, muni sur sa longueur de trois bobines traversées par le courant d'une petite batterie portée par la voiture : le passage du courant développe, dans les barreaux parallèles qui constituent le frotteur, des polarités convenables pour déterminer l'attraction énergique des clous.

Tel est, dans ses grandes lignes, l'ensemble des moyens qui ont permis de résoudre le problème de l'adduction du courant électrique aux voitures de tramways proprement dits, mais un ordre de préoccupation nouveau a été provoqué par l'application de la traction électrique aux trains de chemins de fer.

Le rail conducteur a fait à ce sujet une réapparition récente; l'application aux grands trains des Compagnies de chemins de fer exige, en effet, pour le conducteur une section considérable, et il devient très difficile de le supporter aériennement; s'il est vrai que les premiers trains électriques installés en Amérique, à Baltimore, prenaient le courant par roulettes sur un conducteur de cuivre aérien, ce système a été abandonné pour les applications qui ont suivi et sur les lignes installées en Amérique, pour le service du pont de Brooklyn; en France, par la Compagnie de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

l'Ouest, pour la ligne des Invalides à Versailles, et par la Compagnie Thomson-Houston, par la Compagnie d'Orléans entre la place Valhubert et le quai d'Orsay, un troisième rail isolé sur traverses en bois paraffinées a été posé sur le côté des voies de roulement qui servent au retour du courant. Le contact se fait par frotteurs plats glissant sur le rail, généralement protégé aux passages à niveau par une couverture isolante.

Aux croisements et aux aiguillages, le rail conducteur est interrompu ou placé sur l'autre côté de la voie. Pour éviter la cessation de contact, les locomoteurs sont munis de quatre frotteurs, deux sur chaque côté aux extrémités du châssis. Aux démarrages, ces frotteurs peuvent collecter jusqu'à 1200 ampères.

Enfin, et comme s'il était dit que toutes les idées des premiers inventeurs devaient un jour trouver l'occasion de renaître, le chariot à roulette prenant le courant sur deux fils aériens parallèles trouve aujourd'hui sa raison d'être dans l'application de la traction électrique des voitures sur routes et des bateaux sur les canaux. La difficulté d'entraîner le chariot par la traction exercée sur le câble a été ingénieusement tournée par l'emploi d'un petit moteur placé sur le chariot et lui imprimant une vitesse telle qu'il se maintient toujours en avant en tendant le câble. A Vincennes se trouve exposée une ligne de ce genre, dans laquelle le moteur du circuit est maintenu constamment à vitesse égale à celle du véhicule.

C'est un moteur d'induction recevant un courant triphasé pris sur trois bagues reliées à l'induit même du moteur de la voiture ou du bateau; un avenir prochain décidera le sort de ce système.

Nous nous arrêterons ici en constatant, en résumé, que les moyens utilisés dans la technique actuelle sont devenus aussi simples que pratiques et qu'ils paraissent répondre à tous les besoins de l'industrie et de la locomotion électrique.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

TROISIÈME SECTION.

DÉPOTS ÉLECTROCHIMIQUES;

PAR M. HENRI BOUILHET.

I. — DÉPOT ÉLECTROCHIMIQUE DU CHROME.

Nous assistons, depuis quelques années, à une véritable renaissance de l'Art de la médaille. Des maîtres comme Chaplain, Chapu, Daniel Dupuy, Roty et tant d'autres l'ont transformé et ont mis dans les mains de tous, sous une forme pratique et légère, de véritables bas-reliefs, fixant dans le métal les grands événements de notre époque, les traits des savants ou des artistes, les souvenirs de famille, empreints d'une vérité, d'une grâce et d'une poésie qui émeuvent.

Les dépôts électrochimiques des métaux n'y sont pas étrangers. La nouvelle école ne s'attache plus à faire preuve d'habileté dans le maniement du burin : la machine à réduire et le modèle de grande dimension exécuté par l'artiste et reproduit en cuivre galvanique suffisent à obtenir ces chefs-d'œuvre.

Mais le cuivre galvanique supporte mal le passage du stylet d'acier de la machine à réduire. Le dépôt galvanique du nickel à la surface du cuivre a rendu déjà de signalés services en durcissant la surface du métal. Mais il y aurait intérêt à rechercher si le chrome ne pourrait pas être déposé électrochimiquement et remplacer le nickel dans cette application, et à connaître si des essais ou des résultats de ce genre ont été déjà tentés ou obtenus à l'étranger.

II. — DÉPOTS DE CUIVRE, DE NICKEL, D'ARGENT, D'OR SUR L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES.

La légèreté de l'aluminium l'a fait employer dans la fabrication d'objets de bijouterie ou d'ustensiles familiers dans lesquels cette qualité trouvait une heureuse application.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Mais la couleur grise et terne de ce métal a toujours été un obstacle au développement de son emploi; l'or et l'argent ne peuvent se déposer facilement à sa surface. Pour les rendre adhérents il faut recourir à des artifices tels que le dépôt préalable d'une couche de cuivre ou de nickel.

Il n'y a pas de procédé réellement pratique de dorure et d'argenture directe de l'aluminium. Il serait intéressant de connaître les essais qui ont pu être tentés dans ce sens et les résultats obtenus pour déposer l'or et l'argent sur l'aluminium, d'une manière adhérente et sans intermédiaire.

III. — Documents statistiques donnant pour chaque nation :

1° La quantité d'argent et d'or déposée annuellement par voie électrochimique;

2° La quantité de cuivre électrolytique déposée annuellement :

a. Pour l'affinage;

b. Pour la fabrication directe d'objets (tubes, fils, planches, reproductions, orfèvrerie, etc.);

3° La quantité de nickel électrolytique déposée annuellement.

La découverte des procédés de dorure et d'argenture galvaniques a déterminé, depuis soixante ans qu'ils sont entrés dans le domaine de la pratique, une déperdition de matières précieuses qui entrent dans la consommation et sont destinées à disparaître de la circulation.

Cette consommation est aujourd'hui considérable. En connaître l'étendue est difficile, car il n'existe pas de sources officielles telles que la Monnaie et les bureaux de garantie qui enregistrent les quantités de métal précieux livrées annuellement au commerce.

Si l'enquête est difficile à faire, elle n'est pas impossible, en s'adressant dans chaque pays aux affineurs de métaux précieux. On pourrait obtenir des documents qui, contrôlés dans un Congrès, permettraient de constituer une statistique dont l'intérêt est évident pour tous ceux qui s'occupent des questions monétaires et de l'influence de l'abondance ou de la rareté des métaux précieux dans les échanges internationaux.

C'est à l'électricité qu'on doit cette transformation de l'équilibre des métaux : c'est aux électriciens d'aujourd'hui qu'incombe

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

le devoir de fixer dans quelles limites les dépôts galvaniques en surface sont intervenus ou interviendront dans la déperdition de l'or et de l'argent.

A titre de renseignement, j'extrais d'un Rapport publié sous la direction de M. Camille Krantz, commissaire général du Gouvernement français à Chicago, et rédigé par M. André Bouilhet, le document suivant :

Le poids d'argent employé à la fabrication des objets en argent massif est évalué à environ 5 millions d'onces (140000 kg).

Le poids de l'argent vierge employé pour l'argenture est estimé à 3 millions d'onces, soit 84000 kg.

Quant à l'argent vierge employé dans les autres industries similaires, il est de 1250000 (35000 kg).

Ce qui fait un total de 259000 kg d'argent employé dans les arts, et ce chiffre est conforme à celui donné dans le Rapport de la Monnaie des États-Unis en 1892.

Les Directeurs de la maison Gorham, qui nous ont confirmé ces évaluations, estiment que le montant total des affaires faites annuellement dans ce genre d'industrie peut être évalué à 12 millions de dollars (60000000 fr).

L'introduction de la machine Gramme dans l'Électro-Métallurgie a déterminé la création d'industries nombreuses pour l'affinage du cuivre et du nickel, et la production directe de matières premières ou d'objets ouvrés.

Nous avons pensé qu'il serait intéressant, au point de vue économique et au point de vue statistique, de connaître quel était le développement actuel de ces industries, et que l'on trouverait dans les savants et les industriels qui prendront part au Congrès des Électriciens d'utiles auxiliaires pour préparer les éléments de ces statistiques, et démontrer la part d'influence qu'a eue la machine Gramme dans le développement de la Métallurgie.

LES FOURS ÉLECTRIQUES;

PAR M. KELLER.

DIFFÉRENTS GENRES DE FOURS ÉLECTRIQUES.

L'emploi des fours électriques a pris un rapide développement dans ces dernières années et l'on en trouve aujourd'hui un grand

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

nombre de modèles en service dans l'industrie; il est donc intéressant d'étudier les différents types qu'ils présentent et les progrès faits dans leur construction.

Ces appareils dérivent, pour la plupart, comme types, du four électrique en forme de creuset de Siemens et Hutington ou du four électrique Moissan.

Four Moissan-Violle. — On sait que ce four est caractérisé par l'utilisation de l'arc électrique employé seulement comme source de chaleur et non comme agent électrochimique.

Il a donné le moyen de dépasser les températures que l'on pouvait obtenir à l'aide des fours de différents genres précédemment employés dans l'industrie.

Les températures les plus élevées atteintes avec ces derniers avant qu'on ait eu recours à l'énergie électrique étaient, en effet, limitées à 1800° environ; le chalumeau à gaz d'éclairage et oxygène seul donnait 2000°; avec le four électrique Moissan, on atteint certainement plus de 3000°.

Dans cet appareil, on fait jaillir l'arc entre deux charbons horizontaux pénétrant dans un canal creusé dans un bloc de chaux vive. Un dôme également en chaux vive ferme le four; il reçoit la chaleur émise par le foyer électrique et la réfléchit sur la matière à traiter, qui est placée au-dessous de l'arc électrique.

L'action calorifique du courant est ainsi nettement séparée de son action électrolytique; la disposition adoptée évite également que les impuretés contenues dans les électrodes interviennent dans l'expérience.

Par suite de la faible conductibilité de la matière employée, une épaisseur de 30 mm seulement pour le dôme a pu suffire pour permettre de réaliser la fusion de la partie interne de ce dôme, avec production de lumière Drumond, tandis que la partie extérieure restait suffisamment froide pour qu'on y pût appliquer la main.

Four Siemens. — Le four Siemens est conçu dans un autre ordre d'idées. Les premiers appareils Siemens étaient destinés à la fusion des métaux et consistaient en un creuset de matière réfractaire, à parois doublées d'une enveloppe isolante et recevant à sa base le courant électrique.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Une électrode verticale, disposée au-dessus du creuset, servait de deuxième conducteur au courant. La matière introduite dans le creuset tient lieu, dans ce système, de conducteur intermédiaire et l'arc électrique jaillit entre l'électrode verticale et la matière elle-même.

Le réglage de l'arc est automatique; il s'obtient par la mise en dérivation, dans le circuit, d'un solénoïde provoquant le déplacement de l'électrode.

Par la suite, pour éviter les perturbations amenées dans l'action chimique par les impuretés de l'électrode et par la chute, dans le bain de fusion, de particules de charbon, Siemens fit usage d'un pôle supérieur en cuivre avec refroidissement par courant d'eau intérieur.

Fours industriels. — Avant de parler des types nouveaux dont l'introduction dans l'industrie a été provoquée surtout par la fabrication du carbure de calcium, il ne sera pas inutile d'entrer dans quelques détails sur les deux ou trois systèmes de fours industriels dérivés des types qui précèdent et qui, restés seuls, pendant un certain temps, en usage dans l'industrie, ont servi à fixer les conditions d'emploi pratique des fours électriques, en dehors des nombreux essais faits sur différents autres types qui sont restés plutôt dans le domaine des laboratoires.

Four Cowles. — En 1885 apparut le four Cowles, qui répondait déjà à certains besoins industriels et avec lequel ont été faites les premières applications de l'électricité à la réduction des oxydes.

L'appareil des frères Cowles se compose d'une capacité horizontale en matière réfractaire dont une extrémité, fermée par une paroi en matière conductrice de l'électricité, constitue un pôle.

L'autre extrémité de la capacité est fermée par un creuset en graphite constituant l'autre pôle.

La matière à traiter est placée dans la capacité horizontale et le courant électrique est ainsi obligé de la traverser.

Cette capacité horizontale est entourée de matières pulvérulentes non conductrices, tout comme dans le four Siemens.

En vue de rendre le fonctionnement de leur appareil plus pratique, surtout au début de l'opération, les frères Cowles, en 1886,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

introduisirent dans la capacité contenant la matière deux électrodes horizontales entre lesquelles l'arc jaillit tout d'abord; ces électrodes sont ensuite éloignées au fur et à mesure de la fusion de la matière.

Ce perfectionnement du four primitif permit de traiter des matières qui, à froid, n'étaient pas conductrices de l'électricité. Ce système fut employé à l'usine de Milton (Angleterre) pour la réduction des oxydes d'aluminium et la formation des alliages.

En 1887, MM. Cowles prirent un nouveau brevet pour un four électrique dans lequel la charge était introduite d'une manière continue.

Il est composé de deux électrodes verticales creuses en charbon; l'électrode supérieure seule est mobile; le tout est compris dans une chambre, en briques réfractaires, fermée hermétiquement autour des électrodes. La matière à traiter descend par l'électrode supérieure, traverse le foyer électrique et est évacuée par l'orifice de l'électrode inférieure.

Four Héroult. — Le four Héroult, appliqué tout d'abord à la réduction de l'alumine par le cuivre, est basé sur le même principe que le four précédent de Cowles. Le cuivre est introduit dans le four, en granules; le courant électrique fond le métal interposé entre les deux électrodes; on verse ensuite de l'alumine et l'on obtient un alliage d'aluminium et de cuivre.

Fours de Froges. — Les usines de Froges et de Newhausen ont employé les fours Héroult pour la fabrication de l'aluminium. A l'apparition du carbure de calcium, les mêmes fours, dans ces usines, servirent à la fabrication de ce corps.

Ce four électrique, approprié à la fabrication du carbure de calcium et qui conserve, en France, le nom de *four de Froges,* est composé d'une électrode verticale pouvant recevoir un mouvement de montée ou de descente au-dessus d'une chambre dont le fond est en charbon et qui est montée sur roues. Cette chambre constitue ainsi un four mobile et sert de seconde électrode; les parois sont doublées de matière isolante. Le carbure est évacué, par voie de coulée, par un orifice ménagé à cet effet à la partie inférieure de la chambre de fusion.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsqu'une opération est terminée, le four mobile est enlevé et remplacé par un autre.

Le four de Froges fut, industriellement, le point de départ de la plupart des fours électriques actuellement employés.

Fours industriels récents. — L'apparition du carbure de calcium fut le signal de la mise à l'étude de fours électriques à grand rendement et à fonctionnement continu.

Se basant sur les types classiques déjà connus qui viennent d'être décrits sommairement, les idées des inventeurs se partagèrent et des études qui furent mises au jour put bientôt se dégager une classification industrielle des fours électriques, savoir :

1° Ceux basés sur les fours Moissan-Violle et Siemens, dénommés *fours à arc;*

2° Ceux basés sur le four Héroult, dénommés *fours à résistance;*

3° Ceux enfin que l'on peut faire dériver du premier four Cowles, appelés *fours à résistance superficielle ou à incandescence.*

FOURS A ARC.

Les fours à arc peuvent se diviser en :
Fours à un seul arc à deux électrodes mobiles;
Fours à un seul arc à une électrode mobile;
Fours à plusieurs arcs.

Fours à un seul arc à deux électrodes mobiles. — Ils sont composés de deux électrodes placées le plus souvent dans une position inclinée et pouvant se remonter dans une chambre en maçonnerie réfractaire.

La matière à traiter est placée autour de l'arc; elle est introduite par le haut du four. Ces fours comportent soit un mouvement d'ascension de l'arc électrique rendu mobile au-dessus de la matière à traiter, soit un mouvement de descente de cette matière au-dessous de l'arc électrique laissé fixe.

A la fin d'une opération, le courant électrique est ordinairement interrompu et la matière traitée est sortie du four.

A ce type appartiennent les fours Patin, les fours de la *Deutsche*

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Gold und Silberscheide Anstalt pour la production du carbure de calcium, et les fours Street pour la production du graphite.

Fours à un seul arc à une électrode mobile. — L'électrode mobile est alors ordinairement placée verticalement; l'électrode fixe est placée horizontale ou inclinée; elle est constituée par un assemblage de charbons dénommé *sole.*

La matière est introduite par la partie supérieure du four et l'arc jaillit d'abord entre l'électrode mobile et la *sole,* puis entre l'électrode fixe et la matière fondue.

Il a été imaginé, sur ce principe, un très grand nombre de dispositions des organes d'attache des électrodes et de modes de connexion et de constitution des soles. La tension employée dans ce genre de four varie de 50 à 60 volts.

A cette catégorie se rattachent les fours électriques de la Société des Carbures métalliques figurant à l'Exposition, et les systèmes Siemens et Halske, Schuckert, etc., ainsi qu'un grand nombre d'autres fours qui sont actuellement employés dans les usines pour la fabrication du carbure de calcium et qui ne présentent, en dehors de l'emploi de l'arc, aucune disposition caractéristique.

Fours à arcs multiples. — Ce ne sont que des variantes des deux précédents, auxquels ils se rattachent comme principe. On a cherché à les employer, afin de répartir l'action calorifique de l'arc sur de plus grandes surfaces et d'arriver à obtenir, dans un milieu donné, et non pas seulement *au point d'émission de l'arc électrique,* la température nécessitée par l'action thermique à mettre en jeu.

A cette catégorie se rattachent les fours électriques Gin et Leleux, modèle 1897, Bertolus ou Memmo, Nicolaï, Bovy, etc.

Le premier de ces fours a été employé pour la fabrication du carbure de calcium et pour celle du phosphore; il était composé de quatre paires de charbon permettant l'utilisation de quatre arcs dans une même capacité et d'une sole mobile à mouvement hélicoïdal se déplaçant sous les arcs.

Les fours Bertolus sont employés par leur inventeur à l'usine de Bellegarde (Ain). Le courant électrique est triphasé et il est formé de trois arcs au moyen de trois charbons mobiles inclinés se dépla-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

çant au-dessus d'une sole commune, reliée électriquement à la dynamo ou non.

Les fours électriques Memmo sont semblables aux fours Bertolus.

Les fours Nicolaï sont composés d'une couronne métallique fixe recouverte de charbons et constituant un pôle; l'autre pôle est constitué par plusieurs électrodes disposées circulairement et recevant un mouvement de rotation au-dessus de la couronne métallique fixe sur laquelle la matière à traiter se déverse, en suivant le mouvement de déplacement de l'arc électrique ainsi formé.

Le four Bovy est caractérisé par l'emploi, dans une même capacité, de plusieurs électrodes verticales et d'une sole commune inclinée servant au retour du courant, les électrodes étant, pour cela, montées en parallèle.

Considérations sur les fours à arc. — Dans ces fours la température obtenue semble varier avec l'intensité du courant (expériences de M. Moissan sur le titane). La tension à employer étant à peu près constante pour une application déterminée, il s'ensuit que dans des fours puissants la température est trop considérable dans l'arc électrique même. L'emploi d'arcs multiples ne remédie que très imparfaitement au défaut capital de l'emploi de l'arc électrique, qui est de produire en un point donné une température beaucoup trop élevée, d'où il résulte une grande volatilisation des matières à traiter et quelquefois une dissociation du corps obtenu.

De plus, l'arc électrique a un pouvoir soufflant qui détermine dans les fusions ou réactions électrométallurgiques un enlèvement considérable des matières fines introduites dans le four.

En dehors de la perte qui en résulte on a, par suite, à craindre la formation, dans la salle des fours et même à l'extérieur, d'une atmosphère irrespirable.

Le déplacement de la matière par rapport à l'arc électrique ou *vice versa* ne remédie qu'imparfaitement aux difficultés d'emploi de l'arc et a dû être généralement abandonné, car l'arc électrique rendu mobile se comporte très mal; sa résistance est, en effet, rendue infiniment variable, et la température obtenue est tantôt insuffisante, tantôt trop forte.

La fabrication rationnelle du carbure de calcium, notamment, est pratiquement impossible avec ce genre d'appareils à arcs mobiles.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Au point de vue industriel, il faut encore dire que, l'arc électrique étant *inductif,* son emploi comme résistance, sur un circuit alternatif, provoque un décalage du courant qui entraîne une chute de tension souvent considérable.

FOURS A RÉSISTANCE.

Ces fours sont constitués comme les précédents, mais ils sont disposés pour fonctionner seulement à basse tension.

L'électrode verticale n'est plus, comme précédemment, placée au-dessus de la matière en fusion; elle plonge dedans, et cette matière sert ainsi de conducteur intermédiaire entre l'électrode et la sole.

La puissance électrique est produit en vertu de la formule de Joule

$$P = RI^2$$

et la température obtenue, pour une puissance déterminée, est fonction de la section des électrodes.

La répartition convenable de l'action calorifique est assez facile à obtenir puisqu'elle dépend, pour une tension déterminée, de la densité du courant employé.

Dans les fours basés sur ce principe, la fusion électrique est tranquille; les gaz de la réaction ne sont pas violemment soufflés à l'extérieur du four, comme cela se produit avec l'arc électrique.

L'emploi des fours électriques à résistance a permis de faire usage, pour la fabrication du carbure de calcium, d'une tension de 20 à 25 volts seulement.

Le foyer électrique de ces fours ne donne lieu à aucun effet d'induction, mais, par contre, à puissance égale, il nécessite, pour les canalisations électriques, des sections plus fortes que les fours à arc, à cause des grandes intensités que l'on est conduit à employer avec la faible tension utilisée.

A cette catégorie de fours électriques appartiennent les nouveaux fours de la Compagnie électrométallurgique des Procédés Gin et Leleux, qui sont employés dans un grand nombre d'usines pour la fabrication du carbure de calcium. Dans ces fours, l'électrode mobile servant au réglage de la tension est constituée par un assemblage de charbons de différentes conductibilités atteignant jusqu'à 800 mm de côté.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

FOURS A RÉSISTANCE SUPERFICIELLE ET A INCANDESCENCE.

Dans ce système de fours électriques, les électrodes, à elles seules, ne permettent pas le passage du courant; il est nécessaire, pour provoquer ce passage, que ces électrodes soient réunies, au début de l'opération, par des conducteurs résistants quelconques, tels qu'une suite de morceaux de charbon.

Ces conducteurs sont alors portés à une vive incandescence par le courant électrique et constituent un lit de fusion sur lequel les matières à traiter sont placées. Ce genre de fours permet l'utilisation, dans une même capacité, d'une puissance plus grande que toute autre, car cette puissance, pour une intensité donnée, varie avec l'écartement des électrodes en longueur, écartement qu'il est facile d'obtenir.

Ces fours ont sur les fours à résistance ordinaires le grand avantage que le courant électrique emprunte seulement, comme conducteur, une partie de la matière déjà traitée et n'est pas obligé de la traverser tout entière. On évite ainsi les pertes dues à la résistance souvent considérable que cette couche de matière traitée présente dans certains fours constitués par une sole et une électrode verticale.

A cette catégorie de fours appartiennent les fours Cowles et d'autres fours récemment mis à l'étude et se composant soit de deux groupes d'électrodes, l'un servant à l'arrivée du courant, l'autre à son retour, soit de deux groupes de soles jouant respectivement le même rôle que les électrodes.

CLASSIFICATION DES FOURS ÉLECTRIQUES D'APRÈS LA NATURE DU COURANT EMPLOYÉ.

Les fours électriques se différencient aussi entre eux d'après la nature du courant électrique dont ils font usage et la manière dont il agit.

Après avoir employé uniquement, au début, comme source d'énergie électrique, les moteurs à courant continu, on a été successivement amené à chercher à utiliser les machines à courants alternatifs, simples et polyphasés.

Fours à courant continu. — Les premiers fours électriques fonctionnant avec du courant continu, et dans lesquels il y a élec-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

trolyse, ontét é désignés sous le nom de *fours électrolytiques* par opposition à ceux dénommés *fours électrothermiques*.

On admet alors que, dans les premiers, le courant électrique sert à la fois de source de chaleur et d'agent électrochimique, tandis que dans les seconds il sert seulement de source de chaleur.

Fours à courants alternatifs. — L'emploi des courants alternatifs dans les fours électriques a pris une grande extension parce qu'il assure un meilleur fonctionnement mécanique, les machines électriques à courants alternatifs ayant moins à souffrir que les machines à courant continu des brusques variations de résistance qui peuvent se produire dans la marche des fours électriques.

Les fours électrothermiques employés pour les simples fusions des corps ou pour les réactions à haute température fonctionnent, par suite, la plupart, avec des courants alternatifs; les actions électrolytiques qui interviennent avec l'emploi du courant continu et qui, parfois, jouent un rôle nuisible dans l'opération, sont ainsi évitées et, de plus, les électrodes constituant les deux pôles s'usent également. Nous avons signalé d'autre part déjà que l'emploi des courants alternatifs peut entraîner une chute de tension par suite d'un décalage du courant dû à un effet d'induction. L'emploi des courants alternatifs dans les fours électriques a donné lieu, pour ceux-ci, à des groupements électriques multiples.

Fours électriques à courants alternatifs simples. — Avec les courants alternatifs simples, les fours électriques peuvent être placés en série ou en parallèle, tout comme des résistances ordinaires.

La pratique indique cependant qu'il ne faut placer, dans aucun de ces cas, un trop grand nombre d'unités sur un même circuit.

Dans la mise en série, l'arrêt de l'un des fours entraînant l'arrêt de la batterie entière, on place rarement plus de deux fours sur le même circuit.

Les avantages du groupement des fours électriques en série sont ceux qui résultent de l'emploi d'une tension plus élevée, car les poids de cuivre à mettre en jeu pour deux fours, en série par exemple, sont moitié moindres, pour une tension de régime de four donnée, que dans le cas de l'emploi des deux fours en quantité

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sur le circuit; les effets d'induction sont aussi moins considérables.

Les fours à arc se comportent mieux, quand ils sont groupés en quantité sur un circuit que s'ils sont groupés en série, car ils peuvent être, dans ce dernier cas, sujets à des variations brusques, principalement à l'allumage, ce qui n'a pas lieu avec des fours groupés en quantité. Ceux à incandescence, étant donnée leur grande régularité de marche, peuvent au contraire être utilisés très avantageusement en tension.

Fours à courants alternatifs polyphasés. — On a cherché à utiliser directement les courants alternatifs polyphasés dans les fours électriques. Un brevet pris par Bertolus en 1897 se rapporte à un four électrique utilisant directement le courant triphasé.

Comme nous l'avons déjà dit, ce four est composé de trois électrodes réunies respectivement aux trois bornes de la dynamo, le retour se faisant ou non par une sole commune.

Ce système a été appliqué à la construction des fours électriques pour la fabrication du carbure de calcium. Le courant biphasé pourrait être utilisé de la même façon.

Le plus généralement, les différentes phases des courants polyphasés sont utilisées séparément dans les fours électriques, qui fonctionnent alors comme fours monophasés.

Si nous considérons trois fours constitués chacun par une électrode verticale mobile et une sole, et alimentés par un alternateur triphasé, les trois électrodes seraient réunies au pôle neutre de la machine et les trois soles à ses trois bornes.

L'emploi du courant triphasé permet, par rapport à celui du courant monophasé, de réaliser une notable économie de cuivre dans l'installation des canalisations, car celles-ci peuvent avoir pour le retour une section moins forte.

L'emploi séparé des courants monophasés, composant un circuit triphasé, procure l'avantage d'obtenir sans aucun dispositif spécial, avec une même machine d'alimentation, l'indépendance des trois circuits.

L'indépendance des circuits peut être aussi obtenue avec un seul alternateur simple à six bornes composé de trois groupes distincts de bobines.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Électrodes. — La difficulté d'obtenir des électrodes de dimensions suffisantes et de forme convenable a longtemps limité les dimensions et la puissance des fours. La consommation de ces électrodes constitue ainsi, pour certaines fabrications et notamment pour celle du carbure de calcium, un élément important de la production économique.

Aussi l'ingéniosité des inventeurs s'est-elle exercée sur les dispositions à donner à ces électrodes.

Dans le cas où les fours comportent des électrodes verticales mobiles, ces électrodes sont souvent constituées par un assemblage de charbons de haute conductibilité obtenus par une fabrication spéciale.

Ces électrodes sont alors le plus souvent de forme carrée ou rectangulaire.

Les électrodes horizontales ou inclinées traversant les parois des fours sont, au contraire, le plus souvent cylindriques.

Les charbons de haute conductibilité qui composent l'électrode étant exposés à brûler au contact de l'oxygène de l'air, par suite de la haute température à laquelle ils sont portés, on a cherché à les protéger en les isolant de l'air et les refroidissant par un afflux d'eau dans les parties exposées; on trouve des exemples de ces dispositions dans les fours Gin et Leleux d'ancien modèle et dans les fours Patin.

La distribution d'eau autour des électrodes est difficilement réalisable et peut constituer un danger sérieux. On y a substitué, dans les derniers modèles des fours Gin et Leleux, un afflux d'air froid en ayant recours, en outre, à une enveloppe d'agglomérés protecteurs.

Courants. — Les fours électriques employés pour la fabrication du carbure de calcium fonctionnant à des tensions relativement peu élevées utilisent des courants de haute intensité, et l'on emploie fréquemment aujourd'hui des courants d'intensité de 8000 à 10000 ampères. Il est impossible, pour de telles intensités, d'installer des coupe-circuits, et c'est l'électrode mobile du four qui sert d'interrupteur sur la canalisation.

Lorsqu'un four est mis brusquement hors circuit, par suite d'une rupture ou d'une fausse manœuvre d'électrode par exemple, la

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

résistance devenant nulle, la machine électrique est déchargée d'un seul coup.

Si elle alimente seulement ce four, cette brusque décharge peut occasionner des accidents graves, soit à la dynamo, soit à la machine à vapeur ou à la turbine.

Pour cette raison, ajoutée à celles que nous avons déjà données, il est préférable, quand on le peut, d'alimenter plusieurs fours en parallèle avec une même machine. En cas d'arrêt de l'un d'eux, la variation n'est plus alors qu'une fraction de la puissance totale.

Les données des courants employés dans les fours électriques varient dans des limites très étendues, suivant la nature des réactions et des fabrications demandées à ces appareils, et aussi suivant la puissance utilisée dans chacun d'eux.

1° *Tension.* — Dans les fours à arc la tension employée varie suivant la conductibilité électrique des vapeurs qui sont émises par la matière traitée, portée à une haute température, et d'après l'écartement donné aux électrodes.

Cet écartement est ordinairement, en pleine marche, de 30^{mm} à 40^{mm}; en l'augmentant trop, on risque de produire l'*extinction de l'arc* et ainsi de rompre le circuit.

La fabrication du carbure de calcium nécessite, pour les fours à arcs, une tension de 50 à 60 volts. La fusion de la bauxite, pour la fabrication du corindon artificiel, nécessite également, dans ce même genre de fours, une tension de 50 volts.

La fusion des minerais de fer, sous l'action de l'arc électrique, peut être réalisée à la tension de 20 volts, par suite de la grande conductibilité des vapeurs émises.

Dans les fours à résistance, dans lesquels l'arc ne jaillit pas, la tension peut être moins élevée, elle n'est fonction que du coefficient de conductibilité de la matière à traiter; ainsi la fabrication du carbure de calcium dans un de ces fours, du type à électrode verticale mobile, peut être réalisée facilement à une tension ne dépassant pas 25 volts. Dans la fabrication de l'aluminium, le four Héroult a fonctionné entre 20 et 25 volts.

Dans les fours à résistance superficielle, par suite de la disposition des électrodes, qui permettent d'introduire entre elles une

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

grande quantité de matière à traiter, la tension de régime peut être facilement portée de 80 à 100 volts.

2° *Intensité.* — L'intensité employée dans les différents systèmes de fours électriques dépend seulement de la puissance de l'appareil et de la température à obtenir, la tension seule variant suivant la matière à traiter ou le type de four employé.

Dans les fours Cowles, il a été réalisé des intensités atteignant jusqu'à 5000 ampères, ce qui correspond, pour une tension de 50 à 60 volts, à une puissance de 250 à 300 kilowatts.

Dans le four Héroult, l'intensité du courant atteint 6000 ampères.

Pour la fabrication du carbure de calcium, des fours à un seul arc et à deux électrodes mobiles ont été construits pour des intensités de 1000 à 2500 ampères, ce qui, à la tension de 50 volts ordinairement employée, représente 50 à 125 kilowatts.

Ces puissances ont été doublées, triplées et même quadruplées, par la réunion, dans un même four, de deux, trois ou quatre arcs.

Les fours à un seul arc, à une électrode verticale mobile, sont mieux disposés que ceux à deux électrodes mobiles pour utiliser des courants électriques de grande intensité, étant donnée la plus grande facilité qu'ils présentent pour employer des électrodes de grande section.

Dans ce genre de fours électriques, on atteint maintenant couramment des intensités de 5000 à 6000 ampères, ce qui correspond à une puissance de 300 kilowatts.

Les fours électriques à résistance Gin et Leleux, dans lesquels la tension employée est très faible, étant donnée la suppression complète de l'arc électrique, utilisent des courants d'intensité atteignant 10000 ampères.

Dans les fours à résistance superficielle, dans lesquels une quantité considérable de matière à traiter peut être interposée entre les électrodes, la puissance utilisée par un seul appareil doit pouvoir atteindre 1000 kilowatts avec un courant de 10000 ampères.

DÉVELOPPEMENT DES INDUSTRIES EMPLOYANT LES FOURS ÉLECTRIQUES. TYPES EXPOSÉS.

D'après des évaluations récentes, la puissance employée à l'aide de fours électriques s'élève déjà au chiffre considérable de près de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

230000 chevaux au total, sur lesquels la fabrication du carbure de calcium utiliserait 185000, celle de l'aluminium 27000, celle du cuivre 11000 et celle du carborundum 2000 chevaux.

En France seulement, plus de 60000 chevaux sont réservés à la fabrication du carbure de calcium.

La fabrication mixte du phosphore et du carbure de calcium au four électrique a été abordée l'année dernière, et tout récemment sont apparues les fabrications, dans certaines usines de la Savoie, du vanadium et du ferrochrome.

Il faut encore citer, en dehors des productions dont nous venons de parler, la fabrication du corindon artificiel, produit dû à la fusion de la bauxite au four électrique.

Les progrès réalisés dans le mode de construction des fours électriques industriels ont été, dans ces derniers temps, très considérables; ainsi le rendement de ces appareils, pour la fabrication du carbure de calcium, qui atteignait seulement 3 kg par kilowatt et par vingt-quatre heures en 1897, vient d'être porté dans les fours Gin et Leleux à 6,2 kg, ce qui correspond pour ces fours à un rendement thermique de 75 pour 100 environ.

A l'Exposition de 1900, dans l'Annexe de la Section d'Électrochimie, on trouve en fonctionnement trois spécimens de fours électriques différents. Ils sont alimentés par du courant alternatif à la tension de 40 volts et absorbent de 1000 ampères à 2500 ampères.

Ils comprennent un four Moissan, un four de la Société des Carbures métalliques, ou four Bullier, et un petit modèle de four de la Compagnie électrométallurgique des procédés Gin et Leleux. Cette Société expose aussi un de ses grands fours pour la fabrication du carbure de calcium, mais le courant disponible n'est pas suffisant pour le faire fonctionner.

Le four Moissan exposé est un four de laboratoire; il fonctionne généralement à 40 kilowatts et est utilisé pour des expériences de fusion des métaux, de réduction de minerais, de production de diamants, de distillation de la silice, etc.

Le four Bullier exposé se compose d'un creuset ouvert constituant l'un des pôles dans lequel plonge une électrode verticale mobile, laissée à l'air libre et constituant l'autre pôle. Ce four, qui est surmonté d'une hotte, est utilisé pour la production du carbur

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de calcium au moyen de l'arc électrique et il consomme environ 70 kilowatts.

Le four Gin et Leleux appartient à la classe des fours à résistance dans lesquels on évite la formation de l'arc; c'est une réduction des fours industriels de même nom. Il est constitué comme ces derniers par une maçonnerie fixe en matières réfractaires enveloppant un creuset métallique mobile monté sur roues qui forme la sole constituant l'autre pôle et est muni d'un bec de coulée. La sole de ce four est du système Keller. L'électrode verticale mobile pénètre par une ouverture rectangulaire dans la maçonnerie.

Les fours Gin et Leleux présentent encore cette particularité que des dispositions sont prises pour évacuer les gaz chauds de la réaction et faire disparaître de la salle qui les contient les fumées et les poussières. Ils sont disposés pour effectuer des coulées fréquentes jusqu'au moment où l'usure de l'électrode oblige à terminer les opérations par la production d'un bloc dont l'enlèvement est rendu facile par la mobilité du creuset. Le four de petit modèle exposé fonctionne à 70 kilowatts environ.

En dehors des fours réunis dans l'annexe de la section d'Électrochimie, nous n'avons trouvé, à l'Exposition, qu'un plan du four Memmo dans la section italienne.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

QUATRIÈME SECTION.

ÉTAT ACTUEL ET PROGRÈS DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL, PAR ONDES HERTZIENNES;

PAR M. ANDRÉ BLONDEL,
Ingénieur des Ponts et Chaussées, Attaché au Service Central des Phares,

ET M. GUSTAVE FERRIÉ,
Capitaine du Génie, Attaché au Dépôt Central de la Télégraphie militaire.

I. — HISTORIQUE.

Dans ce Rapport, nous désignerons sous le nom de *Télégraphie sans fil* la transmission des signaux par des ondes hertziennes, sans l'intermédiaire de fils conducteurs réunissant les deux postes correspondants (1).

On avait déjà cherché, presque dès l'apparition de la Télégraphie ordinaire, à utiliser diverses formes de l'énergie électrique pour obtenir des communications sans fil (2). Mais, les systèmes essayés n'ayant pas donné des résultats réellement pratiques, nous ne les décrirons point, et nous mentionnerons seulement le système Edison (3), qui offrait beaucoup de ressemblance avec la Télégraphie sans fil actuelle, avec la différence qu'il n'employait pas

(1) Nous ne traiterons donc pas des ingénieux systèmes de Télégraphie par induction à basse fréquence de MM. Preece, Evershed, Lodge, etc., qui ont été décrits avec détails par leurs auteurs dans le *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, numéro de février 1899.

(2) *Voir*, pour plus de détails historiques et descriptifs, les Notices de M. BANTI (*L'Eletricittà*, 1897), de M. DELLA RICCIA (*Bulletin de l'Institut Montefiore*, 1898), de M. VOISENAT (*Annales télégraphiques*, mars 1898; *Éclairage électrique*, 8 et 15 avril 1899), de MM. BOULANGER et FERRIÉ (*Revue du Génie militaire*, 1899) et le Livre de M. BROCA (*Télégraphie sans fil;* Gauthier-Villars, 1900).

(3) Patente américaine 465971, du 14 mai 1885.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

d'oscillations de hautes fréquences (1). Ce même système fut repris quelques années plus tard par Narkevitch Jodko.

En 1888, Hertz exécuta ses fameuses expériences destinées à vérifier la savante théorie de Maxwell et mit en évidence la propagation des ondes électromagnétiques. Mais l'absence d'un détecteur sensible ne permettait pas de songer encore à utiliser ces ondes, concurremment aux ondes lumineuses, pour des communications télégraphiques à grande distance.

Ce n'est qu'après les ingénieux travaux (2) de notre compatriote M. Branly, commencés en 1890, sur les propriétés des corps conducteurs en contact imparfait (déjà signalés sous une autre forme par une Note alors inaperçue de M. Calzecchi Onesti) soumis à l'action immédiate ou à distance de décharges électriques, que l'on disposa de moyens appropriés pour déceler les ondes électriques. Nous renvoyons pour le détail et les conclusions de ces travaux au Rapport spécial qui sera présenté au Congrès par leur auteur.

M. Branly constata, en particulier, que les limailles métalliques enfermées dans un tube isolant, entre deux électrodes également métalliques, offrant dans certains cas une résistance ohmique atteignant parfois plusieurs méghoms, voient leur résistance s'abaisser brusquement lorsqu'on les soumet à l'action d'une décharge ou au voisinage d'une étincelle. La conductibilité ainsi acquise par la limaille persiste longtemps, mais est détruite par le moindre choc.

Dès 1893, M. Lodge utilisa les propriétés de ces tubes radio-

---

(1) Le poste transmetteur se composait d'une forte bobine d'induction dans le primaire de laquelle était intercalée une pile avec une clé Morse, et dont le secondaire était relié d'une part à la terre et d'autre part à une antenne aboutissant à une large surface métallique. Le poste récepteur comprenait une antenne et une plaque semblable reliées à la terre par un téléphone.

Le circuit secondaire de la bobine d'induction était ainsi fermé par la terre, le téléphone et le condensateur de très faible capacité formé par les deux surfaces métalliques; les contacts plus ou moins prolongés de la clé Morse, placée dans le primaire de la bobine, se traduisaient dans le téléphone par des sons de même durée.

Les expériences faites ne donnèrent pas de résultats bien satisfaisants et aucune installation pratique du système ne fut réalisée.

(2) Cf. *Lumière électrique,* mai et juin 1891. M. Branly a complété cette étude depuis 1897 dans un grand nombre de Communications intéressantes (*Comptes rendus,* 1897, 1898, 1899, 1900), que nous ne pouvons analyser ici.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

conducteurs de Branly, qu'il appela *cohéreurs,* pour l'étude des ondes hertziennes. Il employait à cet effet un dispositif comprenant un cohéreur, une pile et un galvanomètre. Pour détruire la conductibilité de la limaille, il provoquait généralement l'ébranlement du tube au moyen d'un mouvement d'horlogerie.

La présence d'ondes put être ainsi décelée à 40 m de leur point de production. Dans une conférence faite à Oxford en 1894, à la réunion de l'Association Britannique, M. Lodge émit l'opinion que le tube de Branly ne cessait d'être influencé qu'à la distance d'un demi-mille. Aucun essai ne fut d'ailleurs tenté par lui pour corroborer cette opinion.

Un certain nombre de physiciens de tous pays répétèrent les mêmes expériences au moyen de dispositifs plus ou moins analogues à celui de M. Lodge. M. Popoff, en particulier, le perfectionna en le rendant automatique par l'addition d'un relais actionné par le courant passant dans le tube et qui mettait en action une sonnerie placée en dérivation aux bornes de la pile (1). Le marteau de la sonnerie était disposé de façon à frapper le cohéreur et le ramener à l'état neutre à chacune de ses vibrations. L'inscription graphique des signaux était obtenue par un enregistreur Richard monté en dérivation sur la sonnerie. Pour éviter au cohéreur les effets des ondes parasites produites par les étincelles de rupture de la sonnerie et du relais, on l'entourait d'une double enveloppe métallique munie d'une fente étroite pour le passage des ondes à étudier.

A cette époque, M. Popoff n'utilisa ce dispositif que pour l'enregistrement des décharges de la foudre et vérifia qu'elles étaient oscillantes, d'après les idées de Lodge. Il reliait pour cela l'une des bornes de son récepteur à la tige d'un paratonnerre ou simplement à un fil vertical placé le long d'un mât, l'autre borne du récepteur étant mise à la terre. Il annonça que cet appareil pourrait aussi bien enregistrer les signaux émis par un oscillateur assez puissant.

C'est à M. Marconi, alors étudiant à l'Université de Bologne, qu'appartint l'honneur de réaliser le premier cette expérience (2),

(1) *Journal de la Société physique et chimique russe,* 1er trimestre 1895, et *Elektritchestvo,* octobre 1895.

(2) Le premier brevet de M. Marconi est de juin 1895. Il est vraisemblable que l'inventeur ne connaissait pas les publications de M. Popoff.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

grâce à l'emploi du récepteur à antenne, ou fil vertical, de Popoff, modifié comme on le verra ci-après, pour la réception des signaux télégraphiques Morse, et à la réalisation du producteur d'ondes le plus convenable sous forme d'une seconde antenne reliée à un oscillateur mis d'autre part à la terre. Les deux antennes mises à la terre, qui constituent au fond un élément essentiel des deux postes, comme dans le système d'Edison, n'étaient pas encore à cette époque considérées comme indispensables, et l'ingénieux expérimentateur préconisait concurremment l'emploi de réflecteurs entourant l'oscillateur et le cohéreur. En même temps le jeune inventeur apportait de grands perfectionnements pratiques aux cohéreurs.

Nous nous bornerons à décrire sommairement ses installations actuelles en nous réservant de discuter dans une autre partie les différents organes d'une station.

Un poste transmetteur se compose d'une bobine d'induction dans le primaire de laquelle sont intercalés une source d'énergie (généralement piles et accumulateurs), une clé Morse et un interrupteur à marteau. Les extrémités du secondaire sont reliées à deux sphères métalliques formant l'oscillateur et communiquant elles-mêmes, l'une avec l'antenne, l'autre avec la terre. Chaque fermeture du circuit au moyen de la clé Morse est accompagnée de la production d'étincelles oscillantes entre les sphères de l'oscillateur et donne lieu, comme on l'expliquera plus loin, à l'émission d'ondes hertziennes dans l'espace autour de l'antenne.

Un poste récepteur se compose essentiellement d'un cohéreur dont les électrodes sont reliées, pendant la réception, d'une part à l'antenne et à la terre, et d'autre part aux extrémités d'un circuit contenant un élément de pile et un relais. Le contact de ce relais commande deux autres circuits locaux comprenant, dans une partie commune, une pile et le contact du relais, puis, respectivement, l'un un trembleur destiné à décohérer le tube, et l'autre un appareil Morse.

Lorsque les ondes, recueillies par l'antenne, agissent sur le cohéreur, celui-ci est rendu conducteur. Le circuit dérivé contenant les bobines du relais est alors fermé, et la palette attirée ferme les circuits du frappeur et du Morse. Le marteau du frappeur entre en vibration contre le tube et le décohère; le courant cesse de passer

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dans les bobines du relais et la palette revenant au repos rouvre les circuits du Morse et du frappeur. Les mêmes faits se reproduisent pendant tout le temps que des ondes parviennent à l'antenne.

Si le transmetteur émet une longue série d'ondes, cette série sera traduite sur la bande du Morse par une série de points que l'on peut transformer facilement en un trait par des artifices de construction ou par l'emploi d'un second relais, comme l'a proposé M. Strecker.

M. Marconi s'est attaché à supprimer d'une façon aussi complète que possible toutes les ondes parasites provenant d'étincelles de rupture et pouvant agir sur le cohéreur. Il a placé dans ce but des shunts sans self-induction en dérivation de part et d'autre de tous les points où se produisent les ruptures de circuit et sur toutes les bobines pouvant être le siège de force électromotrice de self-induction. Les bobines du relais en particulier ont été shuntées pour éviter la réexcitation du cohéreur sous l'effet des étincelles de rupture qui se produisent au moment du choc du marteau.

En outre, pour éviter que les ondes émises par l'antenne ne suivent en partie le circuit dérivé contenant le relais, et évitent ainsi le cohéreur, M. Marconi a intercalé dans ce circuit, de part et d'autre du cohéreur, deux bobines présentant une assez grande self-induction et s'opposant par leur impédance au passage des ondes.

Enfin, plus récemment, M. Marconi est parvenu à réaliser un petit transformateur élévateur de tension, qu'il appelle *jigger,* destiné à augmenter l'effet des oscillations recueillies par l'antenne réceptrice en augmentant la force électromotrice induite qui agit sur le cohéreur. Nous reviendrons plus loin sur cet appareil.

Pour éviter que les oscillations produites par la transmission dans une station n'agissent sur le cohéreur trop énergiquement et ne le mettent rapidement hors de service, M. Marconi enferme tous les appareils du poste récepteur dans une boîte métallique, à l'exception du Morse, dont les fils de connexion avec les autres appareils traversent, à leur entrée dans la boîte, des bobines d'impédance enroulées avec interposition de bandes d'étain mises à la terre.

Les premières expériences eurent un grand retentissement, et

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

un grand nombre d'expérimentateurs et de physiciens de tous pays les répétèrent avec plus ou moins de succès, pendant que M. Marconi continuait à rechercher des perfectionnements et des applications commerciales du système.

Il convient de citer, par exemple, les expériences de MM. Slaby et Strecker en Allemagne, de MM. Voisenat et Tissot en France, de MM. Popoff et Ducretet en Russie, etc. Divers perfectionnements ont été apportés aux appareils qui seront examinés plus loin.

Ces nombreuses études n'ont pas encore permis de faire une théorie complète et vérifiée des phénomènes utilisés par la Télégraphie sans fil. Cependant on peut en déduire un certain nombre de faits permettant d'esquisser une théorie vraisemblable suffisante pour guider provisoirement les recherches.

II. — Résultats, portées réalisées, lois des antennes.

Les résultats obtenus jusqu'à ce jour, tant par M. Marconi que par les autres expérimentateurs, mettent en évidence les faits suivants :

La qualité des communications est sensiblement la même, quel que soit le temps, par le brouillard, la pluie, le vent, etc.; mais il est très notablement plus facile d'établir une correspondance entre deux stations séparées par la mer ou un lac qu'entre deux stations situées dans l'intérieur des terres. Nous avons observé que l'humidité du sol joue en petit le même rôle, car la sécheresse gêne les communications. Les hauteurs d'antennes nécessaires sur terre sont toujours bien supérieures à celles qui suffisent sur mer pour communiquer à la même distance. Il est possible, souvent, de mettre en relation deux stations séparées par des obstacles matériels assez élevés, mais on doit tenir compte du fait que les ondes contournent généralement ces obstacles par les côtés.

Nous donnons ci-après les résultats des expériences les plus intéressantes d'après diverses publications.

Tout d'abord en mer :

En 1897, des navires de guerre italiens munis d'appareils Marconi purent communiquer avec la côte jusqu'à une distance de 16km avec des antennes de 22m et 34m.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En août 1898, le yacht royal *Osborne* put correspondre au moyen d'appareils analogues avec une station de la côte anglaise à 13,5 km, malgré l'interposition d'une haute colline.

En 1899, une communication provisoire fut établie à travers la Manche, entre Douvres et Boulogne, à 46 km, avec des antennes de 37 m.

Un navire en marche put également communiquer avec la côte à 52 km, avec 31 m et 37 m d'antennes en espace découvert, et à 19 km avec 22 m et 45 m d'antennes avec interposition du cap Gris-Nez, d'environ 100 m de hauteur.

En juillet de la même année, deux navires de guerre anglais échangèrent des télégrammes en pleine mer à 112 km avec des antennes de 53 m et 60 m.

En 1900, M. Marconi aurait pu établir une communication entre deux stations distantes de 136 km avec 45 m seulement d'antenne. La ligne droite joignant les extrémités supérieures des deux antennes passait à 300 m au-dessous du niveau de la mer.

En France, M. Tissot, employant un matériel construit par M. Ducretet d'après ses indications et celles de M. Popoff, a pu communiquer en mer à 61 km avec des antennes de 30 m, et M. Popoff, en Russie, à 56 km.

Les expériences faites à l'intérieur des terres sont moins brillantes. On a dû recourir, dans la plupart des cas, à des ballons captifs ou des cerfs-volants pour obtenir des antennes suffisamment élevées.

En 1897, M. Slaby put recevoir des signaux à 21 km avec des antennes de 300 m supportées par des ballons captifs.

En 1898, M. Voisenat obtint de bons résultats à 10 km avec des antennes de 40 m.

En 1899, M. Marconi, avec le concours des capitaines Bret et Kennedy, put communiquer à 54 km entre Salisbury et Bath au moyen d'antennes très élevées maintenues par des cerfs-volants. Il ne semble pas cependant qu'au Transvaal, malgré l'annonce des premiers résultats, on ait pu tirer parti des appareils de Télégraphie sans fil qui avaient été envoyés pour les opérations militaires.

Enfin, des essais ont été faits dans des circonstances spéciales par M. M. Lecarme : en montagne, entre le mont Blanc et Chamonix (1899), la communication fut très régulière, malgré la

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

nature rocheuse du sol et le manque de conductibilité de la glace qui le recouvre. En ballon libre, les résultats furent également intéressants : des signaux purent être reçus dans le ballon alors que l'antenne réceptrice (50 m) était parallèle à l'antenne d'émission (40 m) et à une grande hauteur. On put ainsi communiquer à une distance de 8 km et à une hauteur de 800 m.

Lois des antennes. — M. Marconi a déduit de ses nombreuses expériences en mer les lois suivantes, qui ont été vérifiées aussi par M. Gavey, ingénieur du Post-Office.

1° Pour obtenir le maximum d'effet utile, les antennes des deux stations doivent être égales et parallèles;

2° La hauteur des antennes nécessaire pour une bonne communication est liée à la distance qui sépare les deux stations par la formule $H = \alpha\sqrt{D}$, α étant un coefficient dépendant des moyens et des appareils employés.

La distance donnée par cette formule pour une hauteur d'antenne déterminée en espace découvert est diminuée au moins de moitié lorsque les deux stations sont séparées par des obstacles matériels élevés.

Il nous a été possible de vérifier approximativement l'exactitude de cette loi dans les communications entre deux stations dans les environs de Paris, pour des distances ne dépassant pas jusqu'à ce jour 13,5 km.

Il nous a fallu 12 m d'antenne pour 3 km, 18 m pour 9,5 km et 24 m pour 13,5 km (1).

L'avantage d'avoir des antennes égales a paru assez faible, et les résultats étaient à peu près identiques lorsqu'on faisait varier simultanément les hauteurs de deux antennes en maintenant leur somme constante. Cependant il y a une limite inférieure qu'on ne peut réduire; elle nous a paru être comprise entre 5 m et 10 m pour les distances indiquées ci-dessus.

La loi devrait donc être complétée sous la forme suivante :

$$h_t + h_r = 2h \qquad \text{avec} \qquad h_t \quad \text{et} \quad h_r < \lambda,$$
$$H = \alpha\sqrt{D}.$$

(1) Une partie de la ville de Paris était comprise entre les deux stations sur une largeur de plusieurs kilomètres.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

III. — Théorie de la Télégraphie sans fil.

Le phénomène de la Télégraphie sans fil est assez complexe et a donné lieu à des interprétations variées. La première idée qui se présente à l'esprit, c'est d'admettre qu'il y a induction mutuelle entre les deux antennes verticales sensiblement parallèles; l'antenne excitatrice étant parcourue par un courant de charge i sensiblement uniforme (surtout si la capacité à l'extrémité est grande) produit dans l'antenne réceptrice, en vertu du théorème de Newmann, une force électromotrice induite

$$\frac{hh'}{r}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

h et h' étant les hauteurs d'antennes et r leur distance. Mais ce n'est là qu'une expression mathématique, d'ailleurs en désaccord avec la loi indiquée ci-dessus (en remarquant que la limite de portée est définie par une certaine force électromotrice minima nécessaire pour agir sur le cohéreur), qui n'explique rien sur la propagation des ondes et qui paraît enfin en défaut quand, par suite de la rotondité de la terre ou d'un obstacle, les antennes sont invisibles l'une de l'autre.

Certains auteurs ont cru pouvoir invoquer un effet de capacité électrostatique entre les antennes, comme dans le dispositif d'Edison cité plus haut, mais il est facile de voir que l'effet produit diminuerait en raison inverse du cube de la distance et serait très vite annulé, contrairement à ce qu'indiquent les résultats expérimentaux.

D'autres, et au début M. Marconi, ont cru que la propagation se faisait par ondes libres dans l'air, et ne faisaient aucune distinction entre l'emploi d'un simple oscillateur à boules de Righi et celui d'une antenne mise à la terre. Cependant, l'expérience a montré que les antennes jouaient un rôle considérable et que, sans elles, la transmission est limitée à de très faibles distances.

M. Broca a expliqué le rôle de l'antenne d'émission en supposant que l'énergie se propage le long de cette antenne jusqu'au sommet, où (la direction du vecteur de Poynting étant indéterminée) elle se disperse suivant une nappe horizontale. Mais les faits ne confirment pas cette hypothèse, car, en recourbant le bout de l'antenne

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

à angle droit, ce qui devrait rendre la nappe verticale, on n'observe aucune différence. En outre, cette théorie n'expliquerait pas l'effet de la mise à la terre de l'une des boules de l'oscillateur qui accroît, dans une proportion inouïe, la portée des signaux.

D'autres physiciens, frappés de cet effet de la mise à la terre, ont été tentés de ne voir dans la propagation des signaux qu'un effet de conduction par la terre, effet qui est encore plus sensible quand on remplace celle-ci par un fil conducteur entre les deux postes. On expliquerait ainsi pourquoi la transmission est bien meilleure sur la mer (1) que sur la terre, moins bonne conductrice, et pourquoi, dans certaines expériences du lieutenant Tissot, où le poste émetteur était sur un rocher, il a fallu, pour obtenir une bonne communication, se relier d'abord à la mer par un fil métallique. Mais on ne saurait alors expliquer les réceptions excellentes obtenues par M. Lecarme au moyen d'une antenne dans un ballon.

En réalité, le phénomène nous paraît être un mélange de plusieurs effets dont l'un ou l'autre prédomine suivant les cas.

Tout d'abord, l'antenne mise à la terre constitue, avec celle-ci, un oscillateur puissant, à côté duquel celui que constituent les deux boules du déflagrateur ne joue qu'un rôle négligeable, comme l'a déjà fait ressortir M. Della Riccia. Cet oscillateur est à la fois très puissant, par suite de sa capacité par rapport à la terre, et très efficace, par suite de la façon dont il polarise les ondes, comme l'un de nous l'a exposé ailleurs avec plus de détails (2). Des oscillations électriques se produisent le long de l'antenne, à laquelle la force électrique est normale (fait confirmé expérimentalement par M. Tommasina au moyen de la photographie des effluves) et ébranlent l'éther voisin entre l'antenne et la terre. De là naissent des ondes qui se propagent dans tout l'éther environnant; elles sont polarisées et de révolution autour de l'antenne. Les lignes de force électrique sont dans les plans méridiens et aboutissent nor-

(1) Nous ne citons que pour mémoire une explication trop ingénieuse de M. Della Riccia, d'après laquelle l'effet favorable de la mer serait dû à la réflexion des ondes hertziennes à la surface, grâce à la polarisation favorable produite par l'antenne verticale.

(2) A. BLONDEL, *Rôle des antennes dans la Télégraphie sans fil* (*Association française. Congrès de Nantes*, 1898). La considération des images électrostatiques utilisées dans cette Note montre que l'antenne est équivalente à un demi oscillateur de Hertz.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

malement à la terre; les lignes de force magnétique sont des cercles ayant l'antenne pour axe. Mais, par suite de cette polarisation et de l'effet de concentration bien connu dans la propagation des ondes le long des fils ou des surfaces métalliques, la densité électrique est beaucoup plus forte à la surface du sol, directement reliée à l'oscillateur, que dans l'atmosphère, et, en gros, les lignes magnétiques semblent glisser le long du sol. Cette concentration est d'autant plus grande que le conducteur est plus parfait et la perte d'énergie occasionnée par le glissement est d'autant plus faible.

Mais cette concentration n'exclut pas la diffusion d'une partie importante de l'énergie dans tout l'espace sous forme d'ondes hémisphériques, dont les effets sont moins intenses qu'au voisinage du sol, mais néanmoins notables.

L'antenne réceptrice, coupée aux divers points de sa hauteur par ses lignes de force magnétique, est le siège d'une force électromotrice résultante proportionnelle à l'intensité du champ et à la rapidité des oscillations qui agissent sur le cohéreur. Plus l'antenne est longue, plus elle coupe de lignes magnétiques; à égale longueur, elle en coupe d'autant moins qu'on l'écarte davantage du sol, autrement dit la portée est donc plus grande à la surface du sol qu'à une certaine distance. Il n'est pas nécessaire que l'antenne de réception soit reliée au sol, mais la portée paraît être un peu augmentée dans ce cas par l'effet de conduction signalé ci-dessus.

La force magnétomotrice des lignes magnétiques autour du centre d'ébranlement est, en vertu de la réciproque de la loi d'induction, égale à la dérivée du flux électrostatique dont la variation leur donne naissance, $H = \frac{d\Phi}{dt}$.

Il y a donc intérêt théoriquement à accroître le plus possible la capacité mise en jeu, le potentiel employé et la fréquence des oscillations, en réduisant la self-inductance. Nous avons été ainsi conduits à essayer des antennes très grosses ou formées de bandes, puis à les remplacer par un disque horizontal au-dessus d'un autre placé sur le sol. Mais ce dernier dispositif donne de très médiocres résultats si l'on n'y ajoute pas une antenne; celle-ci paraît donc nécessaire pour produire l'ébranlement le plus considérable et le

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

mieux polarisé, malgré la self-induction notable qu'elle présente. Le rôle de l'antenne, à ce point de vue, mérite d'être étudié plus complètement.

IV. — Progrès réalisés et discussion des diverses parties.

1° **Appareils producteurs d'ondes**. — Aucun progrès notable n'a été réalisé dans les organes de transmission depuis l'origine de la Télégraphie sans fil, l'effort des expérimentateurs s'étant porté presque exclusivement sur les organes de réception. On produit les ondes en chargeant périodiquement, au moyen d'une bobine d'induction, le condensateur formé par l'antenne et la terre, la décharge se faisant entre les boules de l'oscillateur.

Bobines. — Il semble résulter des expériences faites, conformément à la théorie précédente, qu'il y a avantage à transmettre des signaux avec une étincelle de décharge aussi longue que possible, pourvu qu'elle soit nettement oscillante. Il s'ensuit que l'on doit employer des bobines d'induction très puissantes. Les plus usitées sont celles qui donnent de 25 cm à 40 cm d'étincelles entre pointes, mais, par suite du débit assez notable de la bobine sur la capacité du système antenne-terre, les étincelles sont réduites à une longueur de 3 cm à 5 cm environ et deviennent très nourries. On ne peut employer que des bobines construites avec le plus fort isolement possible et en ayant soin, si les deux pôles sont inégalement isolés, de relier à la terre le moins isolé. Les bobines unipolaires de Wydts-Rochefort donnent de bons résultats dans ces conditions, mais ils ne semblent pas supérieurs à ceux d'une bobine ordinaire.

On a essayé tous les types d'interrupteurs : à contacts tournants, à mercure, à pilon, à turbine, etc., mais aucun n'a montré de supériorité bien réelle. Pour une marche très prolongée, les meilleurs sont les deux derniers types. Il est toutefois certain que la fréquence doit être assez faible. M. Marconi est revenu au simple interrupteur à marteau, qui nous a également donné toute satisfaction. Le Wehnelt, qui a donné lieu à des insuccès ailleurs, nous a paru excellent si l'on a soin d'ajouter une capacité en dérivation pour éviter l'arc. Pour éviter l'emploi d'interrupteurs, bien incommodes lorsqu'on fait usage de grandes intensités, nous avons

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

essayé avec plein succès des transformateurs à courants alternatifs à 30 000 volts et au-dessus, avec capacité en dérivation aux bornes du secondaire et self-induction dans le primaire (préconisée par M. d'Arsonval). Cet appareil présente le grand avantage que le courant débité sur l'antenne ne modifie pas la longueur de l'étincelle et qu'il est ainsi facile, même avec un transformateur à tension modérée, d'obtenir des étincelles oscillantes de grande longueur. L'un de nous a fait construire, dans ce but, par la maison Sautter-Harlé, un transformateur de 100 000 volts d'un type nouveau unipolaire. Mais l'emploi de transformateurs ne peut être qu'assez limité, étant donnés les dangers que présentent les courants à très haute tension et l'énergie assez considérable qu'exigent ces appareils, supérieure à celle consommée par une bobine. Nous poursuivons de nouvelles expériences sur cet appareil.

Oscillateurs. — M. Marconi, étant un élève de M. Righi, a fait ses premiers essais au moyen de l'oscillateur Righi, composé de quatre boules dont les deux intérieures sont de plus fort diamètre et plongées dans l'huile.

On a reconnu depuis que cet appareil ne présentait aucun avantage, car il joue le rôle d'un simple déflagrateur, et n'importe quel autre exploseur à deux, trois, quatre boules, etc., placées dans l'air ou dans des liquides isolants est équivalent. Les résultats dans l'huile sont même généralement moins bons qu'on ne pourrait le supposer, la résistance et le pouvoir inducteur spécifique du liquide baissant assez rapidement par suite de sa décomposition partielle et de la mise en liberté de parcelles de charbon. Cependant, nous avons été satisfaits de l'emploi d'un oscillateur à quatre boules plongé dans du pétrole et suspendu à une baguette de verre par d'autres baguettes ou par des cordons de soie permettant de les déplacer pour régler la longueur des étincelles. La plupart des expérimentateurs, même M. Marconi, sont revenus à l'exploseur de Hertz à deux boules dans l'air; le platinage des boules ne paraît pas nécessaire, pourvu qu'elles soient polies de temps en temps au papier d'émeri.

Antennes. — Contrairement à ce qu'indiquait la théorie, nous avons constaté que la nature des antennes de réception et de trans-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

formation n'a qu'une très faible influence sur la qualité des communications. Bien que les étincelles de transmission soient plus nourries lorsque l'antenne a une plus grande surface (fil de gros diamètre, bande de clinquant ou de toile métallique), ou qu'on lui adjoint une capacité supplémentaire au sommet ou à la base (en dérivation), la réception n'en paraît ni meilleure ni pire si l'on maintient au déflagrateur le même potentiel explosif. Il suffit que les antennes soient isolées avec beaucoup de soin, surtout pour la transmission, par des suspensions en ébonite; un guipage en caoutchouc le long du fil paraît même utile en empêchant la décharge partielle de l'antenne par convexion. Le seul élément important est, semble-t-il, la hauteur et la verticalité de l'antenne.

2° **Appareils récepteurs.** — Des perfectionnements notables ont été introduits dans la constitution des postes récepteurs, grâce à la connaissance plus approfondie que l'on a des conditions de fonctionnement de l'organe principal, le cohéreur.

Théorie et construction des cohéreurs. — Pour expliquer les phénomènes de variation de conductibilité de corps conducteurs en contact imparfait sous l'action des ondes électriques, deux théories ont été proposées, l'une par M. Branly, l'autre par M. Lodge. Il nous semble que rien ne force à les opposer et qu'il existe probablement deux effets simultanés répondant à ces deux théories. M. Branly (1) suppose qu'il y a, par l'action de la force électrique, une sorte de modification ou orientation des molécules par un processus encore inconnu, analogue à la polarisation des diélectriques ou à l'électrotonus des cellules nerveuses. M. Branly montre, en effet, qu'en appliquant progressivement une force électromotrice croissante on détermine des variations également croissantes de la résistance dont le signe peut changer suivant les corps. M. Lodge (2) attribue, au contraire, l'accroissement de conductibilité, au moment de l'action des ondes, à la formation de soudures entre les corps conducteurs en contact imparfait. M. Arons (3) en a donné une vérification en montrant à la loupe

(1) BRANLY, *Lumière électrique,* t. LI, p. 526.
(2) LODGE, *Philosophical Magazine,* t. XXXVII, p. 94.
(3) DORN et ARONS, *Wiedemann's Ann.,* année 1898.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

les petites étincelles soudantes qui jaillissent entre les particules. M. Tommasina a montré également qu'on peut, par l'action d'une force électromotrice suffisante, produire des chaînes de limaille spontanément agglomérées. Aussi la théorie de la soudure est-elle généralement admise. Elle est confirmée par les travaux de l'un de nous (1), qui a mis en évidence la nécessité, pour un cohéreur pratique, de limailles ou d'électrodes en métal légèrement oxydable. Les recherches de Dorn ont montré en outre que l'oxydation apparente ou la couche isolante n'est souvent qu'une couche de gaz apparents ou occlus qu'on fait disparaître plus ou moins rapidement par le vide. Ce phénomène de soudure, qui nous paraît expliquer la diminution brusque de résistance qui actionne le relais au passage des ondes, n'exclut pas du tout l'existence concomitante du phénomène de Branly, plus lent et moins prononcé. Quoi qu'il en soit de la cause intime de la cohérence, il ressort des expériences faites en particulier sur les cohéreurs à limaille, les faits suivants qui caractérisent le fonctionnement de l'appareil au point de vue pratique de la Télégraphie sans fil :

Si l'on fait varier la différence de potentiel créée entre les électrodes d'un cohéreur déterminé, intercalé, par exemple, dans un circuit contenant un potentiomètre et un galvanomètre, la limaille se cohère à partir d'une certaine tension et ne peut même plus se décohérer par le choc, lorsque cette différence est égale ou supérieure à une certaine valeur que l'un de nous (2) a dénommée *tension critique de cohérence;* celle-ci varie avec la nature des métaux employés, leur degré d'oxydation, la pression des limailles.

Pour utiliser les propriétés du cohéreur dans la Télégraphie sans fil, il faut que cette tension critique ne soit pas atteinte par la force électromotrice de la pile, augmentée de la force électromotrice de self-induction $e = L\frac{di}{dt}$, à laquelle donne lieu l'extra-courant de rupture dans le circuit local du cohéreur et du relais. Il faut donc avoir soin que l'inductance de ce circuit local soit aussi faible que possible, et que le courant qui le parcourt ait une inten-

(1) BLONDEL, *Association française. Congrès de Nantes,* 1898.
(2) BLONDEL et DOBKÉWITCH, *Éclairage électrique,* t. XXIII; 5 mai 1900.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sité également aussi faible que possible. La première condition étant difficile à satisfaire parfaitement, malgré l'emploi de shunts sur toutes les parties inductives, par suite de la présence des inductances supplémentaires nécessaires, il faut réduire surtout l'intensité du courant par l'emploi d'une pile à basse tension; nous nous servons avec succès de celles de M. O'Keenan ou de celle de M. de Lalande qui peut, avec l'étain comme électrode négative, descendre à 0,25 volt.

Si l'on appelle E' la force électromotrice de la pile, E_0 la tension critique du cohéreur, e la force électromotrice de self-induction du circuit, E la différence de potentiel produite entre les électrodes par le passage des oscillations recueillies par l'antenne, on doit avoir

$$E' + e < E_0 < E,$$

conditions que l'on pourra satisfaire en faisant E' et E_0 aussi petits que possible. On accroît donc la sensibilité avec une antenne donnée en abaissant le plus possible la valeur critique par l'emploi de métaux peu oxydables et en mettant en circuit une pile de faible force électromotrice et un relais très sensible.

Nous avons obtenu de très bons résultats en construisant des cohéreurs en limaille d'or vierge, d'argent vierge, ou d'argent allié d'un centième de cuivre, comprise entre des électrodes de maillechort (1). L'emploi d'un métal légèrement oxydable permet d'élever suffisamment la tension critique de cohérence pour permettre l'emploi d'une pile capable d'actionner un relais.

Pour éviter que l'oxydation des métaux employés ne se modifie, il y a évidemment avantage à faire le vide dans le cohéreur, mais, d'après ce qu'on a dit plus haut, il ne faut pas exagérer ce vide et tenir compte des modifications qu'il peut produire en se réservant de faire varier après coup la tension critique de cohérence en agissant sur la pression de la limaille à l'aide d'une réserve de limaille contenue dans une poche recourbée en verre. Cette réserve peut aussi être placée derrière l'une des électrodes, dans laquelle on a pratiqué une encoche suivant toute la longueur d'une génératrice.

(1) BRANLY, *Comptes rendus*, 1898; BLONDEL, *Congrès de Nantes*, 1898; et TISSOT, *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 302.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Tissot a constaté que l'on augmentait aussi bien à volonté la pression des limailles et, par suite, la sensibilité d'un cohéreur, en faisant les électrodes et la limaille en métal magnétique (acier, nickel ou cobalt) et en rapprochant plus ou moins du tube un petit aimant dont les lignes de force sont parallèles à l'axe du tube.

Transformateurs amplificateurs. — Il était naturel d'essayer d'accroître la force électromotrice induite agissant sur le cohéreur et, par suite, la distance possible de communication avec des moyens déterminés, par un transformateur analogue à ceux que l'on emploie en téléphonie, en en reliant le primaire d'une part à l'antenne et, d'autre part, à la terre, et en intercalant le secondaire dans le circuit cohéreur-pile-relais dans le voisinage immédiat du cohéreur. M. Marconi a réalisé avec succès, le premier, ce dispositif sous le nom de *jigger* et a su, par tâtonnements, trouver le meilleur enroulement pour le secondaire de ce transformateur; ce secondaire est formé de couches successives de manière que le nombre de tours dans chacune d'elles diminue à mesure qu'augmente la distance au centre; on doit relier directement au cohéreur l'extrémité du secondaire qui est la plus éloignée du noyau; les fils sont bobinés sur un noyau de verre.

M. Marconi ne donne aucune théorie à l'appui de ce mode de construction de son transformateur, qui semble réduire au minimum l'impédance et réaliser le maximum d'induction mutuelle pour ces courants de haute fréquence. L'expérience nous a montré que le *jigger* n'agit bien que comme transformateur et que le condensateur ajouté par M. Marconi en dérivation, dans l'idée de réaliser par la combinaison un effet de syntonie, est sans action sensible. Quant au transformateur, son action favorable est des plus nettes, comme nous l'avons vérifié; d'après M. Marconi, cet appareil accroîtrait la portée de 30 à 60 pour 100.

Relais. — L'organe essentiel d'un poste récepteur, après le cohéreur, est le relais. Nous avons expérimenté un grand nombre de modèles de cet instrument; ce sont les relais Claude, à cadre mobile, qui nous ont donné les meilleurs résultats. Nous avons pu recevoir des signaux corrects avec un relais de cette espèce en employant un cohéreur en limaille d'argent allié d'un centième de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

cuivre, entre électrodes de maillechort, et une pile de 0,16 volt. L'intensité du courant passant dans le cohéreur était un peu supérieure à un vingtième de milliampère. Mais c'était là une limite, et nous opérons le plus souvent avec des piles de 0,3 volt.

V. — Dispositifs a l'étude.

Cohéreurs à décohésion spontanée. — La nécessité d'un frappeur avec les cohéreurs actuels est très gênante et ne permet pas l'emploi du téléphone comme récepteur. Divers expérimentateurs ont donc cherché des cohéreurs décohérant spontanément sans choc.

M. Tommasina (1) a essayé de remplacer, pour un cohéreur à limaille d'acier, fer, nickel, cobalt, le frappeur par un électro-aimant en dérivation, qui est aimanté dès que le cohéreur est actionné et, par suite, attire aussitôt la limaille et la décohère. Mais nous avons constaté que ce dispositif présente un inconvénient, comme le dispositif Tissot décrit plus haut : la limaille s'aimante au bout d'un certain temps, sa tension critique s'abaisse fortement et il n'est plus possible de la décohérer sous les tensions employées pratiquement.

Le même auteur a indiqué qu'il était possible d'obtenir des cohéreurs auto-décohérents au charbon. On obtient de bons résultats en constituant les deux électrodes au moyen de fils de maillechort plongeant dans de la poudre de charbon analogue à celle employée dans les microphones de l'Administration suisse (2).

Le fait avait été déjà signalé par Hughes, l'inventeur du microphone (3), qui l'a revendiqué récemment. MM. Ducretet et Popoff (4) ont fait en Russie des expériences au moyen de ce procédé ou d'un dispositif analogue où le charbon est remplacé par de la poudre d'acier. Les résultats obtenus auraient été bons et leur auraient permis d'établir une communication à 50 km.

Autres systèmes détecteurs. — Righi et Tuman ont essayé de réaliser des détecteurs dans le vide formés de deux fils de platine

(1) *Comptes rendus*, t. CXXVIII; 15 mai 1899.
(2) *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 904.
(3) Du Moncel, *Journal de Physique*, t. VII, p. 219.
(4) *Éclairage électrique*, n° 16 du 21 avril 1900.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

très rapprochés et soudés dans une ampoule à vide. L'un de nous (1) a expérimenté dans le même but un tube de Geissler, à larges électrodes presque en contact, combiné, non plus comme les précédents, avec un relais, mais avec un téléphone. La pile doit être insuffisante pour rompre seule la résistance du tube à vide, mais suffisante pour produire un courant à chaque passage d'un courant oscillatoire qui établit une effluve entre les électrodes. Ces dispositifs donnent des signaux à faible distance, mais ils manquent jusqu'ici de sensibilité comparés aux cohéreurs.

Anticohéreurs de Neugschwender et de Schafer (2). — M. Neugschwender est parvenu à constituer un détecteur d'ondes en intercalant dans un circuit comprenant une pile et un galvanomètre un fragment de glace dont on a séparé l'argenture en deux parties par une fente étroite. Une certaine largeur est nécessaire pour éviter que le détecteur ne fonctionne comme cohéreur. Si l'on souffle sur la fente ou qu'on la place dans le voisinage d'un électrolyte liquide, la couche très fine de vapeur ou de buée qui se dépose forme conducteur et le galvanomètre dévie. Il revient à zéro si l'on produit des ondes dans le voisinage; les ondes cessant, le galvanomètre dévie de nouveau, d'où le nom d'*anticohéreur*. On peut entretenir la conductibilité du détecteur en plaçant près de lui un chiffon mouillé ou une cuve pleine. Les trépidations, vibrations acoustiques, élévations de température, électricité statique, sont sans influence sur l'instrument.

La résistance ohmique à l'état normal est de 50 ohms et monte brusquement à 8000 ou 9000 ohms sous l'action des ondes.

L'auteur du procédé a expliqué que le phénomène était dû à ce qu'il se forme entre les deux parties de l'argenture, sous l'effet de l'électrolyse, des filaments métalliques qui se rompent sous l'action des ondes électriques. Il est également possible que les oscillations arrêtent simplement les ions dans leur transport à travers l'électrolyte, car l'un de nous a constaté le même phénomène entre deux fils plongés dans une cuve électrolytique.

M. Beler Schafer a perfectionné et rendu pratique ce dispositif

(1) Pli cacheté du 16 août 1898 et *Comptes rendus*, 21 mai 1900.
(2) *Wiedemann's Ann.*, t. LXVII, p. 430, et t. LXVIII, p. 92.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

au point d'obtenir des communications avec des antennes de 30 m jusqu'à plus de 60 km.

Emploi du téléphone. -- L'un de nous a signalé qu'il serait très avantageux d'employer le téléphone comme appareil récepteur en combinaison avec un des appareils précédents, notamment les détecteurs et anticohéreurs.

Il y a plusieurs années que MM. Colson et Narkevitsch Jodko ont indiqué l'emploi du téléphone pour déceler les ondes électriques. Mais les résultats obtenus par ce moyen nous paraissent bien incertains, car le téléphone est aussi actionné à distance, par induction ordinaire, même en circuit ouvert, par des courants vibrés à haut potentiel comme ceux que produisent les bobines d'induction. C'était le principe du dispositif d'Edison rappelé plus haut.

Il y aurait donc doute sur la cause du son rendu par le téléphone. Le peu de sensibilité qui aurait été reconnu pour cet usage proviendrait probablement du faible rayon d'action de ces courants vibrés.

Il n'en est pas de même si, comme l'a proposé l'un de nous (1), on intercale le téléphone dans un circuit contenant une pile et un détecteur ou un cohéreur décohérent. On arrive par ce procédé à obtenir des sons dans le téléphone alors que celui-ci est placé bien en dehors de la zone d'action des courants vibrés. On est donc certain que son fonctionnement est dû à l'action des ondes sur le détecteur. Étant donnée l'extrême sensibilité du téléphone, on peut employer des cohéreurs décohérents à tension critique très basse.

Système de syntonie. — Un des graves inconvénients que l'on reproche à la Télégraphie sans fil, et qui l'empêche d'entrer dans le domaine réel de la pratique, consiste en ce fait qu'avec les appareils ordinaires décrits plus haut il n'est pas possible d'obtenir dans une même station deux communications indépendantes, tout récepteur placé dans le rayon d'action d'un transmetteur étant actionné par les ondes émises par celui-ci.

(1) *Loc. cit.*

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Divers systèmes basés sur des principes différents ont été proposés dans le but d'éviter cet inconvénient.

Système Lodge Muirhead (1). — En se basant sur l'analogie que présentent à certains points de vue les oscillations électriques et les ondes sonores, MM. Lodge et Muirhead ont êssayé d'obtenir une résonance électrique entre les circuits émetteurs et récepteurs. Ils rendent pour cela le radiateur et le collecteur indépendants des autres appareils et agissent sur leur période $T = 2\pi\sqrt{LC}$, en modifiant la self-induction L au moyen d'une bobine de self à nombre de spires variable.

Système Marconi. — M. Marconi, sans rien changer à l'installation de ses stations décrites plus haut, agit à la fois, pour obtenir la résonance, sur la capacité et la self, en plaçant parallèlement à l'antenne un large filet métallique relié à la terre à l'une de ses extrémités, et en embrochant sur l'antenne une bobine de self variable.

Bien que M. Shaw (*Société de Physique de Londres,* 23 mars 1900) ait fait des expériences montrant qu'il est possible d'obtenir un effet maximum en agissant sur la capacité et la self, cette méthode n'a pas eu de résultats bien probants, par suite du fait que les oscillations de l'antenne d'émission sont très vite amorties et n'ont pas le temps de donner lieu à l'établissement d'une véritable résonance au poste transmetteur.

Système Blondel. — L'un de nous a indiqué, dès 1898 (2), un autre procédé de synchronisation qui consiste à accorder ensemble, non plus les fréquences des oscillations électriques propres du transmetteur et du récepteur, mais des fréquences artificielles beaucoup plus basses, tout à fait arbitraires et indépendantes des antennes, à savoir la fréquence des charges de l'antenne et celle des vibrations d'un téléphone sélectif tel que les monotéléphones de M. Mercadier.

Il suffit de maintenir la fréquence de l'interrupteur bien constante et égale à la fréquence propre du récepteur.

---

(1) *The Electrical Review,* t. XLII; 19 août 1898.

(2) Pli cacheté 6041 du 16 août 1898 et *Comptes rendus* du 21 mai 1900.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

On peut employer, associé au téléphone, comme on l'a vu plus haut, un détecteur anticohéreur ou un cohéreur à décohérence spontanée, tel que ceux au charbon de M. Tommasina.

Chaque groupe d'ondes de haute fréquence, rapidement amorties, agit en bloc comme une simple percussion sur le téléphone à vibration lente : celle-ci reste d'ailleurs sensiblement sinusoïdale, grâce à l'inertie.

On peut enfin, dans le récepteur, remplacer l'élasticité mécanique par une élasticité électrique, en ajoutant en dérivation une capacité telle que le circuit formé par le tube, le téléphone et le condensateur soit alors en résonance ou plutôt en pseudo-résonance avec le poste d'émission, et l'on peut en tirer parti, soit pour sélectionner les signaux avec un téléphone quelconque, soit pour renforcer l'effet sélectif d'un monotéléphone de même fréquence.

S'il y a plusieurs récepteurs dans un même poste, il sera plus avantageux de les monter chacun sur une antenne différente.

D'autres inventeurs ont proposé, d'une façon qui paraît encore bien prématurée, l'emploi de dispositifs de Télégraphie multiple du genre Baudot, qui ne résolvent pas, du reste, le même problème (1).

Enfin, M. Guarini Foresio, à côté de théories erronées, a indiqué un système de relais automatique dont on ne connaît pas encore les résultats.

CONCLUSIONS.

PERFECTIONNEMENTS DÉSIRABLES.

En résumé, à peine créée par les efforts successifs des savants cités dans l'historique et rendue pratique par M. Marconi, la Télégraphie sans fil a reçu de nombreux perfectionnements de détails, qui ont eu pour effet d'accroître énormément les portées réalisées, surtout en mer.

Mais, sur terre, ces portées sont encore insuffisantes pour faire concurrence à la Télégraphie optique et, sur mer, l'utilité de ce

(1) Nous ne citerons aussi que pour mémoire les ingénieux dispositifs de M. Turpain pour la Télégraphie multiple syntonique par ondes hertziennes le long des fils des lignes télégraphiques ordinaires (Cf. *Comptes rendus,* 1899).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

genre de signaux est très restreinte par suite de l'impossibilité de les séparer si l'on emploie des cohéreurs ordinaires très sensibles. Les cohéreurs décohérents et les anticohéreurs, combinés avec le système de pseudo-syntonie, ouvrent des horizons nouveaux, mais la sensibilité est jusqu'ici plus restreinte et les essais sont encore trop peu nombreux pour permettre de juger l'avenir réservé à ce procédé.

C'est de ce côté qu'il semble le plus urgent de porter les efforts pour donner à la Télégraphie sans fil toute sa valeur.

On peut désirer aussi actuellement voir perfectionner encore les appareils, notamment les bobines, interrupteurs, relais, et surtout les appareils récepteurs nouveaux (détecteurs, anticohéreurs, etc.) qui n'exigent pas l'intervention d'un frappeur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

PROCÈS-VERBAUX.

SÉANCES GÉNÉRALES.

SÉANCE D'OUVERTURE,

Samedi 18 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. MOUGEOT,
Sous-Secrétaire d'État.

La séance est ouverte à $10^h 15^m$, dans le Palais des Congrès.

Discours de M. MOUGEOT, *président.*

MESSIEURS,

L'honneur est grand pour moi de présider cette Séance et d'ouvrir vos travaux. Je sais, en effet, de quels hommes savants et éminents se compose votre assemblée, et je n'ignore pas non plus que, chez vous, la Science est accompagnée du plus grand désintéressement, que les richesses du cœur sont jointes aux qualités de l'esprit.

Vous êtes les disciples dévoués de la Science, qui est le plus sûr pionnier de la civilisation, et dont l'Électricité est une des plus merveilleuses applications. (*Applaudissements.*)

Chaque progrès, en effet, n'est-il pas accentué par les découvertes de la Science et par le travail du génie humain dont vous êtes l'émanation?

Je vous salue surtout, vous, nobles étrangers, qui êtes accourus

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

à Paris pour communier dans un même sentiment d'amour de la Science et dans une même pensée de solidarité, en vue d'améliorer le sort de l'humanité elle-même. (*Applaudissements.*)

Au nom du Gouvernement de la République, je vous souhaite à tous la bienvenue. Je désire que votre séjour parmi nous soit heureux, et je vous félicite d'avance des résultats féconds que les débats aussi solides qu'élevés qui se produiront dans cette enceinte ne manqueront pas de donner.

Je vous salue tous, soldats de la Science et de la paix, qui venez ici, mus par un même sentiment et animés d'un même souffle, pour travailler dans l'intérêt supérieur de l'humanité. (*Applaudissements.*)

Avant de vous donner la parole, monsieur Mascart, je veux, usant de ma prérogative de président éphémère, vous adresser publiquement, le premier, l'hommage de mes compliments et des félicitations sincères que mérite la haute distinction qui vient de vous être conférée par le Gouvernement de la République et dont toutes les personnes ici présentes savent la légitimité. (*Vive approbation.*)

Tous ceux qui ont étudié votre œuvre, tous ceux qui savent qui vous êtes et quelles espérances le monde savant fonde sur vos travaux, sont heureux de cette distinction, dont l'éclat se réfléchit sur tous vos collaborateurs. (*Double salve d'applaudissements.*)

Discours de M. MASCART,
Président de la Commission d'organisation du Congrès.

MONSIEUR LE SOUS-SECRÉTAIRE D'ÉTAT,
MESDAMES, MESSIEURS,

Le Comité d'organisation du Congrès d'Électricité a d'abord une mission particulièrement agréable à remplir, celle d'exprimer sa profonde reconnaissance à nos collègues étrangers pour l'empressement avec lequel ils sont venus en aussi grand nombre pour répondre à son invitation. Nous espérons que ce Congrès, en rapprochant les savants et les ingénieurs de différents pays qui ont dirigé leurs efforts en vue des progrès de l'Électricité, contribuera à resserrer les liens d'amitié formés dans des réunions antérieures et à créer entre eux de nouvelles relations.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Les applications de l'Électricité s'étendent aujourd'hui à presque toutes les branches de l'activité humaine.

Au début du siècle, le premier Consul, après avoir assisté aux expériences de Volta devant la première classe de l'Institut, émit l'opinion que cette partie de la Physique paraissait le chemin des grandes découvertes. Aucune prédiction n'a été plus complètement réalisée. Les découvertes qui se sont succédé depuis cette époque présentent un caractère unique dans l'histoire de l'esprit humain.

La première tâche était de mettre en évidence les principes et les lois des courants électriques; elle fut accomplie en trente années par les travaux d'OErstedt, Ampère et Faraday.

En même temps, Davy montrait par des expériences mémorables les ressources que devait y trouver la Chimie, Jacobi constituait l'industrie importante de la Galvanoplastie et la découverte d'Arago sur l'aimantation du fer par les courants donnait naissance à la Télégraphie électrique.

L'utilisation de cet agent nouveau pour les moteurs et la production des courants par des moyens mécaniques eurent des progrès beaucoup plus lents. Si le problème était résolu en principe, les solutions pratiques offraient les plus grandes difficultés.

Pour quelques applications particulières, la marche alternative que le mouvement des organes mécaniques imprime naturellement aux courants induits ne présentait pas d'inconvénients sérieux, mais on cherchait surtout à redresser ces courants afin de leur conserver le même sens à l'extérieur des machines, par analogie avec ceux que fournissait la pile de Volta, et le second tiers du siècle n'a pas suffi pour en trouver une solution entièrement satisfaisante.

C'est alors que la petite machine trop ignorée de M. Paccinotti et l'invention de la dynamo industrielle par M. Gramme ont ouvert une voie toute nouvelle.

Le spectacle que nous avons aujourd'hui sous les yeux tient du prodige. Au lieu des petits appareils du laboratoire et du matériel encombrant des piles électriques, nous voyons des machines de toutes dimensions, capables de se plier aux opérations les plus délicates et d'absorber le travail des plus puissants moteurs mécaniques avec une souplesse qui défie toute comparaison.

L'Industrie entière en est transformée.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Les forces en réserve dans la nature trouvent partout une meilleure utilisation. Le cours des fleuves, les torrents, les cascades, toutes les formes de ce qu'on a appelé *la houille blanche* sont mises à profit par l'Électricité pour les besoins de l'homme, soit sur place, soit à de grandes distances, et des ressources immenses autrefois perdues restent encore disponibles.

Si les amateurs de paysages solitaires peuvent regretter parfois que l'industrie envahisse les vallées gracieuses ou sauvages et prenne possession des sites pittoresques, ces plaintes ne se justifient pas en regard des bienfaits dont profite le genre humain.

L'Électricité opère également une véritable révolution dans l'industrie des transports. Elle multiplie les relations entre les habitants des villes et les communications entre les différentes localités. Dans un pays voisin, si aimé des touristes, elle conduit sur les cimes les plus élevées les visiteurs désireux de jouir sans fatigue des grands aspects de la nature.

A l'Exposition de 1881, William Siemens nous montrait, pour la première fois, une expérience curieuse sur l'affinage du fer dans un creuset entre les charbons d'un arc électrique. L'opération n'était faite que sur 1 kg de matière, et l'on ne pouvait guère prévoir que ce four électrique aurait tant d'avenir.

Les puissants moyens qu'offrait l'Électricité industrielle ont été mis à profit par les chimistes pour la production économique de l'aluminium et des métaux rares, pour l'affinage du cuivre, la formation directe de diverses substances et d'une série de corps nouveaux, au point que l'un des maîtres de la Science a pu dire : « La Chimie minérale, qui paraissait terminée, n'en est qu'à son aurore. Dans ce domaine encore, la Science a rendu à l'Industrie avec usure les services qu'elle en avait reçus. »

L'éclairage électrique n'a plus à faire valoir ses qualités spéciales pour conquérir la faveur publique ; il se développe tous les jours davantage, et l'Exposition nous montre avec quelle magie cette lumière se prête aux plus merveilleux effets de décoration. L'Électricité peut même revendiquer à son compte une de ses rivales d'origine plus récente, la lumière de l'acétylène, dont la place n'est pas encore bien délimitée dans l'économie générale.

Pour les moyens d'échange de la pensée humaine, le télégraphe et le téléphone, chaque jour, apportent un nouveau progrès.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'accroissement des transactions a fait imaginer les méthodes les plus ingénieuses pour multiplier le service des lignes et utiliser un même fil à la transmission simultanée de plusieurs dépêches, de même sens ou de sens contraire, laissant aux appareils récepteurs le soin de dégager, chacun en ce qui le concerne, celui des signaux qui leur est destiné.

On va même jusqu'à supprimer les conducteurs métalliques en confiant à l'air le soin de transmettre les ondulations électriques. Verrons-nous le moment où l'atmosphère, chargée ainsi d'une électricité toute différente de celle des orages, sera parcourue en tous sens par des vagues artificielles, messagers invisibles, sans se troubler mutuellement, comme font les rayons de lumière qui se propagent dans l'éther?

Mais le télégraphe ne suffit plus à l'activité un peu fébrile de notre temps.

Le téléphone lui-même cause beaucoup d'impatiences et devient impuissant pour les très longues distances. Qu'à cela ne tienne : on inscrit maintenant la parole sur des fils d'acier qui la répètent à leur tour; nous aurons bientôt des relais téléphoniques permettant, d'un bout à l'autre des continents, de transmettre les messages de commerce et d'entendre les voix qui nous sont chères. Que reste-t-il à désirer, sinon de voir à distance? Si complaisante que soit l'Électricité, il y aurait sans doute indiscrétion à lui demander ce miracle.

Je n'ai pu qu'indiquer en grandes lignes les principales applications de l'Électricité. Il resterait à parler encore des résultats obtenus en Physiologie et en Médecine, où l'emploi des courants de haute fréquence n'a pas dit son dernier mot, ainsi que des propriétés encore mystérieuses que présentent les rayonnements émis par les ampoules de Crookes et par certains composés chimiques. Dans ce champ d'investigations il reste beaucoup à faire, et nos vues actuelles sur la constitution des corps en seront sans doute singulièrement modifiées.

Tel est le domaine immense dans lequel vous aurez nécessairement à faire un choix pour vos délibérations.

Au moment où le siècle arrive à sa fin, il est permis de jeter un regard en arrière sur la route parcourue.

Les esprits les plus éminents ont appliqué leur génie à l'étude

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

des phénomènes électriques, une armée d'ingénieurs est venue ensuite leur donner une traduction pratique.

L'Électricité a pénétré dans toute l'industrie, supprimé les distances, franchi les océans et rapproché les peuples; elle jouera un rôle essentiel dans la réalisation du rêve général de paix et de fraternité qui fermente chez tous les peuples civilisés. Un siècle entier pour l'accomplissement de cette œuvre, c'est beaucoup pour les contemporains, c'est bien peu dans la longue histoire de l'humanité.

Lorsque nos arrière-neveux auront à juger le XIXe siècle, ils éprouveront sans doute un sentiment de surprise et d'admiration à constater que tant de choses y aient été accomplies.

Permettez-moi de terminer par un souvenir personnel. En 1881, non loin d'ici, avait lieu le premier Congrès d'Électricité, qui réunissait les savants les plus illustres du monde entier. Je ne puis me rappeler sans émotion que beaucoup d'entre eux ont disparu et je voudrais rendre un pieux hommage à leur mémoire.

On y voyait entre autres : pour l'Allemagne, von Helmholtz, Clausius, Kirchhoff, Du Bois Reymond, Werner Siemens, Wiedemann; pour la Grande-Bretagne : Spottiswoode, Hopkinson, Hughes, William Siemens; pour l'Autriche : Mach; pour l'Italie : Rossetti, Govi, Ferraris; et bien d'autres dont la liste serait trop longue.

Dans la Commission célèbre des Unités, cet aréopage était présidé par J.-B. Dumas, avec une autorité et une élévation d'esprit qui imposaient le respect. Il nous apparaissait comme le dernier représentant d'une génération antérieure, celle des grands fondateurs de la Science, dont les noms étaient pour nous entourés d'une sorte d'auréole.

C'est grâce à un esprit général de conciliation et au désir commun de faire œuvre utile que, sous l'influence de Dumas, la Commission aboutit par un vote unanime à des résolutions qui ont rendu tant de services à la Science et à l'Industrie.

Je voudrais ouvrir le Congrès actuel sous les auspices du Congrès de 1881, désormais historique, en exprimant la confiance qu'aujourd'hui comme alors vos délibérations seront inspirées par le même esprit de conciliation, de concorde et de sentiment du bien public. (*Applaudissements.*)

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

A la suite de ce discours, la séance est levée pendant quelques minutes pour permettre aux membres du Congrès de conférer sur la constitution du Bureau.

A la reprise de la séance, la liste suivante est proposée et adoptée à l'unanimité :

Président : M. E. Mascart, membre de l'Institut.

Vice-Présidents : MM. Moissan, membre de l'Institut, H. Fontaine et Gariel, vice-présidents de la Commission d'organisation (*France*).

Professeur F. Kohlrausch, et professeur Dorn, délégués de l'Empire allemand (*Allemagne*).

Professeur Perry, F. R. S., et sir William Preece, F. R. S., délégués du Gouvernement de la Grande-Bretagne (*Angleterre*).

Professeur Jullig, délégué du Gouvernement de l'Autriche (*Autriche*).

M. Eric Gerard (*Belgique*).

MM. Carl Hering et E. Kennelly, délégués du Gouvernement des États-Unis (*États-Unis*).

M. de Fodor (*Hongrie*).

M. Colombo, délégué du Gouvernement de l'Italie (*Italie*).

Professeur de Chatelain, délégué du Gouvernement de la Russie (*Russie*).

M. Turrettini, délégué de la ville de Genève (*Suisse*).

Rapporteur : M. E. Hospitalier.

Secrétaire général : M. P. Janet.

Les présidents des sections sont ensuite proposés et nommés à l'unanimité :

Première section. — Méthodes scientifiques et appareils de mesure : M. Violle, membre de l'Institut.

Deuxième section. — Sous-section A : Production et utilisation mécaniques de l'électricité : M. A. Hillairet.

Deuxième section. — Sous-section B : Éclairage électrique : M. Hippolyte Fontaine.

Troisième section. — Électrochimie : M. Moissan.

Quatrième section. — Télégraphie et Téléphonie : M. Wunschendorff.

Cinquième section. — Électrophysiologie : M. d'Arsonval.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. LE PRÉSIDENT donne lecture d'une lettre de Lord Kelvin dans laquelle celui-ci exprime le regret d'être retenu loin de Paris par raison de santé, et adresse tous ses vœux au Congrès international d'Électricité. Un télégramme de remercîment et de respectueuse sympathie sera adressé à Lord Kelvin au nom de l'assemblée.

M. le Président fait connaître que, en dehors des cinq sections indiquées au programme, il a été constitué une Commission des Délégués officiels des Gouvernements, qui aura la mission d'examiner les propositions d'intérêt international qui lui seraient transmises par les sections; cette même procédure a déjà été appliquée au Congrès de Chicago. La Commission des Délégués se réunira le vendredi 24 août à 2^{h}, à la Société d'Encouragement, 44, rue de Rennes.

Les séances de section se tiendront, à partir du lundi 20 août, à l'hôtel de la Société d'Encouragement, 44, rue de Rennes, tous les matins, à 9^{h}.

Exceptionnellement, les séances de la quatrième section (Télégraphie et Téléphonie) se tiendront les lundi 20, mardi 21 et mercredi 22 août à 9^{h} du matin à la Société d'Horticulture, 84, rue de Grenelle.

Le programme des excursions et visites qui auront lieu pendant le Congrès a été distribué à tous les membres, et sera à leur disposition au secrétariat du Congrès, 44, rue de Rennes. Il convient d'y ajouter les renseignements suivants :

1° *Lundi soir*, 20 *août*, M. le Prince Roland Bonaparte veut bien recevoir MM. les membres du Congrès en son hôtel, 10, avenue d'Iéna; les membres qui désirent obtenir une carte d'invitation sont priés de s'inscrire au secrétariat (44, rue de Rennes);

2° *Mercredi et jeudi toute la journée,* MM. les membres du Congrès seront admis à la Tour Eiffel, sur la présentation de leur carte du Congrès;

3° *Jeudi à* 9^{h} *du soir*, également sur la présentation de la carte du Congrès, séance au Palais des Illusions (Palais de l'Électricité, entrée par la porte à gauche du Château-d'Eau).

4° Enfin des cartes sont mises à la disposition des membres du Congrès pour être admis dans le salon des Présidents du groupe V (Palais de l'Électricité, 1er étage).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. le Professeur AYRTON, F. R. S., *délégué du Gouvernement de la Grande-Bretagne :*

MESSIEURS,

Au nom des Étrangers, je désire exprimer nos remercîments au Gouvernement de la République française pour la réception qu'elle nous a faite si gracieusement et pour nous avoir fourni l'occasion d'assister à cette réunion dans la ville même où se tenait le premier Congrès d'Électricité.

Nous devons adresser des remercîments spéciaux à notre Président et aux autres personnes qui, avec un soin si laborieux, ont fait tous les préparatifs nécessaires pour assurer le succès de cette réunion.

Je suis certain que les délibérations de ce Congrès agrandiront les limites de la Science et de la pratique des ingénieurs et des électriciens dans le monde entier. (*Applaudissements.*)

M. le Professeur Dr DORN, *délégué de l'Empire allemand :*

MESSIEURS,

Je vous prie de vouloir bien m'excuser si je ne m'exprime pas correctement dans une langue qui n'est pas ma langue maternelle.

Je me bornerai donc à vous remercier, au nom des délégués et des autres membres allemands, pour l'invitation que vous nous avez adressée d'assister à cet important Congrès.

Permettez-moi d'y ajouter l'assurance que nous ferons tous nos efforts pour contribuer au succès de ce Congrès.

Je termine en exprimant le désir que la solidarité entre les nations civilisées se manifeste non seulement pour le Congrès scientifique, mais qu'elle inaugure aussi une ère de paix. (*Applaudissements.*)

M. LE PRÉSIDENT. — Je remercie, au nom de la France, nos collègues étrangers qui ont bien voulu nous dire des paroles aussi aimables. J'ajouterai que c'est toujours un très grand honneur de recevoir à Paris des personnes aussi éminentes dans le monde scientifique et dans le monde industriel. (*Applaudissements.*)

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SÉANCE DE CLOTURE,

Samedi 25 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. MASCART.

La séance est ouverte à $9^h 30^m$.

M. le PRÉSIDENT. — Messieurs, nous devrions lire aujourd'hui le procès-verbal de la première séance d'ouverture du Congrès, mais vous avez tous reçu les procès-verbaux, et je prierai ceux des membres qui auraient des observations à faire ou des modifications à introduire, de vouloir bien les transmettre à M. Paul Janet, qui en tiendra compte dans la rédaction définitive.

De même, nous n'avons pas pu faire approuver par les différentes sections les procès-verbaux d'hier. Ces procès-verbaux ont été imprimés. Je prierai donc également les membres qui auraient des modications à proposer de les transmettre à M. Paul Janet, secrétaire général du Congrès. Il n'est pas possible, en effet, de donner lecture de tous ces procès-verbaux; cette formalité allongerait inutilement la séance.

La parole est à M. Paul Janet, secrétaire général, pour la communication au Congrès de deux résolutions qui ont été adoptées par la Commission des délégués.

M. P. JANET. — Extrait du procès-verbal de la section I. Séance du vendredi 24 août :

Première résolution. — « La section recommande l'attribution de noms spéciaux aux unités C. G. S. de champ magnétique et de flux magnétique. »

Seconde résolution. — « 1° La section recommande l'attribution du nom de *Gauss* à l'unité C. G. S. de champ magnétique. 2° La section recommande l'attribution du nom de *Maxwell* à l'unité C. G. S. de flux magnétique. »

M. le PRÉSIDENT. — Nous prenons acte de ces deux résolutions qu'il n'y a pas lieu de soumettre à une nouvelle discussion.

Quelqu'un désire-t-il prendre la parole pour des communications particulières aux membres du Congrès?

La parole est à M. Mailloux.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Mailloux, *délégué des États-Unis :*

Monsieur le Président,
Messieurs les Membres du Congrès,

J'ai demandé la parole pour remercier, de la part de la délégation américaine, le gouvernement français, la Société internationale des Électriciens et, en général, nos confrères de tous les pays de l'accueil qui nous a été fait en Europe. Nous avons été reçus et fêtés de tous les côtés en vrais frères.

Nous avons le désir de répondre à ces bontés et, dans cette intention, nous avons, dès le début du Congrès, exprimé le vœu de voir tous nos confrères nous rendre visite en Amérique.

Aussi est-ce avec le plus grand plaisir que nous avons entendu certains membres de la Société manifester le désir de venir en Amérique l'année prochaine. Je profite donc de la circonstance pour demander aux membres étrangers s'ils ne croiraient pas devoir profiter de cette occasion pour se joindre à eux et venir nous visiter. L'occasion est d'autant plus favorable qu'il y aura l'année prochaine, à Buffalo, une exposition des produits de toutes les Amériques, exposition qui s'appellera *panamerican*. Cette réunion sera d'autant plus intéressante que la proximité des célèbres chutes du Niagara permettra une installation de transmissions de force qui dépassera en puissance toutes celles qui existent actuellement.

Quoique nous ne puissions pas vous faire une invitation formelle, je me permets de vous la faire au nom de tous les Américains ici présents, car j'ai la conviction que notre proposition sera accueillie avec autant d'enthousiasme que de sympathie de la part de tous les électriciens et techniciens d'Amérique. Je prierai donc ceux d'entre vous, Messieurs, qui ont quelque influence dans les sociétés d'électriciens de se mettre en relation avec les membres américains présents ici, et particulièrement avec M. Carl Hering, qui est le président de l'*American Institute of Electrical Engineers,* et qui se fera le plus grand plaisir de s'entendre avec eux au sujet de cette visite.

Il serait certainement à désirer que les sociétés qui ont l'intention de se rendre en Amérique n'y viennent pas isolément, mais toutes ensemble.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Nous avons pu, en effet, reconnaître le grand avantage qu'il y a à se rassembler, à faire des réunions de toutes les nationalités, ce qui tend à démontrer encore une fois que la Science n'a pas de patrie. Pour ce qui nous concerne, nous avons éprouvé des sensations si enchanteresses et si délicieuses que nous voudrions pouvoir les renouveler le plus tôt possible.

On nous parle, il est vrai, du projet de certaines sociétés qui auraient déjà ébauché un programme pour l'année prochaine, en vue d'organiser le prochain Congrès dans un autre pays. Mais, en raison de ce que je viens de dire, j'espère qu'elles pourraient différer peut-être l'exécution de leurs projets, afin de ne pas perdre l'occasion de nous réunir à l'exposition de toutes les Amériques. (*Applaudissements.*)

M. le PRÉSIDENT. — Messieurs, avant de demander au Congrès ses sentiments au sujet de la proposition très amicale de M. Mailloux, je voudrais donner la parole à M. von Boschan, qui a une proposition analogue à faire.

M. Mailloux demande encore la parole.

M. MAILLOUX. — Messieurs, je désire ajouter à ce que je disais tout à l'heure que l'exposition de Buffalo commencera le 1er mai 1901 et finira le 1er novembre.

Je donne ce renseignement pour que tous aient le temps de s'entendre et de préparer les détails de notre future réunion. Vous savez, en effet, que la perfection d'un programme dépend surtout des travaux préparatoires. Plus on s'y prend à temps, et plus le programme peut être parfait, comme chacun de nous a pu s'en rendre compte ici.

M. le PRÉSIDENT. — M. von Boschan, vous avez la parole.

M. VON BOSCHAN. — Comme M. le Président l'a dit, c'est une proposition analogue à celle de M. Mailloux que j'ai à présenter à l'assemblée (1). Toutefois je m'empresse d'ajouter que rien ne

(1) MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

La Société électrotechnique de Vienne a l'intention d'organiser en 1903 une Exposition électrotechnique à Vienne. A l'égard du grand succès du dernier Congrès d'Électricité à Vienne en 1899, cette Société s'adonne à l'espoir qu'un Congrès international d'Électricité à Vienne serait couronné du même succès.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

s'oppose à ce qu'elles soient approuvées toutes deux, attendu que l'Exposition de Vienne, à laquelle je désire vous convier, aura lieu en 1903. Il s'agit d'une Exposition d'Électricité, il est vrai, réservée aux produits de l'industrie électrique austro-hongroise, et le Comité d'organisation aurait le grand désir de réunir à cette occasion un Congrès international d'Électricité. Cette invitation a été transmise au Commissariat général de l'Autriche à l'Exposition, et je crois qu'une communication par écrit est déjà parvenue au bureau du Congrès actuel. M. Exner, commissaire général de l'Autriche, espérait pouvoir venir appuyer cette invitation auprès du Congrès ; malheureusement une circonstance imprévue ne le lui a pas permis, et c'est à l'instant même qu'il m'a chargé de vous la faire connaître. Nous espérons que le Congrès voudra bien accepter.

Je tiens à rappeler à cette occasion que la dernière Exposition de Vienne, qui fut internationale et que beaucoup d'entre vous ont visitée, fut, par un hasard heureux, le point de départ d'une nouvelle application d'électricité.

J'espère donc que ces Messieurs ont conservé un bon souvenir de leur dernière visite à Vienne et qu'ils voudront bien nous faire l'honneur d'y organiser un Congrès international en 1903. (*Applaudissements.*)

M. le Président. — Messieurs, je me trouve un peu embarrassé, parce que l'on m'informe qu'il y a un projet de faire une Exposition d'Électricité à Liége en 1903 également (1). Je prierais donc

---

Ladite Société m'a chargé de soumettre au bureau du Congrès international d'Électricité de Paris la demande que tous les membres de ce Congrès se décident à honorer de leur présence le prochain Congrès international d'Électricité à Vienne, en 1903.

J'ai donc l'honneur de vous prier, Monsieur le Président, d'avoir l'obligeance de faire part au Congrès de la demande de ladite Société, en l'appuyant de toute votre influence, notre pays s'estimant heureux de pouvoir saluer tous les membres du Congrès en 1903 à Vienne.

Veuillez agréer, Monsieur le Président, l'assurance de ma haute considération.

Le Commissaire général impérial-royal d'Autriche :
EXNER.

(1) MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

Nous avons l'honneur de porter à votre connaissance qu'un Comité dès maintenant formé, et qui s'est d'ores et déjà assuré l'appui de l'Administration communale de Liége et du Gouvernement belge, a entrepris l'organisation d'une Exposition universelle et internationale à Liége en 1903; les résultats obtenus

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

nos collègues, si une suite doit être donnée à ce projet, de vouloir bien s'entendre, afin que la réunion de Vienne n'ait pas lieu en même temps que celle de Liége. Cependant, quand bien même les deux expositions se produiraient à la même époque, il serait très facile de prendre des mesures pour que les invitations aux membres du Congrès ne concordent pas. De cette façon on pourrait se rendre à la fois à Vienne et à Liége. Quoi qu'il en soit, je remercie infiniment notre collègue de Vienne, M. von Boschan, de la proposition qu'il a bien voulu nous faire : cette proposition sera certainement examinée avec le plus vif intérêt par la Société internationale des Électriciens de Paris.

à ce jour nous permettent d'affirmer que cette entreprise est assurée d'une complète réussite.

Or, l'expérience a démontré que les Expositions universelles sont des occasions particulièrement favorables pour organiser des Congrès et des Conférences, attendu qu'elles permettent de donner plus d'éclat à ces réunions et qu'elles y attirent un grand nombre de participants.

Pénétrés de cette vérité, nous désirerions vivement faire coïncider l'Exposition universelle et internationale que nous organisons pour 1903 avec l'organisation de nombreux Congrès, et nous sommes résolus à faire ce qui dépendra de nous pour que ceux qui s'y tiendront aient le plus d'éclat possible.

En vue d'en mener à bien l'organisation, nous avons décidé la constitution d'une Commission de Patronage composée des personnalités les plus marquantes du monde scientifique de Liége et du pays.

D'autre part, nous sommes en instance auprès de l'Administration communale de notre ville à l'effet d'obtenir que celle-ci accorde son patronage aux Congrès, et nous avons reçu de nos magistrats communaux les assurances les plus sérieuses d'un accueil favorable.

Dans ces conditions, nous nous permettons de vous prier, Monsieur le Président, de bien vouloir nous dire si le Congrès dont vous avez la présidence pourrait fixer ses prochaines assises à Liége en 1903.

Nous vous serions aussi très obligés de bien vouloir nous faire parvenir, dès maintenant, la liste des congressistes inscrits pour prendre part à vos travaux, afin de nous mettre à même de leur transmettre des invitations pour la date dont il s'agit.

Soyez persuadé, Monsieur le Président, que, si vous voulez bien répondre à notre appel, la population liégeoise fera à ses invités l'accueil le plus chaleureux, et que nous nous multiplierons pour vous rendre agréable et utile le séjour que vous voudrez bien faire parmi nous à cette occasion.

Dans l'espoir que vous voudrez bien accueillir favorablement notre demande, nous nous mettons à votre entière disposition pour vous fournir tous renseignements complémentaires que vous pourriez désirer, et vous prions d'agréer, etc.

Les Secrétaires :
F. Pholgène (?).
Forquet.

Le Président :
Diqueffe.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En ce qui concerne maintenant la proposition de M. Mailloux, nous tous qui avons fait le voyage de Chicago, nous avons été absolument charmés de la manière dont les Américains savent recevoir les étrangers, et nous ne doutons pas qu'à l'occasion de l'Exposition de Buffalo, les étrangers ne soient encore reçus avec cette hospitalité américaine qu'il nous a été donné d'apprécier.

Je remercie donc M. Mailloux de la proposition qu'il a faite au nom des électriciens américains, et je suis convaincu que toutes les Sociétés d'électricité d'Europe qui sont représentées dans cette assemblée prendront cette proposition en très grande considération. Je sais en particulier que la Société internationale des Électriciens s'en est déjà préoccupée et que nous avons le très vif désir de répondre à l'aimable invitation de nos collègues d'Amérique.

Je remercie donc encore une fois cordialement nos collègues américains de leur proposition, qui, j'en ai le ferme espoir, aura le plus grand succès. (*Applaudissements.*)

La parole est à M. le major John Millis.

M. Millis donne lecture d'une Note en anglais.

M. le Président. — M. Mailloux veut bien nous donner un résumé de la communication de M. Millis pour ceux des membres qui ne comprennent pas l'anglais.

M. Mailloux. — Messieurs, je suis prié par M. le major John Millis, ainsi que par M. Mascart, de résumer en deux mots la communication que vous venez d'entendre. M. Millis exprime tous ses remercîments pour le bon accueil que nous avons reçu, et il invite tous les membres présents, spécialement de la part du génie militaire et du département des travaux publics, à venir nous rendre visite l'année prochaine. (*Applaudissements.*)

M. H. Fontaine. — Messieurs, la sous-section B pour l'étude des questions d'éclairage électrique a émis « le vœu que les gouvernements facilitent dans la plus large mesure l'établissement des réseaux aériens ou souterrains destinés au transport et à la distribution de l'énergie électrique par tous les moyens en leur pouvoir (lois, décrets, etc.) ».

M. le Président. — Vous voyez, Messieurs, quel est le caractère de cette proposition. Elle a quelque analogie avec une autre pro-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

position adoptée par la Commission des délégués; mais elle émane des industriels. Ceux-ci désirent que l'établissement de tramways électriques, si appréciés par les populations, soit l'objet de lois et de règlements destinés à en assurer le service dans une large mesure. L'installation des lignes destinées au transport de l'énergie électrique a besoin des mêmes sécurités.

On vise là des questions administratives, mais je crois qu'il n'y a pas de difficulté à soumettre cette proposition au Congrès. C'est un simple vœu, émis au nom de la deuxième section, pour appeler l'attention des pouvoirs publics.

S'il n'y a pas d'observation, je vais mettre aux voix l'approbation de ce vœu.

La proposition est adoptée à l'unanimité.

M. le PRÉSIDENT. — Messieurs, nous sommes parvenus au terme de nos travaux. Je suis heureux de pouvoir ajouter que le Congrès d'Électricité a largement répondu à toutes nos espérances et qu'il figurera avec honneur dans l'histoire de la Science et de l'Industrie.

Je n'ai pas eu le temps matériel de préparer à si bref délai une appréciation détaillée des nombreuses Communications présentées aux diverses sections. C'est un travail qui aurait exigé du temps et de la réflexion, et je me bornerai à signaler quelques-unes des plus importantes.

Les sections d'Électrochimie et d'Électrophysiologie ont été moins suivies. Nous avons eu cependant un Mémoire très curieux de M. Stanoïevitch sur les relations qui existent entre la structure des plantes et la distribution des lignes équipotentielles. En Électrochimie, diverses Communications : de M. Keller sur les fours électriques, de M. Hollard sur l'analyse électrolytique; de M. Zenger sur l'utilisation de l'eau de mer à la production de l'énergie électrique. — Plusieurs travaux relatifs à ces deux sections avaient été présentés déjà aux Congrès antérieurs de Chimie et de Médecine, et nous en avons été privés, sans doute par la crainte exagérée des auteurs pour une répétition.

Dans la première section, nous avons eu plusieurs Communications d'un grand intérêt :

M. Weyde a mis sous nos yeux une représentation mécanique très ingénieuse de phénomènes électriques dans l'idée de tourbillons;

M. Addenbrooke a exposé un dispositif complet pour la mesure

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

des courants alternatifs par l'emploi exclusif d'électromètres et de résistances;

M. Blondin a communiqué une étude sur les oscillographes imaginés par M. Blondel, dont il a montré le fonctionnement.

L'oscillographe de M. Abraham se trouve à l'Exposition de M. Carpentier, où les membres du Congrès ont été invités à l'examiner.

M. Kempf Hartmann a réalisé un appareil très ingénieux pour mesurer au moyen d'une lame vibrante la fréquence des courants alternatifs.

M. Hildburgh a donné une description détaillée des appareils propres au redressement des courants alternatifs.

M. Arnoux a fait ressortir les avantages de l'étalon de force électromotrice au cadmium signalé par M. Czapski en 1884, et présenté de nouveaux galvanomètres thermiques.

M. Paul Janet a fait connaître un enregistreur destiné à inscrire simultanément le courant et la différence de potentiel de trois lampes en série.

La Photométrie a été l'objet de Communications de MM. Cornu et Crova. D'autre part, M. Violle a exposé les importants travaux de M. Petavel sur l'étalon de platine, les recherches récentes relatives aux étalons secondaires à incandescence ou à flamme, ainsi que le progrès effectué dans les appareils de mesure.

Je ne ferai enfin que citer les résolutions proposées pour des dénominations nouvelles dont on nous a rendu compte.

Dans la quatrième section (Télégraphie et Téléphonie) les séances ont été très nourries.

A signaler une Communication de M. André sur les multiples téléphones à batterie centrale;

De M. Roosen sur les canalisations téléphoniques;

De M. Pinter sur le télégraphe rapide écrivant du système Pollak et Virag;

De M. Kennelly sur un nouveau transmetteur pour récepteur Wheatstone, imaginé par MM. Squier et Crehore.

La Télégraphie sans fil, d'origine si récente, a donné lieu à une discussion du plus haut intérêt, à laquelle ont pris part MM. le Dr Blochmann, Chatelain, le capitaine Ferrié, le capitaine Tissot, Gavey, Lamenor, etc.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La deuxième section était particulièrement chargée, au point qu'il a été nécessaire d'organiser trois sous-sections :

A. Production et utilisation de l'énergie électrique;

B. Éclairage électrique;

C. Tramways à contacts superficiels.

Dans la première sous-section A, M. le professeur Sylvanus Thomson et M. Guénée nous ont entretenus des lois générales qui régissent les dispositifs électromagnétiques, et de leurs applications.

M. Thury a exposé des considérations générales sur les applications de la distribution en série au moyen du courant continu, et sur un mode de réglage de la tension d'une usine centrale à courant continu. M. Weyler a développé quelques considérations relatives aux dimensions des inducteurs et au nombre de pôles des dynamos à courant continu.

Les alternateurs, leur construction et leurs différents modes d'excitation ont été étudiés par MM. Blondel et Rey, Boucherot, Leblanc; les convertisseurs ou commutatrices, par MM. Paul Janet, Blondel et Rey, Boucherot, Leblanc.

M. Semenza nous a donné la description de l'importante transmission d'énergie de Paderno-d'Adda, à Milan, et nous a rendu compte des essais de cette installation à 15000 volts, ainsi que des difficultés qu'on y a rencontrées.

Les condensateurs, leur construction et leur emploi ont été discutés par MM. Lombardi, Boucherot et Leblanc, qui ont apporté des résultats d'essais à l'appui de leurs considérations.

M. Ernest Gerard a donné les résultats de déterminations d'efforts de traction effectués sur une voiture à accumulateurs des chemins de fer de l'État belge, en collaboration avec M. L'Hoest.

Ces déterminations ont été effectuées électriquement : les différents essais reproduisaient toujours identiquement les mêmes résultats, qu'on peut regarder comme pratiquement très exacts. M. le colonel Renard a cru devoir signaler que les résultats de ses essais relatifs à la résistance de plaques minces, déplacées dans l'air par un procédé électrique, étaient en parfaite concordance avec ceux de MM. E. Gerard et L'Hoest.

Enfin M. Léon Gerard a fait une longue Communication sur « La traction électrique sur les canaux et son application au canal

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de Charleroi à Bruxelles ». MM. Bède et Blondin ont décrit des systèmes de prises de courants pour tramways à caniveau et à contacts superficiels qni ont été discutés dans la sous-section C.

La sous-section B a entendu et discuté, dans six séances, plusieurs Mémoires fort intéressants lus par MM. de Fodor, Mornat, Hoho, Victor, Weissmann et Lorsay; mais elle s'est particulièrement occupée de deux Communications dues à Mme Ayrton et à M. Blondel.

M. Blondel a passé en revue, d'une façon toute magistrale, les progrès réalisés en éclairage électrique depuis dix ans, et il a donné des renseignements de haute valeur sur les lampes à arc alimentées par des courants alternatifs et sur les charbons les plus usités dans l'éclairage à arc.

Mme Ayrton a démontré que la meilleure manière d'employer l'arc à courants continus, au double point de vue du maximum de lumière utilisable et du plus grand rendement en énergie, résidait dans la formation d'un arc ayant seulement 1 mm de longueur. Cette démonstration élégante, claire et précise, a été fortement appuyée par des preuves concluantes, et elle a soulevé d'unanimes applaudissements.

Les conclusions de Mme Ayrton, contraires aux idées généralement admises par les constructeurs et les ingénieurs, vont, comme les remarquables expériences de M. Blondel, surexciter le zèle des savants et des praticiens, et il en résultera avant peu, nous en avons la conviction, de grands progrès dans l'éclairage à arc.

Les membres du Congrès de la sous-section B ont demandé à l'unanimité, avant de se séparer, qu'il soit adressé des témoignages de reconnaissance à Mme Ayrton et à M. Blondel pour leurs admirables travaux. (*Applaudissements.*)

Dans la sous-section C, MM. Turrettini, Bède, Bouton, Diatto, Dolter, Ernest Gerard, Pollak, Sylvanus Thomson, Védovelli, ont exposé les différents systèmes de tramways à contacts superficiels, et de la discussion très nourrie provoquée par ces Communications on pourra déduire les avantages et les points faibles de chacun des systèmes en présence.

Nous sommes très fiers que les membres du Congrès, en très grand nombre, aient bien voulu accorder une visite au *Laboratoire central d'Électricité* et à l'*École supérieure d'Électricité*

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et en utiliser le matériel pour de belles expériences. Il n'est pas inutile de rappeler que ces deux fondations sont dues à la Société internationale des Électriciens et qu'elles sont entretenues à l'aide de ressources fournies par des particuliers ou par de grandes Sociétés industrielles.

Nous avons dans notre pays trop peu d'exemples d'institutions semblables dues à l'initiative privée pour ne pas montrer celles-là avec quelque satisfaction.

Avant d'aller plus loin, je voudrais, au nom du Congrès des Électriciens, envoyer un témoignage de sympathie à deux de nos collègues qui ont été retenus loin de nos séances par une cause analogue.

D'abord à M. Potier, que tout le monde admire, dont chacun a pu apprécier les importants travaux et qui a éprouvé un très vif et très profond regret de ne pouvoir venir lui-même aux séances du Congrès. (*Vifs applaudissements.*)

J'ajouterai M. Blondel, qui est frappé, lui aussi, d'une affection cruelle. M. Blondel donne un exemple extrêmement rare d'une puissante activité scientifique, malgré les douleurs qui le retiennent chez lui ; il a fait acte de présence virtuelle en envoyant au Congrès des Communications adressées à différentes sections, Communications du plus grand intérêt.

Je crois qu'il sera touché des souvenirs du Congrès à son égard. (*Vifs applaudissements.*)

Ce court aperçu permet d'apprécier la portée de ces réunions internationales dans lesquelles se font un échange fécond des idées et le frottement des esprits, au grand profit de chacun, avec une connaissance plus intime des personnes et les sentiments d'estime réciproque qui en résultent.

Un voile de mélancolie s'étend toujours sur les séances de clôture. Nous voyons avec peine se disperser des amitiés de longue date et des amitiés nouvelles créées dans le court intervalle qui nous a réunis, comme si elles avaient la mission de remplacer celles que le cours des choses a fait disparaître.

Le Comité d'organisation va reprendre son rôle : il lui reste une dernière tâche, celle de revoir l'ensemble des Procès-Verbaux, de réunir les Rapports imprimés avant les séances, ainsi que les Mémoires présentés aux différentes sections, pour constituer avec

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ces documents un volume instructif qui sera en même temps pour chacun un souvenir presque vivant des relations trop courtes à notre gré.

Je remercie de nouveau, les divers gouvernements qui nous ont donné un précieux témoignage d'intérêt et de bienveillance en désignant des délégués revêtus d'un caractère officiel.

J'exprime en particulier à nos collègues étrangers toute notre reconnaissance pour les sentiments de courtoisie et de véritable confraternité dont ils nous ont donné tant de preuves. A tous nous souhaitons un heureux retour dans leur patrie et nous voudrions leur dire à courte échéance : Au revoir ! (*Applaudissements prolongés.*)

M. le Professeur W.-E. Ayrton, *délégué de la Grande-Bretagne*. — Une fois de plus, un Congrès d'Électricité vient de finir à Paris qui, cette année, peut être appelée justement la ville des Congrès. Cette ville a vu naître en quelque sorte, il y a dix-neuf ans, l'industrie électrique. Plusieurs savants très renommés qui célébraient cette naissance ne sont plus, malheureusement. Mais nous avons la satisfaction de revoir au milieu de nous celui qui, à cette époque, nous a apporté un concours si précieux et dont l'aide, aujourd'hui encore, a contribué à assurer le succès de ce Congrès. Je parle de notre Président, dont les travaux ont reculé les bornes de la Science. Pour cette raison et pour d'autres encore, je suis sûr d'être l'interprète des délégués étrangers en adressant à M. Mascart l'hommage de nos sentiments de sympathie et de reconnaissance. (*Applaudissements.*)

On a dit souvent que rien ne contrastait plus que la vie du savant et la vie du politicien, et l'on a eu raison. En effet, rien ne serait plus dénué d'intérêt que la vie du politicien, si elle n'était relevée par les luttes et les agitations des partis. Au contraire, la Science est si vaste, les savants sont si occupés non seulement par leurs travaux, mais encore par l'assistance qu'ils se prêtent les uns aux autres, qu'ils n'ont guère le temps de se quereller. (*Rires et applaudissements.*) Aussi, quels que soient les nuages qui peuvent obscurcir l'horizon, les savants de tous pays garderont toujours leur amitié les uns pour les autres et seront toujours prêts à se tendre la main.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En terminant, Messieurs, je suis sûr d'être votre interprète à tous en adressant nos remercîments les plus respectueux et les plus sincères à notre Président. (*Vifs applaudissements.*)

M. KOHLRAUSCH, *délégué de l'Allemagne.*— Monsieur le Président, Messieurs, la valeur principale d'un Congrès scientifique réside dans la connaissance personnelle que font entre eux les membres. J'ai le plus grand plaisir à constater que la concorde qui doit régner dans la Science pure et appliquée n'a jamais été plus grande qu'en cette occasion. (*Applaudissements.*)

M. TURRETTINI, *délégué de la Suisse.* — Les deux orateurs qui m'ont précédé ont exprimé leurs remercîments pour l'organisation du Congrès. Nous avons eu le plaisir, pendant ce Congrès, non seulement de jouir de toutes les Communications scientifiques qui nous ont été faites, mais encore de voir les objets les plus intéressants. En effet, nos collègues français ont su préparer un programme si attrayant qu'en dehors des heures où nous nous sommes réunis ici, il nous a été donné d'admirer une quantité de choses qui ont fait la joie de nos yeux et de notre esprit. Nous devons adresser nos sincères félicitations à notre Président et aux membres français du Congrès pour la belle journée de mardi qu'ils nous ont fait passer dans cet admirable Chantilly, ce joyau de la France, où nous avons vu réunies toutes les merveilles qu'un homme peut rassembler dans son existence. Nous avons constaté que la France sait faire marcher de front la Science et les Beaux-Arts.

Nous devons être profondément reconnaissants, nous, étrangers, à nos collègues français de nous avoir permis d'admirer quelque chose qui n'a rien à voir avec l'Électricité et qui nous a intéressés au plus haut point.

Messieurs, on a parlé du rapprochement qui résulte des travaux scientifiques. Je crois que l'Électricité en a donné un exemple tout particulier : elle est la seule science au monde, en effet, bien qu'une des plus jeunes, qui soit arrivée à l'accord complet sur toutes les questions d'unités. Puisque la Science électrique a pu obtenir ce premier résultat, ne peut-on espérer que les autres branches de la Science ne contribuent pour leur part à amener le rapprochement de tous les peuples ?

C'est dans cet esprit, Messieurs, que je remercie, au nom de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

tous les délégués et représentants étrangers à ce Congrès, notre Président et nos collègues français. (*Applaudissements.*)

M. Eric Gerard, *délégué de la Belgique.* — Mesdames et Messieurs, je crois que nous ne devons pas nous séparer avant d'adresser nos remercîments à la chancellerie du Congrès. M. Paul Janet, secrétaire général, et ses dévoués collaborateurs vous ont tenus journellement au courant de nos travaux d'une façon très précise et très claire, et cela par un labeur que nous ne connaissons pas assez.

M. Eugène Sartiaux, secrétaire, a organisé des excursions extrêmement intéressantes; nous devons lui en exprimer notre profonde gratitude. (*Vifs applaudissements.*)

M. E. de Fodor. — Messieurs, au nom de la section de l'Éclairage électrique, nous tenons à remercier notre Président, M. Fontaine, de la façon magistrale dont il a conduit les débats. Il a pu remplir cette tâche avec d'autant plus d'autorité que son nom est inscrit pour jamais dans l'histoire de la lumière électrique, à tel point qu'on peut l'appeler le « père de la lumière électrique ». (*Bravos et applaudissements.*)

M. Fontaine n'a pas seulement doté la Science électrique d'appareils innombrables : il a découvert une nouvelle qualité de l'Électricité, celle de conserver la jeunesse. Nous espérons pour lui et pour la Science qu'il nous montrera longtemps encore cet esprit alerte dont il nous a donné tant de preuves, et que dans dix ans, quand nous nous rencontrerons ici de nouveau, nous le retrouverons aussi jeune et aussi vert qu'aujourd'hui. (*Applaudissements.*)

M. le Président. — Messieurs, nos collègues étrangers nous ont vraiment comblés de remercîments.

Je ne trouve pas de paroles pour leur exprimer notre gratitude, et je lève la séance. (*Salve d'applaudissements.*)

La séance est levée à $10^h 35^m$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

COMMISSION

DES

DÉLÉGUÉS OFFICIELS DES GOUVERNEMENTS.

Séance du 24 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. MASCART.

La séance est ouverte à $2^h 15^m$.

M. MASCART remercie les Gouvernements étrangers qui ont bien voulu donner un si haut témoignage d'intérêt et de sympathie en envoyant au Congrès des délégués officiels, et adresse ses plus sincères remercîments aux délégués eux-mêmes qui ont consacré leur temps à suivre les différents travaux du Congrès.

Le résultat des discussions soulevées dans les séances a été de faire ressortir l'importance de l'entente internationale au sujet du choix des unités électriques. Nous avons constaté avec la plus grande satisfaction qu'aucune difficulté ne s'était produite entre les membres du Congrès. L'accord général s'est rapidement établi et a simplifié les questions.

Quelques-uns de nos collègues, en particulier les délégués américains, ayaient proposé d'apporter des modifications au système d'unités actuel, mais ils ont bien voulu retirer leurs propositions; nous leur en savons le plus grand gré, car des changements aux unités reconnues partout comme officielles, telles que l'ohm et le volt, eussent soulevé des difficultés nombreuses et souvent insurmontables.

Il reste à examiner une proposition de la première section, au sujet de l'opportunité de deux définitions nouvelles adoptées

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

par les praticiens de cette section, qui en ont reconnu l'utilité.

La section recommande l'attribution du nom de *Gauss* à l'unité C.G.S. de champ magnétique et l'attribution du nom de *Maxwell* à l'unité C.G.S. de flux magnétique.

Les questions télégraphiques et téléphoniques, malgré leur importance au point de vue international, n'ont donné naissance à aucune observation qu'il y ait lieu d'examiner.

Seule, une proposition fut faite par M. Blochmann pour nommer *Branly* le tube radio-conducteur. La proposition est restée à l'état de projet.

Dans la séance du 22 août, M. Chaye-Pacha a fait une Communication sur les applications des microphones sous-marins à la sécurité des pêcheurs de Terre-Neuve, et a demandé au Congrès d'attirer l'attention des Chambres de commerce sur cette question, qui présente un intérêt d'ordre général.

Les travaux du Congrès ayant fait l'objet de discussions détaillées dans les différentes sections, M. Mascart demande si MM. les délégués ont quelque observation particulière à présenter à la réunion.

M. Kohlrausch, au nom de tous les délégués, remercie M. Mascart, qui a su mener à bien avec tant de dévouement l'organisation du Congrès. (*Applaudissements.*)

M. Mascart remercie M. Kohlrausch de cette marque de bienveillance, mais il tient à rendre justice au concours actif qu'il a trouvé auprès de ses collaborateurs, en particulier au zèle de MM. P. Janet et E. Sartiaux. (*Applaudissements.*)

M. Preece exprime son approbation entière des propositions qui ont été soumises au Congrès. Il a été membre du Comité de l'Association britannique et de tous les Congrès d'Électricité en 1881, 1882, 1884. Il fera son possible en Angleterre pour obtenir l'adoption de toutes les décisions du Congrès actuel.

M. Mailloux, délégué des États-Unis, demande quelle sera la sanction de la question des unités nouvelles, le gauss et le maxwell, soulevée à la première section; il voudrait que l'on confirmât d'une manière officielle cette décision.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. MASCART. — On ne peut donner à cette proposition aucun caractère officiel, car les deux nouvelles unités n'ont pas la portée légale des mesures fondamentales, comme le mètre, l'ohm, le volt.

Il n'y a pas plus de nécessité de demander le concours d'une action législative pour le gauss et le maxwell que cela n'a été fait au Congrès de 1889 pour le joule et le watt.

Les dérivées d'une unité fondamentale, étant la conséquence de cette unité, n'ont pas besoin d'une définition officielle.

MM. MAILLOUX (États-Unis), ADDISON (F.) (Espagne) et STANOIEVITCH (Serbie) font diverses observations.

M. MASCART propose de voter immédiatement sur la proposition de la section I, concernant les unités nouvelles. A la majorité, les délégués sont d'accord pour adopter les définitions du gauss et du maxwell.

M. STANOIEVITCH soulève la question de la propriété de l'énergie électrique et émet le vœu que les différents gouvernements protègent cette propriété comme les autres biens.

Une longue discussion s'engage à ce sujet entre MM. Ayrton (Angleterre), Columbo (Italie), Darcq (France), Eric Gerard (Belgique), Maillard (États-Unis), Postel Vinay (France), Stanoievitch (Serbie).

A la suite de cet échange d'idées, M. MASCART soumet au vote des délégués la proposition suivante, qui a été adoptée à la majorité des voix :

La Commission est d'avis que l'énergie électrique doit être considérée comme une propriété; elle émet le vœu que cette propriété soit protégée de même que toute autre, suivant la jurisprudence déjà établie dans plusieurs grands États.

La séance est levée à $3^h 20^m$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SÉANCES DES SECTIONS.

PREMIÈRE SECTION.

MÉTHODES SCIENTIFIQUES ET APPAREILS DE MESURE.

Séance du lundi 20 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. CORNU.

La séance est ouverte à $9^h 15^m$.

M. le Président Violle, empêché, est suppléé par M. Cornu, membre de l'Institut.

Il est procédé à la nomination du Bureau. Sont élus :

VICE-PRÉSIDENTS : MM. Arnold, Ayrton, de Châtelain, Crova, Kennelly.

SECRÉTAIRES : MM. Bourguignon, David, Odent.

M. CORNU donne lecture de la liste des membres du Congrès qui désirent prendre part aux travaux de la première section, ainsi que des Communications.

M. ARNOUX : *Sur les piles-étalons au cadmium.*

M. BLONDEL : *Sur les oscillographes.*

M. GINO-DOMPIERI : *Division décimale de l'heure.*

M. HILDBURGH : *Conduction asymétrique et irréciproque.*

M. DE HOOR-TEMPIS : *Essai sur les corps diélectriques.*

M. KEMPF-HARTMANN : *Mesure des fréquences des courants alternatifs.*

M. MAJOR JOHN MILLIS : *Photométrie des sources colorées.*

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. CONSTANTIN-PERSKYI : *Télévision au moyen de l'électricité.*

M. DE REY-PAILHADE : *Sur les avantages d'adopter des unités nouvelles basées sur une unité physique de temps égale à la* $\frac{1}{100000}$ *partie du jour solaire moyen.*

M. WEYDE : *Sur le mécanisme de l'électricité.*

M. ZENGER : *Sur le rôle que pourrait jouer l'Électricité galvanique dans l'Électrotechnique.*

M. CORNU fait remarquer qu'il y aurait grande utilité à abréger le plus possible les discussions relatives aux unités, qui risqueraient fort d'absorber tout le temps des séances.

M. HOSPITALIER propose la nomination d'une **Commission chargée d'étudier les questions relatives aux unités** et d'en présenter un rapport à la séance de vendredi.

Cette proposition est adoptée et M. Hospitalier est chargé de préparer une liste des membres qui feront partie de cette Commission.

M. CORNU appelle les Communications annoncées ; pour différents motifs, toutes ces Communications sont remises au lendemain, dont l'ordre du jour se trouve être le même que celui de la première séance.

M. CORNU donne quelques explications sur le système proposé par M. de Rey-Pailhade sur les avantages d'adopter des unités nouvelles basées sur une unité physique de temps égale à $\frac{1}{100000}$ partie du jour solaire moyen.

L'examen approfondi de la question est renvoyé à la Commission des unités.

M. HOSPITALIER présente la liste suivante qu'il a préparée pour la Commission des unités :

MM. Ayrton (Grande-Bretagne) ;
De Châtelain (Russie) ;
Dorn (Allemagne) ;
De Fodor (Hongrie) ;
Gerard (Eric) (Belgique) ;
De Hoor-Tempis (Hongrie) ;

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM. Hospitalier (France);
Lombardi (Italie);
Kennelly (États-Unis).

Cette liste est adoptée à l'unanimité.

M. Cornu demande si, parmi les membres présents, il s'en trouve qui désirent faire des Communications.

M. de Châtelain prie M. Cornu de vouloir bien prendre la parole.

M. Cornu. — La **Photométrie** exigeant nécessairement la distinction des radiations qui constituent la lumière émise, il importe de définir la loi de répartition des couleurs dans le spectre de la lumière considérée, parce que c'est de cette répartition que dépend la mesure de l'intensité de chaque couleur.

M. Cornu saisit cette occasion pour s'élever contre l'interprétation qu'on a donnée dans ces dernières années aux mots *spectre normal*, le mot *normal* semblant exprimer une propriété unique et décisive qui s'impose comme choix des couleurs classées suivant leur longueur d'onde.

Cette loi ne se recommande par aucun avantage particulier, si ce n'est qu'elle correspond au mode de mesure le plus précis actuellement pour la détermination des longueurs d'onde (λ). Il y aurait une infinité de lois arbitraires de représentations qui, suivant les circonstances, seraient plus avantageuses les unes que les autres; par exemple, la loi $\frac{1}{\lambda}$, qui représente le nombre relatif des vibrations dans l'unité du temps, et la loi $\frac{1}{\lambda^2}$, qui représente sensiblement la loi de dispersion des corps réfringents employés pour la construction des lentilles et autres dispositifs optiques.

Il faut donc, dans chaque cas, choisir un mode approprié de représentation de la répartition des radiations.

M. Cornu prie M. Crova de donner son opinion sur ce sujet.

M. Crova expose sa manière de voir au sujet de la **Représentation des radiations.** Il parle de l'échelle logarithmique qui, procédant par octaves successifs, permet peut-être de mieux représenter l'ensemble des radiations depuis l'extrême ultra-violet jusqu'aux ondes électro-magnétiques. La fréquence ou l'inverse des lon-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

gueurs d'ondes peut encore constituer un mode de représentation plus pratique que la longueur d'onde.

Quant aux comparaisons d'intensités lumineuses, la plus grande difficulté qu'elles entraînent est due à la différence des teintes. On peut éliminer cette difficulté, comme l'a montré l'auteur de la Communication, en réduisant cette comparaison à celle des intensités des radiations correspondant à une même longueur d'onde prise dans les deux sources. Cette méthode, recommandée par le Congrès des Électriciens en 1889, n'offre que quelques difficultés pratiques qu'il serait peut-être possible de lever ou d'atténuer. Ce point pourrait être très utilement traité par une Commission composée des électriciens et des physiciens qui se sont le plus spécialement occupés de ces questions.

M. CORNU remercie M. Crova et insiste sur l'importance de ces questions de photométrie hétérochrome.

M. HOSPITALIER rappelle qu'il y a eu des décisions prises à ce sujet depuis 1889, mais qu'elles n'ont pas été observées, à cause des difficultés pratiques, et que c'est dans cette voie qu'il faut orienter les recherches.

La séance est levée à 10 heures.

Séance du mardi 21 août.

PRÉSIDENCE DE M. VIOLLE.

La séance est ouverte à $9^h 15^m$.

M. VIOLLE remercie MM. les membres du Congrès de l'avoir choisi comme président de la première section.

M. CORNU rappelle que la *Commission des unités* présentera son rapport à la section I dans la séance de vendredi, qui sera consacrée à la discussion de ces importantes questions.

M. HILDBURGH donne une description détaillée des appareils propres au **Redressement des courants alternatifs** (conduction asymétrique et irréciproque). La Communication a été faite en anglais.

Le redressement des courants alternatifs peut être obtenu par

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

des procédés mécaniques, physiques et chimiques basés sur le changement de la valeur de la résistance suivant le sens du courant et sur l'apparition de forces électromotrices.

Les conducteurs asymétriques peuvent être disposés pour envoyer la partie positive de la courbe de force électromotrice dans un circuit, et la partie négative dans un autre.

Les appareils de ce genre non mécaniques présentent une résistance élevée.

Le Mémoire de M. Hildburgh sera analysé aux annexes.

M. Georges Claude. — A la suite de la Communication de M. Hildburgh sur le redressement des courants alternatifs, je crois intéressant de signaler quelques essais personnels encore inédits tendant au même but.

J'ai mis à profit pour ces essais un phénomène singulier observé par moi autrefois et qui est le suivant (*fig.* 1) :

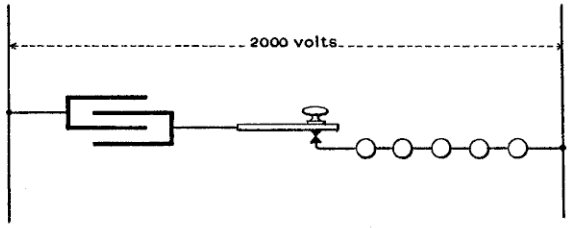


Fig. 1.

Sur une différence de potentiel voisine de 2000 volts — fournie par une distribution quelconque — on place en série un condensateur, un interrupteur et 4 ou 5 lampes à incandescence, la capacité étant calculée convenablement pour que le courant correspondant porte au rouge sombre les filaments des lampes; si l'on vient alors à ouvrir l'interrupteur de manière à y provoquer l'apparition d'un arc minuscule, on constate que l'éclat des lampes *augmente de plus en plus* à mesure qu'augmente l'écartement des mâchoires de l'interrupteur, et passe au *blanc éblouissant* lorsque cet écartement atteint la valeur maxima à laquelle l'arc s'éteint.

J'ai donné comme raison de ce fait (1) que, lorsque l'interrup-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXVIII, p. 187; 1894.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

teur est fermé, le condensateur prend chacune de ses charges pendant le temps total qui s'écoule entre un maximum et le minimum suivant, d'où une intensité *efficace* faible dans le circuit : au contraire, lorsque l'interrupteur est ouvert, le courant ne peut passer que quand la différence de potentiel entre les mâchoires de l'interrupteur dépasse la valeur qui correspond à la distance explosive représentée par l'écart. Donc, à mesure qu'on écarte celles-ci, une même quantité d'électricité traverse le circuit à chaque alternance en un temps de plus en plus court et qui devient très faible lorsque l'écart atteint la limite supérieure que la force électromotrice maxima de la source est seule capable de vaincre. D'où une intensité efficace de plus en plus grande, que décèle l'augmentation considérable de l'éclat des lampes.

Or, la distance explosive qui correspond à une différence de potentiel donnée est fonction, on le sait, de la nature des électrodes : et comme l'arc est accompagné d'une projection de particules matérielles du pôle positif, c'est surtout, à chaque alternance, la nature de l'électrode positive qui influe. Si l'électrode positive est en charbon, par exemple, la différence de potentiel pour vaincre un écart donné sera moindre que si c'est du laiton. Il est facile d'appliquer cette remarque à notre essai de tout à l'heure. A la suite du condensateur, au lieu d'un seul système capable de faire jaillir l'arc, nous en prenons deux, A et B (*fig.* 2). Chacun de ces interrupteurs est constitué par une électrode en charbon a, l'autre électrode b étant en laiton. Seulement, dans l'interrupteur A l'électrode en charbon a est à gauche, tandis qu'elle est à droite

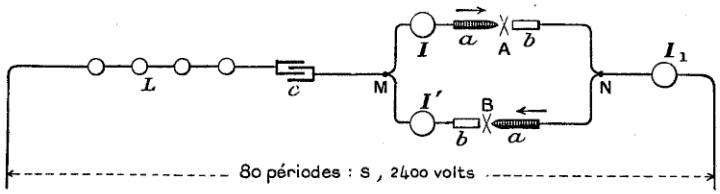


Fig. 2.

dans l'interrupteur B. Ces deux interrupteurs sont réglés préalablement à des intervalles égaux. Ceci posé, il résulte de ce que nous venons de dire que la différence de potentiel suffisante pour

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

vaincre la distance *ab*, en A ou en B, sera moindre si c'est le charbon qui est positif. Si donc le courant est dirigé à un instant donné de M vers N, l'arc s'amorcera d'abord en A et tout le flux du courant s'écoulera dès lors par l'intermédiaire de l'arc ainsi amorcé : le flux de charge passé, l'arc s'éteindra, puis, le courant changeant de sens, l'arc s'amorcera en B, où il trouve maintenant un chemin plus facile, et tout le courant de cette dernière période passera dans la branche BN. Les mêmes phénomènes se reproduiront ainsi indéfiniment, tous les courants allant de M vers N traversant AN et pouvant être dès lors indiqués par un ampèremètre à courant continu I, tandis que tous les courants dirigés de N vers M passent au contraire dans NB. Sauf un réglage initial assez délicat, cet essai m'a très bien réussi avec le courant primaire de l'usine des Halles, 2400 volts, 83 périodes par seconde, et avec des courants de 2 ou 3 ampères. L'emploi du miroir tournant permettait de constater aisément qu'un seul arc A ou B était allumé à la fois. C'est d'ailleurs à cette rupture nette du courant à chaque demi-période, rupture nette due à la présence du condensateur, qu'on doit attribuer l'insuccès des essais faits en remplaçant le condensateur par une bobine de self-induction ayant pour but de s'opposer à de trop grandes intensités : l'arc persiste pendant presque toute la période et, par suite de la chaleur restante, se réamorce indistinctement en A ou en B.

M. R. Arnoux fait ressortir les avantages, au point de vue pratique, d'un bon **Étalon de force électromotrice** pour les mesures électriques. En 1893, le Congrès de Chicago a proposé d'adopter l'étalon imaginé par M. Latimer Clark. Mais cet étalon présente quelques défauts assez graves : d'abord sa grande variation de force électromotrice en fonction de la température, laquelle d'ailleurs ne peut jamais être connue d'une façon suffisamment exacte, et ensuite ses grandes variations de résistance intérieure qui obligent à employer des galvanomètres extrêmement sensibles généralement peu portatifs. En 1884, M. Czapski a appelé l'attention sur l'élément au cadmium qui ne diffère de l'élément Clark que par la substitution du cadmium et du sulfate de cadmium au zinc et au sulfate de zinc, en montrant que sa variation de force électromotrice en fonction de la température est environ trente

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

fois plus faible. Plus tard, en 1897, MM. Jaeger et R. Wachsmuth ont fait à la Reichsanstalt de Berlin une étude très intéressante de l'élément au cadmium, confirmant les observations de M. Czapski. M. Gouy, qui est l'auteur d'un élément au bioxyde de mercure, a fait au Congrès international de Physique de 1900 un rapport très documenté sur l'étalon au cadmium, dans lequel il reconnaît que son élément au bioxyde de mercure « ne peut rivaliser avec l'étalon au cadmium » au point de vue de la variation thermique de la force électromotrice. M. Gouy préconise, comme MM. Jaeger, Wachsmuth et Kahle, la forme en H, mais M. Arnoux estime que la disposition cylindrique ordinaire est préférable à employer dans la pratique courante, parce qu'elle permet de réaliser des éléments de résistance intérieure environ cinquante fois plus faibles et par conséquent d'employer des galvanomètres de zéro moins sensibles, mais beaucoup plus portatifs.

M. Fernandez Addison demande à M. Arnoux quelques explications sur les méthodes employées pour déterminer la résistance intérieure des piles.

M. Weyde lit un Mémoire sur l'**Application mécanique des phénomènes électriques** d'après les idées de Maxwell et la **Théorie des tourbillons.**

Le conférencier présente un appareil très intéressant destiné à reproduire mécaniquement les effets d'une force électromotrice continue ou alternative dans un circuit possédant de la résistance, de la self-induction et de la capacité. Un système enregistreur permet de se rendre compte des effets obtenus lorsque l'on fait varier l'un ou l'autre des éléments du circuit.

La séance est levée à 11^h.

Séance du mercredi 22 août.

Présidence de M. VIOLLE.

La séance est ouverte à $9^h 15$.

M. Blondin présente, au nom de M. Blondel, les nouveaux

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Oscillographes imaginés par ce dernier et construits par M. Dobkevitch.

Ces appareils sont de trois types différents : l'oscillographe bifilaire, l'oscillographe à fer doux et l'oscillographe à bande de fer vibrante qui dérive du précédent. Le deuxième est aujourd'hui abandonné.

Après avoir indiqué rapidement la théorie de ces instruments, et rappelé les conclusions auxquelles elle a conduit, M. Blondin décrit successivement les trois types d'appareils qui précèdent; il indique ensuite les dispositifs optiques qui permettent de projeter la courbe sur une plaque photographique ou sur un écran : il insiste ensuite sur les avantages relatifs aux divers types d'oscillographes.

L'oscillographe bifilaire est le plus exact, mais il est d'une manipulation délicate et convient surtout aux recherches de laboratoire; la fréquence des oscillations de l'équipage mobile est de 10000 à 15000 oscillations par seconde. L'oscillographe à bande de fer vibrante convient surtout aux travaux d'ordre industriel, sa fréquence d'oscillation peut atteindre 45000 oscillations par seconde; monté avec un aimant permanent, son poids ne dépasse pas 12 kg à 15 kg, et il peut, par conséquent, être facilement transporté : une simple lampe à incandescence suffit pour la photographie des courbes moyennes; le champ magnétique directeur étant produit par un aimant permanent, il n'est pas nécessaire d'avoir de courant continu pour son fonctionnement.

M. Duddell rappelle les travaux qu'il a poursuivis sur la question; il est arrivé, en ce qui concerne les oscillographes bifilaires, aux mêmes resultats que M. Blondel, dont il ne connaissait pas les recherches. Il demande divers renseignements sur les dimensions des miroirs employés et sur les nombres de vibrations et la sensibilité des différents systèmes essayés.

M. Doskewitch donne les chiffres suivants : pour l'oscillographe à bande vibrante sans shunt magnétique : 25000 à 30000 vibrations par seconde avec une sensibilité de 40 mm par ampère sur une échelle placée à un mètre.

Avec un shunt magnétique fort, 10000 vibrations par seconde

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

environ avec une sensibilité de 180 mm par ampère sur une échelle placée à un mètre.

En variant le shunt magnétique on obtient toute l'échelle des sensibilités et des fréquences.

Dimensions des miroirs : épaisseur comprise entre 0,06 mm et 0,1 mm; largeur, 0,02 mm à 0,03 mm; hauteur, 0,5 mm à 1 mm.

M. CARPENTIER rappelle la solution donnée par M. Abraham pour l'inscription des courants variables et invite MM. les Membres du Congrès à examiner le rhéographe qui se trouve exposé dans son stand. Il revendique l'idée d'une fente en développante de cercle pour obtenir dans le système optique le déplacement d'un point lumineux proportionnellement au temps.

M. ADDENBOOKE fait une Communication sur la **Mesure précise des courants alternatifs**. Il présente un dispositif complet de mesures construit sur ses données, et basé sur l'emploi exclusif d'électromètres et de résistances, à l'aide desquels on fait les mesures : de volts, d'ampères et de watts. L'électromètre servant à la mesure des intensités fonctionne sous 1,5 volt. (*Voir* le Rapport de l'auteur, p. 45.)

La séance est levée à 11^h.

Séance du jeudi 23 août.

PRÉSIDENCE DE M. VIOLLE.

La séance est ouverte à $9^h 15$.

M. DE CHÂTELAIN, vice-président et délégué officiel de la Russie, prend place à côté de M. le Président.

M. VIOLLE prend la parole pour sa Communication sur la **Photométrie** et indique l'état actuel des diverses questions qui intéressent particulièrement la Photométrie industrielle touchant les étalons à incandescence ou à flammes comme les appareils de mesure, photomètres et spectrophotomètres.

Le texte de cette communication a été distribué aux membres du Congrès. (*Voir* le Rapport de l'auteur, p. 23.)

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. DE CHÂTELAIN remercie M. Violle de son intéressante Communication et dit que l'emploi de diaphragmes lui a permis d'employer comme étalon suffisant pour des mesures faites par des élèves, une simple lampe à pétrole à mèche plate.

M. KEMPF-HARTMANN présente une note sur un **Appareil de mesure de la fréquence des courants alternatifs.** L'appareil consiste, en principe, en un électro-aimant parcouru par le courant alternatif dont on veut mesurer la fréquence en excitant une lame vibrante qui émet un son. On déplace l'électro-aimant devant une série de lames vibrantes et l'on s'arrête devant celle qui rend le son le plus net. L'excitation des lames voisines permet jusqu'à un certain point d'apprécier des nombres de périodes non compris dans la série des lames vibrantes employées.

M. KEMPF-HARTMANN présente aussi un appareil basé sur le même principe et destiné à contrôler la fréquence d'un courant alternatif donné. Il se compose de deux lames vibrantes réglées l'une au-dessus, l'autre au-dessous de la fréquence à contrôler. L'appareil ne rend aucun son tant que le nombre de périodes est constant. On peut ajouter un système de relais actionnant des appareils régulateurs. (*Voir* aux annexes.)

M. HARTMANN père invite MM. les membres du Congrès à visiter son exposition, où ils verront ces appareils fonctionner; il dit qu'on y trouvera aussi des galvanomètres genre Deprez-d'Arsonval à grande sensibilité $K = 5 . 10^{-10}$.

M. BLONDIN présente, au nom de M. BLONDEL, une Communication sur une **Étude d'alternateurs diphasés et triphasés**, faite au Laboratoire central d'Électricité par MM. Blondel, Dobkevitch, Duris, Farmer et Tchernosvitoff, au moyen d'oscillographes. Cette étude montre que : 1° la charge d'une phase influe sur la forme des courbes des autres phases; 2° la déformation est d'autant plus importante que les charges sont plus inégales; 3° la réaction d'induit produit dans le circuit inducteur des pulsations souvent très fortes dont la fréquence est égale au double du produit de la fréquence du courant induit par le nombre des phases. (*Voir* aux annexes.)

La séance est levée à 11^{h}.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Séance du vendredi 24 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. VIOLLE.

SÉANCE DU MATIN.

La séance est ouverte à $9^h\,15^m$.

M. HOSPITALIER donne lecture du **Rapport de la Commission des Unités.**

COMMISSION DES UNITÉS.

Rapport à M. le Président de la 1re Section.

Dans ses séances des 21 et 22 août 1900, la Commission des Unités nommée par la première Section du Congrès international d'Électricité a adopté les vœux suivants :

La Commission ne prendra en considération que les propositions de nature à n'apporter aucune modification aux décisions des Congrès antérieurs.

La Commission ne croit pas à la nécessité actuelle de donner des noms à toutes les unités électro-magnétiques.

Cependant, en présence de l'emploi d'appareils pratiques de mesure donnant directement les intensités de champ en unités C. G. S., la Commission recommande l'attribution du nom de *Gauss* à cette unité C. G. S.

La Commission propose d'attribuer à l'unité de flux magnétique dont la grandeur sera définie ultérieurement le nom de *Maxwell*.

M. KENNELLY, au nom de l'*American Institute of Electrical Engineers*, retire les propositions relatives aux préfixes et à la rationalisation des unités électriques et magnétiques.

Le Président de la Commission,
É. HOSPITALIER, *rapporteur.*

Paris, le 22 août 1900.

M. le PRÉSIDENT met aux voix le premier vœu de la Commission des Unités : « La Commission ne prendra en considération que les propositions de nature à n'apporter aucune modification aux décisions des Congrès antérieurs. »

Cette proposition est adoptée à l'unanimité.

M. MASCART combat l'attribution d'un nom à l'unité C. G. S. de champ magnétique. L'emploi d'appareils pratiques de mesure donnant directement les intensités de champ en unité C. G. S. ne

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

paraît pas suffisant pour justifier l'attribution d'un nom à l'unité. En outre, cette décision paraîtrait contraire à l'esprit des Congrès de 1881 et 1889, qui n'ont pas donné de noms de savants aux unités C. G. S. Il admettrait que l'on donne un nom à l'unité pratique. En tout cas, le nom de *Gauss* lui semble pouvoir donner lieu à confusion, Gauss étant l'inventeur du premier système absolu (millimètre-milligramme-seconde), système qui est encore employé actuellement dans certains cas.

M. G.-J. VAN DE WELL est partisan d'adopter le nom de *Maxwell* pour l'unité du flux magnétique, mais il insiste pour que l'on définisse la grandeur de cette unité.

M. KOHLRAUSCH dit que les unités absolues suffisent aux physiciens, mais que si les ingénieurs éprouvent le besoin d'unités pratiques, M. Dorn et lui ne voient pas d'inconvénient à ce qu'on leur donne des noms : ceux de *Gauss* et de *Maxwell*, par exemple. Les délégués allemands ne peuvent s'engager pour leur Gouvernement et pensent que le Congrès doit se borner à recommander l'emploi de ces nouvelles appellations sans chercher à leur donner une sanction légale.

M. AYRTON est de l'avis de M. Mascart et rappelle que l'on utilise depuis plusieurs années des appareils (A. M. *fields tester*) et que l'on n'a pas éprouvé le besoin de donner un nom à cette unité. Il fait observer d'autre part que l'unité C. G. S. de champ est d'un emploi pratique.

M. MASCART fait remarquer qu'il y a ambiguïté sur le mot *pratique*. L'unité C. G. S. de champ est employée en pratique, mais n'appartient pas au système dit *pratique*.

M. HOSPITALIER insiste pour que l'on donne des noms à l'unité de champ et à l'unité de flux. Il ne demande pas de décision légale, mais une simple recommandation de la Section, qui lui paraît suffisante pour atteindre le but poursuivi, c'est-à-dire son adoption internationale.

Une discussion s'engage à laquelle prennent part MM. AYRTON, CARPENTIER, DORN, FERNANDEZ ADDISON, HOSPITALIER, KOHLRAUSCH, MAILLOUX, MASCART, SIEMENS (Alexandre), THOMPSON (Sylvanus).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. GERARD (Eric) dit qu'il croit qu'il y a lieu de décider d'abord que des noms seront donnés aux unités C. G. S. de champ magnétique et de flux d'induction magnétique.

M. MASCART se rallie à cette proposition, qui est adoptée.

M. le PRÉSIDENT met aux voix la proposition suivante :

« La Section recommande l'attribution de noms spéciaux aux unités C. G. S. de champ magnétique et de flux magnétique. »

Cette proposition est adoptée à l'unanimité moins deux voix.

La séance est suspendue pendant quelques minutes pour permettre aux membres d'échanger leurs vues sur les noms à adopter pour chacune de ces unités.

A la reprise de la séance, M. le PRÉSIDENT met successivement aux voix les deux propositions suivantes :

1° « *La Section recommande l'attribution du nom de* GAUSS *à l'unité C. G. S. de champ magnétique.* »

2° « *La Section recommande l'attribution du nom de* MAXWELL *à l'unité C. G. S. de flux magnétique.* »

Ces deux propositions sont acceptées à l'unanimité moins deux voix (1).

La séance est suspendue un quart d'heure; puis la parole est

---

(1) Budapest et Kaschaù, fin d'août 1900.

A Monsieur le Professeur Jules Violle, membre de l'Institut, Président de la 1re Section du Congrès international d'Électricité, à Paris.

Société internationale des Électriciens, 14, rue de Staël, Paris.

MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

Nous soussignés, comme membres du récent Congrès international d'Électricité et du groupe I (méthodes scientifiques et appareils de mesure), ayant été empêchés de voter tout de suite pendant les séances à Paris sur la proposition des unités magnétiques nouvelles, le *gauss* et le *maxwell*, demandons à Monsieur notre Président de vouloir bien faire noter, avant la rédaction définitive du procès-verbal, que nous n'acceptons pas les propositions dans la forme et définition enregistrées dans les procès-verbaux (*Revue générale des Sciences* du 25 août), mais que nous adhérons à la proposition de M. A. Blondel (*Sur la question des unités magnétiques*), selon laquelle *il est de haute importance de ne point donner occasion de confondre les unités dites* absolues (C. G. S.) *avec leurs dérivées, les unités pratiques.*

Nous pensons que ces dernières seulement doivent recevoir des noms propres

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

donnée à M. R. Arnoux, qui présente un nouveau modèle de **Galvanomètre thermique** étudié en collaboration avec M. Chauvin. Ce modèle diffère des appareils similaires par deux points :

1° Par le dispositif amplificateur ;

2° Par un dispositif compensateur de la température extérieure.

Le dispositif amplificateur de la dilatation du fil thermique consiste à atteler le fil dilatable de longueur variable f à un levier de longueur b fixe et très petit, qui avec le bâti de longueur fixe a constitue un triangle dont l'angle F opposé au fil dilatable est très voisin de 0° ou de 180°.

Entre ces différentes quantités on a la relation très connue

$$f^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos F,$$

qui différentiée devient

$$f\,df = ab\sin F\,dF,$$

ou

$$\frac{dF}{df} = \frac{f}{ab\sin F}.$$

Cette relation montre que la variation élémentaire dF de l'angle F correspondant à un allongement donné df du fil dilatable f sera maximum en faisant le levier b très petit et l'angle F très voisin de zéro (première disposition), ou de 180° (deuxième disposition).

(de savants) et aussi qu'elles doivent être des dérivées (par une puissance de dix) des unités absolues (C.G.S.).

Quant aux noms proposés par la Commission, nous les acceptons, mais seulement pour des unités pratiques.

Nous votons :

L'unité *pratique* du flux magnétique se nommera *maxwell* et est égale à l'unité C.G.S. $\times 10^8$. L'unité *pratique* de l'intensité du champ se nommera *gauss* et est égale à l'unité C.G S. $\times 10^{-1}$.

Sollicitant l'insertion de cette déclaration dans le procès-verbal, agréez, Monsieur le Président, l'expression de notre haute considération.

Weyde,
Professeur à l'École supérieure des Arts et Métiers,
à Kaschau (Hongrie).

François Vittmann,
Professeur à l'Université technique, Budapest.

Professeur A. Straub.

Étienne de Fodor,
Vice-Président du Congrès international d'Électricité,
Directeur de la Société générale d'Électricité de Budapest.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Avec ce dispositif amplificateur on est parvenu à obtenir une déviation de 90° de l'aiguille avec une consommation de 0,35 watt dans le fil dilatable, ce qui correspond pour l'ampèremètre à un courant de 3,5 ampères sous 0,1 volt, au lieu de 0,3 volt généralement nécessités par les appareils thermiques actuellement employés.

Le dispositif compensateur de la température ambiante consiste à fixer dans une direction sensiblement parallèle au fil dilatable un faisceau de fils identiques au fil dilatable et à tendre le tout à l'aide d'un fort ressort en acier. Ce dispositif permet de réaliser un appareil qui tient bien son zéro, l'action de la température extérieure se faisant sentir également et également vite sur tous les fils puisqu'ils sont tous identiques.

M. P. JANET donne ensuite quelques renseignements sur un **Appareil enregistreur** construit sur ses indications par la maison Richard. Cet appareil est spécialement destiné à l'étude du fonctionnement de trois lampes à arc montées en série. Il comporte trois voltmètres enregistreurs destinés à relever la différence de potentiel aux bornes de chacune des lampes et un ampèremètre enregistreur pour l'intensité du courant. Les quatre plumes inscrivent sur le même tambour et sur la même ordonnée, de sorte que la comparaison des courbes se fait avec une grande facilité.

L'ordre du jour étant épuisé, la séance est levée à 11^{h}.

SÉANCE DE L'APRÈS-MIDI.

La séance a eu lieu à 3^{h} dans la salle des cours de l'École supérieure d'électricité.

M. C. PERSKYI fait une Communication sur la **Télévision au moyen de l'Électricité**. Il décrit, en s'aidant de projections, les différents appareils imaginés pour réaliser ce problème. Ces appareils sont basés sur les propriétés magnétiques du sélénium. (*Voir* aux annexes.)

La séance est levée à 4^{h} 15^{m}.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

DEUXIÈME SECTION.

PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ. ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

SOUS-SECTION A.

PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

Séance du lundi 20 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HILLAIRET.

La séance est ouverte à $9^h 15^m$.

Il est procédé à la nomination du Bureau. Sont élus :

VICE-PRÉSIDENTS :
Allemagne : M. le professeur Strœcker.
Angleterre : M. le professeur Silvanus Thompson.
États-Unis : M. Mailloux.
Suisse : M. Turrettini.
SECRÉTAIRES : MM. Thomine, Grunberg, Grisel, Boisseau, Halphen.

M. le PRÉSIDENT rappelle l'article du règlement relatif à la durée des Communications, puis lève la séance pendant cinq minutes pour fixer l'ordre du jour. A la reprise, il annonce des Communications de MM. BÈDE de Bruxelles, REY de Paris, et THURY de Genève.

M. BÈDE expose un **Système de prise de courant** qui est en essai à Bruxelles. L'organe essentiel de ce système est un bouchon en

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

caoutchouc traversé par des pièces de contact et qui remplit un triple rôle : 1° support mobile des pièces de contact; 2° fermeture isolante pour le conduit contenant le conducteur de courant; 3° ressort pour rompre le courant quand le collecteur de courant abandonne le bouton de contact.

Le conducteur principal de la ligne est placé dans un conduit en fer étendu le long d'un des rails de la voie, dont il est séparé par une rainure de 28^{mm} de largeur dans laquelle passe la charrue collectrice du courant. A Bruxelles, ce conduit est percé, de mètre en mètre, de trous fermés par les bouchons de caoutchouc. En face de chaque bouchon, le câble est dénudé et muni de selles en cuivre isolées et en contact avec le bouchon.

L'écartement du bouton de contact et des selles en cuivre est de 3 mm au repos.

L'expérience a montré que l'isolement de tout le système se comporte fort bien. Il a été reconnu que la circulation des voitures n'a pas d'influence nuisible, que le nettoyage de la rainure n'offre aucune difficulté, et que l'on n'a à craindre aucun accident pour les passants ou pour les animaux.

M. le Président remercie M. Bède de son intéressante Communication et renvoie la discussion à une date ultérieure, certains membres n'ayant pu être prévenus à temps de la fixation de l'ordre du jour (1).

M. Rey, ingénieur en chef des ateliers Sautter, Harlé et Cie, fait une Communication **Sur la prédétermination de la chute de tension dans les alternateurs polyphasés**, au moyen de la théorie des deux réactions.

La théorie des deux réactions, due à M. A. Blondel, permet de prédéterminer, d'une manière précise, la chute de tension des alternateurs polyphasés débitant sur réseaux non inductifs ou inductifs.

L'auteur a eu l'occasion d'appliquer cette théorie à un alternateur spécial, à fer tournant, muni de trois entrefers et construit dans les ateliers Sautter, Harlé et Cie. Les résultats de calcul

(1) Une sous-section C a été créée pour la discussion des questions relatives à la traction par contacts superficiels.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

théorique coïncident, d'une manière remarquable, avec les mesures expérimentales faites sur cet alternateur.

Cet alternateur présentait la particularité que les deux réactions, l'une directe, produite par le courant déwatté, l'autre transverse, produite par le courant watté, étaient fort inégales de grandeur. Aucune des théories connues, qui supposent l'égalité de ces deux réactions, n'aurait pu rendre compte des résultats expérimentaux; le grand nombre des considérations qui entrent dans la théorie des deux réactions donne à l'accord obtenu entre les chiffres calculés et les chiffres mesurés une valeur toute particulière.

M. Rey présente ensuite au Congrès une Note sur le **Compoundage des alternateurs** au nom de M. A. Blondel, qui, malade, ne peut assister aux séances.

Le système de compoundage des alternateurs polyphasés, proposé par M. A. Blondel, consiste à employer une excitatrice à courant continu, dont l'induit est traversé par le courant polyphasé propre de l'alternateur, ou par une dérivation obtenue au moyen d'un transformateur en série.

L'auteur montre les conditions que doit remplir l'excitatrice pour que le compoundage de l'alternateur puisse se faire sur réseau inductif comme sur réseau non inductif. Il donne la théorie de ce système de compoundage ainsi que la méthode expérimentale qui s'en déduit pour le réglage des divers éléments; il rappelle enfin qu'il a indiqué, pour la première fois, cette méthode de compoundage au Congrès international des Électriciens à Genève, en 1896; la vérification en a été faite avec succès dans les ateliers de MM. Sautter, Harlé et Cie, sur une machine de 100 kilowatts à forte réaction d'induit. (*Voir* aux annexes.)

Le Président remercie M. Rey de ses intéressantes Communications et le prie de transmettre à M. Blondel les remercîments du Congrès.

M. Thury prend ensuite la parole **Sur l'application des dynamos survoltrices au réglage automatique de la force électromotrice des batteries d'accumulateurs.** — Le réglage automatique de la force électromotrice des batteries d'accumulateurs présente d'assez grandes difficultés pratiques, surtout lorsque les batteries doivent fonctionner en tampon, pour pouvoir passer brusquement du régime

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de charge au régime de décharge sans variation sensible de la tension de régime.

Le réglage par réducteur automatique est assez précis, mais pas très prompt; de plus, ce système est coûteux et compliqué, et les éléments de réglage sont difficiles à entretenir.

De là l'idée de faire le réglage en montant en série sur la batterie une dynamo dont la force électromotrice puisse varier dans les mêmes proportions que celle de la batterie. M. Thury emploie, dans ce but, une dynamo dont le champ peut s'inverser entre deux limites égales en passant graduellement par zéro. De cette façon, la puissance du survolteur peut être réduite de moitié.

Le changement d'intensité du champ se fait au moyen d'un régulateur automatique consistant essentiellement en un servo-moteur mécanique d'une grande puissance.

Une difficulté provient des étincelles au collecteur. On arrive à les éviter au moyen de machines à induits courts, munies d'enroulements lisses à grand entrefer, et en multipliant le nombre de pôles.

On peut faciliter le réglage automatique au moyen d'un enroulement compound. Le renversement de polarité est alors plus rapide.

La séance est levée à 11^h.

Séance du mardi 21 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HILLAIRET.

La séance est ouverte à $9^h\,10^m$.

M. le Professeur SYLVANUS P. THOMPSON fait une Communication sur les **Mécanismes électromagnétiques**, qui a été distribuée aux congressistes à l'ouverture du Congrès (*voir* p. 201).

M. GUÉNÉE, constructeur à Paris, fait connaître qu'à la Classe 27 de l'Exposition universelle il a exposé des systèmes électromagnétiques où il applique rigoureusement la loi de M. le Professeur Sylvanus Thompson.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les électro-aimants construits par M. Guénée on s'est proposé de régler les valeurs successives de $\frac{d\varphi}{dl}$. Pour arriver à ce résultat et obtenir le plus grand effort possible avec un nombre d'ampères-tours donné, on a diminué le plus possible la réluctance là où les lignes de force ne travaillent pas.

La solution la plus simple que l'on ait employée consiste à former une armature d'un cylindre de fer surmonté d'un système de rondelles de fer séparées par des rondelles de cuivre d'épaisseurs variables. Cette armature se déplace au centre d'une bobine enveloppée d'une cuirasse de forme spéciale.

On arrive ainsi à produire des efforts constants ou maximums en un point déterminé d'une course relativement longue.

L'électro le plus puissant, construit suivant ce système, produit un effort constant de 600 kg sur 22 cm de course. Ces électros ont été appliqués à divers mécanismes de chemin de fer, signaux, aiguilles, etc., et des régulateurs.

M. le Président remercie M. Guénée de ses intéressants renseignements.

M. Maurice Leblanc prend la parole sur la **Construction des machines dynamo-électriques**. Cette conférence à été distribuée à MM. les congressistes à l'ouverture du Congrès (*voir* p. 63).

M. Ernest Gerard, ingénieur en chef aux chemins de fer de l'État belge, parle de la **Résistance des voitures automotrices à la traction**. Pour déterminer la résistance des trains à la traction, on fait usage de formules diverses trouvées en différents pays à la suite d'expériences soignées, formules qui présentent en général deux ou trois termes donnant la résistance par tonne :

$$r = a + bv + \frac{cSv^2}{p} \pm m,$$

où a, b, c, sont des coefficients, v la vitesse en kilomètres à l'heure, m l'inclinaison de la voie en millimètres par mètre, S la surface d'attaque des trains, p leur poids en tonnes.

Lorsqu'il s'agit de trains remorqués par locomotive et de vitesses inférieures à 60 km à l'heure, on peut s'affranchir du terme en v^2 et

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

se contenter des deux premiers termes. Ainsi la formule des ingénieurs de l'Est Français, réduite aux termes suivants :

$$r = 1,80 + 0,08\,v$$

donne une approximation suffisante :

Ce n'est qu'à partir de 60 km qu'il est indispensable d'introduire le terme v^2 pour tenir compte de la résistance de l'air.

Mais il n'en est plus de même quand il s'agit de voitures isolées. Dans ce cas, même aux faibles vitesses de 30 km à 40 km par heure, la résistance de l'air joue un rôle important.

L'administration des chemins de fer de l'État belge a entrepris une série d'expériences au moyen de voitures automotrices électriques, expériences ayant surtout pour objet l'étude des moteurs et des appareils de changement de marche.

M. L'Hoest, ingénieur en chef aux chemins de fer de l'État belge, en a profité pour recueillir, entre autres, des données assez précises touchant la résistance des automotrices à la traction, en mesurant avec soin la puissance consommée et tenant compte du rendement des moteurs déterminé auparavant.

La formule à laquelle il est arrivé est la suivante :

$$f = 1,80 + 0,04\,v + \frac{0,0415}{p}\,v^2 \pm m.$$

Étant dégagée, dans le terme en v^2, du facteur représentant la surface, elle est d'application facile.

M. le Président remercie M. Gerard de son intéressante Communication qui précise des résultats jusqu'à présent restés un peu vagues.

M. Blondin présente le **Système de traction à contacts superficiels** récemment imaginé par M. Dolter et qui est actuellement en essai sur une ligne de 750 m de longueur établie à la Porte Maillot.

Dans ce système, le frotteur est aimanté soit normalement par le courant qui alimente les moteurs, soit, dans certains cas, par le courant d'une petite batterie d'accumulateurs placée sur la voiture. En passant sur un plot, ce frotteur provoque l'attraction d'un cylindre en fer constituant l'un des bras d'un levier coudé; l'autre bras met alors en contact deux pastilles de charbon dont l'une

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

est reliée à la ligne d'alimentation et l'autre est reliée au plot. Le plot devient alors *actif* et le courant arrive au moteur.

Ce système présente sur les systèmes actuels divers avantages.

A ce propos, M. BLONDIN fait observer que dès 1886 MM. Pollak et Biswanger avaient imaginé un système analogue, avec cette différence, toutefois, que le courant était amené par un double rail à tronçons isolés et des balais placés sous la voiture, au lieu d'être amené par des plots à un frotteur; c'est en quelque sorte le système Dolter renversé. Le système Pollak et Biswanger possédait sur les systèmes déjà proposés antérieurement l'avantage important que les tronçons de rails ayant une longueur bien plus faible que la voiture, les tronçons actifs se trouvaient entièrement au-dessous de celle-ci et ne pouvaient occasionner d'accidents.

La séance est levée à 11^h.

Séance du mercredi 22 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HILLAIRET.

La séance est ouverte à $9^h\,10^m$.

M. le PRÉSIDENT annonce que M. le colonel RENARD a des observations à présenter sur la Communication de M. Ernest Gerard et fixe à l'ouverture de la séance de jeudi cette discussion.

M. le PRÉSIDENT annonce que la discussion des systèmes de traction par contacts superficiels présentant actuellement un grand intérêt, M. Mascart a décidé de créer une sous-section spéciale (sous-section C) dont M. Turrettini voudra bien diriger les travaux. Cette sous-section siégera pour la première fois jeudi, à 9^h, dans la salle de la bibliothèque.

M. SEMENZA présente une Communication sur les **Essais et mesures sur une grande installation à haute tension.**

Après avoir décrit brièvement l'installation de Paderno-Milan dans ses points principaux, M. Semenza parle des dynamos à 15 000 volts et de leur fonctionnement très satisfaisant.

La ligne de transmission, longue de 33 km environ, donne lieu

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ensuite à l'examen détaillé des différentes parties qui la composent et des résultats obtenus dans l'exploitation.

L'isolateur doit être pris en considération toute spéciale comme l'organe le plus important de la ligne.

M. SEMENZA fait ensuite l'exposition des résultats des mesures exécutées sur la ligne pour en déterminer les différentes constantes et il présente des graphiques des conditions de fonctionnement.

Enfin, il passe en revue les accidents arrivés sur la ligne par suite de défauts des isolateurs, décharges atmosphériques et causes accidentelles.

Il conclut en disant que le fonctionnement de l'installation Paderno-Milan est une preuve de l'emploi pratique des hautes tensions.

M. Semenza ajoute à sa Communication une observation sur les bruits produits dans les lignes téléphoniques supportées par les mêmes poteaux que les câbles de transmission de force. Il dit avoir supprimé le bruit en isolant fortement la ligne téléphonique de la terre. (*Voir* aux annexes.)

Au sujet des bruits dans les lignes téléphoniques, M. HILLAIRET dit que les essais faits depuis quelques années par l'administration des Postes et Télégraphes français tendent à confirmer l'hypothèse de M. Semenza.

M. BOUCHEROT. — Les procédés de **Compoundage d'alternateurs** qui ont été proposés jusqu'ici, tant à l'étranger qu'en France, sont relativement nombreux. Vers la fin de l'année 1898, il y en avait quatre ou cinq qui, tous, reposaient sur l'emploi, comme intermédiaire entre le courant alternatif produit par l'induit et le courant continu d'excitation, de l'appareil communément appelé *convertisseur* ou *commutatrice*. L'adaptation de cet appareil à l'alternateur était faite de façon plus ou moins différente, plus ou moins simple, mais c'était toujours ce même appareil qui était appliqué.

Je me rendis compte à cette époque que l'emploi du convertisseur présentait un inconvénient très sérieux et un autre inconvénient moins grave, mais de nature à faire désirer le remplacement du convertisseur par un autre appareil.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En premier lieu, il ne faut pas songer, je crois, à faire mouvoir ce convertisseur comme un convertisseur ordinaire, c'est-à-dire comme moteur synchrone, à cause de la variabilité de la tension à laquelle ce convertisseur est soumis; je crois que ce serait là une imprudence. Il faut donc, soit monter ce convertisseur sur l'axe de l'alternateur, soit le faire mouvoir par l'intermédiaire d'un engrenage. Or, il est facile de voir de suite qu'à cause du grand nombre de pôles nécessité par le convertisseur, cet appareil devient difficile à réaliser, sinon impossible d'une façon simple, dans la plupart des cas; il suffit, pour s'en convaincre, de jeter les yeux sur le Tableau suivant :

Puissance de l'alternateur.	Mode de commande.	Vitesse angulaire.	Puissance pour l'excitation.	Mode de commande du convertisseur.	Nombre de pôles du convertisseur.
kw		t. p. m.	kilowatts		
100	Courroie	500	2 à 3	Sur l'axe	12
100	Volant	120	2 à 3	Engrenage	12
400	Courroie	350 à 400	6 à 8	Sur l'axe	16
400	Volant	60 à 80	6 à 8	Engrenage	16 à 20

Vous voyez donc que, pour les alternateurs commandés par courroie, le convertisseur est à peu près impossible à réaliser sans un train d'engrenages, et, pour les alternateurs volants, sans deux trains d'engrenages. L'autre inconvénient de cet appareil résulte de la relation forcée qui existe entre la tension alternative et la tension continue. De ce fait, pour produire le courant continu au moyen d'un alternateur de haute tension, il faut ajouter un transformateur abaisseur de tension, en plus du transformateur compensateur ou de compoundage.

J'ai donc cherché à supprimer ces deux inconvénients, et j'y suis parvenu au moyen d'une excitation spéciale que j'appelle *dynamo à enroulements sinusoïdaux*.

C'est une dynamo jouissant de propriétés inverses de celles d'un alternateur et donnant, à une certaine vitesse, du courant continu, lorsqu'elle est excitée avec du courant alternatif.

Cette excitatrice spéciale à enroulements sinusoïdaux se compose en principe d'un inducteur identique à celui d'un moteur à champ tournant et d'un induit ayant, par son collecteur, l'aspect d'un induit de machine à courant continu, mais différent de celui-ci

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

par le fait que cet induit comporte deux ou trois enroulements sinusoïdaux au lieu d'un enroulement uniforme (1).

Pour que la tension de l'alternateur soit indépendante des courants débités et de leur phase, il suffit alors que le courant continu d'excitation varie suivant une certaine loi dans laquelle figurent les courants débités et leur phase. C'est ce que nous obtenons par la combinaison du transformateur de compoundage avec l'alternateur et l'excitatrice.

On intercale entre l'induit de l'alternateur et l'inducteur de l'excitatrice le secondaire du transformateur de compoundage dont le primaire est branché en circuit dans le courant principal débité par l'alternateur.

La première machine que j'ai réalisée de ce système était un alternateur de 10 kilowatts à 750 tours par minute, basse tension.

La deuxième a été réalisée par la maison Breguet et est celle de 1000 kg exposée dans la galerie des machines avec la machine à vapeur Delaunay-Belleville.

La petite machine et la grande ont confirmé toutes deux l'exactitude de nos prévisions, soit en ce qui concerne le fonctionnement de la dynamo à enroulements sinusoïdaux, soit en ce qui concerne le compoundage.

Nous avons naturellement eu quelques incidents, dont je vous fais grâce, à la mise en marche, ainsi qu'il arrive chaque fois que l'on fait quelque chose de nouveau. Mais, à part une grande sensibilité à l'influence des variations de vitesse due à ce que le circuit magnétique inducteur n'est pas assez saturé, tout est à peu près en ordre maintenant. Et, j'insiste sur ce point, bien qu'il n'y ait pas eu d'autres essais que ceux faits à l'Exposition même, il nous a été facile d'ajuster l'excitatrice et le transformateur de compoundage de manière à compounder, et même à surcompounder l'alternateur pour le service qu'il doit faire. Cela tient au système admis qui permet un réglage sur place, aux essais, après construction.

Je suis obligé d'ajouter que ce qui vous a été dit hier, au sujet de tous les systèmes de compoundage reposant sur l'emploi d'une

(1) Pour plus de détails, voir l'*Industrie électrique* du 25 juillet 1900, p. 297, et l'*Électricité à l'Exposition*, 2e fascicule, p. 97.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

excitatrice unique et d'un transformateur de compoundage, est complètement erroné, au moins en ce qui concerne le nôtre.

Je voudrais vous dire encore quelques mots au sujet des alternateurs compounds en général. Plusieurs personnes me disaient ces jours-ci : « Pourquoi faire des alternateurs compounds, puisqu'on fait aujourd'hui des alternateurs n'ayant que 10 à 15 pour 100 de chute de tension? » Mais justement pour ne pas avoir à faire des alternateurs n'ayant que 10 pour 100 de chute de tension; pour pouvoir faire des alternateurs ayant 40 pour 100 de chute de tension, c'est-à-dire bien plus légers.

Vous avez pu remarquer la petitesse de la machine de 700 kw dont je vous parlais tout à l'heure, cela tient bien à sa grande vitesse de 250 tours par minute, mais aussi au compoundage. Cette machine dont la chute de tension en charge, à excitation constante, est de 40 à 50 pour 100, n'a que 5000 ampères-tours par pôle inducteur; pour en faire une machine n'ayant que 10 à 15 pour 100 de chute, il faudrait mettre 12000 à 15000 ampères-tours par pôle inducteur, c'est-à-dire augmenter très sensiblement les dimensions, pour pouvoir faire tenir le fil.

Mais le compoundage a encore d'autres avantages : lorsque deux alternateurs sont reliés en parallèle, la puissance synchronisante est proportionnelle au sinus de l'angle d'écart, c'est-à-dire passe par un maximum au delà duquel les alternateurs se décrochent; avec deux alternateurs compounds la puissance synchronisante est proportionnelle à la tangente de l'angle d'écart — la démonstration en est faite — d'où impossibilité *théorique* de décrocher.

Eu égard aux phénomènes de résonance électromécanique, le compoundage a encore un avantage important :

A l'heure actuelle le fonctionnement en parallèle des alternateurs volants mus par les machines à vapeur est assez précaire parce qu'il est enveloppé dans un dilemme : si on leur donne une forte réaction, ils peuvent se décrocher par un caprice du régulateur du moteur à vapeur, parce que la puissance à fournir à l'alternateur en avance pour arriver au décrochage est inférieure à ce que peut fournir momentanément le moteur à vapeur avec une ou deux cylindrées pleines de vapeur; si on leur donne une faible réaction, ils peuvent se décrocher par la résonance électromécanique, parce que leur temps périodique d'oscillations devient plus petit et se rapproche

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

du temps périodique des perturbations ($\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{4}$ de seconde) d'une façon dangereuse. On tombe donc d'un mal dans un autre en passant d'une réaction forte à une réaction faible, et, malheureusement, il semble que les valeurs de la réaction entre lesquelles on peut fonctionner sans décrocher, par l'une ou l'autre, sont souvent très rapprochées, et ne peuvent s'écarter qu'au prix d'une très grande inertie. Avec le compoundage, la réaction étant forte, les oscillations seront lentes; donc pas de crainte de décrocher par la résonance; et comme la puissance synchronisante est proportionnelle à la tangente de l'angle d'écart, pas de crainte de décrocher par un caprice du régulateur de la machine à vapeur.

Il n'était pas inutile d'attirer votre attention sur ces avantages.

M. THURY présente une Communication **Sur les Transports à haute tension au moyen de courant continu en série.** — A mesure que le prix de la force motrice augmente du fait de l'accroissement du prix des combustibles, l'importance du problème de la transmission économique à grandes distances, des forces motrices naturelles, s'accroît de plus en plus. Le problème revient à la recherche des moyens de produire et d'utiliser les tensions les plus élevées, afin de réduire au maximum le poids du cuivre employé dans la construction de la ligne, et, d'autre part, d'arriver à construire celle-ci d'une façon très simple, afin de réduire, dans la mesure du possible, les frais de premier établissement et les chances d'avarie.

L'emploi de courants alternatifs polyphasés est actuellement avantageux dans la plupart des cas où la distance de transmission n'est pas trop grande et où la tension nécessaire à sa réalisation économique peut être directement produite par les génératrices. On peut aujourd'hui admettre que la tension de 15000 volts peut être industriellement produite par des alternateurs d'une puissance supérieure à 300 kilowatts et les expériences faites permettent d'espérer que, dans un avenir plus ou moins rapproché, cette limite pourra être reculée peut-être jusqu'à près de 20000 volts.

L'emploi du courant continu permet la production de tensions excessivement élevées, simplement du fait que le couplage naturel des génératrices à courant continu, excitées en série, est le groupement en tension. Comme, d'autre part, on est arrivé très facilement à réaliser l'isolement parfait du sol, grâce à un montage

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

des génératrices et réceptrices sur isolateurs de porcelaine, la limite de tension n'est plus fixée que par l'isolement de la ligne elle-même. Des génératrices à courant continu, excitées en série, ont été pratiquement construites pour des tensions s'élevant jusqu'à 3600 volts par unité. Si donc on suppose une station génératrice comprenant par exemple 10 unités de 1000 chevaux, formées chacune d'un moteur actionnant deux génératrices de 500 chevaux bobinées pour 3000 volts, on arrive à la production directe d'un courant de 60000 volts et 115 ampères, qui pourrait être transmis économiquement à plus de 200 kilomètres.

Cette facilité très grande de produire de hautes tensions ne suffit pas pour assurer un fonctionnement pratique. Il faut encore transmettre de tels courants, et finalement les utiliser. La transmission est surtout l'affaire des fabricants d'isolateurs, et il est déjà acquis par l'expérience que des isolateurs de porcelaine bien manufacturés peuvent résister à des tensions très élevées, surpassant même 50000 volts alternatifs. Mais en faveur du courant continu, on peut noter l'absence totale des effets de l'induction, ce qui facilite grandement la construction des lignes, les conducteurs pouvant être d'une section quelconque et placés à une distance quelconque l'un de l'autre. Il n'est donc plus besoin de subdiviser les lignes et de rapprocher le plus possible les conducteurs les uns des autres, ce qui ne va pas sans inconvénients.

Jusqu'ici il n'a été constaté nulle part d'effets d'électrolyse sur les isolateurs. Ce point semble définitivement acquis.

Du côté des réceptrices, il y a eu quelques problèmes intéressants à résoudre, et la pratique en est venue facilement à bout.

La plus grosse difficulté gisait dans le fait qu'il était difficile de marcher à blanc ou à très faible charge sans étincelles au collecteur, lorsque la puissance des moteurs dépassait environ 100 chevaux. Cette difficulté a été levée par l'emploi combiné du réglage par le champ et du réglage par décalage des balais. Pour une valeur déterminée du courant d'excitation, on obtient une marche parfaite du collecteur, indépendante de la position des balais qui peuvent être décalés à angle droit, jusqu'à cessation complète de tout effort moteur, ou même plus loin, jusqu'à renversement complet de la marche. Cette propriété précieuse a été utilisée avec succès complet au réglage de moteurs de 300 chevaux,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et rien ne s'oppose plus dès lors à l'augmentation de la puissance des moteurs jusqu'à concurrence de la limite de la tension pratiquement admissible, actuellement fixée à 3600 volts.

La régulation des moteurs a également fait de grands progrès par l'emploi d'appareils simplifiés, plus économiques et néanmoins précis.

M. Maurice Leblanc. — M. Thury a montré les avantages que présente l'emploi des machines à courant continu montées en série, lorsque l'on voulait opérer une transmission de force motrice en masse, à une très grande distance.

Nous croyons possible de réaliser un système semblable au sien, en substituant un courant alternatif simple au courant continu.

L'intérêt de cette substitution consistera : 1° dans la suppression des organes de commutation; 2° dans le réglage naturel de la vitesse des moteurs, qui ne dépendra que de la fréquence des courants employés.

Principe du nouveau système. — Nous emploierons des machines d'induction comme génératrices et utiliserons la faculté qu'elles possèdent de pouvoir être accouplées entre elles, ou avec un alternateur, en série aussi bien qu'en parallèle.

Comme M. Thury, nous disposerons une ligne unique à deux fils comprenant, montées en série, des machines génératrices et réceptrices, que nous ferons parcourir par un courant d'intensité constante.

Génération du courant. — On peut compounder un alternateur à intensité constante, mais le même résultat peut être obtenu plus simplement, en lui donnant une grande réaction d'induit et en ne faisant pas varier son excitation. C'est ainsi que les machines Gramme à bougies Jablochkoff donnaient 8 ampères par circuit en service normal, et seulement 10 ampères lorsqu'on les fermait sur elles-mêmes.

Supposons qu'on emploie comme alternateur une de ces machines, et qu'il tourne, par exemple, avec la vitesse de 100 tours.

Nous associerons en série, avec lui, des machines d'induction

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

dont les circuits induits seront fermés sur des excitatrices semblables à celles que nous avons décrites dans une précédente Communication au Congrès.

Elles seront conduites par des moteurs dont les régulateurs seront réglés, par exemple, pour la vitesse de 105 tours : m.

Leur rotation développera une force électromotrice qui tendra à augmenter l'intensité du courant.

Mais cette intensité ne pourra jamais atteindre 10 ampères, car la force électromotrice développée par l'alternateur deviendrait nulle et nous savons que : si l'action des machines d'induction peut rendre, en apparence, aussi petite que l'on veut l'impédance du circuit sur lequel travaille l'alternateur qui les gouverne, elle ne peut la rendre nulle.

Lorsque la charge du réseau augmentera, l'intensité du courant tendra à diminuer. Il faudra alors remettre une nouvelle machine d'induction en service, et réciproquement, si la charge diminue.

Si, par suite d'une rupture de conduite, le réseau venait à être déchargé, toutes les machines le seraient, mais leurs régulateurs les empêcheraient de s'emballer.

Si un court-circuit venait à se produire, l'intensité ne pourrait dépasser 10 ampères, comme nous venons de le voir. La vitesse des machines d'induction ne pourrait dépasser 105 tours, grâce à l'action de leurs régulateurs. L'alternateur fonctionnerait comme moteur et serait entraîné par elles, mais sa vitesse aurait aussi 105 tours pour limite.

En résumé, on n'aura qu'à mettre en route ou arrêter des machines, suivant les besoins de la consommation, sans leur faire subir aucun réglage. La conduite de l'installation sera donc aussi simple que possible.

Une négligence pourra faire tomber l'intensité au-dessous de 8 ampères, mais aucune négligence, ni aucun accident ne pourront lui faire dépasser 10 ampères. On ne saurait trouver des conditions de fonctionnement présentant plus de sécurité.

Fréquence à donner aux courants. — Du moment que l'on n'a pas à faire de l'éclairage direct et qu'on n'emploie pas de transformateurs, la fréquence des courants employés est indifférente.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les machines à courant continu de grandes dimensions, la fréquence des variations de flux ne dépasse pas 8.

Rien ne nous empêcherait d'adopter la même fréquence. Or, avec des courants de fréquence 8, par exemple, les phénomènes occasionnés dans les lignes, par les variations de flux, tels que l'accroissement réel de la résistance des câbles en vertu de l'effet Thomson, l'accroissement apparent de cette résistance dû à la self-induction de la ligne, deviennent négligeables.

Il est certain que les harmoniques qui pourraient entrer en résonance, si la ligne de transport était constituée par un câble armé, seraient d'un ordre tellement élevé que leur grandeur serait pratiquement nulle.

La force disruptive exercée sur les diélectriques serait, sans doute, du même ordre de grandeur que si l'on employait un courant continu ayant une tension seulement $\sqrt{2}$ fois plus grande que la tension efficace adoptée.

Les difficultés d'isolation dues à l'emploi des courants alternatifs seraient alors fort diminuées.

Plus nous abaisserons la fréquence, plus nous diminuerons les inconvénients dus à l'emploi de courants alternatifs, tout en conservant ses avantages, puisque nous ne voulons qu'actionner directement des moteurs.

Utilisation des courants. — Quant aux récepteurs, on les constituera avec des machines d'induction munies des excitations spéciales que nous avons décrites dans la Communication signalée plus haut, et qui leur permettront d'avoir un $\cos\varphi$ égal à 1.

Il faudra les lancer, mais cela ne présentera pas d'inconvénient, si ces machines font partie de transformateurs rotatifs et doivent conduire des machines à courant continu. On fera démarrer ces dernières au moyen d'une batterie d'accumulateurs.

On pourra d'ailleurs profiter de la faible valeur de la fréquence, pour constituer des appareils à résonance électromécanique, capables de jouer le rôle de condensateurs.

Ceux-ci permettraient de décomposer, sur place, les courants alternatifs simples en courants polyphasés qui alimenteraient des moteurs à champ tournant, capables de démarrer sous charge.

On pourrait également se servir, dans le même but, des conden-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sateurs électrolytiques qui ne valent rien avec des courants de fréquence élevée, mais fournissent de bons résultats avec des courants de basse fréquence.

Enfin, s'il s'agissait de petits moteurs, rien n'empêcherait de se servir de moteurs à collecteur dont on réglerait la vitesse comme le fait M. Thury. La faiblesse de la fréquence rendrait la commutation facile.

Conclusion. — On peut faire un système de distribution en série, à intensité constante, avec un courant alternatif simple, aussi bien qu'avec un courant continu.

Il convient alors d'employer un courant de très basse fréquence.

L'abaissement de cette fréquence permet de rendre insensibles les défauts propres du courant alternatif, en laissant subsister ses avantages, qui consistent dans la suppression des organes de commutation et l'absence de tout réglage, aussi bien des génératrices que des réceptrices.

M. Pérot fait une Communication **Sur l'accouplement des alternateurs au point de vue des harmoniques** et l'effet des moteurs synchrones sur ceux-ci.

M. Pérot montre que l'effet des moteurs synchrones sur les harmoniques des alternateurs est de mettre en court-circuit sur leur armature tous les harmoniques qui ne font pas partie de leur force électromotrice propre. Il en résulte un abaissement considérable de la tension des harmoniques qui peuvent passer de 8,5 pour 100 à 3 pour 100. M. Pérot indique que les moteurs asynchrones doivent pouvoir remplir le même office. Enfin, il indique un mode de construction des alternateurs permettant d'avoir des machines débarrassées d'harmoniques sensibles. (*Voir* aux *Annexes.*)

La séance est levée à $11^h 20^m$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Séance du jeudi 23 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HILLAIRET.

La séance est ouverte à $9^h 15^m$.

M. le PRÉSIDENT donne la parole à M. ROUTIN **Sur les alternateurs compounds et les transformateurs statiques.**

Cette étude a été distribuée aux membres du Congrès. (*Voir* les *Rapports préliminaires,* p. 105.)

M. le PRÉSIDENT remercie M. Routin pour son intéressante Communication et donne la parole au colonel RENARD pour des observations à présenter sur la Communication de M. Ernest Gerard relative à la **Résistance des voitures automotrices à la traction.**

M. le colonel RENARD. — Dans la séance du 21 août M. Ernest Gerard a donné pour la résistance par tonne d'une voiture de chemin de fer expérimentée en Belgique la formule

$$f = 1,8 + 0,04\,v + \frac{0,0415\,v^2}{p}$$

(p poids du véhicule en tonnes).

Le colonel Renard avait été frappé de la faiblesse du troisième terme qui représente la résistance de l'air.

Si en effet on isole ce terme on peut l'écrire

$$fp = R = 0,0415\,v^2;$$

c'est la résistance en kilogrammes de l'air au mouvement du véhicule.

Or, il résulte d'expériences très concordantes (Robert de Didion, Langley, Établissement de Chalais) que la résistance d'une surface plane de 1 m² se mouvant avec une vitesse de 1 m par seconde est de 0,085 kg $= \varphi$. De sorte que la résistance R′ de ce plan est exprimée par la formule $R' = 0,085\,v^2$ (air de 1,25 de densité). On en déduit $\frac{R}{R'} = 0,49$; soit environ $\frac{1}{2}$, de sorte que la voiture essayée avait une résistance équivalente à celle d'un plan mince de 0,50 m².

Comme sa surface réelle est donnée de 6 m² (section trans-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

versale) il faudrait en conclure que les *formes de la voiture* avaient eu pour résultat de réduire la résistance dans le rapport de $\frac{1}{2}$ à 6 ou de 1 à 12. Cette conclusion était invraisemblable, car le véhicule n'était que légèrement arrondi à l'avant.

Ce désaccord heureusement n'est qu'apparent; dans la formule de M. E. Gerard, en effet, v est exprimé non en mètres par seconde, mais en kilomètres à l'heure.

Si, pour faciliter les comparaisons on la transforme en y exprimant v en mètres par seconde, il faut multiplier par 3,6 le coefficient de v et par $\overline{3,6}^2$ ou 13 environ celui de v^2.

Elle devient alors:

$$f = 1,8 + 0,144v + \frac{0,54v^2}{p}.$$

La résistance R de l'air au mouvement du véhicule devient

$$R = 0,54v^2;$$

celle d'un plan mince de 1 m² est

$$R' = 0,085v^2,$$

d'où $\frac{R}{R'} = 6,35$, ce qui veut dire que la résistance de la voiture est équivalente à celle d'un plan mince σ de 6,35 m² de surface. Cette surface de 6,35 m² est très approximativement celle de la section transversale de la voiture. *Il y a donc eu accord remarquable* entre les expériences belges et les données générales sur la résistance de l'air.

Calculons numériquement et la résistance totale (rapportée à une tonne) et la résistance de l'air pour une voiture de 40 tonnes et une vitesse $v = 20$ m ou 72 km à l'heure, nous trouverons

Pour les deux premiers termes.....	1,8 + 2,88 = 4,68
Et pour le dernier.....	5,40
Total.....	10,08

On voit que la résistance de l'air 5,40 est déjà pour cette vitesse notablement supérieure à l'ensemble des autres résistances.

Or on peut réduire beaucoup cette résistance de l'air.

Pour ne citer que quelques chiffres, en prenant pour unité celle d'un plan mince de même section transversale :

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La résistance d'une sphère est ..... $\frac{1}{6,3}$
Celle d'un fuseau dont la longueur est double du diamètre. $\frac{1}{13}$ } environ
Celle d'un fuseau dont la longueur est le triple du diamètre. $\frac{1}{31}$ }

Sans aller si loin on peut par un profil ogival peu allongé réduire la résistance au tiers de sa valeur.

Avec cette modification très simple le chiffre global 10,08 donné plus haut tomberait à

$$4,68 + \frac{5,40}{3} = 6,48.$$

Le rapport de ce chiffre au précédent est de 0,65 environ et l'économie réalisée serait de 35 pour 100.

Pour une vitesse de 108 km à l'heure elle serait de 44 pour 100, c'est-à-dire de près de $\frac{1}{2}$.

L'importance des formes d'avant et d'arrière pour les véhicules rapides, mobiles sur rails ou sur routes, si longtemps méconnue, est mise en évidence.

Il est à remarquer que les mêmes expériences faites en Belgique sur la résistance des voitures et celles qui ont été faites à l'Établissement de Chalais sur la résistance de l'air ont été exécutées par des procédés électriques. Leur concordance remarquable montre le parti qu'on peut tirer de l'électricité dans ce genre de recherches.

M. Claude fait une Communication sur quelques idées nouvelles **Sur le mécanisme de l'électrolyse par les courants de retour des tramways**. Cette étude a été distribuée aux membres du Congrès. (*Voir* les *Rapports préliminaires*, p. 154.)

M. le Président remercie M. Claude de son intéressante Communication et fait remarquer que la règle des 5 volts est maintenue dans les villes ; mais on a donné plus de latitude pour les réseaux suburbains.

M. Léon Gerard fait une Communication **Sur le halage électrique des bateaux par remorqueurs et automobiles.** Il décrit la transmission triphasée qui sert au remorquage des bateaux entre Bruxelles et Charleroi et alimente en même temps une distribution d'éclairage et de force motrice.

Il indique les précautions prises pour ne pas troubler les lignes télégraphiques et téléphoniques très voisines, puis décrit les

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

trolleys particuliers à cavalier employés, les voitures automobiles et les remorqueurs qui servent au service de halage.

Il insiste en terminant sur les avantages sociaux considérables qui en sont résultés pour la région traversée par le canal et pour la batellerie.

M. le PRÉSIDENT remercie M. L. Gerard pour son intéressante Communication à propos de laquelle il insiste sur les inconvénients des régulateurs trop sensibles dans les stations centrales.

La séance est levée à 11^h40^m.

Séance du vendredi 24 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HILLAIRET.

SÉANCE DU MATIN.

La séance est ouverte à 9^h20^m.

M. P. JANET fait une Communication **Sur la Théorie et les essais d'une commutatrice** exécutés au Laboratoire central d'électricité.

J'examinerai, dans cette Communication, deux points particuliers de la théorie des commutatrices monophasées : 1° quelle est la nature de la tension recueillie aux balais lorsque la machine est alimentée aux bagues par une tension alternative constante; 2° quelle est l'influence de l'excitation sur cette tension recueillie aux balais. Les expériences ont porté sur une commutatrice Alioth de 15 kilowatts, je me bornerai au cas où la machine fonctionne à vide.

Je commencerai par tracer les caractéristiques à vide de la machine considérée comme génératrice, à la vitesse du synchronisme : l'une de ces courbes se rapporte à la tension continue aux balais, l'autre à la tension alternative aux frotteurs; le rapport théorique entre ces deux tensions est, comme on le sait, $\sqrt{2} = 1,41$. Dans la machine étudiée, ce rapport est 1,55 : ce n'est pas la seule différence que nous trouverons entre la théorie et l'expérience; mais nous prendrons seulement la théorie comme un guide général pour indiquer les caractères principaux des phénomènes à observer.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Considérons maintenant la machine fonctionnant comme moteur synchrone à vide. A l'inverse de ce qui se passe pour les dynamos à courant continu, le courant absorbé n'est pas nul en général : il dépend de l'excitation suivant la courbe en V bien connue, et ne s'annule que pour une valeur déterminée de l'excitation.

En pratique le courant ne s'annule jamais, mais la courbe passe seulement par un minimum très prononcé; cela tient : 1° à ce que les frottements et l'hystérésis empêchent que la machine fonctionne réellement à vide; 2° à ce que les harmoniques tant de la force électromotrice principale que de la force contre-électromotrice du moteur donnent des courants qui ne s'annulent pas; par exemple, pour une tension de 56 volts efficaces environ aux frotteurs, le courant passe par un minimum pour une excitation de 0,85 ampère.

Il est facile de montrer que ce minimum a lieu lorsque l'excitation est telle que la tension alternative appliquée aux frotteurs est précisément égale à celle que l'on recueillerait si la machine fonctionnait en génératrice. Nous appellerons cet état, *état de fonctionnement normal.*

La présence de ce courant alternatif dans l'armature entraîne, même à vide, une réaction d'induit qui va influer sur la tension aux balais.

On sait que le flux propre d'une armature parcourue par un courant alternatif se compose : 1° d'un flux fixe dans l'espace; 2° d'un flux tournant avec une vitesse double de la pulsation du courant donné.

Envisageons d'abord les effets de ce dernier : il est facile de voir qu'il va donner aux balais une tension alternative de pulsation 2ω, c'est-à-dire de fréquence double de celle du courant principal.

La tension recueillie aux balais est donc en réalité une tension ondulée formée par la superposition d'une tension continue et d'une tension alternative due au flux tournant. Si l'on observe cette tension ondulée avec deux voltmètres, l'un magnétique, l'autre thermique, le premier donne la tension continue, le second la tension ondulée, et la différence des carrés des deux lectures donnera le carré de la tension alternative. Théoriquement les deux lectures ne devraient concorder que pour l'excitation où le courant

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

s'annulerait; pratiquement, on trouve que les deux lectures, très différentes d'abord, se rapprochent beaucoup à ce moment. Nous donnons également un certain nombre de courbes de ce genre pour des tensions alternatives variant de 56 volts à 110 volts. (*Voir* aux *Annexes*.)

Cette ondulation des tensions aux balais des commutatrices peut s'observer dans d'autres circonstances : lorsque, à l'inverse de ce que nous avons considéré jusqu'ici, une commutatrice sert à transformer une tension continue en tension alternative, elle ondule fortement la tension continue qui lui est fournie; nous avons pu, avec M. Hospitalier, observer un effet très marqué de ce genre à la station centrale de Rouen : à cette station, une partie importante du courant continu est transformée en courant alternatif au moyen de commutatrices; or on observe très nettement que le courant, au départ des feeders principaux à courant continu, est fortement ondulé : il suffit d'en approcher un morceau de fer que l'on sent vibrer dans la main. L'explication est évidemment la même que plus haut.

Théoriquement, des effets de ce genre ne devraient pas exister dans les commutatrices polyphasées, le flux propre de l'induit étant fixe dans ces machines; mais les harmoniques donnent des flux tournants qui ondulent encore la tension principale, ce qui dans certains cas a eu de graves inconvénients au point de vue des téléphones.

Laissons de côté maintenant cette tension alternative qui se superpose à la tension continue aux balais, c'est-à-dire ne portons plus notre attention que sur les flux fixes et les mesures faites au moyen d'appareils magnétiques. Nous étudierons d'abord la machine à tension alternative constante et excitation variable, puis à excitation constante et à tension alternative variable.

1° Appliquons aux frotteurs une tension alternative constante, 56 volts par exemple, et partons d'un état de fonctionnement normal, c'est-à-dire réglons l'excitation de manière que la machine, fonctionnant comme génératrice, donnerait 56 volts efficaces aux frotteurs : cette excitation est 0,85 ampère; alors nous devons prévoir que la tension continue aux balais sera $56 \times 1{,}55 = 86$ volts. Nous trouvons, en réalité, 84 volts, ce qui concorde très sensiblement.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

A partir de ce point normal, faisons croître l'excitation : alors un courant alternatif traverse l'induit, même à puissance nulle. On démontre facilement que le flux fixe engendré par ce courant exerce sur les inducteurs une action démagnétisante; il en résulte, pour la tension continue, une tendance à se maintenir constante; mais, contrairement à ce qui se passe pour les commutatrices polyphasées, il est loin d'en être ainsi : l'augmentation d'excitation l'emporte sur l'action démagnétisante du flux fixe de réaction d'induit, et la tension continue monte jusqu'à 93 volts pour une excitation de 1,1 ampère. Inversement, si l'on diminue l'excitation, pour des raisons analogues, la tension continue baisse jusqu'à 56 volts pour une excitation de 0,2 ampère.

J'ai répété des mesures analogues pour les tensions alternatives de 86 volts et de 110 volts; toutes les courbes obtenues ont la même allure.

Lorsque l'excitation tend vers zéro, la tension continue tend vers une certaine limite qui dépend d'une façon simple des constantes (résistances et réactance) de la machine : mais la machine se décroche avant qu'on puisse observer ce point : on l'obtiendrait en maintenant artificiellement sa vitesse constante au moyen d'un autre moteur synchrone couplé arbre à arbre avec la commutatrice.

J'examinerai maintenant la marche de la machine à excitation constante et à tension alternative variable aux bornes. Soit E_a la tension alternative aux bagues, E_c la tension continue aux balais; portons E_a en abscisses, E_c en ordonnées. Si l'on avait la relation

$$E_c = 1,55\,E_a,$$

comme lorsque la machine fonctionne en génératrice, la relation entre E_c et E_a serait représentée par une droite dont le coefficient angulaire serait 1,55. Si nous partons d'un état normal de fonctionnement A, nous devons trouver un point sur cette droite : mais, à partir de cet état, faisons croître la tension alternative, l'excitation restant constante; nous devons obtenir une ligne située *au-dessous* de la précédente; en effet, pour un point tel que B, il faut augmenter l'excitation pour retrouver un nouvel état normal de fonctionnement. Les courbes obtenues confirment très sensiblement ces prévisions. (*Voir* aux *Annexes*.)

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Lombardi, **Sur l'emploi des condensateurs à haute tension.** — M. Lombardi donne les résultats des nouveaux essais qui ont été faits sur la construction des condensateurs à plaques isolantes de paraffine pure et cérésine, d'après la méthode imaginée par lui et communiquée l'année dernière au Congrès de Côme.

Les plaques sont maintenant fabriquées en grand nombre par la Maison Ing. V. Tedeschi et Cie de Turin, qui construit des condensateurs industriels pour haute tension. Un de ces condensateurs, d'une capacité de 1 microfarad pour 5000 volts, ou de 0,25 microfarad pour 10000 volts, figure à l'Exposition universelle, dans la Section italienne d'Électricité. La dissipation d'énergie n'y excède guère 1 pour 100, de sorte que la température ne varie pas sensiblement, d'après les mesures thermo-électriques, qui ont été poursuivies sur la pièce en question jusqu'à des tensions de 9000 volts, les plaques mêmes ayant été essayées à 17000 volts.

Le prix des nouveaux condensateurs à haute tension peut baisser jusqu'à 50 fr. par kilovolt-ampère, de façon qu'il n'excède point celui des autres grandes machines industrielles.

L'énergie qu'un condensateur permet d'économiser, rapportée à l'unité de capacité, dépend de la diminution qu'il réalise dans le décalage du courant, et varie beaucoup avec la chute de tension dans la ligne et le type de la génératrice : avec $\cos\varphi = 0,8$ et une chute de potentiel de 10 pour 100 dans la ligne, l'énergie économisée dans la transmission peut atteindre 2 kilowatts pour une capacité de 1 microfarad; celle qu'on économise dans l'alternateur peut même dépasser 1 kilowatt. En même temps, la puissance de la machine augmente et le réglage devient plus aisé. Dans ces conditions, l'emploi des condensateurs peut donner pratiquement un véritable avantage. Tout danger pour les condensateurs et les réseaux peut être éliminé par l'adoption de parafoudres et plombs de sûreté, qui empêchent toute surélévation du potentiel et de l'intensité du courant. (*Voir* les *Rapports préliminaires,* p. 183.)

M. Boucherot. — Je n'ai pas l'intention, Messieurs, de vous lire mon Rapport sur l'emploi des condensateurs; je pense que vous l'avez lu, et je voudrais simplement développer quelques-unes des affirmations qu'il contient.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Je dois d'abord m'excuser de n'avoir cité personne, alors que j'aurais pu, au contraire, citer nombre de nos Collègues, et des plus éminents; mais certaines des applications, non pas les moins importantes, ont été trouvées simultanément en France et à l'étranger, et il valait mieux ne pas s'exposer à des réclamations de priorité, afin que nos délibérations restent inspirées, suivant l'expression de notre Président dans la séance d'ouverture, par l'esprit de conciliation et de concorde.

En résumé, je crois que le prix encore trop élevé du kilowatt apparent, et les phénomènes de surélévation de tension s'opposent encore aujourd'hui à l'application *en grand* des condensateurs. Il se pourrait, et je ne serais pas éloigné de croire, que la voie toute nouvelle dans laquelle s'est engagé M. Lombardi pour la fabrication de ces appareils soit celle qui conduira à la solution complète et définitive; si l'on réfléchit, en effet, à la différence colossale qui existe entre la résistivité de la paraffine pure et celle du papier paraffiné, on peut fonder bien des espérances sur le procédé de M. Lombardi, qui, au premier abord, semble assez risqué, par suite de la suppression du support de la paraffine.

Mais, dès maintenant, je pense que beaucoup d'applications pourraient être faites dans de petites installations. Malheureusement, on a fait au condensateur une réputation déplorable, et il en résulte que ni les constructeurs, ni les exploitants ne veulent se décider à en faire des applications, même en petit. Je dois cependant citer, comme exception, une application qu'est en train de faire la maison Breguet, chez MM. Menier, de mon système de distribution en série par conducteurs et bobines de self-induction, pour l'éclairage des routes et abords de la chocolaterie et du village de Noisiel.

En ce qui concerne les grands réseaux à haute tension, je dis que l'application des condensateurs n'est peut-être dangereuse qu'en apparence, par suite des surélévations de tension dues à la capacité. Ces surélévations de tension se produisent, en effet, dans certains réseaux, d'une manière alarmante par sa continuité et par l'intensité des effets produits. J'ai fait, par exemple, il y a quelques années, avec le concours du secteur des Champs-Élysées, des essais de condensateurs sur ce secteur. Or des condensateurs qui ne pouvaient être percés au laboratoire qu'avec 6000 à 8000 volts,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

qui avaient fonctionné pendant des semaines entières au laboratoire sur un alternateur de 300 chevaux et sous une pression de 4000 volts, se trouvaient percés très rapidement sur ce réseau.

Un premier appareil qui laissait passer, au laboratoire, 3 ampères sous 3300 volts, et sur le secteur 5 ampères sous 3300 volts (ce qui indique la présence d'harmoniques supérieures dans la courbe de la force électromotrice du réseau) fut mis hors de service au bout de dix à douze heures par fusion de la paraffine; le refroidissement n'était pas assez énergique par suite de la trop grande épaisseur des éléments.

Un deuxième appareil laissant passer 2 ampères sous 3300 volts a fonctionné pendant douze journées de vingt-quatre heures sur le réseau; ce n'est qu'au bout de ce temps qu'un élément s'est trouvé perforé par l'étincelle. Pour m'assurer qu'il devait y avoir, par moment, des phénomènes anormaux, j'ai, après avoir supprimé l'élément détérioré, remis l'appareil en dérivation sur le réseau, après l'avoir sectionné en dix parties identiques dans chacune desquelles était intercalé au fil fusible; ce fil fusible avait été établi de manière à fondre pour un courant double environ du courant normal passant dans $\frac{1}{10}$ de l'appareil. Après deux ou trois jours, on a ouvert la caisse dans laquelle se trouvaient les fils fusibles, qui tous avaient fondu. Donc, dans cet intervalle de temps, il s'était produit soit des surélévations de tension à la fréquence normale, soit des courants de fréquence plus élevée, soit les deux. Les surélévations de tension se sont certainement produites, puisque, au laboratoire, il fallait 6000 à 8000 volts pour percer le diélectrique.

Il y a donc de fortes améliorations sur les réseaux importants ayant de la capacité.

Or, examinons un tel réseau. Supposons un réseau de lumière débitant le soir 1000 kilowatts; il y a environ 3000 kilowatts de transformateurs qui absorbent environ 200 à 300 kilowatts déwattés ou magnétisants, soit 70 à 100 ampères sous 3000 volts. La capacité des câbles concentriques étant d'environ 30 microfarads absorbe environ 25 ampères. Un tel système est donc ajusté pour l'harmonique 3 ou 4, soit pour une fréquence de 120 à 160 périodes par seconde, c'est-à-dire qu'il peut résonner pour les courants de cette fréquence en produisant des effets plus considérables

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et nuisibles que s'il résonnait pour la fréquence 40, c'est-à-dire s'il avait 3 ou 4 fois plus de capacité. La présence des alternateurs qui ont de la self-induction et de la mutuelle induction et des masses de fer dans lesquelles se développent des courants de Foucault modifie nécessairement les chiffres que j'indique, en ce sens qu'il faudrait sensiblement plus de 3 à 4 fois 30 microfarads pour avoir résonance avec la fréquence 40; mais il n'en résulte pas moins que les effets nuisibles doivent passer par un maximum pour une certaine capacité, ainsi que je dis dans mon Rapport, et qu'il se pourrait que, en mettant beaucoup de capacité, on soit assez loin de ce maximum, et dans des conditions aussi bonnes qu'avec très peu de capacité.

Il me reste à dire quelques mots de la chaîne thermo-électrique utilisée comme décaleur, comme appareil équivalent à une capacité par son introduction dans un circuit alternatif.

J'ai cru que cet appareil pourrait servir comme capacité : en effet, si l'on fait passer pendant un certain temps un courant continu dans un ensemble cuivre-fer-cuivre, par exemple; si l'on coupe ensuite ce circuit et si l'on ferme le double couple sur un galvanomètre, il passe dans le galvanomètre un courant analogue au courant de décharge d'un condensateur.

J'ai alors essayé de voir l'effet produit dans un circuit alternatif; 200 à 300 rondelles de fer et de cuivre soudées alternativement ont été introduites dans le circuit secondaire d'un transformateur donnant moins d'un volt, les mesures étaient effectuées sur le primaire à 100 volts; il ne m'a pas été possible de constater un effet appréciable; s'il y en avait un, il était de l'ordre de grandeur des erreurs d'expériences.

Je me proposais alors d'intercaler dans le même circuit quelques milliers de rondelles fer-cuivre; mais j'ai interrompu cette recherche à la suite de calculs auxquels je me suis livré; il résulte, en effet, de ces calculs que, même si l'on obtenait un effet de décalage appréciable, cette propriété ne serait pas utilisable pour le but proposé, car le décalage est théoriquement de $\frac{\pi}{4}$, et non de $\frac{\pi}{2}$.

En effet, dans cette chaîne thermo-électrique, c'est le courant qui développe aux soudures la chaleur (positive ou négative), et c'est la différence des températures des soudures qui donne lieu à

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

la force électromotrice ; donc, la force électromotrice est en phase avec la température et l'intensité en phase avec le flux de chaleur aux soudures. Or un calcul simple montre qu'il y a entre le flux de chaleur aux soudures et leur température (pour des fonctions sinusoïdales) un décalage de $\frac{3\pi}{4}$. En tenant compte des signes, le décalage entre la force électromotrice et le courant est donc de $\frac{\pi}{4}$. En tenant compte de l'effet Joule, qui a été négligé dans ces calculs, le décalage est inférieur à $\frac{\pi}{4}$. Je pense donc qu'il n'y a pas lieu d'espérer de voir cet appareil se substituer au condensateur.

SÉANCE DE L'APRÈS-MIDI.

La séance est ouverte à $2^h 10^m$.

Le PRÉSIDENT donne la parole à M. REY, **Sur la théorie graphique de la régulation des convertisseurs rotatifs** de M. Blondel.

M. Blondel démontre que les convertisseurs peuvent se ramener au cas des moteurs synchrones à réaction transversale nulle.

Il en déduit des épures très commodes pour les différents cas qui peuvent se présenter dans la pratique.

Le Président remercie M. Rey et donne la parole à M. Max Weyler pour une Note **Sur la manière de calculer la hauteur d'enroulement des électros, connaissant l'excitation en ampères-tours et l'épaisseur d'enroulement.** (*Voir* aux *Annexes*.)

M. LOMBARDI reprend la parole pour répondre à M. Boucherot. Il explique que l'on choisit la cérésine, au lieu de la paraffine, à cause de sa température de fusion qui peut s'élever jusqu'à 80° C. Tout danger d'inflammabilité peut d'ailleurs être évité en employant des plombs de sûreté et toute surélévation de tension par l'emploi des parafoudres.

M. Lombardi croit que le plus grand nombre de mécomptes obtenus avec des condensateurs insérés dans les réseaux, après avoir été essayés au laboratoire, sont dus à la forme différente de la courbe de tension qui, pour la même valeur efficace, peut présenter un maximum beaucoup plus élevé. On y remédie en essayant des condensateurs au triple de la tension normale. Certainement,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

une connexion fautive entre deux parties d'un réseau qui présentent des capacités très différentes peut donner lieu à des surélévations de tension tout à fait inattendues.

Quant à la question de prix, il y est répondu par la Communication elle-même.

M. Maurice Leblanc. — **Sur l'emploi des condensateurs.** — Nous avons essayé, dès 1890, de nous servir de condensateurs, surtout dans le but de décomposer un courant alternatif simple en courants polyphasés capables d'actionner un moteur à champ tournant, dont le $\cos\varphi$ devait, en même temps, être rendu égal à 1.

Nous avons employé notamment des condensateurs en papier paraffiné construits par M. Labour, des condensateurs en papier noyé dans de l'huile de pétrole de M. Swinburne, des condensateurs faits avec de l'ébonite de 0,5 mm d'épaisseur, à très bas prix (6 fr le kilog.), provenant d'une usine de Manheim, et des condensateurs en verre à vitres. Ces derniers étaient chargés par l'intermédiaire d'un transformateur.

Nous sommes ainsi parvenus à faire un moteur à courant alternatif simple, démarrant sous charge avec son courant normal et ayant un $\cos\varphi$ égal à 1. Malheureusement, les inconvénients inhérents à l'emploi de condensateurs nous ont empêché, jusqu'à présent, de rendre ce moteur industriel (1).

Depuis, ayant eu à faire des installations comportant des câbles armés qui auraient une capacité notable, nous avons constaté que

(1) Dans une première série d'essais, la machine génératrice était une machine Gramme, à intensité constante, servant à l'éclairage de bougies Jablochkoff. La réaction d'induit était telle que la machine, qui fournissait normalement 8 ampères sous 2400 volts, ne donnait que dix ampères en court-circuit, son excitation étant la même dans les deux cas.

Nous avions muni la batterie de condensateurs d'un paratonnerre à soufflage magnétique d'Elihu Thomson, adapté par M. Labour à l'emploi des courants alternatifs. Le paratonnerre fonctionnait de temps en temps, au moment des variations de régime, sans amener aucun trouble dans l'installation, et les condensateurs étaient protégés. Dans ces conditions, nous étions arrivés à constituer un système peut-être peu économique, mais marchant bien.

Dans une seconde série d'essais, la machine génératrice fut une machine de M. Labour, à tension constante et dont la réaction d'induit était remarquablement petite.

Dans ces nouvelles conditions, il nous fut impossible de faire fonctionner notre moteur. Le paratonnerre ne cessait de se réamorcer, chaque fois que son arc

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

des machines qui supportaient très bien leur tension, en desservant des lignes aériennes, ne le pouvaient plus, lorsqu'on les fermait sur des câbles armés.

C'est ainsi qu'à l'usine du secteur des Champs-Elysées, on fit produire sans accident 4000 volts à un de nos alternateurs, en le faisant travailler sur un rhéostat. On le mit ensuite sur le réseau, qui est constitué avec des câbles concentriques, et l'on fit monter progressivement sa tension; à partir de 1500 volts, une pluie d'étincelles se manifesta dans son entrefer et mit le feu aux isolants. Il fallut remplacer ceux-ci par du mica.

Dans une autre installation, sur le secteur de la Société d'Éclairage et de Force à Paris, où l'on envoyait des courants alternatifs diphasés à la tension de 6000 volts dans des câbles concentriques, après avoir successivement renforcé l'isolation de tous les appareils, nous sommes arrivés à la rupture des câbles. Mais, cette fois, il fut facile de vérifier que l'on avait affaire à un simple phénomène de résonance, car sans rien changer au débit des appareils, nous avons pu amener ou faire disparaître les surélévations de tension, en faisant varier la capacité du réseau ou sa self-induction. Les alternateurs, étant munis de circuits amortisseurs, développaient une force électromotrice très sensiblement sinusoïdale, mais cette installation desservait des transformateurs redresseurs dont les collecteurs étaient divisés en 12 sections.

Le fonctionnement de ces derniers appareils développait dans chacune des branches du réseau une petite force électromotrice de fréquence douze fois plus grande que la fréquence normale, et dont la grandeur se trouvait affectée de battements, si bien que l'on pouvait la considérer comme la superposition des harmo-

---

avait été soufflé : l'intensité du courant variait continuellement et le régime ne pouvait s'établir.

Si l'on ne mettait pas de paratonnerre, les condensateurs étaient immédiatement mis hors d'usage.

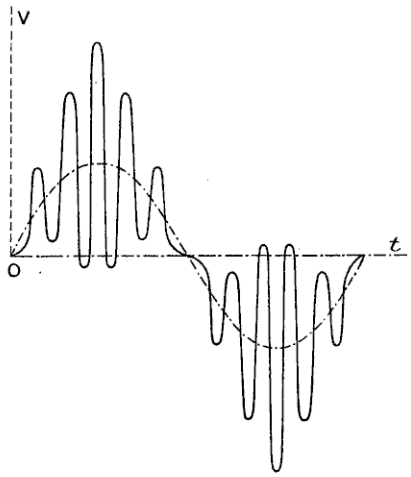
Ces phénomènes étaient évidemment dus à l'emploi d'une génératrice à très faible réaction d'induit.

Comme, dans la pratique, nous devions avoir à disposer nos moteurs sur des réseaux à tension constante, constituant des circuits à très petit coefficient de self-induction, et non à les intercaler dans des lignes parcourues par des courants d'intensité constante; comme, d'un autre côté, nous n'apercevions aucun moyen de nous opposer aux accroissements de la force disruptive constatée, nous abandonnâmes ces essais.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

niques de rang 11 et 13 de la force électromotrice normale (1).

Un oscillographe suffisamment sensible, branché sur ce réseau, aurait dû donner une courbe de tension telle que celle représentée par un trait continu sur la figure ci-jointe, au lieu de la sinusoïde représentée par une succession de points et de traits, sur la même figure.



Si l'on représente une semblable courbe par l'équation

$$h = \mathrm{H}\sin 2\pi\alpha t + h[\sin 2\pi(11)\alpha t + \sin 2\pi(13)\alpha t],$$

la valeur maximum de la différence de potentiel qu'auront à supporter les diélectriques sera égale à $\mathrm{H} + 2h$, tandis que la tension efficace correspondante, telle que le mesurerait un électromètre, ne sera égale qu'à $\sqrt{\frac{\mathrm{H}^2 + 2h^2}{2}}$.

A égalité de tension efficace, la différence de potentiel maximum

(1) Ces forces électromotrices amenaient la superposition de différences de potentiels de mêmes fréquences, aux différences de potentiels normales. Ces différences de potentiels supplémentaires pouvaient avoir des valeurs incomparablement plus grandes que les forces électromotrices qui leur avaient donné naissance, lorsqu'il y avait résonance.

Or le coefficient de self-induction d'un réseau varie avec sa charge. Lorsque celle-ci variait graduellement, on arrivait toujours à faire résonner ces harmoniques de rangs 11 et 13, avant d'avoir obtenu la pleine charge.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

qu'auront à supporter les diélectriques sera plus grande que si les variations de tension suivaient la loi sinusoïdale. En effet, on a

$$H + 2h = \sqrt{H^2 + 4hH + 4h^2} > \sqrt{2}\sqrt{\frac{H^2 + 2h^2}{2}}$$

et cet effet sera d'autant plus marqué que la quantité h sera plus grande.

Mais nos appareils de mesure ne peuvent pas mesurer la tension efficace véritable, lorsqu'il y a des harmoniques susceptibles de résonner sur un réseau.

En effet, il est impossible de se servir alors d'électromètres qui seraient capables de mesurer cette tension. Les distances explosives deviennent trop grandes : ils servent de paratonnerres et sont très rapidement mis hors d'usage.

On est toujours conduit à employer des voltmètres thermiques desservis par l'intermédiaire de petits transformateurs. Au coefficient de transformation près, le circuit du voltmètre peut être considéré comme ayant une impédance $\sqrt{r^2 + 4\pi^2\alpha^2 l^2}$, où r représente la résistance propre du voltmètre, l un coefficient de self-induction correspondant aux fuites magnétiques du transformateur et α la fréquence du courant.

Tant que la fréquence α est normale, soit 40 ou 50, l'impédance $\sqrt{r^2 + 4\pi^2\alpha^2 l^2}$ ne diffère qu'extrêmement peu de la résistance r, mais il n'en est plus de même si la fréquence α devient très supérieure, c'est-à-dire si c'est celle d'une harmonique de rang élevé, telle que la douzième.

L'impédance du circuit du voltmètre est alors très différente de sa résistance. Cet appareil qui indiquait la véritable tension efficace, lorsque la fréquence était égale à 40, par exemple, n'indiquera plus qu'une tension efficace très inférieure à la tension efficace réelle, lorsque la fréquence sera devenue 480.

La tension efficace, mesurée par nos appareils industriels, ne représente donc guère que celle qui correspondrait aux variations de tension ayant la fréquence normale, comme si les harmoniques n'existaient pas.

Pour les deux raisons précédentes, nous voyons que : si l'on maintient la tension constante sur un réseau, en s'en rapportant aux indications d'un voltmètre desservi par un transformateur, les

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sommets de la courbe de la figure précédente pourront atteindre des hauteurs quelconques, si des harmoniques viennent à résonner, sans qu'il y ait aucune relation entre ces hauteurs et la grandeur de la tension mesurée par le voltmètre.

C'est ainsi qu'à l'usine de Saint-Ouen nous avons vu jaillir un arc entre deux conducteurs distants de 14 cm, alors que le voltmètre indiquait 6000 volts (1).

Or si l'on a pu se passer des services qu'auraient pu rendre les condensateurs, on ne peut songer à se passer des câbles armés, pour constituer les réseaux.

Il était donc nécessaire de rechercher les moyens de supprimer les résonances d'harmoniques.

Supposons d'abord qu'il s'agisse d'un réseau en câbles armés dont la capacité soit constante.

Si nous désignons par c la capacité du réseau, par L son coefficient de self-induction, et par A celui de l'armature de l'alternateur qui l'alimente, il tendra à faire résonner des courants de fréquence β telle que l'on ait

$$\beta = \frac{1}{2\pi\sqrt{c\,\frac{AL}{A+L}}}.$$

Lorsque l'alternateur sera en pleine charge, le coefficient L devra être considéré comme infini et la valeur de la fréquence sera alors

$$\beta_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{cA}}.$$

Lorsque l'alternateur sera en charge, le coefficient L sera environ cinquante fois plus petit que le coefficient A, la valeur de la fréquence β sera alors sensiblement égale à

$$\beta_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{cL}}.$$

(1) Nous ne rapportons ici que ce que nous avons vu, mais nous savons que des phénomènes de ce genre ont été fréquemment observés sur des réseaux constitués avec des câbles armés.

Ces phénomènes étaient d'ailleurs identiques à ceux que nous avions observés avec notre moteur à condensateur, lorsque nous l'alimentions avec la machine de M. Labour.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La fréquence β_2 sera à peu près sept fois plus grande que la fréquence β_1.

La charge variant d'une manière continue, la valeur de la fréquence β coïncidera successivement avec celle de diverses harmoniques de la fréquence du réseau.

Le nombre d'harmoniques qui pourront successivement entrer en résonance sera d'autant plus élevé que la fréquence β_1 sera elle-même plus grande par rapport à la fréquence normale α. Mais cela n'aura pas d'importance si la fréquence β_1 est très élevée en grandeur absolue. En effet, les courants de cette fréquence et, *a fortiori*, de fréquence supérieure pourront difficilement se propager dans le réseau, car ils ne passeront plus qu'à la surface des conducteurs, et développeront des courants de Foucault intenses dans les masses de fer qu'ils contourneront. La résistance effective ainsi opposée à leur passage les empêchera d'acquérir une grande intensité et les surélévations de tension qu'ils détermineront ne seront pas dangereuses.

Il n'en sera plus de même si la fréquence β_1 diminue.

Toutes choses égales d'ailleurs, le coefficient de self-induction d'un alternateur croît comme le carré de sa tension. La fréquence β est alors inversement proportionnelle à la tension.

D'un autre côté, si l'on augmente la tension, c'est qu'on a à transmettre de l'énergie à une plus grande distance. Les câbles sont plus longs et la capacité c est augmentée, d'où une nouvelle diminution de la fréquence β_1.

Nous arriverons alors à faire résonner des harmoniques de fréquence assez basse, pour que des courants de ces fréquences puissent circuler dans le réseau, sans avoir à surmonter de résistance effective notablement supérieure à sa résistance ohmique.

C'est à ce moment que les phénomènes de résonance seront redoutables.

Mais si nous ne pouvons diminuer la capacité du réseau, nous pouvons l'augmenter et diminuer la fréquence β_1.

Nous diminuerons ainsi le nombre des harmoniques susceptibles de résonner et nous pourrons nous proposer de constituer des appareils générateurs ou récepteurs qui ne les produisent pas.

Il sera plus simple d'adjoindre des condensateurs aux divers appareils récepteurs, de manière que la capacité du réseau aug-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

mente, quand sa self-induction diminue. On pourra ainsi rendre constante la fréquence pour laquelle le réseau sera susceptible de résonner, et il sera facile de faire en sorte qu'elle ne corresponde à aucune des harmoniques qu'il superposera à sa tension fondamentale.

Mais si la résonance se produisait pour les courants ayant la fréquence normale, il n'y aurait aucune surélévation de tension à redouter si l'on maintenait constante la tension efficace.

Cette constance pouvant être assurée automatiquement, à l'aide des divers modes de compoundage que l'on connaît, la résonance aurait simplement pour effet de rendre très sinusoïdale la courbe de la tension, et s'opposerait, au contraire, aux surélévations de tension.

Conclusion. — En résumé, il convient qu'un réseau n'ait qu'une très petite ou très grande capacité.

Il résulte des divers essais que nous avons faits sur les condensateurs et sur les câbles armés que tous les accidents que nous avons observés tenaient à la résonance d'harmoniques d'un rang peu élevé, et qu'il ne se passe rien d'anormal lorsqu'on empêche ces résonances de se produire.

Le développement naturel des distributions d'électricité conduira, dans un avenir peu éloigné, à constituer des réseaux où les courants de fréquence normale résonneront eux-mêmes (1).

Cela imposera l'emploi d'alternateurs compoundés à tension constante, pour éviter les surélévations de tension dues à cette résonance, et le moyen le plus simple d'assurer la sécurité du fonctionnement sera de faire croître la capacité du réseau avec sa charge. Il y aura donc lieu d'adjoindre des condensateurs à tous les récepteurs.

C'est qu'alors l'adjonction de ces appareils s'opposera aux résonances d'harmoniques, au lieu de les provoquer, comme elle l'a fait jusqu'ici.

L'emploi de ces appareils ne pouvant plus être une cause d'accidents, au contraire, nous pourrons enfin mettre à profit leurs merveilleuses propriétés que tout le monde connaît.

(1) Sur le réseau de Berlin, on a constaté déjà la résonance de la troisième harmonique.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM. Boucherot et Lombardi ont, d'autre part, suffisamment étudié la fabrication de ces appareils, pour qu'on n'ait plus à redouter d'être arrêté par des questions de prix de revient.

Nous sommes donc convaincus que, dans ces conditions, l'emploi des condensateurs ne tardera pas à se généraliser et que l'on aménagera les réseaux déjà existants, de manière à y faire résonner les courants de fréquence normale.

M. Boucherot. — **Sur la puissance virtuelle dans les réseaux à courants alternatifs.** — Je voudrais montrer combien la considération de ce que M. Blondel a appelé la *puissance déwattée,* mais que je préfère appeler *puissance virtuelle* ou mieux encore *puissance magnétisante,* permet de simplifier les calculs dans les réseaux à courants alternatifs.

La simplification résulte du théorème suivant :

Dans un réseau de circuits à courants alternatifs, ne comportant ni collecteurs, ni commutateurs tournants, ni résistances variables pendant la période, la somme des puissances magnétisantes est nulle, comme la somme des puissances réelles.

Soit un point quelconque d'un réseau où se trouve un appareil soumis à une tension efficace E_n, absorbant un courant efficace I_n décalé sur la tension E_n d'un angle φ.

La puissance réelle absorbée par l'appareil est

$$P_n = E_n I_n \cos\varphi.$$

La puissance magnétisante est

$$V_n = E_n I_n \sin\varphi.$$

Or la somme des puissances instantanées dans le réseau est nulle, c'est-à-dire, si ψ est l'angle de décalage entre E_n et une origine quelconque, on a

$$\Sigma 2 E_n I_n \sin(\omega t + \psi) \sin(\omega t + \psi + \varphi) = 0;$$

d'où les deux équations

$$\Sigma 2 E_n I_n \sin^2(\omega t + \psi) \cos\varphi = 0$$

et

$$\Sigma 2 E_n I_n \sin(\omega t + \psi) \cos(\omega t + \psi) \sin\varphi = 0.$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

En intégrant la première pendant une période et la seconde de $-\psi$ à $-\psi+\frac{\pi}{2}$, il vient

$$\Sigma E_n I_n \cos\varphi \quad \text{ou} \quad \Sigma P_n = 0$$

et

$$\Sigma E_n I_n \sin\varphi \quad \text{ou} \quad \Sigma V_n = 0,$$

Il suffit donc d'exprimer chacun des appareils en puissance réelle et puissance magnétisante, de même que les pertes dans les transformateurs et en lignes pour avoir, en sommant, les valeurs en un point quelconque des puissances réelle, magnétisante et apparente, du $\cos\varphi$, de la tension, etc.

Par exemple, supposons une fraction de réseau comportant une ligne de 20 ohms de résistance et de 30 ohms de réactance, au bout de laquelle se trouve un transformateur ayant 4000 volts aux bornes du primaire et sur le secondaire duquel sont branchés :

A. Un moteur synchrone surexcité de 10 000 volt-ampères, $\cos\varphi = 0{,}8$;

B. Un moteur asynchrone de 20 000 volt-ampères, $\cos\varphi = 0{,}9$;

C. Un moteur asynchrone de 5000 volt-ampères, $\cos\varphi = 0{,}8$;

D. 10 000 watts de lampes;

E. Un condensateur de 2000 watts.

On aura

	Puissance réelle.		Puissance magnétisante.
Pour A.....	8 000		— 6 000
» B.....	18 000		9 000
» C.....	4 000		3 000
» D.....	10 000		0
» E.....	0		— 2 000
Soit, au secondaire du transformateur.....	40 000	et	4 000

Si le transformateur prend 2,5 pour 100 d'énergie pour ses pertes et 5 pour 100 de puissance magnétisante, il faudra lui fournir au primaire :

41 000 watts vrais et 6 000 watts magnétisants,

soit $\sqrt{41\,000^2 + 6\,000^2} = 41\,500$ watts apparents, ou volt-ampères, c'est-à-dire sous 4 000 volts : 10,12 ampères.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

La ligne absorbera donc

$20.\overline{10,12}^2 = 2060$ watts vrais et $30.\overline{10,12}^2 = 3090$ watts magnétisants.

Il faudra alors fournir au bout de la ligne

43 060 watts vrais et 9 090 watts magnétisants,

soit 44 600 volt-ampères avec $\cos\varphi = \frac{43\,050}{44\,600} = 0{,}98$, soit, avec le courant de 10,12 ampères : 4350 volts.

J'ai pensé que cette manière rapide de calculer, que j'ai indiquée depuis deux ou trois ans aux élèves de l'École supérieure d'Électricité, pourrait être utile à quelques-uns; c'est pourquoi je n'ai pas hésité à vous demander quelques minutes d'attention.

M. le Président remercie M. Boucherot de son intéressante Communication et insiste pour que l'on remplace le nom de *puissance virtuelle* ou *dévattée* par celui de *puissance magnétisante*.

La séance est levée à $3^h 20^m$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SOUS-SECTION B.

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

Séance du lundi 20 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HIPPOLYTE FONTAINE.

La séance est ouverte à $9^h 45^m$.

VICE-PRÉSIDENTS : MM. Ferdinand Meyer (France), de Fodor (Hongrie), Carl Hering (États-Unis).

SECRÉTAIRES : MM. Gasnier, Pernollet, Soulier.

M. LAPORTE donne lecture des passages les plus importants d'un Rapport de M. BLONDEL **Sur les progrès des lampes électriques**. Ce Rapport a été distribué. (*Voir* p. 210.)

M. FONTAINE remercie M. Laporte et demande quelles sont les personnes qui veulent présenter des observations sur la Communication précédente. M. Fontaine ajoute qu'il n'est pas tout à fait exact qu'on revienne aux lampes à arc à mouvement d'horlogerie; il cite des lampes à moteur système Gramme qui fonctionnent très bien depuis vingt ans dans des fonderies malgré la poussière, et cela à cause de la puissance du moteur.

M. MAILLOUX considère le Rapport de M. Blondel comme très important. Il parle de l'emploi des mouvements d'horlogerie en Amérique; on les a fait disparaître et l'on a recherché surtout la simplicité : on s'est borné à l'embrayage et à l'enclenchement. En Amérique on emploie des tensions élevées; on a commencé à 70 volts et l'on est monté jusqu'à 125 volts. M. Mailloux pense qu'il n'y a pas d'avenir dans les lampes à haute tension, ni comme rendement, ni comme durée, ni comme intensité lumineuse. Il défend l'installation de Hartford, que M. Blondel cite comme peu économique. Il dit que le rendement d'une installation d'éclairage à courant continu ne dépasse pas 75 pour 100, tandis qu'avec le

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

courant alternatif on a un bien meilleur rendement. On fait encore beaucoup usage, en Amérique, du système en série pour l'éclairage des rues.

M. X... émet le vœu que le Congrès réalise une entente entre les divers pays sur la comparaison des lampes à arc à courant alternatif et à courant continu.

M. DE FODOR explique qu'en Amérique on n'a pas comme en France la concurrence de la lumière Auër; il a fait lui-même des essais avec l'arc enfermé et a remarqué une grande instabilité : il en conclut qu'il faut avoir un bon mécanisme pour avoir une lumière parfaite. A Budapest on n'a qu'un seul type de lampe, ce qui simplifie beaucoup l'entretien.

M. MAILLOUX dit qu'on emploie des lampes à arc très allongé, de 160 à 180 volts, que l'on branche directement sur 230 à 240 volts; mais ces lampes donnent une lumière très violacée.

M. FERDINAND MEYER rappelle que progressivement on a élevé les tensions et qu'aujourd'hui on a une tendance à passer de 110 à 120 volts; il se demande comment une société a pu passer de 110 à 220 volts sans inconvénients.

M. FONTAINE reconnaît que le consommateur n'a rien gagné à ce changement, mais qu'il peut y gagner si la Compagnie lui fait des concessions.

M. DE FODOR croit qu'il faudrait tout reconstruire à neuf.

La séance est levée à $11^h 10^m$.

Séance du mardi 21 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HIPPOLYTE FONTAINE.

La séance est ouverte à $9^h 50^m$.

M. FONTAINE fait observer que les constructeurs qui fabriquent des lampes à moteur ne les ont jamais abandonnées, en raison des avantages qu'elles présentent grâce à la puissance de leur moteur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. DE FODOR fait observer qu'à Budapest la station n'utilise qu'un seul type de lampes, qu'elle a choisi le plus parfait possible et qu'elle fournit à sa clientèle.

M. DE FODOR fait une Communication **Sur la Proposition d'un nouveau mode de tarification du courant électrique.**

Ce Rapport a été distribué. (*Voir* p. 277.)

M. LAURIOL. — Les idées émises par M. de Fodor me paraissent très justes. Le secteur municipal de Paris applique un tarif analogue divisé en deux parties : 1° une taxe fixe par kilowatt installé et par mois; 2° une taxe proportionnelle à la consommation. Le prix total payé par kilowatt-heure est ainsi d'autant plus faible que la durée de fonctionnement a été plus longue.

Avec ce tarif, comme avec celui de M. de Fodor, deux inconvénients sont à craindre : 1° le consommateur est poussé à réduire son installation et à ne poser que des lampes ou autres appareils qui auront une longue durée de fonctionnement. Or il peut être commode d'avoir des lampes, pour ainsi dire dans tous les coins d'un appartement, sauf à ne faire fonctionner certaines d'entre elles que peu de temps; 2° il est facile à l'abonné d'augmenter la puissance installée à l'insu de l'exploitant; ce dernier se trouve alors lésé. Il ne peut l'éviter qu'au prix d'une surveillance incessante et aussi gênante pour l'abonné que pour l'exploitant lui-même.

Le tarif dit *de Brighton*, avec indicateurs de maxima type Wright, échappe aux inconvénients signalés.

Mais, de même que les autres systèmes précédemment décrits, il laisse subsister un troisième inconvénient, peut-être plus théorique que pratique, mais qu'on ne doit pas négliger. Avec tous ces systèmes, un consommateur consommant pendant un petit nombre d'heures paiera un tarif fort. Or il pourra arriver que ce petit nombre d'heures tombe en dehors des heures de forte consommation générale, par exemple s'il s'agit de force motrice, d'éclairages de sous-sol, etc. En ce cas nous avons affaire à un bon client, qui mérite un tarif réduit.

A cela nous ne voyons qu'un remède : le compteur à double tarif et le paiement de deux prix différents suivant l'heure à laquelle on aura consommé. Les prix et les heures d'application

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

pourraient varier selon la saison. Deux systèmes principaux de compteurs sont en présence : 1° le compteur à enregistrement unique, qui se trouve systématiquement faussé à certaines heures de la journée; 2° le compteur qui enregistre exactement toutes les quantités d'énergie consommée, mais les enregistre sur deux cadrans suivant l'heure de la journée. Avec le premier système, le client ne peut plus se rendre compte de sa consommation et se croira facilement lésé. Aussi donnerions-nous la préférence au second système, et prions-nous les constructeurs de nous fournir des types pas trop coûteux et de fonctionnement sûr.

J'ajoute qu'il faut distinguer entre deux catégories d'exploitants : 1° les Sociétés entièrement libres de leurs tarifs, au-dessous d'un certain maximum. En ce cas le flair du commerçant pourra l'amener dans chaque espèce à trouver la solution convenable; 2° il en est autrement d'une Administration publique, ou des Sociétés qui ne sont pas libres de baisser leurs tarifs arbitrairement. En ce cas il faut une règle précise pour déterminer les baisses de tarifs. Si l'on veut tenir compte de tous les éléments en jeu dans une question si complexe, la règle sera elle-même un peu compliquée. Le compteur à double tarif permet d'établir la règle la moins compliquée, embrassant tous les cas : lumière, force motrice, chauffage, électrochimie, etc., et dispensant l'exploitant de tout contrôle inquisitorial chez l'abonné, au delà du compteur.

M. DE FODOR répond qu'il fait usage de compteurs à deux tarifs (compteur Aron avec une résistance introduite dans le circuit à fil fin). L'indicateur de Wright demande des visites fréquentes et n'est pas bien juste. M. de Fodor dit que son tarif varie avec la saison, ce qui a un intérêt pour les installations doubles (gaz et électricité) dans lesquelles on ne consomme l'électricité pendant l'été que si un rabais suffisant rend son prix égal à celui du gaz. A Budapest on fait aussi usage du forfait, mais seulement pour les installations ou parties d'installations pour lesquelles la consommation est bien connue.

M. FONTAINE fait remarquer que les observations de M. de Fodor s'appliquent plus particulièrement à l'Autriche-Hongrie en raison du développement considérable du bec Auer dans ce pays.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. F. MEYER dit que l'abonné est souvent disposé à faire des déclarations inexactes.

M. DE FODOR dit que des inspections régulières sont faites en même temps que le relevé du compteur et par le même employé.

M. LAURIOL fait observer que le système de M. de Fodor ne peut être appliqué que par des Sociétés ayant la liberté de leur tarif. Prix du gaz à Budapest : 20 centimes le mètre cube. Prix de l'énergie électrique : 80 centimes le kilowatt-heure avec rabais allant jusqu'à 60 pour 100.

M. MEYER dit qu'il serait logique de tarifer l'énergie suivant le genre d'installation (café, pharmacien, etc.). Le système de Fodor encourage à la consommation.

M. FONTAINE trouve que l'un des avantages de ce système est de permettre aux abonnés, grâce aux rabais considérables accordés pendant l'été, de juger des nombreux avantages de la lumière électrique. On a ainsi toute chance de conserver ces abonnés.

M. CLAUDE fait remarquer que le tarif doit varier non seulement avec la saison, mais aussi avec l'heure de la journée, de façon à égaliser le plus possible la charge de l'usine.

M. MORNAT fait une Communication **Sur l'Électricité et la force motrice au théâtre.** (*Voir* p. 281.)

M. CLAUDE. — **Sur l'emploi des condensateurs dans les lampes à arc à courant alternatif.**

Dans une Communication antérieure, M. Blondel a eu la bienveillance de rappeler une proposition que j'ai faite autrefois dans le but d'améliorer le réglage des lampes à arc à courants alternatifs, et de regretter que des applications industrielles de ce dispositif n'aient pas encore été réalisées. Bien que ce soit sans doute beaucoup de présomption de ma part, j'ai pensé qu'à cette occasion il serait peut-être intéressant de vous rappeler brièvement le principe de ma proposition.

Pour qu'une lampe à arc règle bien, il faut qu'une *petite* variation dans l'écart des charbons se traduise par une *grande* variation dans l'attraction de l'électro destiné à faire mouvoir le méca-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

nisme, de manière que cette petite variation d'écart provoque un réglage énergique qui ramène exactement les charbons à leur écart primitif.

Tant qu'on a affaire au courant continu, cette condition est aisée à réaliser.

Je suppose qu'il s'agisse d'une lampe en dérivation, c'est-à-dire dans laquelle un électro L placé en dérivation aux bornes de l'arc (*fig.* 1) a pour but, par l'intermédiaire d'un mécanisme conve-

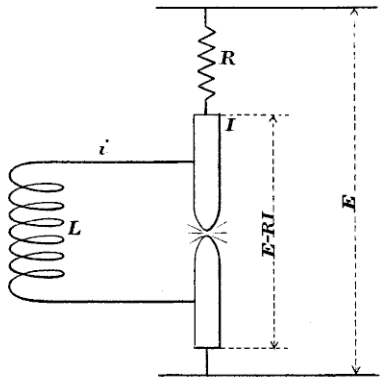


Fig. 1.

nable, de maintenir constante la différence de potentiel aux bornes de cet arc. Dans ce cas, pour une position donnée du noyau et en supposant ce noyau non saturé, l'attraction dépend du carré de l'intensité du courant I qui circule dans le fil de l'électro, c'est-à-dire du carré de la différence du potentiel aux bornes; en sorte que dans le cas du courant continu, obtenir une attraction très variable avec l'écart des charbons revient tout simplement à réaliser une différence de potentiel très variable avec ce même écart.

C'est, comme on sait, dans ce but qu'en tension avec l'arc on place une résistance ou rhéostat de réglage R transformant la différence de potentiel constante U de la canalisation en une différence de potentiel aux bornes $U - RI$ variable avec l'intensité I du courant circulant dans la rampe (c'est-à-dire avec l'écart) et d'autant plus variable que R est plus grand. Aussi, plus R est grand et meilleure doit être la marche de la lampe, ce que l'expérience vérifie précisément.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Avec le courant alternatif il n'en va plus aussi simplement. Un nouvel élément intervient en effet, qui est la self-induction de la bobine. Cette self-induction n'agit pas seulement pour augmenter dans une mesure considérable la résistance apparente de l'électro et diminuer dans la même mesure le nombre des ampères-tours. Elle agit d'une manière plus défavorable encore en faisant *varier* cette résistance apparente chaque fois que le noyau se déplace.

Supposons en effet, toujours dans l'hypothèse d'une lampe en dérivation, que, par suite de l'usure progressive des charbons et de la présence d'une *réactance* de réglage (*fig.* 2), la différence de

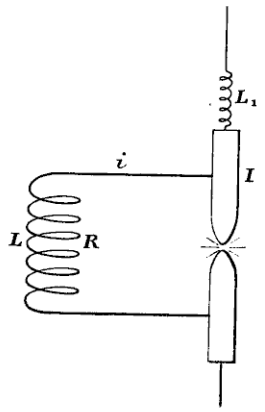


Fig. 2.

potentiel aux bornes de l'arc augmente : l'intensité i dans l'électro augmentant, le noyau s'enfonce d'une certaine quantité. Mais en s'enfonçant, il augmente la self-induction de la bobine, c'est-à-dire la résistance apparente. La résistance apparente augmentant, l'intensité ne peut plus, comme ce serait le cas avec le courant continu, augmenter *aussi vite* que la différence de potentiel. En pratique, elle augmente *énormément moins vite*. Ainsi, j'ai effectué à ce sujet, quelques expériences devant la *Société des électriciens* avec une lampe Brianne à courant alternatif, alimentée par le courant du secteur de la rive gauche. En faisant varier la différence de potentiel aux bornes de manière à attirer plus ou moins le noyau, on pouvait constater que, selon la grandeur du déplacement de ce noyau, l'intensité variait de *cinq à dix fois moins vite* que la différence de potentiel, en dépit de la faible fréquence, 42 périodes par seconde, du courant employé.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Ceci peut s'appliquer d'une manière générale à toutes les lampes en dérivation, quel que soit leur système, quelque petits que soient les déplacements du noyau déterminant le réglage; de telle sorte que dans ces lampes, surtout aux fréquences élevées, la différence de potentiel, c'est-à-dire l'écart, peut varier dans de larges limites sans qu'il en résulte pour le noyau autre chose que de très faibles variations d'attraction.

On est donc conduit à rattraper par la sensibilité du mécanisme, par la délicatesse du réglage, ce que les conditions électriques ne peuvent plus donner. C'est évidemment là une situation précaire et qui contribue dans une large mesure à expliquer le faible nombre des lampes à courant alternatif fonctionnant relativement bien.

Il s'agirait maintenant de voir si, à la cause de mauvais fonctionnement que nous venons de signaler, on ne pourrait pas trouver un remède.

Toutes les considérations précédentes, en somme, peuvent se résumer en deux mots en disant que si les lampes à courant alternatif fonctionnent mal, la cause en revient en grande partie à l'augmentation de résistance apparente qui accompagne l'enfoncement du noyau. Pour faire en sorte que ces lampes, à ce point de vue particulier tout au moins, soient dans des conditions équivalentes à celles des lampes à courant continu, il faudrait nous arranger de telle sorte que cette résistance restât *constante*. Et l'on conçoit même que l'idéal dans cette voie serait atteint si nous pouvions faire en sorte que la résistance allât en *diminuant* lorsque le noyau s'enfonce; car, dans ce cas, l'intensité varierait *plus vite* que la différence de potentiel, et nous nous trouverions dans des conditions *plus favorables* que dans le cas lui-même du courant continu.

Or, c'est ici que l'utilité des condensateurs va devenir évidente.

Supposons qu'en tension avec l'électro L (*fig.* 2), nous placions un condensateur de capacité telle que nous soyons au delà de la résonance par rapport à la self-induction. Ceci revient à substituer au montage de la *fig.* 2 celui de la *fig.* 3. Or si la résistance apparente du circuit électro seul (*fig.* 2) était, en appelant R la résistance ohmique,

$$R_{app} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

et *augmentait* avec L, c'est-à-dire avec l'enfoncement du noyau, la résistance apparente du circuit électro + condensateur (*fig.* 3) est au contraire

$$R'_{app} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega c} - \omega L\right)^2},$$

c'est-à-dire qu'elle *diminue* lorsque le noyau s'enfonce et que par conséquent l'intensité dans un semblable circuit doit varier *plus vite* que la différence de potentiel.

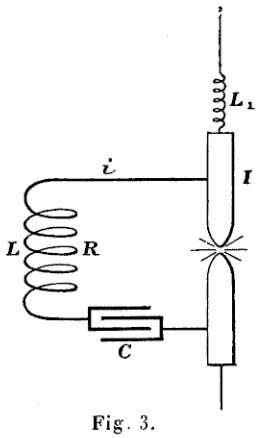


Fig. 3.

Et pour vérifier expérimentalement ces considérations, j'ai effectué à la *Société des électriciens* sur la même lampe Brianne de tout à l'heure, additionnée d'un condensateur convenable, quelques essais dans lesquels l'intensité variait en effet *deux fois plus vite* que la différence de potentiel, alors qu'elle variait à peine cinq fois moins vite lorsque l'électro était seul en série. On conçoit que dans ces conditions la moindre variation d'écart se traduise par une variation considérable de l'attraction et que par suite la lampe ainsi modifiée se trouve dans des conditions de réglage infiniment meilleures.

Il faut remarquer toutefois que des précautions convenables doivent être prises pour se mettre à l'abri d'une cause d'instabilité provoquée par l'efficacité même du condensateur : en supposant en effet le noyau en équilibre dans une certaine position, si ce noyau pour une cause quelconque vient à s'enfoncer un peu, comme, par le fait même de son déplacement, il trouvera une intensité plus grande, il pourra arriver qu'il continue son mouve-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

ment jusqu'au bout de sa course. Mais on conçoit qu'il suffira, pour se mettre à l'abri de cet inconvénient, d'employer une force antagoniste assez rapidement variable.

Il me reste à justifier au point de vue pratique ce nouvel emploi des condensateurs.

Il faut remarquer qu'à l'encontre des propositions faites jusqu'à présent pour l'emploi industriel des condensateurs, il ne s'agit pas ici de faire fonctionner ces appareils sous les différences de potentiel de plusieurs milliers de volts qui leur sont si préjudiciables. Tout ce que nous demandons, c'est qu'ils soient en état de résister aux 30 ou 40 volts propres aux lampes à courant alternatif, portés à la grande rigueur à 50 ou 60 volts par le voisinage de la résonance (1).

Dans ces conditions, nous pouvons sans inconvénient réduire à l'extrême limite l'épaisseur du diélectrique, et, comme la capacité que l'on peut emmagasiner dans un volume donné est sensiblement en raison inverse du *carré* de l'épaisseur du diélectrique, nous réaliserons ainsi des condensateurs très puissants sous un très petit volume. D'autre part, nous serons nécessairement conduits à des bobines à fil fin, à grande self-induction, ne demandant surtout aux fréquences élevées que peu de capacité pour être neutralisée; et de ces deux faits connexes résultera en pratique l'emploi de condensateurs très petits (disque de 10cm de diamètre sur 3 d'épaisseur par exemple), pouvant se loger facilement dans l'enveloppe de la lampe et n'en n'augmentant pas sensiblement le prix. Enfin, il convient de remarquer qu'il ne s'agit plus ici d'obtenir la neutralisation *exacte* d'une self-induction par une capacité, de telle sorte que la déformation des courbes pratiques du courant alternatif est sans inconvénient.

---

(1) Remarquons en passant que, par suite de ce voisinage de la résonance, la bobine elle aussi travaille sous une tension supérieure à celle qui alimente la lampe même. Elle produit donc plus d'ampères-tours et travaille dans de meilleures conditions que sans le condensateur, ce qui est un nouvel avantage que nous confère l'emploi de la capacité.

Remarquons aussi que si le noyau devait, en service, se déplacer beaucoup (genre lampe Pilsen), il pourrait en résulter quelques inconvénients, car le circuit, disposé dans une position pour résonner avec le courant principal, pourrait, dans une autre position, résonner avec l'harmonique supérieure et même les autres.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Telles sont, Messieurs, les considérations que je voulais vous soumettre. Je serais infiniment heureux si elles pouvaient provoquer les recherches industrielles souhaitées par M. Blondel.

La séance est levée à $10^h 40^m$.

Séance du mercredi 22 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HIPPOLYTE FONTAINE.

La séance est ouverte à $9^h 30^m$.

M. WEISSMANN fait une Communication **Sur l'emploi des lampes à gros filament et à basse tension.**

Cette Communication a été distribuée (*voir* p. 269).

M. BOCHET discute le Rapport de M. Blondel **Sur l'emploi des lampes à arc** (*voir* p. 210).

Il rappelle les avantages considérables des lampes ne possédant, pour leur réglage, qu'un électro en dérivation. Comme il l'a déjà établi, de telles lampes possédant un bon mécanisme de réglage donnent les mêmes résultats que des lampes différentielles. Si l'on a pu observer une économie de 15 pour 100 à l'avantage de ces dernières, cela tient à ce que la comparaison a été faite entre des lampes différentielles réglées spécialement pour la marche à basse tension et des lampes en dérivation qui n'avaient pas été construites pour ce régime.

M. Bochet cite une application dans laquelle des lampes en dérivation maintiennent un arc de 45 volts sur un circuit à 50 volts seulement. Il signale aussi la bonne marche de lampes de ce genre montées par trois en tension sous 120 volts.

A propos du système Claude, M. Bochet attire l'attention sur l'avantage que présentent les lampes à frein dont la self-induction ne varie pas, grâce à l'immobilité presque complète du noyau pendant le réglage.

M. Bochet insiste sur l'intérêt qu'il y a à encourager la construction des lampes à incandescence à 220 ou 240 volts. L'élévation de la tension facilite beaucoup l'extension des applications de l'électricité.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Bochet cite les bons résultats obtenus dans des distributions à trois fils avec 240 volts entre chaque pont, permettant de desservir, en même temps que l'éclairage, des moteurs utilisant 480 volts.

M. Ayrton reprend la discussion de la Communication de M. Blondel **Sur les progrès des lampes à incandescence**. Les expériences de M. Langhaus ont eu pour but d'augmenter le rendement des lampes à incandescence en vue d'accroître le nombre des abonnés de la station centrale. La difficulté réside dans la fabrication des filaments.

M. Ayrton a obtenu avec certaines lampes les résultats suivants :

Volts.	Ampère.	Bougies.	Consommation spécifique.
100	0,32	18,8	1,7 watt par bougie.
100	0,72	50	1,44 —
100	0,81	72	1,13 —

Malheureusement M. Ayrton n'a pu donner aucun résultat sur la durée de ces lampes qui viennent seulement d'être mises à l'essai.

M. Bainville demande quelle est la résistivité et la composition de filaments de ces lampes.

M. Ayrton répond à M. Bainville qu'il ne connaît pas la résistivité des filaments de M. Langhaus, mais que ces filaments sont composés de carbone et de silicium.

M. Mailloux ajoute quelques remarques à sa Communication précédente; il rappelle qu'on substitue en Amérique les lampes à arc à courant alternatif montées en série aux lampes à arc à courant continu montées également en série. M. Mailloux reconnaît que dans les circuits à haute tension, avec des lampes à courant alternatif, le facteur de puissance est assez élevé et influe sur la régulation. M. Mailloux pense comme M. Bochet qu'il faut élever la tension le plus possible. Si l'éclairage doit être à arc, il vaut mieux faire une installation spéciale pour cet éclairage. S'il y a des lampes à incandescence, il faut apporter certaines modifications à l'appareillage (douilles, coupe-circuit, interrupteurs, etc.).

M. Ayrton adresse ses sincères félicitations à M. Blondel pour les remarquables résultats qu'il a obtenus.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Fontaine demande à M. Mailloux s'il y a beaucoup de lampes à arc à 220 volts en Amérique.

M. Mailloux dit que le rendement de cet arc est peut-être un peu faible, mais que son grand inconvénient est la teinte violacée qu'il prend.

M. de Fodor, relativement à la Communication de M. Bochet sur les distributions à 220 volts, fait remarquer que dans ce cas il faut installer les lampes à arc par quatre en tension, ce qui est un inconvénient pour les petits consommateurs qui n'ont besoin que d'une lampe; de plus, le démarrage des moteurs à 220 volts provoque, sur la canalisation, des chutes de tension qui ne sont pas négligeables.

M. Bochet partage l'opinion de M. de Fodor en ce qui concerne l'emploi de très petits moteurs sous une haute tension, mais il fait remarquer que son observation vise particulièrement les nombreuses et importantes distributions ne desservant que des moteurs assez puissants. En ce cas, on a tout avantage à adopter une tension élevée.

M. le Professeur Sylvanus Thompson s'est toujours opposé au passage de 100 à 200 volts dans l'intérêt des consommateurs; si, en effet, on construit facilement des lampes de 8 bougies anglaises à 100 volts qui sont très employées en Angleterre, il y a plus de difficulté à construire des lampes de 200 volts. La consommation atteint 6,7 et même 8 watts par bougie.

M. Mailloux dit que la consommation des lampes à 200 volts est à peu près normale au début (3,5 à 4 watts par bougie), mais augmente très rapidement avec l'âge de la lampe.

M. de Fodor a constaté sur des lampes à haute tension une consommation de 4 watts par bougie au début; mais au bout de 200 heures la lampe n'éclairait plus.

M. F. Meyer demande à M. Mailloux des renseignements au sujet du **Contrôle et de la surveillance des installations.**

M. Mailloux dit qu'on s'est inspiré du *Board of Trade*. Ce

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

contrôle existe depuis très longtemps et aucune installation ne peut être faite sans son contrôle.

La séance est levée à 11^h30^m.

Séance du jeudi 23 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HIPPOLYTE FONTAINE

La séance est ouverte à 9^h30^m.

Mme AYRTON présente une Communication **Sur l'intensité lumineuse de l'arc à courant continu.** Cette Communication a été distribuée (*voir* p. 250).

M. le PRÉSIDENT remercie Mme Ayrton de sa très intéressante Communication, qui apporte aux praticiens et aux théoriciens des éléments nouveaux.

M. BOCHET exprime son admiration pour la merveilleuse analyse exposée par Mme Ayrton et rappelle que la réduction de l'éclat intrinsèque du cratère avec celle de l'intensité est attribuée par M. Blondel aux conditions de refroidissement de l'arc fonctionnant à l'air libre.

M. FONTAINE pense que l'explication de Mme Ayrton est excellente.

M. AYRTON rappelle quelques recherches personnelles sur la longueur de l'arc, qui ont amené Mme Ayrton aux brillants résultats qu'elle a obtenus.

M. R. ARNOUX dit que, dans sa belle Communication, Mme Ayrton a fait connaître qu'il y a un écart critique des charbons correspondant au rendement lumineux maximum de l'arc électrique. M. Arnoux fait observer qu'il y a une question importante au point de vue pratique : c'est la stabilité lumineuse de l'arc pour les écarts indiqués par Mme Ayrton. Avec la plupart des charbons actuellement employés, ces écarts donnent lieu à la formation de champignons sur le charbon négatif, qui nuisent beaucoup à la stabilité

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

de la lumière, dont les variations influencent désagréablement les yeux. Il semble donc que non seulement les constructeurs de lampes doivent s'efforcer de nous fournir des mécanismes maintenant bien constant l'écart critique des charbons, mais aussi que les constructeurs de charbons doivent s'efforcer de nous fournir des crayons qui ne donnent pas lieu à la formation de champignons pour les écarts critiques indiqués par Mme Ayrton.

M. FONTAINE fait observer que c'est Mme Ayrton qui a montré que la meilleure utilisation lumineuse de l'arc correspondait à un écartement des charbons égal à 1 mm.

M. le Professeur SYLVANUS THOMPSON rappelle une Communication antérieure de Mme Ayrton sur le sifflement de l'arc. Il dit que la Communication de Mme Ayrton donne l'explication de deux phénomènes : 1° celui signalé par M. Trotter : en regardant un arc à travers la fente d'un disque tournant, on voit quelque chose qui tourne; il pense que cela est dû probablement à des tourbillons de poussières de charbon; 2° la force contre-électromotrice de l'arc : la couche de vapeur vraie de carbone à la surface du cratère donne lieu à une grande résistance.

M. LAPORTE communique une Note de MM. BLONDEL et GIGOUZO **Sur le rendement comparatif des arcs à courants continus et alternatifs** (*voir* commencement de la deuxième section B).

M. DUDDELL. — Je prends le plus vif intérêt à la très importante Communication que M. Blondel vient de nous faire, surtout à cause de sa valeur pratique et industrielle. M. Blondel nous dit que la forme de la courbe de la force électromotrice des alternateurs n'a pas une grande influence dans la pratique sur le rendement lumineux de l'arc, et il nous démontre aussi que le rendement lumineux est très influencé par la forme de l'onde du courant. Dans des expériences antérieures de M. Blondel, et dans une série d'expériences systématiques communiquées par M. Marchant et moi-même à l'*Institution of Electrical Engineers* de Londres, il a été démontré que la nature de l'alternateur a non seulement son effet sur la courbe de la différence de potentiel aux bornes de l'arc, mais surtout sur la forme de l'onde de courant, et que le rendement lumineux doit être modifié de ce fait.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Sans entrer dans les détails de ces expériences, je dirai seulement que l'arc à charbons homogènes paraît toujours tendre à transformer l'onde de courant en une forme qui donne un mauvais rendement, et que le meilleur moyen d'empêcher cette transformation est d'employer une self-induction en série avec l'arc, ou de se servir d'un alternateur qui a une grande self-induction propre. Il est à remarquer aussi que la nature des transformateurs a aussi un effet sur la forme des ondes.

Je crois que c'est M. le Professeur J.-A. Fleming qui, le premier, a indiqué que l'arc à basse fréquence donne un meilleur rendement lumineux que l'arc à haute fréquence. Comme cette observation est tout à fait contraire à ce que M. Blondel disait qu'il attendait dans une de ses premières Communications sur l'arc, j'ai fait faire des expériences sur ce point.

Leur résultat a permis de constater que le rendement lumineux est beaucoup plus grand à basse fréquence qu'à haute fréquence, l'écart des charbons et le courant efficace étant maintenus constants.

M. Arnoux dit qu'en étendant aux arcs à courants alternatifs la loi de l'écart critique correspondant au rendement lumineux maximum, les recherches de MM. Blondel et Gigouzo complètent très heureusement celles de Mme Ayrton.

M. Laporte, au nom de MM. Blondel et Gigouzo, dit que, eu égard à l'extinction périodique de l'arc, il y aurait intérêt à réaliser des courbes de courant de forme sensiblement rectangulaire.

M. Arnoux estime que cela n'est pas absolument nécessaire et qu'on gagnerait fort peu à réaliser des courbes du courant de cette forme. Des expériences effectuées par lui, en 1883, sur une lampe de phare à courants alternatifs de 250 ampères, lui ont montré qu'un quart de minute après l'extinction de l'arc, celui-ci se rétablit *spontanément* à travers un espace d'air de 2 mm. Il semble donc d'après cela que le rallumage de l'arc ne nécessite pas une différence de potentiel très élevée, et qu'un courant alternatif de forme rectangulaire ne donnerait pas un rendement sensiblement plus élevé que les courants fournis par les bons alternateurs.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Bochet fait remarquer que la réduction d'éclat n'est sensible que pour les arcs de très faible intensité; il cite les mesures qu'il a faites de la puissance d'un appareil optique de 1,20 m de diamètre, mesurée à longue distance (6 km). Comme l'a démontré M. Blondel, cette puissance est proportionnelle à l'éclat de la source.

M. Bochet a ainsi contrôlé que cet éclat était constant pour des intensités variant de 30 à 120 ampères.

M. Pellissier expose le **Tarif différentiel**, qui est en plusieurs points analogue au tarif proposé par M. de Fodor, mais qui se rapporte à la durée d'utilisation nécessaire pour avoir un rabais sur le nombre de lampes allumées simultanément et non sur le nombre des lampes installées.

M. de Lutoslawski décrit un système analogue qui a été adopté dans la concession de la station centrale de Varsovie. Le concessionnaire doit accorder des rabais montant jusqu'à 10 pour 100 aux clients qui déclarent une consommation de courant maxima en rapport avec la quantité d'heures par an qui résulte de la division de la quantité de kilowatts-heures indiquée par le compteur par la quantité de kilowatts déclarés. Ont été proposés comme appareils de contrôle des coupe-circuits automatiques qui interrompent le courant si la consommation maxima déclarée est dépassée pendant plus d'une demi-heure.

M. Victor indique un système de distribution dans lequel on installe un appareil qui indique le temps pendant lequel la consommation d'énergie est supérieure au chiffre maximum demandé.

M. de Fodor dit qu'il se base pour l'installation de ses usines sur une moyenne de consommation de 400 heures par lampe et par an; ce chiffre résulte de nombreuses statistiques. Il ajoute que le système de M. Victor exige un appareil et que les abonnés se méfient des instruments placés chez eux; il pense que ce système, dans lequel un coupe-circuit interrompt le courant quand il dépasse une certaine valeur, découragerait le client.

M. Victor dit que les actionnaires des sociétés sont partisans des appareils de contrôle; il fait d'ailleurs remarquer que son appareil de contrôle ne fonctionne que si le client trompe la Compagnie.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. PELLISSIER fait remarquer que les appareils de contrôle tendent à se répandre dans plusieurs pays de l'Europe, et il pense qu'ils présentent un avantage considérable.

La séance est levée à 11^h35^m.

Séance du vendredi 24 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. HIPPOLYTE FONTAINE.

SÉANCE DU MATIN.

La séance est ouverte à 9^h35^m.

La parole est donnée à M. LORÇAY pour sa Communication **Sur les Lampes à incandescence sans culot** (*voir* aux *Annexes*).

MM. FONTAINE, MEYER et BAINVILLE font des observations au sujet de la proportion bien trop élevée de lampes défectueuses par suite du culot en plâtre, ce qui tendrait à faire croire à une fabrication française très inférieure.

M. BAINVILLE insiste sur ce que le collage à la sécotine des paillettes d'amenée de courant à l'ampoule pourrait laisser à désirer.

M. LAPORTE donne lecture d'une Communication de M. BLONDEL **Sur l'essai des charbons des lampes à arc** (*voir* aux *Annexes* de la deuxième section).

M. LAURIOL demande que l'on définisse exactement les conditions dans lesquelles M. Blondel mesurait les variations de tension entre les charbons.

M. STANOIEVITCH parle des **Installations électriques gratuites** et insiste sur l'intérêt qu'il y aurait pour les stations centrales et les consommateurs à ce que ces premières fissent elles-mêmes gratuitement les installations intérieures.

M. F. MEYER pense que le système précédent ne peut avoir d'intérêt que pour de petites stations établies dans une ville où il

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

y a peu ou pas d'installateurs; le système de M. Stanoievitch constitue une responsabilité trop lourde dans une grande ville, et, dans ce cas, le rôle de la station centrale doit s'arrêter aux coffrets d'arrivée du courant.

M. DE FODOR, qui a expérimenté le système à Budapest, est d'un avis analogue à celui de M. F. Meyer.

M. BOCHET présente quelques observations relatives à la Communication de M. MORNAT **Sur l'électricité et la force motrice au théâtre** (*voir* p. 281).

Comme l'a signalé depuis longtemps M. Picou, il convient de faire un serrage élastique sur les plombs de sûreté. L'emploi de rondelles, genre Belleville, vaut beaucoup mieux que le double écrou. La guipure d'amiante offre des inconvénients dans les endroits humides.

De bonnes soudures valent beaucoup mieux que des serre-fils.

Il ne faut pas multiplier outre mesure les appareils automatiques, car, lorsqu'ils sont insuffisamment surveillés, ils constituent une cause de danger.

M. Bochet insiste principalement sur les inconvénients de la Communication de M. Mornat, présentée sous forme d'un véritable règlement, des prescriptions administratives pouvant être basées sur les délibérations du Congrès.

Il est fort à désirer que les règlements administratifs en France continuent à indiquer seulement le but à atteindre et non les moyens d'y arriver, comme on le fait dans certains pays étrangers, en Amérique par exemple.

M. MARCEL MEYER demande que le mercure ne soit pas exclu des jeux d'orgues des théâtres, ainsi que le désire M. Mornat.

M. BAINVILLE présente quelques observations **Sur les lampes à gros filament.** — On ne peut augmenter le rendement d'une lampe à incandescence à filament de carbone qu'en augmentant la température du filament.

Or, quel que soit le diamètre du filament, sa température pour un même rendement sera la même tout au moins à la surface de ce filament. Mais, comme l'a fait observer M. Blondel dans son Rap-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

port, les filaments rayonnent par leur masse quand leurs diamètres sont inférieurs à l'épaisseur limite de rayonnement du carbone solide; il nous faut donc envisager deux cas :

Premier cas. — Le diamètre du filament est plus petit ou égal à l'épaisseur limite du rayonnement;

Dans ce cas, la température sera sensiblement égale dans toute la masse du filament.

Second cas. — Le diamètre est plus grand que l'épaisseur limite de rayonnement du carbone.

Dans ce cas, la température intérieure de la masse du filament sera plus élevée que celle de la couche superficielle ayant pour épaisseur l'épaisseur limite de rayonnement, puisque alors la chaleur ne pourra plus se transmettre à la surface que par conduction et non par rayonnement. M. Elihu Thomson a d'ailleurs signalé la transformation en graphite de l'âme des filaments de grosses sections. Cette transformation ne peut être due qu'à l'élévation de la température de cette âme dans les conditions particulières où elle se trouve placée.

On peut déduire de ce qui précède que, pour une même température de la couche extérieure, c'est-à-dire sensiblement pour un même rendement lumineux, la température moyenne d'un gros filament est plus élevée que celle d'un filament fin.

C'est peut-être la cause du meilleur rendement des gros filaments que M. Blondel signale dans sa Communication, et sur laquelle est fondée l'économie du procédé de M. Weissmann. Cette économie ne serait due alors qu'à une diminution de la résistance spécifique des filaments, diminution qui se ferait proportionnellement à la durée d'éclairage dans la limite des essais, c'est-à-dire en cent cinquante ou deux cents heures.

On ne peut expliquer en effet ce meilleur rendement uniquement par la plus grande résistance aux à-coups de la ligne que présentent les filaments à grosse section.

Il est bien évident que ces filaments constituent un volant thermique grâce auquel leur température ne s'élève pas sensiblement pendant les variations brusques et courtes de la différence de potentiel aux bornes des lampes, mais cette seule cause paraît insuffisante pour expliquer les chiffres de rendement que signale

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Weissmann, et il est nécessaire d'en chercher une autre. Celle que je propose m'a semblé intéressante à signaler.

M. Weissmann développe sa Communication **Sur les lampes à incandescence à gros filament**, qui a été distribuée précédemment (*voir* p. 269) et répond aux objections antérieures de M. Bochet en critiquant le montage en série des lampes à basse tension.

M. de Fodor demande si le système Weissmann a été appliqué sur le courant continu. D'après M. de Fodor, les lampes à court filament présentant une petite surface lumineuse donnent une impression désagréable; les longs filaments ont l'avantage de distribuer la lumière sur toute l'étendue de l'ampoule.

M. Weissmann répond que cette application est à l'étude, et qu'elle lui a déjà donné de bons résultats.

M. Fontaine, pour répondre à M. Weissmann, au sujet des lampes à faible puissance lumineuse, rappelle que la Société d'Encouragement a organisé un concours pour des lampes de deux bougies et 100 volts. Quatre fabricants ont livré de très bonnes lampes ayant en moyenne une consommation inférieure à 4 watts par bougie et une durée de 300 heures.

M. Weissmann répond qu'il considère ces lampes comme une œuvre d'art et qu'il n'a jamais pu personnellement en obtenir de semblables.

M. de Fodor demande l'appréciation des spécialistes sur les **Lampes Nernst**. La consommation spécifique, indiquée comme très faible, est peu connue. Le mécanisme d'allumage automatique, qui a dû être abandonné dans les premières lampes à incandescence à filament de platine, donnera certainement lieu à des désagréments. Avec les gros filaments des lampes Nernst à très forte intensité lumineuse (pouvant remplacer l'arc), la question de l'attache n'est pas résolue.

M. Weissmann ayant utilisé des lampes à très gros filaments de charbon croit que la difficulté ne réside pas uniquement dans le mode d'attache, mais dit qu'il est difficile d'obtenir un filament

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

(comme celui de la lampe Nernst) de composition d'une homogénéité absolument parfaite et rappelle que, pour ces lampes, il n'existe aucune opération permettant de combler les points faibles.

M. Blondin décrit les **Résistances métallo-céramiques Parvillée pour appareils de chauffage électrique.** Ces résistances, comme leur nom l'indique, sont constituées par une poudre métallique noyée dans une pâte céramique.

Une application très importante de ces appareils de chauffage se trouve à l'Exposition, au restaurant La Feria, où toute la cuisine est faite à l'électricité; dans cette installation on utilise jusqu'à 400 ampères sous 110 volts. Les congressistes ont pu voir ces appareils au Stand de MM. Parvillée, au premier étage du Palais de l'Électricité.

Avant la clôture des travaux de la Sous-Section B, M. Meyer demande que celle-ci émette le vœu que le **Projet de loi de E. Guillain sur les distributions d'énergie électrique** soit adopté par le Gouvernement français. Cette proposition est adoptée à l'unanimité.

SÉANCE DE L'APRÈS-MIDI.

La séance a eu lieu à 4^h30^m dans la salle de Cours de l'École supérieure d'Électricité.

Mme Ayrton donne des explications complémentaires sur ses **Essais sur les arcs** et fait diverses expériences qui mettent en évidence le rôle absorbant et réfringent de la vapeur de carbone produite dans l'arc, ainsi que la production et l'absorption dans l'arc de radiations vertes et jaunes.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SOUS-SECTION C.

TRACTION PAR CONTACTS SUPERFICIELS.

Séance du jeudi 23 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. TURRETTINI.

La séance est ouverte à $9^h 30^m$.

M. DOLTER présente un modèle de **Pavé de contact magnétique** de son invention. Après avoir fait la description de son système de traction, il indique les divers avantages qu'il croit y trouver.

Parmi ceux-ci il signale particulièrement :

1° Meilleure utilisation du flux magnétique;
2° Interchangeabilité facile des pièces sujettes à l'usure;
3° Grande rupture des arcs;
4° Prix modique de l'installation et réparation des canalisations sans avoir besoin de toucher à la chaussée.

M. VEDOVELLI demande quelle pression ont les charbons et s'ils ne rougiront pas. Il demande en outre si un court-circuit ne détériore pas la boîte.

M. DOLTER dit que les charbons ont toujours bien fonctionné et que, par un court-circuit, il n'y a que le tube contenant le fusible qui soit abîmé. Celui-ci est facilement remplaçable.

M. BOUTON demande le dispositif employé pour empêcher l'eau d'entrer.

M. DOLTER présente sa fermeture hermétique à double cloche avec vaseline.

M. VEDOVELLI demande ce qui se passe quand un pavé est mal isolé et si la distance de rupture de l'arc est suffisamment grande

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

quand il reste une dérivation de 50 ampères sous 500 volts par exemple, provenant de boues sales et métalliques.

M. Dolter répond que les premières voitures sortant du dépôt portent des balais à l'avant, nettoyant la voie en cas de boue ou de neige et qu'alors une si forte dérivation n'est pas à craindre.

M. Bouton est également de l'avis qu'il ne peut y avoir un si fort courant de dérivation.

M. Vedovelli expose son **Système de traction électromagnétique à sens de marche déterminée.** Il montre que l'isolement des plots n'est pas nécessaire. Il appelle l'attention sur ce qui se passe dans les systèmes à commutateurs circulaires lorsque, un raté se produisant, la voiture continue son mouvement. Dans son système, le commutateur revient à sa première position.

Sur la demande de M. Bouton, M. Vedovelli expose les moyens de réversibilité de son système.

M. Diatto montre que, dans son système, il n'y a pas à craindre d'étincelles à l'intérieur de la boîte. Il estime que la petite batterie de 6 à 8 accumulateurs que porte sa voiture est un avantage plutôt qu'un inconvénient, en ce sens qu'elle évite beaucoup de ratés et qu'elle permet de remettre en route instantanément après un raté.

La séance est levée à 11^h30^m.

Séance du vendredi 24 août 1900.

Présidence de M. TURRETTINI.

La séance est ouverte à 9^h30^m.

M. Pollak, en présentant des observations sur les **Prises de courant pour tramways,** dit que l'on devrait s'inquiéter des moyens de faire continuer sa route à une voiture par déraillement momentané quand la voie est encombrée. Il lui semble que les systèmes de sécurité actuellement en usage ne sont pas suffisants et qu'il faudrait s'inquiéter de moyens plus sûrs. Il faut en outre que,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

lorsque le système de sécurité a fonctionné, il soit facilement remplaçable.

Il y a intérêt à ce que le contact ait lieu en même temps entre le frotteur et plusieurs plots.

M. VEDOVELLI présente un modèle de sa **Boîte de distribution**. Il montre que le contact des charbons de l'interrupteur est excellent : et que pendant un certain temps, le frotteur de la voiture est alimenté par deux plots consécutifs.

M. Vedovelli présente des généralités sur les systèmes à contacts superficiels.

Il conseille, d'après ses expériences personnelles, confirmées par celles de M. Vuilleumier et de M. Diatto, de se servir pour les fils de dérivation de câbles sous caoutchouc et non sous plomb. Au besoin, on peut les mettre dans une enveloppe de grès ou même dans un tube de fer.

Il signale la difficulté du nivellement des plots. Les parties usées doivent être facilement remplaçables. L'acier coulé lui a donné de bons résultats. Les frotteurs seront particulièrement bien isolés de la masse. Il croit que pour les systèmes électromagnétiques, il est préférable qu'un court-circuit fasse sauter un disjoncteur dans une boîte de section.

M. DIATTO pense que pour les systèmes magnétiques il est plus commode que le disjoncteur soit dans chaque pavé.

M. BOUTON pense qu'un disjoncteur de section a de sérieux inconvénients pour un trafic intense, comme dans Paris, par exemple. Il trouve qu'il est préférable de marcher avec un plot mort qu'on peut changer pendant la nuit.

M. VEDOVELLI croit que si l'on marche avec un plot mort, les suivants se détérioreront successivement.

M. VEDOVELLI parle ensuite de l'entretien de la propreté des voies, du nivellement des plots, de la vérification des appareils de fonctionnement et de l'isolement des frotteurs. Il attire l'attention sur la difficulté des dispositions dans les courbes à cause du danger de court-circuit par les frotteurs.

Dans les systèmes magnétiques, on rapproche les pavés en

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

courbe. Dans les systèmes électromagnétiques, on est conduit à rendre les pavés plus larges dans les courbes. Dans les voitures à boggies, on peut mettre un frotteur sous chaque boggie, ces frotteurs étant reliés électriquement.

A propos de la vitesse de marche dans les systèmes de traction par contact superficiel, il expose ses motifs de croire que l'on ne pourra jamais dépasser 40 à 50 km, à cause de l'inertie des pièces mécaniques.

M. Dolter croit qu'avec son système on pourra aller jusqu'à 200 km par heure.

M. Diatto présente un **Système de pavé à double boîte** pour la traction de voitures lourdes et en rampe. Il se range à l'avis de M. Vedovelli sur l'impossibilité de réaliser de grandes vitesses.

M. Dieudonné dit que ses calculs l'ont conduit à partager l'avis de MM. Vedovelli et Diatto sur les vitesses que l'on peut atteindre.

M. Bède développe le système qu'il a exposé dans la section II, sous-section A, à la séance du 20 août (*voir* aux *Annexes* de la 2e section, sous-section C).

M. Bouton demande quelques explications sur les ruptures de courant, les aiguillages et le nettoyage du caniveau.

M. Vedovelli présente des considérations générales **Sur l'utilisation de l'électricité pour les grandes vitesses.** — Après avoir rappelé qu'avec le système de pavés de contact on ne peut pas atteindre de grandes vitesses, M. Vedovelli préconise le système de distribution par frotteur sur une file de rails. Cette file sera constituée par des tronçons pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres et recevrait le courant par un système électromagnétique. Ce dispositif formerait un véritable block-système.

Ce système permettrait d'utiliser du courant continu à haute tension, 2000 volts par exemple, avec grande sécurité, car le courant ne serait sur le rail qu'au passage du train.

M. le Président dit avoir vu en Amérique un système semblable.

M. Pollak parle de la difficulté de construire des contrôleurs et des moteurs continus de haute tension.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Sylvanus Thompson dit que, pour les grandes vitesses, il lui semble qu'il ne doit pas y avoir d'engrenages et que l'on ne pourra produire industriellement de collecteur pour moteur à grande vitesse et à haute tension. Il pense que le courant alternatif convient mieux dans ce cas.

M. le Président clôt les travaux de la sous-section.

La séance est levée à $11^h 30^m$

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

TROISIÈME SECTION.

ÉLECTROCHIMIE.

Séance du lundi 20 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. CAILLETET

La séance est ouverte à 9^h 30^m.

M. le président Moissan empêché est suppléé par M. Cailletet, membre de l'Institut.

VICE-PRÉSIDENTS : MM. Pagliani, Ch.-V. Zenger.
SECRÉTAIRE : M. Landrin.

Après la constitution du bureau et le règlement de l'ordre du jour de la séance du 21 août, la séance est levée à 10^h.

Séance du mardi 21 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. ZENGER.

M. BLONDIN fait la critique des **Désignations unitaires, proposées au Congrès de Chimie appliquée**, par M. le Dr Le Blanc, et qui modifient, inutilement à son avis, les désignations déjà admises. Une Commission avait été nommée pour présenter un Rapport sur ce sujet au Congrès de Physique.

M. HOLLARD, membre de cette Commission, propose une série de notations qui s'accordent avec les notations adoptées par les précédents Congrès.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. KELLER fait une Communication sur **Les fours électriques**, qui a été distribuée aux membres du Congrès (*voir* p. 305).

UN MEMBRE DU CONGRÈS. — M. Keller aurait-il l'obligeance de rappeler les expériences de Moissan dont il a parlé?

M. KELLER. — M. Moissan, opérant la réduction de l'acide titanique par le charbon, employa d'abord un courant de 50 ampères sous 50 volts et obtint le protoxyde bleu de titane; quelle que fût la durée de l'opération, avec un courant de 350 ampères sous 50 volts, il obtint l'azoture de titane, et enfin, en portant le régime électrique à 1000 ampères sous 70 volts, l'azoture de titane fut dissous et il y eut formation de titane liquide plus ou moins carburé.

M. PITAVEL. — M. Keller voudrait-il donner son avis sur la consommation d'électrodes dans la fabrication du carbure de calcium?

M. KELLER. — La consommation d'électrodes dans la fabrication du carbure de calcium est dans beaucoup d'usines le principal facteur du prix de revient.

Quoi qu'on en dise, la dépense d'électrodes atteint en moyenne 50 à 60 fr par tonne de carbure fabriqué. Les fours les plus perfectionnés permettent d'arriver à une dépense de 25 à 30 fr par tonne. Ces évaluations sont faites en comptant les électrodes à 60 fr les 100 kg rendus franco à l'usine. Les principaux progrès à réaliser dans la fabrication du carbure de calcium résident principalement dans cette partie, et il est certain que les inventeurs n'ont pas dit leur dernier mot à ce sujet.

UN MEMBRE DU CONGRÈS. — Les chiffres relatifs aux puissances utilisées dans la fabrication électrochimique sont-ils le résultat d'une statistique officielle?

M. KELLER. — Ils sont extraits d'un Rapport de l'éminent professeur-docteur Borchers.

UN MEMBRE DU CONGRÈS. — M. Keller voudrait-il donner son avis sur les moyens les plus pratiques de réunir les alternateurs aux fours électriques?

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. KELLER. — La question des canalisations reliant les alternateurs aux fours électriques mérite beaucoup d'attention. Les premières usines installées utilisant des machines existantes, ou ignorant les phénomènes d'induction dus aux courants de haute intensité employés dans les fours électriques, eurent de sérieuses déconvenues, le facteur d'utilisation, ligne et fours compris, n'ayant quelquefois pas, dans ces usines, dépassé 0,50.

Il convient d'installer les fours électriques dans une salle voisine de la salle des alternateurs et parallèlement à ceux-ci, les alternateurs et les fours n'étant respectivement séparés des deux faces opposées du mur que par 0,75 cm à 1 m environ. Avec cette disposition, on réalise des canalisations dont le développement, pour des alternateurs, ne dépasse pas 15 à 18 m, et pour des transformateurs 12 à 15 m.

La théorie indique qu'il y aurait lieu d'employer pour ces canalisations à haute intensité des sections tubulaires; mais le supplément de prix de revient des tubes, les difficultés provoquées par les changements de direction et de raccords conduisent à l'emploi de barres plates de 200 mm × 4 mm, par exemple, qui permettent d'éviter suffisamment les effets d'impédance.

Ces barres doivent être placées de champ les unes près des autres à 1 cm d'intervalle. Il est ainsi constitué, pour les deux pôles, deux faisceaux d'un certain nombre de barres, maintenus parallèles par des supports en bois installés de place en place. Les deux faisceaux sont séparés par un intervalle de 40 à 50 mm. Il est de toute importance de diriger les deux faisceaux parallèlement et l'un près de l'autre sur le plus grand parcours possible et de ne les séparer que pour leur jonction avec les bornes des fours, de façon à réduire au minimum la surface de la boucle d'induction formée par la canalisation et le four électrique. La disposition que nous avons indiquée implique le voisinage immédiat des bornes de la source d'énergie; il ne faut pas croire qu'il y a lieu, dans un four à électrode verticale mobile et sole fixe, de grouper les bornes de la même façon, car sous prétexte d'augmenter le facteur de puissance de 5 pour 100 environ, on compliquerait énormément les connexions du four électrique; d'ailleurs, l'emploi d'une canalisation courte formée de barres minces avec voisinage de l'aller et du retour pendant la plus grande partie du parcours, permet

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

d'obtenir un facteur d'utilisation ayant pour valeur 0,9 environ, ce qui est très admissible, en pratique, puisque les 10 pour 100 représentant le décalage *ne constituent pas une perte* et obligent seulement à prévoir un matériel électrique pouvant fournir une puissance apparente de 10 pour 100 supérieure à la puissance effective.

Pour terminer, nous devons dire qu'il faut éviter avec soin d'employer dans les canalisations et connexions des fours des plaques de fer massives qui donnent lieu, comme on le sait, à des phénomènes d'hystérésis.

M. HOLLARD fait une Communication sur **Les principes de l'analyse électrolytique** (*voir* aux *Annexes*).

On a trop souvent insisté, en analyse électrolytique, sur la séparation des métaux, basée sur les différences de tension de polarisation de leurs sels. Ce principe n'est pas applicable en analyse, où la tension de polarisation dépend de la concentration du métal, et où la concentration diminue à chaque instant au fur et à mesure que le métal se dépose. On pourra cependant appliquer ce principe là où les différences de tension de polarisation seront assez grandes pour ne pas s'annuler par suite de la diminution de la concentration du bain ; de là, une première classification des métaux en groupes. Dans chacun de ces groupes, on tâchera de séparer les métaux en engageant un ou plusieurs d'entre eux dans des ions « complexes », et alors, ou bien leur dépôt électrolytique ne pourra se faire, ou, si l'ion complexe est partiellement dissocié, le dépôt se fera, mais avec une tension de polarisation qui pourra être assez grande par rapport à celle des autres métaux pour que la séparation en soit rendue possible. M. Hollard parle ensuite de l'influence de l'intensité et de la densité du courant en analyse et présente un nouveau système d'électrodes.

La méthode d'**Analyse du cuivre industriel** de M. Hollard est une application des principes qui précèdent (*voir* aux *Annexes* de la 3e Section).

La séance est levée à $10^h 45^m$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Séance du mercredi 22 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. LE GÉNÉRAL SEBERT.

La séance est ouverte à $9^h 30^m$.

La parole est donnée à M. ZENGER pour une Communication sur l'**Utilisation des eaux de mer à la production de l'énergie électrique**, au moyen d'une pile ainsi constituée : une électrode est formée d'un tube en charbon poreux rempli de brome, l'autre électrode d'un tube de fer percé de trous et rempli de morceaux de fer. L'ensemble baigne dans une dissolution de bromures et chlorures alcalins, résidus de la fabrication du sel marin. Ces sels sont suffisamment hygrométriques pour qu'il ne soit jamais nécessaire de remplacer l'eau. Le tube à brome est hermétiquement fermé et il ne se dégage pas de vapeurs.

Cette pile, dont l'invention remonte à 1883, a donné de très bons résultats pour la téléphonie, la télégraphie avec ou sans fils et la télégraphie optique. Le poids des petits éléments est environ un tiers de celui de la pile Bunsen ou des accumulateurs.

Cette pile est régénérable : un courant quelconque réduit le fer de ses chlorures et bromures et le brome dans le charbon creux.

M. ZENGER propose d'utiliser des batteries de cette pile pour la production de l'énergie électrique. Il pense que le brome pourrait atteindre de très bas prix ; le fer a peu de valeur, et les sels alcalins sont des résidus de fabrication. M. Zenger voudrait attirer l'attention du Congrès sur l'intérêt qu'auraient des expériences faites en grand.

M. le PRÉSIDENT rappelle que le principe de cette pile a été indiqué par le colonel Renard.

M. VIGNON fait remarquer que le brome vaut 2,5 fr. le kg, que la production dans le monde entier en est de 300 tonnes par an, et que, dans ces conditions, l'utilisation industrielle de la pile de M. Zenger lui semble difficile.

La séance est levée à $10^h 15^m$.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

QUATRIÈME SECTION.

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE.

Séance du lundi 20 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. WUNSCHENDORFF.

VICE-PRÉSIDENTS : MM. Roosen (Belgique) ; Gavey (Angleterre) ; Pinter (Hongrie), Strecker, délégué de l'Empire allemand.

SECRÉTAIRES : Sire de Vilar, Racapé, Lacaze.

M. ANDRÉ appelle l'attention du Congrès sur les **Réseaux téléphoniques à grande capacité**, dont l'importance augmente rapidement par suite de la baisse de taxe notable surtout en Suède et en Amérique (*voir* aux *Annexes* de la 4e Section).

Il est donc indispensable de perfectionner les procédés permettant d'établir les communications entre les abonnés en réduisant au minimum les dépenses du personnel et du matériel. M. André signale les efforts qui ont été faits dans ce sens tant pour les lignes des abonnés ordinaires que pour les lignes auxiliaires et interurbaines.

Dans ce système, toutes les sources d'énergie sont centralisées au poste central.

Au point de vue de l'exploitation, il fallait réduire au minimum le temps qui s'écoule entre l'appel de l'abonné demandant et la réponse de l'opératrice ; on y est arrivé en employant comme signal d'appel une petite lampe à incandescence placée immédiatement au-dessus du jack local correspondant.

En même temps que l'opératrice répète le numéro, elle enfonce sa fiche dans le jack de l'abonné demandé ; pour lui permettre de s'assurer qu'il répond à son appel, il suffit d'associer à la fiche d'appel un signal de supervision.

Quant au signal de fin de conversation, il est donné automati-

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

quement au moment où les deux abonnés accrochent leur téléphone par les deux signaux de supervision correspondant à chacun d'eux.

On évite ainsi les inconvénients de la fin de conversation transmise verbalement à la téléphoniste.

M. André signale ensuite les règles posées pour obtenir le rendement maximum avec les lignes auxiliaires et interurbaines et termine par la comparaison des moyennes de nombres d'appel par jour et par opératrice d'abonnés dans l'ancien et le nouveau système.

M. Frouin appelle l'attention des membres de la Section sur la confusion que doit produire dans l'esprit de la téléphoniste un tel nombre d'appels.

M. André répond que l'objection, très fondée en théorie, n'est cependant pas vérifiée dans la pratique.

M. West Bertin, à cette occasion, rappelle qu'il existe à New-York et à Stockholm un système permettant de distribuer automatiquement les appels par ordre.

M. le Dr Rudolf Blochmann, Ingénieur civil, Président de l'Union Électrotechnique à Kiel, fait une Communication sur la question de la **Dirigeabilité des appareils de la Télégraphie par les ondes électriques**. — L'auteur se demande ce qui se passe dans le milieu, c'est-à-dire dans l'atmosphère terrestre, pendant que les appareils de télégraphie par ondes électriques sont en action. Se basant sur le fait que cette télégraphie est troublée pendant la durée des orages, même lointains, l'auteur pense que le médium de la transmission est l'électricité atmosphérique.

La sphère terrestre est entourée de surfaces équipotentielles, qui ne sont pas troublées par un objet s'élevant dans l'atmosphère, pourvu qu'il n'ait pas de grandes dimensions de largeur, par exemple un fil métallique vertical de grande hauteur. Mais s'il se produit des fluctuations électriques le long du fil, l'équilibre des surfaces équipotentielles sera troublé, de même que la surface de l'eau est troublée quand une pierre tombe sur elle. De même que, dans ce dernier cas, il se produit des ondes qui s'étendent de

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

proche en proche et qui peuvent être reçues par le fil vertical relié aux appareils récepteurs.

Pour cette opinion, l'auteur apporte trois arguments : 1° les fils de renforcement horizontaux ne conviennent pas pour la transmission ; 2° il en est de même des fils tombant du haut en bas d'un édifice élevé ; 3° on a transmis des télégrammes à des distances telles que la propagation rectiligne semble impossible à cause de la courbure de la terre.

L'auteur, en terminant, pense que si la théorie précédente est vraie, la dirigeabilité des appareils employés maintenant pour la télégraphie nouvelle doit être regardée comme impossible.

M. le capitaine FERRIÉ demande que le Dr Blochmann explique pourquoi la transmission est meilleure entre deux stations séparées par l'eau qu'entre deux stations à l'intérieur des terres.

Le docteur répond que les surfaces équipotentielles sont beaucoup plus régulièrement distribuées au-dessus de la surface de l'eau qu'à l'intérieur des terres.

Séance du mardi 21 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. WUNSCHENDORFF.

La séance est ouverte à $9^h\,10^m$.

M. DE CHATELAIN lit une Communication de M. POPOFF **Sur les applications des récepteurs téléphoniques à la télégraphie sans fil.** — Lorsque l'on se sert pour la télégraphie sans fils des radiations électriques d'une faible puissance, on peut arriver avec des radioconducteurs de tout genre (métaux divers, grains de charbon dur, grains de charbon et métal, etc.) à obtenir la diminution de résistance pendant l'action des radiations successives ; ces variations de résistance sont de courte durée, elles peuvent être observées directement au téléphone. Deux blocs de charbon et de simples tiges métalliques, aiguilles, etc., permettent de reproduire ce phénomène intéressant.

En juillet 1899, M. Popoff a indiqué l'utilisation pratique de ce phénomène pour remplacer, dans la télégraphie sans fil, les

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

récepteurs avec relais (appareils Popoff-Ducretet) par des téléphones. Le récepteur comprend alors : *une pile mise en circuit avec un radioconducteur et un téléphone.* Pour les grandes distances, le radioconducteur employé est celui à grains d'acier possédant plusieurs états d'oxydation à leur surface. Cette nouvelle application des radioconducteurs Branly, du type Popoff, est intéressante par la simplicité du système. Les influences atmosphériques peuvent être atténuées et même supprimées par les moyens employés en télégraphie et en téléphonie.

Le poste transmetteur (et son oscillateur) est celui du matériel Ducretet avec bobine de Ruhmkorff du type transportable à étincelle puissante; elle donne toute satisfaction.

Les postes établis dans le golfe de Finlande entre des îles distantes de 47 km (Kotka et Hohland) ont prouvé, par le succès des transmissions réalisées en hiver (au commencement de 1900) que cette transmission sans fil pouvait être pratiquement adoptée entre ces îles jusqu'alors privées entre elles de tout moyen de communications télégraphiques (1).

Pendant une durée de 84 jours, 440 télégrammes officiels ont été échangés entre ces postes, à des heures déterminées; la plus longue dépêche a été de 108 mots : le service régulier était assuré par des télégraphistes du Génie militaire russe.

Les mâts employés pour recevoir les antennes « radiatrice et collectrice » ont 48 m de hauteur. Un de ces mâts est à 5 km de la côte au milieu d'un bois, une portion d'île est interposée entre les postes. D'autres détails de cette double installation ne peuvent être décrits.

Pour les essais rapides, les cerfs-volants sont d'un bon emploi.

---

(1) Cette installation de télégraphie sans fil avait été réalisée en vue du sauvetage du cuirassé russe *Général-Amiral d'Apraxine* échoué sur les côtes de l'île de Hohland, l'hiver dernier, par 20° au-dessous de zéro. Les transmissions établies, il fut permis de signaler, par le télégraphe sans fil, qu'un bloc de glace s'étant détaché près de Zovensary, un groupe de pêcheurs qui s'y trouvait était entraîné vers la pleine mer. Le télégramme d'alarme envoyé, signé de l'amiral Avelan, fut reçu *au vol* par le navire brise-glaces *Ermack*, et les 27 pêcheurs échoués sur le bloc de glace furent sauvés d'une mort certaine. Les débuts pratiques de la télégraphie sans fil en Russie furent donc au profit de l'humanité, et c'est avec une réelle émotion qu'ils furent annoncés par la presse russe en même temps que le succès du sauvetage du cuirassé, mis ainsi en communication, sans fil, avec des îles distantes de 47 km.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Sur la télégraphie sans fil, par M. WILLOT. — L'auteur rappelle l'origine et les antécédents de la télégraphie sans fil et que la découverte de M. Branly a fait entrer dans une phase nouvelle. Cependant, malgré l'impulsion donnée par la découverte des cohéreurs, l'auteur ne pense pas que la distance des deux stations puisse dépasser 60 km. La distance maximum est fonction de la hauteur des antennes des deux stations. Il est indispensable que les deux stations soient visibles. La rotondité de la terre est un obstacle insurmontable à cette télégraphie.

L'auteur présente au Congrès des idées personnelles au sujet d'un nouveau genre de télégraphie utilisant les différentes couches indiquées par les cartes géologiques et permettant de mettre en rapport deux stations par l'intermédiaire de ces couches. L'expérience seule pourra indiquer les transmetteurs et les récepteurs nécessaires pour ce nouveau genre de télégraphie sans fil.

Sur la télégraphie sans fil, par M. TISSOT. — L'auteur s'élève contre la théorie de M. Willot et se range du côté de la théorie des surfaces équipotentielles exposée lundi 20 août par M. Blochmann à la Section IV. M. Tissot rappelle les expériences faites entre deux navires de guerre français dans la Manche, à 39 milles marins de distance, avec des antennes de 26 m. Dans les appareils employés, la bobine de Ruhmkorff avait été remplacée par un petit transformateur spécialement construit à cet effet et gardé secret. Quant au radioconducteur, construit spécialement par M. Tissot, toute limaille oxydée était soigneusement écartée.

Sur la télégraphie sans fil, par M. GAVEY. — L'auteur annonce au Congrès qu'il a pu échanger une conversation téléphonique sans fil entre un îlot et la terre ferme sur la côte d'Islande, les deux stations étant séparées par 12 km. Il pense que ces communications de télégraphie sans fil électromagnétique peuvent rendre des services et être supérieures à la télégraphie sans fil par ondes hertziennes, quand la distance n'est pas supérieure à 12 km.

M. CHAYE-PACHA rappelle qu'en 1886 il a fait en rade de Brest des essais de téléphonie sans fil entre deux navires distants de 100 m et qu'il regrette de n'avoir pu donner suite à ses expériences.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Applications des microphones sous-marins à la sécurité des pêcheurs de Terre-Neuve, par M. CHAYE-PACHA. — Les pêcheurs de Terre-Neuve sont exposés au danger des transatlantiques et aussi à celui de voir s'égarer des bateaux à vapeur de pêche, les barques parties pour poser et retirer les lignes de fond. — L'appareil avertisseur se compose d'un microphone enfermé dans une boîte et plongé dans l'eau et relié à une pile et à un téléphone sur le bateau. On peut ainsi entendre le bruit d'un paquebot à 4 ou 5 km. Le bateau menacé annonce alors sa présence par des signaux acoustiques ou optiques. En enveloppant presque totalement la boîte microphonique d'une matière éteignant les sons (par exemple une double enveloppe de plomb avec interposition de noir de fumée) et en munissant d'un cornet acoustique la partie laissée libre, on peut s'orienter sur la provenance des sons.

M. Chaye termine en demandant au Congrès de faire tous ses efforts pour attirer l'attention des chambres de commerce de tous les ports sur l'avantage qu'il y aurait à munir de microphones tous les Terre-Neuviens.

M. WEST demande si, dotant d'un microphone sous-marin un bateau à vapeur en marche, l'appareil pourra déceler le voisinage d'un autre vapeur. M. Chaye répond qu'il a seulement parlé des pêcheurs de Terre-Neuve, et qu'il n'a pas fait d'expériences pour pouvoir répondre.

Sur les canalisations téléphoniques souterraines, par M. ROOSEN. — L'auteur passe en revue les différents systèmes employés jusqu'ici : canalisations en bois, en fer, en agglomérés. Il passe ensuite à la description des canalisations du réseau téléphonique de Bruxelles, partie aérien, mi-partie souterrain. Après avoir décrit l'ensemble du réseau, M. Roosen s'étend sur le système de canalisations en tuyaux de poteries fabriquées par H.-B. Camp, donne des renseigements sur la mise en place des tuyaux, et sur les essais de rupture faits sur ceux-ci. M. Roosen communique aux membres du Congrès des planches et des photographies montrant les différents points annoncés dans sa Communication.

A la fin de cette Communication, une discussion s'engage entre MM. WUNSCHENDORFF, ROOSEN, GAVEY, WEST et DE LA TOUANE,

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

sur la question de l'étanchéité et de la longueur des tuyaux, et sur la comparaison du système Camp avec le système de tuyaux en blocs de ciment.

La séance est levée à $11^h 15^m$.

Séance du mercredi 22 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. WUNSCHENDORFF.

La séance est ouverte à $9^h 15^m$.

M. le capitaine FERRIÉ fait en son nom et en celui de M. A. BLONDEL une Communication, **Sur l'état actuel et les progrès de la télégraphie sans fil**.

Le seul système pratique de télégraphie sans fil est celui qui eut pour point de départ la théorie des ondes hertziennes et qui s'est développé grâce à l'expérience de M. Branly, aux travaux de M. Marconi et aux expériences récentes de M. le lieutenant Tissot; mais on ne saurait donner actuellement une théorie parfaite du phénomène (*voir* le Rapport, p. 321).

M. BLOCHMANN croit que l'électricité atmosphérique servirait d'intermédiaire de transmission; on a généralement admis que c'était l'éther. Au fond, en y réfléchissant, la théorie de M. Blochmann ne serait pas distincte de cette dernière. Au point de vue des communications, la transmission est la chose principale, la sensibilité du cohéreur n'étant pas absolument indispensable.

Pour la production des ondes, un transformateur permet de mettre en jeu une plus grande quantité d'énergie. Quant aux antennes, la grosseur ne paraît pas intervenir; au point de vue de leur longueur, c'est la somme des longueurs des deux antennes qui entre en jeu plutôt que leur longueur respective.

M. le capitaine FERRIÉ signale à propos de la tension critique de cohérence, l'importance qu'il y a à ce qu'elle ne soit pas atteinte par la force électromotrice de la pile.

Après avoir rappelé les travaux relatifs à la décohérence spontanée et à la syntonie, il termine en souhaitant de voir se perfectionner les appareils cessant d'exiger l'intervention d'un frappeur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

M. Tissot fait remarquer que les appareils qu'il emploie ne sont pas ceux de M. Marconi et note en particulier l'usage qu'il fait du relais Claude à grande résistance. De plus, il opère avec 2 volts et non pas avec une faible force électromotrice. Il conclut en constatant qu'on ne peut encore établir, en raison de la variété des procédés qui donnent de bons résultats, de théorie bien déterminée.

M. Piérard arrête l'attention du Congrès sur la disposition à observer dans l'emploi des *jiggers*. M. le capitaine Ferrié ne croit pas que cela ait une notable importance.

M. Ducretet remarque qu'en utilisant des résonateurs Oudin, il a pu se passer de l'emploi de la terre.

.* **Télégraphe rapide écrivant** système Pollak et Virag, par M. Pinter. — Le principe consiste à faire vibrer, sous l'action d'impulsions de courant transmises au moyen d'une bande perforée, les membranes de deux téléphones récepteurs, munis d'un miroir concave commun. L'une des membranes communique au miroir un mouvement vertical et l'autre un mouvement horizontal. Les lettres ayant été décomposées en composantes verticales et horizontales, on peut, à l'aide de bandes de papier convenablement perforées, envoyer dans les téléphones des impulsions de courant correspondant aux composantes verticales et horizontales qui reconstituent les lettres de l'alphabet.

Les vibrations plus ou moins grandes des membranes sont réalisées par des perforations plus ou moins grandes, et grâce aussi à ce que ces perforations se présentent sur plusieurs rangées dont chacune lance dans la ligne un courant de sens et de tension différents. Le déplacement vertical nécessite trois rangées et le déplacement horizontal deux rangées seulement de perforations.

A chaque lettre correspond un groupe de perforations obtenues par une seule pression d'un perforateur convenable.

L'image, donnée par le miroir, impressionne une bande de papier sensible qui se développe automatiquement dans une caisse *ad hoc*.

A l'aide d'un verre rouge, un employé regarde quand la communication cesse, il coupe la bande et arrête le tout.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'exposé de la Communication est accompagné de dessins des appareils ainsi que de plusieurs échantillons de dépêches obtenues avec ces appareils.

En Amérique et en Hongrie on est arrivé à transmettre 60 000 mots à l'heure. Des essais vont être entrepris au mois de septembre entre Paris et Lyon.

Sur les transformateurs unipolaires, par M. O. ROCHEFORT. — L'auteur donne les détails de construction des bobines d'induction fabriquées par lui, employées par M. le lieutenant de vaisseau Tissot pour la télégraphie sans fil et adoptées exclusivement par la marine française.

Il explique que le primaire n'est pas essentiellement différent du primaire de la bobine classique Ruhmkorff. Le secondaire, pour les appareils destinés à la télégraphie sans fil, est formé d'une seule galette occupant la moitié centrale du primaire.

Cette bobine est formée de deux fils partant du centre et enroulés parallèlement à eux-mêmes par couches successives, pour venir aboutir à la périphérie de la bobine secondaire. Ces deux fils sont réunis à leur point de départ à la borne secondaire qui sera la borne à basse tension et à leur point d'arrivée à la borne secondaire qui sera la borne à haute tension.

Cette disposition du secondaire équivaut à deux bobines secondaires accouplées en quantité et non pas, comme on le croirait, à une bobine secondaire de fil unique de section double.

La partie centrale du primaire est celle qui a le plus d'effet pour l'application du chargement des capacités. La grande intensité secondaire étant favorable, on obtient ainsi des quantités doubles de celles qu'on aurait s'il n'y avait qu'un fil unique.

L'emploi de cette bobine unique n'est possible, pour la haute tension (elle donne 40 cm d'étincelles pour la télégraphie sans fil), qu'avec l'isolant pâteux spécial que M. O. Rochefort a également fait breveter.

La bobine d'induction ainsi comprise est verticale; elle a une tension presque nulle à l'une des bornes, la haute tension étant toute rapportée à l'autre borne. En mettant la borne à basse tension à la terre, on obtient la même longueur d'étincelle qu'auparavant et l'intensité même en semble augmentée.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'aspect de l'étincelle de cette bobine unipolaire est assez spécial et rappelle l'étincelle de la bobine oscillante. Il se produit, comme le fait remarquer M. Armagnat dans un intéressant article sur les bobines d'induction, un phénomène d'autocondensation.

Quoi qu'il en soit, le transformateur unipolaire est maintenant spécialement construit pour la télégraphie sans fil et a donné les meilleurs résultats qu'on ait jamais obtenus pour cette application.

M. le Dr Blochmann prend la parole pour annoncer qu'ayant demandé à M. Branly la permission de faire émettre au Congrès le vœu que le tube à limaille fût appelé *tube Branly,* celui-ci lui avait demandé, par une lettre que M. Blochmann lit à l'Assemblée, de ne pas donner suite à ses intentions.

Le commandant Boulanger propose que le Congrès rende un hommage public à M. Branly. M. le Président propose qu'un extrait du procès-verbal de la séance relatant la Communication du Dr Blochmann soit adressé à M. Branly. Ces propositions sont adoptées à l'unanimité.

La séance est levée à $11^h 30^m$.

Séance du jeudi 23 août 1900.

Présidence de M. WUNSCHENDORFF.

La séance est ouverte à $9^h 10^m$.

M. Kennely présente, au nom de M. le capitaine Squier et de M. E. Crehore, une Communication sur un **Transmetteur télégraphique à ondes sinusoïdales** pour actionner les récepteurs Wheatstone. L'auteur se sert, pour la distribution des courants, d'un alternateur permettant de supprimer les étincelles aux balais du transmetteur, en supprimant les courants au moment précis où ils passent par zéro.

On fait de plus progresser le papier avec un moteur synchrone avec l'alternateur.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

L'appareil tient peu de place et il n'est pas nécessaire pour le réglage que tous les appareils soient sur la table d'opération.

M. KENNELY rappelle que des expériences ont été faites en Angleterre, entre Londres et Édimbourg et que le système a été dernièrement établi en Amérique sur une ligne de la « Commercial cable Company » entre New-York et Canso, sur une longueur de 2000 km environ.

Les avantages sont en résumé les suivants : grande vitesse de transmission, réduction du nombre des relais, transmission simple, maintien de vitesse de transmission par les mauvais temps, constance de la vitesse des appareils, emploi d'une force électromotrice plus grande.

M. GAVEY demande pourquoi, des expériences ayant été faites en Angleterre, on n'a pas adopté ce système. Il rappelle que de grands perfectionnements ont été apportés à l'appareil Wheatstone, lui permettant de transmettre avec des courants de piles jusqu'à 400 mots par minute; d'autre part, les expériences de M. le capitaine Squier ont été faites un dimanche sur une ligne fonctionnant seule et non soumise par conséquent aux inductions pouvant provenir de courants circulant sur les autres lignes en travail.

Sur les cohéreurs décohérents et sur un Essai de théorie des cohéreurs en général, par M. le capitaine FERRIÉ. — L'auteur décrit de nombreuses expériences personnelles sur l'action des ondes hertziennes sur la conductibilité d'un contact imparfait entre deux corps conducteurs. L'auteur a essayé les contacts charbon-charbon, charbon-métal, métal-liquide conducteur. Le contact charbon-métal est plus sensible que le contact charbon-charbon. Cette sensibilité dépend de l'intensité du courant passant au repos dans le contact imparfait, de la nature du métal employé et de la distance du point de production des ondes. On observe les mêmes propriétés pour le contact imparfait de deux métaux, mais le réglage de ce contact est très long à obtenir. Il se produit une cohérence persistante si l'action des ondes est trop énergique.

La sensibilité du contact fil métallique-liquide conducteur est plus faible que celle du contact charbon-métal.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Les résultats sont comparables aux précédents si l'on plonge les corps dans le pétrole au lieu de l'air. Dans le vide, M. Ferrié n'a pas obtenu de résultats.

D'après ces expériences, l'auteur a édifié la théorie suivante. Il suppose que lorsque deux surfaces conductrices sont rapprochées de telle sorte qu'une mince couche de diélectrique soit comprise entre les points les plus voisins, si l'on porte les deux conducteurs à des potentiels différents, il se produit un condensateur dont le diélectrique *crevera* si la différence de potentiel devient trop élevée. Cette différence de potentiel n'est autre que la tension critique de cohérence de M. Blondel.

Si on rapproche encore les deux conducteurs, on peut admettre que le diélectrique est refoulé en dehors des points les plus voisins, produisant ainsi une petite gaine vide entre les deux conducteurs. Si l'on établit alors une différence de potentiel entre les deux conducteurs, il se produira une effluve conductrice dans le chenal vide. Si la différence de potentiel augmente, il arrivera un moment où une étincelle disruptive se produira comme dans le premier cas.

L'auteur explique que le premier cas se produit avec les cohéreurs ordinaires et le second avec les cohéreurs décohérents.

Enfin, l'auteur explique par la même théorie une expérience faite avec le contact d'un crayon de lampe à arc avec un cylindre d'argent qui, sans l'intermédiaire d'ondes hertziennes, produit une variation régulière et automatique de l'intensité du courant dans le circuit duquel ce contact est intercalé.

M. Semenov donne communication des expériences qu'il a faites **Sur les mouvements de la limaille dans les cohéreurs.** — Le tube à limaille est-il cohéreur ou radioconducteur?

Pour résoudre ce problème, M. Semenov a fait l'expérience suivante : Il a placé dans un circuit-conducteur une plaque de mica percée d'un trou rempli de limaille, maintenue d'une part, par une plaque métallique, d'autre part, par l'extrémité d'une vis de serrage appliquant la plaque de mica contre la plaque métallique.

Alors deux ordres de faits ont été constatés : ou la limaille ne laissait pas passer le courant avant le fonctionnement de la bobine

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

employée pour obtenir les ondes; ou la limaille étant fortement tassée, le courant passait avant le fonctionnement de la bobine.

1er cas : Ou le courant prenait naissance immédiatement après l'étincelle, et on doit en conclure que la limaille formait pont; ou le galvanomètre éprouvait simplement une légère déviation, et il est probable que la limaille en se tassant tombait hors du trou.

2° cas : Le courant passait préalablement à travers la limaille; alors, tantôt l'étincelle ne modifiait rien, la limaille étant alors évidemment trop serrée ; tantôt, après une légère impulsion vers zéro, le galvanomètre reprenait sa position primitive, ce qui devait correspondre à un changement d'orientation des grains; ou bien encore le galvanomètre revenait à zéro, les grains perdant l'équilibre pendant l'opération et tombant hors du trou.

De toute façon, il y avait toujours orientation avant le passage du courant, donc action magnétique produite par les ondes, laquelle action était cause de formation du pont qui n'était pas alors créé par suite du courant. Donc le tube est cohéreur et non radioconducteur.

M. le capitaine Ferrié demande comment expliquer les phénomènes de cohérence produits dans les diélectriques, par exemple, avec d'autres matières que la limaille de fer.

M. Semenov répond que les deux séries de phénomènes existent.

M. Tissot déclare que, bien qu'il emploie les tubes à limaille de fer pour d'autres raisons, il n'a jamais observé, ni au microscope, ni à l'aide de phénomènes de diffraction, la moindre orientation. Si M. Semenov a observé des phénomènes de cohérence magnétique, c'est que l'énergie des ondes employées dans ces expériences devait être bien plus considérable que celle des ondes utilisées en télégraphie sans fil, ce qui change les conditions des phénomènes.

Sur l'utilisation de la télégraphie sans fil pour éviter les collisions en mer, par M. Bodde. — Pour remplir son but, l'appareil doit avertir les vaisseaux : 1° de leur voisinage ; 2° de leur direction. Le premier point a déjà été obtenu. L'auteur passe en revue les

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

essais faits pour obtenir le second, essais qui n'ont pas été couronnés de succès.

Il décrit un système qu'il a imaginé dans le même but. Dans ce système, on place un miroir parabolique, non au poste récepteur, mais au poste transmetteur. Le transmetteur se met au foyer d'un miroir parabolique cylindrique. Le miroir parabolique tourne autour de son foyer et envoie des ondes hertziennes successivement dans tous les azimuts.

Lorsque ce faisceau d'ondes hertziennes frappe le mât récepteur d'un navire voisin, il se produira sur ce navire voisin un courant électrique, qui ouvrira au moyen d'un électro-aimant la soupape d'un sifflet à vapeur. A ce moment donc le pilote placé auprès du transmetteur sera averti du voisinage dangereux ; au moment même du bruit, il regardera la position du miroir parabolique et saura par cela la direction dans laquelle est envoyé en ce moment le faisceau d'ondes hertziennes, donc la direction dans laquelle se trouve le navire voisin.

Chaque navire possède un poste transmetteur et un poste récepteur, mais pour que le premier n'influence pas le second, l'auteur a imaginé un commutateur tournant synchroniquement avec le miroir du transmetteur, et permettant de distribuer le temps d'action entre le distributeur et le transmetteur.

M. Chaye-Pacha demande si des essais de ce système ont été faits.

M. Bodde répond que des essais ont été faits, mais qu'il n'a pu encore faire des essais à grande distance.

Sur une question de M. le Dr Blochmann, il ajoute qu'il a été vérifié que par le moyen d'un commutateur tournant, les postes transmetteur et récepteur d'un même navire n'avaient aucune influence l'un sur l'autre.

M. le Président annonce que la session va être close, puisque MM. Grabowski et Puluj, qui devaient faire des Communications, sont absents.

La séance est levée à 11h.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

CINQUIÈME SECTION.

ÉLECTROPHYSIOLOGIE.

Séance du lundi 20 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. BERGONIÉ.

La séance est ouverte à 10^{h}.

En l'absence de M. D'ARSONVAL, président, empêché par une maladie, M. Bergonié prend la présidence et expose qu'il a été prié par M. Mascart de remplacer M. d'Arsonval.

M. BERGONIÉ fait observer que le Congrès ayant été précédé par d'autres Congrès : Radiologie, Radiographie, Médecine, les Communications et Rapports intéressant la Section se trouvent de ce fait très réduits. Deux Communications sont à l'ordre du jour :

Une de M. MOUNT-BLEYER sur la stérilisation des tissus dans la tuberculose et les rayons colorés de lumière pour le traitement de la tuberculose.

M. Mount-Bleyer ne s'étant pas présenté, M. le Président donne la parole à M. STANOÏEVITCH, sur les **Analogies entre la constitution des lignes de force magnétiques et électromagnétiques dans les machines et les dispositions des cellules dans les plantes.**

Après un rappel des distributions des lignes de force et des surfaces équipotentielles, l'auteur fait part de toute une série de recherches entreprises par lui depuis environ quatre ans et présente un album de photographies prises directement sur différentes plantes. La coupe d'un tronc de sapin donne, par la disposition des couches concentriques, l'idée de l'épure de surfaces équipotentielles d'un spectre magnétique. La coupe d'un radis donne la même notion.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le chêne on observe des coupes concentriques correspondant à des surfaces équipotentielles et des lignes radiales à des lignes de force. Les deux ne s'observent pas simultanément dans les spectres magnétiques ou électriques.

Poursuivant les analogies, M. Stanoïevitch montre les effets perturbateurs dus à un ou plusieurs nœuds qui ont leurs parallèles dans des fantômes de Maxwell, résultant de la composition de un ou plusieurs pôles magnétiques.

Comme conclusion de ses recherches et observations, M. Stanoïevitch, sans vouloir se prononcer sur les causes, admet que les cellules organiques obéissent aux lois de Maxwell : elles agissent l'une et l'autre en raison du produit de leur masse et en raison inverse du carré de leur distance.

Le rapporteur, traitant la question au point de vue philosophique, se demande si l'on peut étendre l'analogie au règne animal, mais il reconnaît qu'il n'a pu généraliser avec le règne minéral.

A la suite de cet exposé, un échange d'observations a lieu entre les membres de la Section, dans lequel M. Bergonié, tout en étant entièrement d'accord avec M. Stanoïevitch, en ce qui concerne l'analogie, regrettait de ne pouvoir le suivre quant à la généralisation et l'énoncé d'une loi.

M. Bergonié croit que les dispositions rencontrées dans la nature répondent à des besoins : ainsi la structure fibreuse du bambou semble faite en vue de résister aux vents; la structure radiale du radis pare au contraire aux effets de pression du sol. La tête d'un fémur montre des surfaces parallèles et des lignes radiales résistant aux efforts de pression.

M. le Président met aux voix une proposition demandant que les principales figures de la Communication de M. Stanoïevitch soient reproduites dans les *Comptes rendus*. Ce vœu est adopté à l'unanimité.

Les deux autres Communications portées à l'ordre du jour n'ayant aucun rapport direct avec la science de l'électricité, — et étant du domaine de la médecine, la Section, par un vote, décide qu'il n'y a pas lieu d'en faire l'insertion au Bulletin.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Avant de lever la séance, le PRÉSIDENT, au nom des membres présents, adresse à M. d'Arsonval le télégramme suivant :

« La Section d'électrophysiologie du Congrès international des électriciens adresse à son Président, avec les regrets de ne pas le voir au milieu d'elle, ses vœux les plus sincères pour le rétablissement de sa santé. »

Séance du mardi 21 août 1900.

PRÉSIDENCE DE M. D'ARSONVAL.

La séance est ouverte à 9^h 30^m.

L'ordre du jour étant épuisé, la Section clôt ses travaux pour permettre à chacun de ses membres d'assister aux travaux des autres Sections.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

LISTE DES MEMBRES

DU

CONGRÈS D'ÉLECTRICITÉ.

DÉLÉGUÉS OFFICIELS DES GOUVERNEMENTS.

France.

Ministère du Commerce.

MM.

ARSONVAL (D'), Membre de l'Institut, 28, avenue de l'Observatoire, Paris.

BORDELONGUE, Directeur de l'exploitation électrique au Sous-Secrétariat de Postes et Télégraphes, 103, rue de Grenelle, Paris.

DARCQ (Édouard), Inspecteur général des Postes et Télégraphes, 99, rue de Grenelle, Paris.

MASCART (E.), Membre de l'Institut, Directeur du Bureau Central Météorologique de France, 176, rue de l'Université, Paris.

POSTEL-VINAY, Constructeur-électricien, 41, rue des Volontaires, Paris.

THÉVENIN, Directeur de l'École professionnelle supérieure de Télégraphie 103, rue de Grenelle, Paris.

VIOLLE, Membre de l'Institut, 89, boulevard Saint-Michel, Paris.

Ministère de la Guerre.

BARRIER, Ingénieur des services administratifs, Paris.

BOULANGER, Chef de bataillon du Génie, chef du dépôt central de Télégraphie militaire, Paris.

BRAIVE, lieutenant-colonel d'artillerie, secrétaire de la Commission d'examen des inventions intéressant l'armée, Paris.

LIOUVILLE, Ingénieur des Poudres et Salpêtres, attaché au Laboratoire des Poudres et Salpêtres, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

MEILLET, Chef d'escadron d'artillerie, adjoint à l'Inspection permanente des fabri cations de l'artillerie, Paris.

PISTOR, Colonel breveté à l'État-Major particulier de l'artillerie, sous-chef d cabinet du Ministre de la Guerre, Paris.

Ministère de la Marine.

AUBUSSON DE CAVARLAY, Ingénieur en chef de 2e classe, attaché à l'État-Majo général, Cherbourg.

LE MERCIER-MOUSSEAUX, Capitaine de vaisseau, chef du service central des Tor pilles et de l'Électricité.

MAUGAS, Ingénieur de 1re classe, Professeur à l'École d'application du Géni maritime, Paris.

POLLARD (Jules), Ingénieur en chef de 1re classe, attaché à l'Inspection du Géni maritime, 28, rue Bassano, Paris.

THOMAS, Lieutenant de vaisseau, officier d'ordonnance du Ministre de la Marine

THOMINE, Lieutenant de vaisseau.

TISSOT, Lieutenant de vaisseau, professeur à l'École Navale, Brest.

Ministère de l'Agriculture.

MAZEROLLE, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Paris.

GOUVERNEMENTS ÉTRANGERS.

Allemagne.

DORN (Dr Ernst), Professeur, Directeur de l'Institut de Physique à l'Université de Halle-sur-Saale.

GAISBERG, Inspecteur des Ponts et Chaussées.

KITTLER (Dr Erasmus), Professeur à la *Technische Hochschule* de Darmstadt.

KOHLRAUSCH (Dr Friedrich), Professeur, Président de l'Institut Physico-Technique de l'Empire, 25 *bis*, Marchstrasse, Charlottenburg.

STRECKER (Dr Karl), Ingénieur supérieur des Télégraphes à l'Office Impérial des Postes, 20, Keithstrasse, Berlin W.

Autriche.

Ministère des Chemins de fer.

JÜLLIG (Max), K.-K. Baurath, K.-K. Professor, Colloredogasse, 1, Vienne.

ROTHER (Karl), Ingénieur, sous-directeur près la direction des Chemins de fer de l'État d'Autriche, Innsbruck.

WEISSKOPF (Sigismund), Ingénieur à la Direction des Chemins de fer de l'État, à Prague.

Ministère de l'Intérieur.

TRNOVSKY (Johann), Ingénieur, Hoher Markt, 5, Vienne I.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Administration I.-R. des Postes et Télégraphes.

MM.

BARTH DE WEHRENALP (Charles), Conseiller impérial.
LIMINGER, Ingénieur.

Belgique.

Ministère des Chemins de fer, des Postes et Télégraphes.

GERARD (E.-A.-J.), Chef de cabinet, Ingénieur en chef au Ministère, Bruxelles.
L'HÖEST, Ingénieur en chef aux Chemins de fer de l'État belge, Bruxelles.
ROOSEN (Al.), Ingénieur des Télégraphes, Bruxelles.

Ministère de la Guerre.

BRIFFAUX (Alphonse), Capitaine Commandant, commandant la Compagnie des Télégraphistes de place et d'Artificiers du Génie belge, 53, rue Milis, Borgerhout, Anvers.
GELLENS (Charles), Lieutenant à la Compagnie des Télégraphistes de place et d'Artificiers du Génie belge, Ingénieur-électricien, 16, rue de l'Étoile, Anvers.

Ministère de l'Intérieur.

GERARD (Eric), Professeur à l'Université de Liége, Directeur de l'Institut électrotechnique Montefiore, 43, rue Saint-Gilles, Liége.

Ville de Bruxelles.

WYBAUW (Joseph), Ingénieur en chef, Directeur du Service d'Électricité de la ville de Bruxelles, 7, rue du Beau-Site, Bruxelles.

Bulgarie.

ÉTIENNE (Paul), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 8, rue de Solférino, Paris.

Canada.

MAVOR (James), Professeur d'Économie politique à l'Université de Toronto.

Corée.

FERRET, 44, rue Bourret, Paris.

Danemark.

ERNST (L.-J.-M.), Capitaine d'artillerie, Professeur de Physique à l'École supérieure de Guerre, Copenhague.
MEYER (N.), Directeur en chef des Télégraphes, chevalier du Danebrog, Copenhague.

Équateur.

CARLOS D'ORNELLAS (le baron).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Espagne.

MM.

ADDISON (Fernandez-José).

BROCKMANN J. ABARZUZA (Guillermo).

MAYORAL (Diégo), Ingénieur, Puerto Santa-Maria, près Cadix.

États-Unis d'Amérique.

DRAKE (Francis E.), Directeur de l'Électricité et de la Machinerie au Commissariat général des États-Unis à l'Exposition de 1900.

HERING (Carl), Editor *Electrical Digest,* Consulting Engineer, 929, Chestnut street, Philadelphie.

KENNELLY (Arthur E.), ancien président de l'*American Institute of Electrical Engineers*, Philadelphie.

MARTIN (T.-C.), Editor *Electrical World and Engineer,* 120, Liberty street, New-York.

MILLIS (John), Captain corps of Engineers United States Army, Willits Point, Borough of Queen, New-York.

SHORT (Prof. Sidney H.), Ingénieur-électricien, ancien Ingénieur en chef de The Walker C°, Cleveland (Ohio).

Grande-Bretagne.

AYRTON (Prof. W.-E.), Vice-Président de l'*Institution of Electrical Engineers,* 41, Kensington Park Gardens, London W.

CARR (Major G.-A.), délégué par le Ministère de la Guerre, corps du Génie.

GAVEY, délégué par le Post-Office.

PERRY (Prof. John), professeur d'Électrotechnique et de Mathématiques au *Royal College of Science*, London S. W.

PREECE (sir William H.), Ingénieur civil, Gothic Lodge, à Wimbledon (Surrey).

SIEMENS (Alexander), Ingénieur civil, 12, Queen Anne's Gate, Westminster, London W.

Guatémala.

GUÉRIN (René), 11, rue Edmond-Valentin, Paris.

Hongrie.

HOLLOS (Joseph), Ingénieur en chef des Postes et Télégraphes, Budapest.

KOLOSZVARY (André), Directeur des Postes et Télégraphes, Budapest.

SÖPKESZ (Alexandre), Inspecteur des Chemins de fer et de la Navigation, Budapest.

SZALAY (Pierre DE), Président de la Direction royale hongroise des Postes et Télégraphes, Budapest.

Ministère du Commerce.

STRAUB (Alexandre), Professeur au Musée royal Technologique de Budapest.

WEYDE (J.-F.), Professeur à l'École supérieure des Arts et Métiers de Kasehau.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Indes Britanniques.

MM.

Bose (J.-C.), Professeur au Presidency College, Calcutta.

Pitman (C.-E.), ancien Directeur général des Télégraphes aux Indes Britanniques.

Tfinch (Benjamin J.), Directeur général du département des Télégraphes indo-européens, India Office, Whithall, Londres.

Italie.

Ministère de l'Agriculture.

Columbo (Giuseppe), Ingénieur.

Ministère des Postes et Télégraphes.

Cardarelli (Fedele).

Japon.

Igarashi, Ingénieur au Ministère de la Communication, Directeur du service téléphonique à Tokio et Yokohama.

Oyuwa, Ingénieur au Ministère de la Communication, Tokio.

Tomita (Tadanori), Examinateur au Bureau des Brevets au Ministère de l'Agriculture et du Commerce, Tokio.

Libéria.

Guillerme (Léon), Ingénieur, 114, rue de Provence, Paris.

Luxembourg (Grand-Duché de).

Neuman (Félix), Directeur des Postes et Télégraphes, Luxembourg.

Mexique.

Calderon (Dr Juan B.), Professeur d'Obstétrique à l'École de Médecine de Puebla.

Chavez (Augustin), Ingénieur, Directeur général des Télégraphes fédéraux du Mexique.

Quevedo (Miguel A. de), Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Ramirez (Ignacio), Ingénieur adjoint aux groupes IX et XVI de la Commission mexicaine à l'Exposition de 1900.

Sellerier (Carlos), Ingénieur des Mines, Inspecteur des Mines de la République mexicaine, secretario de Fomento, Mexico.

Stampa (Manuel L.).

Norvège.

Björselt.

Rödland.

Torjussen.

Pays-Bas.

Collette (A. E. R.), Ingénieur en chef des Télégraphes, La Haye.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Russie.

MM.

CHATELAIN, Professeur à l'Institut électrotechnique Alexandre III et à l'É supérieure des Mines Catherine II, de Saint-Pétersbourg.

DES CARRIÈRES, Conseiller d'État.

DOLIVO-DOBROWOLSKY.

Ministère de l'Intérieur.

KRAKAU (A.),
OSSADTCHY (P.),
VOJNAROVSKY P. (DE). } Professeurs à l'Institut électrotechnique de l'Empe Alexandre III.

Ministère des Voies et Communications.

MILLER, Ingénieur.

Administration des Institutions de l'Impératrice Marie.

SCHWAN (DE), Conseiller de cour, sous-chef de service à la chancellerie parti lière de S. M. l'Empereur.

Serbie.

STANOÏEVITCH (G. M.), Professeur à la Faculté des Sciences de Belgrade, Di teur de l'Observatoire, Belgrade.

Suisse.

VANONI (Louis), Chef de la Section technique de la Direction générale des T graphes à Berne.

WEBER (Dr Fr.), Professeur à l'École polytechnique fédérale suisse, Zurich.

VILLE DE GENÈVE.

TURRETTINI (Théodore), Ingénieur, Directeur de la Société genevoise pour la struction d'instruments de physique, Délégué de la ville de Genève.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

DÉLÉGUÉS DES SOCIÉTÉS SAVANTES ET TECHNIQUES.

France.

Association amicale des Ingénieurs électriciens, 19, rue Blanche, Paris.

Association des Industriels du Nord de la France, 116, rue de l'Hôpital-Militaire, Lille.

Chambre de Commerce de Paris, 2, place de la Bourse, Paris, représentée par MM. :

MICHAUD, 1, rue de Béthune, Versailles.

SCIAMA (G.), Administrateur-directeur de la Maison Breguet, 19, rue Didot, Paris.

Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest, représentée par MM. :

CHAPSAL, Ingénieur des Services techniques de la Compagnie, 3, place des Batignolles, Paris.

CLÉRAULT, Ingénieur en chef du Matériel et de la Traction, 42, rue de Monceau, Paris.

DELAVEAU, Inspecteur du Matériel fixe, 118, rue des Aubépines, Colombes.

MAZEN, Ingénieur adjoint à l'Ingénieur des Travaux extérieurs de la Compagnie, 35, rue de Magenta, Asnières.

MOÏSE, 2, rue du Grandchamp, Nanterre.

TOULON, Ingénieur principal du matériel fixe, 75, rue Madame, Paris.

Société amicale des Ingénieurs sortis de l'École supérieure d'Électricité, Paris.

Société française de Physique, 44, rue de Rennes, Paris, représentée par MM. :

JANET (P.), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, Directeur du Laboratoire central et de l'Ecole supérieure d'Électricité, membre du Conseil de la Société de Physique, 8, rue du Four, Paris.

JOUBERT (J.), Inspecteur général de l'Instruction publique, ancien président de la Société de Physique, 67, rue Violet, Paris.

POINCARÉ (L.), Recteur de l'Université de Chambéry, Secrétaire général de la Société de Physique.

Société internationale des Électriciens, 12-14, rue de Staël, Paris.

Syndicat professionnel des Industries électriques, 19, rue Blanche, Paris.

Syndicat professionnel des usines d'électricité, 27, rue Tronchet, Paris, représentée par M. FONTAINE (Eugène), secrétaire général du Syndicat.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Autriche.

Elektrotechnischer Verein, 7, Nibelungengasse, Vienne, représenté par M. Fr. KRIZIK, Ingénieur, Conseiller impérial.

États-Unis d'Amérique.

American Institute of electrical Engineers, New-York, représenté par MM. :
ARNOLD (Bion-J.), Ingénieur-électricien conseil, 1541, Marquette Building, Chicago.
CROCKER (F.-B.), ancien président de la Société, New-York.
HAMMER (W.-J.), 153 W., 46th street, New-York.
HERING (Carl), Ingénieur-électricien conseil, Philadelphie.
KENNELLY (Arthur E.), Ingénieur-électricien, Philadelphie.
MAILLOUX (C.-O.), Ingénieur-électricien, 150, Nassau street, New-York.

Franklin Institute (*The*), Philadelphie, représenté par MM. :
HERING (Carl) et KENNELLY (A.-E.).

New-York Electrical Society, New-York, représentée par MM. :
CROCKER (F.-B.), secrétaire, et MAILLOUX (C.-O.), président.

Grande-Bretagne.

The Institution of Electrical Engineers, Londres, représentée par MM. :
AYRTON (W.-E.), Vice-Président de la Société, 41, Kensington Park Gardens, London W.
CAREY-FOSTER (G.), ancien Professeur de Physique à l'University College de Londres, Ladywalk, Rickmansworth.
COOPER (W.-R.), 28, Victoria street, Westminster-London S. W.
FERRANTI (S.-Z. DE), Ingénieur, Broomhurst Werneth, Oldham.
FITZGERALD (G.-F.), Trinity College, Dublin.
GAVEY John), Ingénieur en chef au *General Post Office*, Hampton Wick, près Londres.
HAMMOND (R.), Ingénieur-conseil, 64, Victoria street, Westminster-London S. W.
HEAVISIDE (A.-W.), 31, Culmington Road, Ealing.
HIRST (H.), 71, Victoria street, London E. C.
LAWSON (A.-J.), Moorgate Court, Moorgate Place, London E. C.
PERRY (John), Professeur au *Royal College of Science*, London S. W.
SELLON (R. P.), 4, Chandos street, Cavendish square, London W.
SIEMENS (A.), 12, Queen Anne's Gate, Westminster, London W.
SWINTON (Campbell-A.-A.), 66, Victoria street, London S. W.
WEBBER (C.-E.), ancien Président de la Société, 27, Chancery Lane, London W. C.

Hollande.

Koninglijk Instituut van Ingenieurs, La Haye, représenté par M. A.-E.-R. COLLETTE, Ingénieur en chef des Télégraphes.

Hongrie.

Société des Ingénieurs et Architectes Hongrois, Budapest, représentée par M. le Dr DE HOOR-TEMPIS.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Italie.

Associazione Elettrotecnica Italiana, Turin, représentée par M. A. GRASSI, président.

Società d'Incoraggiamento d'Arti e Mestieri, Milan, représentée par M. F. GRASSI.

Portugal.

Associaçao dos engenheiros civis portuguezes, Lisbonne.

Russie.

Société Impériale technique de Russie (Section électrotechnique).

Suisse.

Association suisse des Électriciens (Schweizerischer elektrotechnischer Verein), Zurich, représentée par M. TH. TURRETTINI.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

LISTE GÉNÉRALE DES MEMBRES.

MM.

ACHESON (Edward-Goodrich), Président de *The Carborundum Company*, Niagara Falls (N.-Y., États-Unis).

ADAMS Jr (Confort-A.), Assistant professor of electrical engineering, Harvard University, Director of the electrical engineering Laboratory, Cambridge (Massachusetts, États-Unis).

ADDENBROOKE (George-Leonard), Ingénieur-conseil, 53, Victoria street, London, S. W.

ADDISON (Fernandez-José), Délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Espagne.

ALARDIN fils (Justin), Ingénieur, Directeur des anciens ateliers de construction Van den Kerchove (Société anonyme) à Gand, membre de la Chambre syndicale des Électriciens de Bruxelles, 110, rue Neuve, Bruxelles.

ALERS (Charles), Ingénieur des Arts et Manufactures, 65, boulevard Arago, Paris.

ALIAMET (Maurice), Licencié ès sciences, Inspecteur chef du Laboratoire électrotechnique à la Compagnie des Chemins de fer du Nord, 23, rue Philippe-de-Girard, Paris.

ALIOTH (Rodolphe), Ingénieur, 10, Albananlage, Bâle (Suisse).

ALLAIRE (Edmond-Louis-Désiré), Inspecteur des Postes et Télégraphes, 33 *bis*, rue Dutot, Paris.

ALLARD (Félix), Licencié ès sciences physiques, Pharmacien, Docteur en Médecine, 46, rue de Châteaudun, Paris.

ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT, fabricants d'appareils et de machines électriques, 22, Schiffbauerdamm, Berlin.

ALLMÄNNA SVENSKA ELEKTRISKA AKTIEBOLAGET, Westerås (Suède).

AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, 26, Cortland street, New-York.

ANCONA (Ugo), Professeur à l'École polytechnique de Milan, 14, via Dante, Milan.

ANDRÉ (Henri), Ingénieur à la Société de Matériel téléphonique, 17, rue Chevert, Paris.

ANSIL (Miguel), Ingénieur-électricien, Sanguera (province de Navarre, Espagne).

AOYAGI (Dr Eiji), Professeur-assistant à l'Université de Kioto, Electric Engineering Departement, Kioto University (Japan).

ARCHAMBAULT DE VENÇAY (Adolphe), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur principal de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise, 29, rue de Noyon, Amiens.

ARMAGNAT, Chef du Bureau des Mesures électriques des Ateliers Carpentier, 20, rue Delambre, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

ARMENGAUD jeune (Jules), Ingénieur-conseil, 23, boulevard de Strasbourg, Paris.

ARNÒ (Riccardo), Professeur d'Électrotechnique à l'Institut technique supérieur de Turin, 24, rue Santo-Elmo, Turin (Italie).

ARNOLD (Bion-J.), Ingénieur-électricien conseil, délégué au Congrès par l'American Institute of electrical Engineers, 1541, Marquette Building, Chicago (Ill., Etats-Unis).

ARNOLD (E.), Professeur, Directeur de *l'Electrotechnisches Institut* de Karlsruhe (Bade, Allemagne).

ARNOUX (René), Ingénieur-constructeur, 16, rue de Berlin, Paris.

ARON (Hermann), Professeur, docteur, conseiller intime, Lützow-Strasse, Berlin.

ARSONVAL (D'), Membre de l'Institut, délégué au Congrès par le Ministre du Commerce, 28, avenue de l'Observatoire, Paris.

ARTOM (Alexandre), Ingénieur-assistant à l'École Galileo Ferraris, rue du Vingt-Septembre, Turin (Italie).

ASCOLI (Moïse), Professeur à la *Scuola degli Ingegnere* de Rome, vice-président de l'*Associazione elettrotecnica italiana,* Scuola degli Ingegnere, Rome.

ASSOCIATION AMICALE DES INGÉNIEURS ÉLECTRICIENS, 19, rue Blanche, Paris.

ASSOCIATION DES INDUSTRIELS DU NORD DE LA FRANCE, 116, rue de l'Hôpital-Militaire, Lille.

ASSOCIATION DES INGÉNIEURS CIVILS PORTUGAIS (Associaçao dos engenheiros civil portuguezes), Lisbonne.

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS (Schweizerischer elektrotechnischer Verein), Zurich.

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA, 9, via Bogino, Turin.

AUBERT (Edmond), Ingénieur des Arts et Manufactures, Chef du Service électrique de la Société des Mines et Usines de Commentry-Fourchambault-Decazeville (Aveyron).

AUBUSSON DE CAVARLAY, Ingénieur en chef de 2e classe, attaché à l'État-major général, Délégué au Congrès par le Ministère de la Marine, à Cherbourg.

AUGÉ (Daniel), Ingénieur-électricien, 12, rue des Arts, Levallois-Perret (Seine).

AYRTON (Prof. W.-E.), Vice-président de l'*Institution of electrical Engineers*, Délégué au Congrès par le Gouvernement de la Grande-Bretagne et par l'*Institution of electrical Engineers,* 41, Kensington Park Gardens, London W.

AYRTON (Mme Hertha), 41, Kensington Park Gardens, London W.

AZARIA (Pierre), Administrateur-délégué de la Cie générale d'Électricité, 5, rue Boudreau, Paris.

BADON-PASCAL (Georges), Ingénieur des Arts et Manufactures, Directeur de l'Exploitation de la Société nantaise d'Éclairage et de Force par l'Électricité, 8, rue du Calvaire, Nantes.

BAIGNIÈRES (Gustave), Ingénieur des Arts et Manufactures, Sous-Ingénieur des Services techniques aux Chemins de fer de l'Est, Membre du Comité de la Société des Ingénieurs civils, 163, rue du Faubourg-Saint-Martin, Paris.

BAINVILLE (Auguste-Henri), Licencié ès sciences physiques, Ingénieur-électricien, 6, avenue Rochegude, Nanterre (Seine).

BALL (W.-D.), Ingénieur-conseil, Nagle and Ball, New-York Life Building, Chicago III (Ill., États-Unis).

BANCELIN (Edme-Henri), ancien élève de l'École Polytechnique, Secrétaire du Syndicat professionnel des Industries électriques, Administrateur-délégué de la *Société française de l'Accumulateur Tudor*, 21, rue Le Verrier, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

BANNEUX (Joseph), Ingénieur en chef, Directeur d'administration des télégraphes belges, 238, rue Royale Sainte-Marie, Bruxelles.

BARDOT, 19, passage Duranton, Paris.

BARILLET (Léon), Ingénieur des Arts et Manufactures, 6, avenue de La Motte-Piquet, Paris.

BARON (Henri), Directeur honoraire de l'Administration des Postes et Télégraphes, 18, avenue de La Bourdonnais, Paris.

BARRIER, Ingénieur des Services administratifs, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre.

BARTH DE WEHRENALP (Charles), Conseiller, délégué au Congrès par le Gouvernement autrichien (Administration des Postes et Télégraphes), à Vienne (Autriche).

BARTON (Edward-C.), Membre de l'*Institution of electrical Engineers* de Londres, Ann street, Brisbane (Australie).

BARZANO (Carlo), Ingénieur, 1, Foro Bonaparte, Milan.

BASQUIN (Jules), Ingénieur-électricien aux Ateliers du Nord de la France, à Blanc-Misseron, par Crespin (Nord).

BATAULT (Dr Émile), 6, rue de l'Université, Genève (Suisse).

BEAU (Henri-Antoine), ancien Élève de l'École Polytechnique, ancien Ingénieur des Télégraphes, Entrepreneur général d'électricité, 226, rue Saint-Denis, Paris.

BEDE (Émile), ancien Professeur à l'Université de Liége, Président de la Chambre syndicale des Électriciens de Bruxelles, 11, square Gutenberg, Bruxelles.

BEGHIN (Auguste), Licencié ès Sciences mathématiques et physiques, Professeur à l'École nationale des Arts industriels de Roubaix, 50, rue du Tilleul, Roubaix (Nord).

BELUGOU (Victor), Inspecteur-ingénieur des Télégraphes, Membre du Comité supérieur d'Électricité, 103, rue de Grenelle, Paris.

BENOIST (Georges), Ingénieur à la Société d'Éclairage et Force par l'Électricité, 169, boulevard Malesherbes, Paris.

BENTKOWSKI, Ingénieur des Voies et Communications, Électricien, 5, Fontanka, Saint-Pétersbourg.

BENTLEY (S.-Littledale), Électricien, à Bray (Irlande), chez M. Blake-Knox.

BÉRARD, Lieutenant de vaisseau, commandant le torpilleur 126, à Bizerte (Tunisie).

BERG (Hart O.), 54, avenue Montaigne, Paris.

BERGE (René), 12, rue Pierre-Charron, Paris.

BERGONIÉ (Jean-Alban), Professeur à la Faculté de Médecine de Bordeaux, correspondant de l'Académie de Médecine, 6 *bis*, rue du Temple, Bordeaux.

BERNHEIM (Edmond), Ingénieur des Arts et Manufactures, Administrateur délégué de la *Société d'applications industrielles*, 46, rue de Provence, Paris.

BERTHON (L.-A.), Ingénieur, Administrateur de la *Société industrielle des Téléphones*, 51, rue de la Chaussée-d'Antin, Paris.

BESSON (Albert), Ingénieur, Varsonophiewsky Péréoulok, Maison Koudriarzew, Moscou (Russie).

BIARD (Eugène E.), ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur principal du Matériel de la Cie des Chemins de fer de l'Est, 14, rue Monsieur-le-Prince, Paris.

BICHAT (Ernest-Adolphe), Doyen de la Faculté des Sciences de Nancy, correspondant de l'Institut, 6, rue des Jardiniers, Nancy.

BIÉLINSKI (Stanislas DE), Ingénieur de la Société *Bayerische Elektricitätsgesellschaft Helios*, 3, Briennerstrasse, Munich (Bavière).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

BIJUR (Joseph), Ingénieur-électricien, bachelor of arts, assistant chief engineer, Siemens and Halske, Chicago (Ill., États-Unis).

BILES (P.), Ingénieur-électricien, Directeur de la Station centrale de Limoges, Limoges (Haute-Vienne).

BILIOTTI (Frank), Ingénieur-électricien, Membre de l'*Institution of electrical Engineers*, 12, Elliscombe Road, Charlton (Kent, Angleterre).

BILLY (Édouard DE), Ingénieur au corps des Mines, 73, rue de Courcelles, Paris.

BINET, Capitaine à la Section technique de l'artillerie, place Saint-Thomas-d'Aquin, Paris.

BIZET (Paul), Directeur des Stations centrales de la *Compagnie générale d'Électricité*, 5, rue Boudreau, Paris.

BJÖRSELT, Délégué au Congrès par le Gouvernement de la Norvège.

BLANC (Edmondo), Ingénieur de la maison Hensemberger (accumulateurs), à Monza (Italie).

BLOCHMANN (Dr Rudolf), Ingénieur civil, Lornsenstrasse, 24II, Kiel (Allemagne).

BLONDEL (André), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur d'électricité appliquée à l'École nationale des Ponts et Chaussées; 41, avenue de Labourdonnais, Paris.

BLONDIN (Joseph), Professeur au Collège Rollin, Directeur scientifique du journal *l'Éclairage électrique;* 171, rue du Faubourg-Poissonnière, Paris.

BLUMBACH (F.), Inspecteur en chef de la Chambre centrale des Poids et Mesures, Zabalkanski-Prospekt, 19, Saint-Pétersbourg.

BOCHET (Adrien-Claude-Antoine-Marie), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur en chef à la *Maison Sautter, Harlé et Cie*; 14, rue de Passy, Paris.

BODDE (Théodore), Ingénieur électricien, 47, quai de Grenelle, Paris.

BOINET (Henry), Ingénieur civil, 12, rue Lafayette, Paris.

BOISSEAU (Alfred), Ingénieur des Arts et Manufactures, ancien Élève diplômé de l'École supérieure d'Électricité; 165, rue de la Convention, Paris.

BOISSERAND (Philibert), Ingénieur-électricien; 26, rue Belzunce, Paris.

BOISSONNAS (Auguste), Directeur de la *Société franco-suisse pour l'Industrie électrique;* 6, rue de Hollande, Genève.

BOISTEL (Ernest), Ingénieur expert près les Cours et Tribunaux, 62, rue Madame, Paris.

BONAPARTE (Prince Roland), 10, avenue d'Iéna, Paris.

BONGHI (Mario), Ingénieur en chef de la *Societa generale per l'Illuminazione,* Sede in Napoli; 1, Parco Regina Margherita, Naples.

BONNEVIE (Prosper), Administrateur-gérant de la Société anonyme d'Électricité Bouckaert et Cie, château de l'Orangerie, 104, rue de la Station, à Uccle-lez-Bruxelles (Belgique).

BORDE (Edmond), 54, rue de Prony, Paris.

BORDELONGUE, Directeur de l'Exploitation électrique au Sous-Secrétariat des Postes et Télégraphes, délégué au Congrès par le Ministère du Commerce, 103, rue de Grenelle, Paris.

BOREL (Adolphe), Docteur ès Sciences, Ingénieur en chef de la *Süddeutsche Kabelwerke Aktiengesellschaft Neckarau bei Mannheim* (Allemagne), 11, chemin du Pré-Gaudry, Lyon.

BOREL (Charles), Directeur de la *Société française des Câbles électriques système Berthoud, Borel et Cie*, 11, chemin du Pré-Gaudry, Lyon.

BORNS (Dr H.), 19, Alexandra Road, Wimbledon (Surrey, Angleterre).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

BORREL (Georges-Arsène), Horloger-mécanicien-électricien, 47, rue des Petits Champs, Paris.

BOSCHAN (Arthur VON), Ingénieur, 3, Kantgasse, Vienne, I (Autriche).

BOSE (J.-C.), Professeur au Presidency College, Délégué au Congrès par le Gouvernement des Indes Britanniques, Calcutta.

BOUCHARD, Ingénieur des Télégraphes, 69, faubourg Madeleine, Orléans.

BOUCHEROT (Paul), Ingénieur-conseil, 44, rue Laugier, Paris.

BOUCHET (Maurice), Ingénieur des Arts et Manufactures, 22, rue Alphonse-de Neuville, Paris.

BOUILHET (André), Co-gérant de la Société Christofle et Cie, 56, rue de Bondy Paris.

BOUILHET (Henri), Ingénieur manufacturier, 56, rue de Bondy, Paris.

BOULANGER, Chef de bataillon du Génie, Chef du Dépôt central de Télégraphie militaire, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre.

BOULÉ (Auguste), Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite, 7, rue Washington, Paris.

BOULENGER (Alexandre), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur de la Faïencerie de Choisy-le-Roi Hte Boulenger et Cie, à Choisy-le-Roi (Seine).

BOURDIN (Charles-Louis), Électro-gravure, 13, avenue de la République, Paris.

BOURGUIGNON (Paul), Sous-chef de travaux à l'École supérieure d'Électricité, 43 *bis*, boulevard Saint-Marcel, Paris.

BOUSSER (F.), Constructeur, 7, avenue du Mail, Plainpalais-Genève (Suisse).

BOUTON (Georges), Ingénieur-chef des Services techniques de la Compagnie des Tramways de l'Est-Parisien, 12, rue Halévy, Paris.

BOVET (A. DE), Administrateur-délégué de la *Société de Touage et de Remorquage,* 3, avenue du Coq, Paris.

BRADLEY (Charles-S.), Ingénieur-électricien, 44, Broad street, New-York.

BRAIVE, Lieutenant-colonel d'artillerie, secrétaire de la Commission d'examen des inventions intéressant l'armée, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre.

BRAULIK (George), Ingénieur-électricien, Membre de *The Institution of Electrical Engineers,* 217-218, Upper Thames street, London E. C.

BRAUN (Dr Franz), Maison Hartmann et Braun, à Francfort-sur-Mein (Allemagne).

BREUIL (Pierre), Licencié ès sciences physiques, 81, Elisabethenstrasse, Bâle (Suisse).

BRIFFAUX (Alphonse), Capitaine-commandant, commandant la Compagnie de Télégraphistes de place et d'artificiers du Génie belge, Ingénieur-électricien, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre de Belgique, 53, rue Milis, Borgerhout-Anvers.

BRITO (Alfredo DE), Ingénieur-électricien et industriel, membre du Conseil supérieur du Commerce et de l'Industrie du Portugal, secrétaire de l'Association industrielle portugaise, secrétaire de la Commission portugaise à l'Exposition de Paris de 1900, 52-54, rua de Santo-Antonio dos Capuchos, Lisbonne.

BROCHET (André), Docteur ès sciences, chef des Travaux pratiques d'Électrochimie à l'École municipale de Physique et de Chimie industrielles, 70, rue Claude-Bernard, Paris.

BROCQ (François-Alexandre), Ingénieur des Arts et Manufactures, 18, boulevard de Vaugirard, Paris.

BROKMANN Y ABARZUZA (Guillermo), délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Espagne, 21, Paseo de Recoletos, Madrid.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

BROOKS (Morgan), Professeur d'Électrotechnique à l'Université de Nebraska, à Lincoln (Nebraska, États-Unis).

BRUNHES (Louis), Ingénieur en chef de la Société électrique du Nord, Professeur à l'Institut industriel du Nord de la France, 14, rue Voltaire, Roubaix (Nord).

BRUNNER (François), Ingénieur, Chef du Service électrique de la Société des Hauts Fourneaux et Aciéries de Differdange, à Differdange (Grand-Duché de Luxembourg).

BRUNSWICK (Ernest), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur principal chargé du Service technique de la Maison Breguet, 1, rue Alphonse-Daudet, Paris.

BRYLINSKI (Émile), Ingénieur, 5, avenue Teissonnière, Asnières (Seine).

BRZESKI (Henri DE), Ingénieur-électricien, 6, rue Zielna, Varsovie (Russie).

BUCKLEY (Michael-J.), Membre de *The Institution of Electrical Engineers*, Jown Hall, Drumcondra C°, Dublin.

BUQUET (Paul), Directeur de l'École Centrale des Arts et Manufactures, 1, rue Montgolfier, Paris.

BUTTICAZ (Constant), Ingénieur, Directeur des Services industriels de la ville de Genève, 2, quai de la Poste, Genève.

CADIOT (Emmanuel-Horace), Architecte-électricien, 12, rue Saint-Georges, Paris.

CAILLETET (Louis-Paul), Membre de l'Institut, 75, boulevard Saint-Michel, Paris.

CALDERON (D[r] Juan-B.), Professeur d'Obstétrique à l'École de Médecine de Puebla. délégué du gouvernement du Mexique, 4, rue Indépendance, Puebla (Mexique).

CAMPÉ (Léonide), Ingénieur-électricien, Novo-Isaakievskaïa, 18, elektrot. Institut, Saint-Pétersbourg.

CANCE (Albert), Ingénieur des Arts et Manufactures, 5, rue Saint-Vincent-de-Paul, Paris.

CANCE (Alexis), Ingénieur-électricien, 5, rue Saint-Vincent-de-Paul, Paris.

CARDARELLI (Fedele), délégué du gouvernement de l'Italie (Ministère des Postes et Télégraphes).

CAREY-FOSTER (George), ancien Professeur de Physique à l'University College de Londres, délégué au Congrès par *The Institution of Electrical Engineers*, Ladywalk, Rickmansworth (Angleterre).

CARPENTIER (Jules), Ingénieur-constructeur, 20, rue Delambre, Paris.

CARR (Major G.-A.), délégué au Congrès par le gouvernement de la Grande-Bretagne (Ministère de la Guerre, corps du Génie).

CASALIS (Henri-Gaston), Ingénieur des Arts et Manufactures, Directeur des Usines électriques de la Lonza, à Gampel (Valais, Suisse).

CASSIRER (D[r] Hugo), Fabricant, 5/6, Keplerstrasse, Charlottenburg-Berlin.

CASTANHEIRA DAS NEVES, Attaché à la Légation portugaise, 38, rue de Lubeck, Paris.

CASTIATI (Alessandro), Ingénieur civil et électricien, Corso Vinzaglio, 29, Turin.

CATTORI (Capitano Michelangelo), gérant des établissements de constructions métalliques *M. Cattori e C[ia]*, à Castellamare di Stabia (Italie).

CAUDERAY (Edmond), Industriel, 24, boulevard des Capucines, Paris.

CAZENAVE (Clément DE), Administrateur-délégué de la Société anonyme *The Antwerp Telephone and Electrical Works*, 12, rue de Verger, Anvers (Belgique).

CHAMBRE DE COMMERCE DE PARIS, 2, place de la Bourse, Paris.

CHANCEL (Félix), Ingénieur des Arts et Manufactures, Docteur ès sciences, 34, rue Saint-Jacques, Marseille

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

CHANIAL (G.), Ingénieur, 26, rue de la Paix, Saint-Étienne.

CHANTRAINE (Alphonse), Ingénieur-électricien, des Mines et des Arts et Manufactures, Compagnie d'Alais, à Bessèges (Gard).

CHAPERON (Charles-Émile), Ingénieur, Chef de division à la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée, 11, rue Roquépine, Paris.

CHAPSAL, Ingénieur des services techniques des Chemins de fer de l'Ouest, délégué de la Compagnie de l'Ouest au Congrès, 3, place des Batignolles, Paris.

CHARVÉRIAT (Joseph), Ingénieur civil des Mines, 16, quai Tilsitt, Lyon.

CHATELAIN, Professeur à l'Institut électrotechnique Alexandre III et à l'École supérieure des Mines de Saint-Pétersbourg, délégué au Congrès par le Gouvernement de Russie, Institut électrotechnique, Saint-Pétersbourg, Was. Ostr., 10, ligne n° 5.

CHAUFOUR (E.), Ingénieur-électricien, 4, avenue Friedland, Paris.

CHAUMAT (Henri), chef de Travaux à l'*École supérieure d'Électricité*, 26, rue Ernest-Renan, Paris.

CHAUMETIN, Chef de l'exploitation à la *Compagnie du gaz*, 9, rue Charras, Paris.

CHAUSSENOT (Henri), Ingénieur-électricien, Directeur de la *Compagnie électro-mécanique*, 11, rue Duperré, Paris.

CHAVANNES (Roger) Ingénieur des services industriels de la ville de Neuchâtel, Evole 22ª, Neuchâtel (Suisse).

CHAVANON (F.), Ingénieur à la *Compagnie des glaces de Saint-Gobain*, Saint-Gobain (Aisne).

CHAVEZ (Augustin), Ingénieur, Directeur général des Télégraphes fédéraux du Mexique, délégué au Congrès par le Gouvernement mexicain.

CHAYE (Théophile-Joseph-Eugène), Officier de marine en retraite, Pacha, général de brigade du Génie ottoman, tunnel Han, 9, rue Zumbal, Constantinople (Turquie).

CHEVRIER (Louis-Georges), Directeur de l'*Usine centrale du secteur électrique de la rive gauche de Paris*, 39, quai d'Issy, à Issy-lez-Moulineaux (Seine).

CHOQUET (Edmond), Ingénieur des Chemins de fer de l'État belge, 10, rue Van Orley, Bruxelles.

CHOQUETTE (abbé C.-P.), licencié ès sciences, Professeur de Physique à l'Université de Laval, collège de Saint-Hyacinthe (Canada).

CHOULGUIN (Eugène), Ingénieur-électricien, Hôtel de Ville, Moscou (Russie).

CHRIST (Émile), Ingénieur, 15, rue de Milan, Paris.

CHRISTOFLE (Paul), Fabricant d'orfèvrerie argentée et de galvanoplastie, 56, rue de Bondy, Paris.

CISZEWSKI (Joseph), Ingénieur technologue, Institut des Ingénieurs des voies et communications, 9, Zabalkanski-prospeckt, Saint-Pétersbourg.

CLAUDE (Georges), Ingénieur-électricien, chef du service de vérification des installations à la *Compagnie Thomson-Houston*, 1, rue de la Concorde, au Perreux (Seine).

CLÉMANÇON (Édouard), Président du Conseil d'administration de la *Compagnie générale des Travaux d'Éclairage et de Force*, 23, rue Lamartine, Paris.

CLERAULT, Ingénieur en chef du matériel et de la traction à la Cie des Chemins de fer de l'Ouest, délégué au Congrès par la Compagnie, 42, rue de Monceau, Paris.

CLERC (François), Ingénieur civil, 37, rue du Bac, Paris.

CLINTON (Wellesley-Carram), Électricien, 42, Claremont Road Highgate, Londres.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

CŒRPER (Carl), Directeur de l'*Helios Elektrizitäts-Aktiengesellschaft*, Cologne (Allemagne).

COLAS (Louis), Ingénieur, Administrateur de la *Société d'études électro-chimiques* de Genève, de la *Volta suisse* et de la *Volta lyonnaise,* 78, avenue de la Grande-Armée, Paris.

COLLANGETTES (Maurice), Professeur à la Faculté de Médecine, Beyrouth, (Syrie).

COLLETTE (A.-E.-R.), Ingénieur en chef des Télégraphes, délégué au Congrès par le Gouvernement des Pays-Bas.

COLUMBO (Giuseppe), Ingénieur, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Italie.

COMBONI (Joseph), Ingénieur-électricien, 5, rue Vintimille, Paris.

COMERMA Y BATALLA (Andrès-A.), Général du Génie maritime, au Ferrol, (Espagne).

COMITÉ CENTRAL DES HOUILLÈRES DE FRANCE, 55, rue de Châteaudun, Paris.

COMPAGNIE DES MINES DE VICOIGNE ET DE NŒUX, représentée par M. Bresson, Ingénieur en chef de cette Compagnie, Nœux-les-Mines (Pas-de-Calais).

COMPAGNIE DES TRAMWAYS DE L'EST PARISIEN, représentée par M. Paul Debray, Sous-Directeur, 12, rue Halévy, Paris.

COMPAGNIE ÉLECTRIQUE DU SECTEUR DE LA RIVE GAUCHE DE PARIS, représentée par son Directeur, M. Ch. de Tavernier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 124, boulevard Saint-Germain, Paris.

COMPAGNIE GÉNÉRALE DES OMNIBUS, 155, rue Saint-Honoré, Paris.

COMPTOIR NATIONAL D'ESCOMPTE, représenté par M. Mario Constant, Ingénieur civil des Mines, attaché au Service d'études financières, 14, rue Bergère, Paris.

COOPER (W.-R.), délégué au Congrès par *The Institution of electrical Engineers* de Londres, 28, Victoria street, Westminster, London, S. W.

CORDIER (Ferdinand), Capitaine d'artillerie, Manufacture d'armes de Saint-Étienne (Loire).

CORMACK (J.-D), Université de Glascow (Écosse).

CORNU (Marie-Alfred), Membre de l'Institut, 9, rue de Grenelle, Paris.

CORNUAULT, Administrateur-délégué de la *Compagnie du gaz de Marseille,* 10, rue Cambacérès, Paris.

CORSEPIUS (Dr Max), Directeur technique, professeur à la *Königliche Sächsiche Technische Hochschule* de Dresde, *Kgl. Sächs. Technische Hochschule,* Dresde (Saxe).

CORSOL (Adolphe-Pierre), Chef mécanicien à la *Sucrerie centrale de Meaux,* Villenoy (Seine-et-Marne).

CORTE (Enrico), Ingénieur, Fonderia del Piguone, Florence (Italie).

COSTER (Maurice), Sous-Directeur de la *Société Industrielle d'Électricite* (Procédés Westinghouse), 45, rue de l'Arcade, Paris.

COTTARD (Jean-Baptiste), Ingénieur-chef du Laboratoire d'électricité des Usines Schneider et Cie, au Creusot, 30, rue de la Chaise, le Creusot (Saône-et-Loire).

COTTIER (A.), Ingénieur-conseil, 15, rue Saint-François, Lausanne (Suisse).

COTTIER (F.-H.), Ingénieur, 15, place Saint-François, Lausanne.

COTTON (Aimé), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Toulouse, Toulouse.

COULIER (Sylvain), 13, rue Laurent-de-Koninck, Liége.

COUNE (Gustave), Ingénieur de la ville de Gand, 52, Haut-Port, Gand (Belgique).

COURQUIN (l'abbé), Professeur d'électrotechnique à l'*École industrielle,* 70, rue du Casino, Tourcoing (Nord).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

CRÉDIT LYONNAIS, service des Études financières, 19, boulevard des Italiens, Paris.

CROCKER (Francis-B.), Professeur d'électrotechnique à la *Columbia University* de New-York, ancien Président de *The American Institute of Electrical Engineers,* délégué au Congrès de l'*American Institute* et de la *New-York Electrical Society*. Columbia University, New-York (États-Unis).

CROMPTON (R.-E.), Membre de *The Institution of civil Engineers* et de *The Institution of Electrical Engineers,* à Chelmsford (comté Essex, Angleterre).

CROVA (André), Professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier, 14, rue du Carré-du-Roi, Montpellier.

CUÉNOD (Hermann), Ingénieur, 12, rue Diday, Genève (Suisse).

CURLETTI (J.-L.), Appartado 225, à Lima (Pérou).

DANIONI (Filippo), Ingénieur-électricien, Directeur *della Società di Illuminazione elettrica di Venezia,* Corte Morosina, 4422, Venise (Italie).

DARCQ (Édouard), Inspecteur général des Postes et Télégraphes, délégué au Congrès par le Ministère du Commerce, 99, rue de Grenelle, Paris.

DAVAINE (Henri), Ingénieur des Arts et Manufactures, 2, faubourg de Roubaix, Saint-Amand-les-Eaux (Nord).

DAVID (Charles-Narcisse), Ingénieur, chef de travaux au Laboratoire central d'Électricité, 155, avenue de Suffren, Paris.

DAYDÉ (Paul), Ingénieur à la *Compagnie générale d'Électricité de Creil* (établissements Daydé et Pillé), 29, rue de Châteaudun, Paris.

DE ANDREIS (Luigi), Ingénieur-électricien, Député au Parlement Italien, 19, via Volta, Milan.

DE ANGELI (Ernesto), Sénateur, Président de la *Società lombarda per la distribuzione della Energia elettrica,* Milan.

DE BAST (Omer-Pierre-Napoléon), Ingénieur, répétiteur à l'Institut électrotechnique Montefiore, Professeur à l'École industrielle de Liége, Président de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore, 16, rue César-Franck, Liége (Belgique).

DE BENEDETTI (Angelo), Ingénieur, 2, via Berchet, Milan.

DEBEAUVE (Marie-Joseph-Paul), Chef de bureau de mesures de la Maison Breguet, 142, boulevard Raspail, Paris.

DE CROËS (Joseph), Ingénieur civil électricien, 12, rue des Guillemins, Liége (Belgique).

DELAVEAU, Inspecteur du matériel fixe des Chemins de fer de l'Ouest, délégué au Congrès par la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest, 118, rue des Aubépines, Colombes (Seine).

DELHEZ (L.-J.), Ingénieur-électricien, 23, rue Goossens, Bruxelles.

DELLA RICCIA (Angelo), Docteur-Ingénieur. 2, piazza Castello, Milan (Italie).

DELPEUCH (Camille), Ingénieur aux Chemins de fer de l'Est, 74, rue de Dunkerque, Paris.

DELVAUX, Ingénieur des Mines, Ingénieur-électricien, 39, rue Duquesnoy, Bruxelles.

DEMANET (le chanoine S.), Professeur à l'Université de Louvain, Collège Saint-Esprit, Louvain (Belgique).

DES CARRIÈRES, Conseiller d'État, délégué au Congrès par le Gouvernement de Russie, Saint-Pétersbourg.

DESLANDRES (H.), astronome à l'Observatoire de Meudon, 56 *bis*, route des Gardes, Bellevue-Meudon.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

DESOMBRE (Paul-Édouard-Gaspard), Ingénieur des Arts et Manufactures, *Compagnie électro-mécanique,* 11, avenue Trudaine, Paris.

DESROZIERS (Edmond), Ingénieur-électricien, expert près les Tribunaux de la Seine, 10, avenue Frochot, Paris.

DIATTO (Alfred), Ingénieur-électricien, 12, piazza Gran Madre di Dio, Turin, (Italie).

DIETRICH et Cie (DE), maîtres de forges, représentés par M. Paul Nicodême, 20, rue Louis-le-Grand, Paris.

DIEUDONNÉ (Émile), Ingénieur civil des Mines, 95, rue Perronnet, Neuilly-sur-Seine (Seine).

DININ (Alfred), Ingénieur des Arts et Manufactures, fabricant d'accumulateurs électriques, 69, rue Pouchet, Paris.

DIRVELL (Georges), Ingénieur civil des Mines, Sous-Inspecteur à la Compagnie des Chemins de fer de l'Est, 5, rue Guespin, à Clamart (Seine).

DOBKÉVITCH (Gaëtan), Ingénieur-électricien, diplômé de l'Ecole supérieure d'Électricité, 14, rue Liancourt, Paris.

DOLIVO-DOBROWOLSKY, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Russie.

DOLMETSCH (F.), Directeur de la Compagnie Auer pour la région du Mans, 11, rue de la Préfecture, Le Mans (Sarthe).

DOLTER (Henri), Ingénieur-électricien, 12, rue Lafayette, Paris.

DOMALIP (Dr Ch.), Professeur d'Électrotechnique à l'École Polytechnique tchèque de Prague, 12, rue Jungman, Prague (Bohême).

DORN (Dr Ernst), Professeur à l'Université de Halle, délégué au Congrès par le Gouvernement d'Allemagne, Halle-a.-Saale (Allemagne).

DOUBT (Thomas-Eaton), Professeur de Physique et d'Électrotechnique à l'Université de Washington, à Seattle (Washington, États-Unis).

DRAKE (Francis-E.), Directeur de l'électricité et de la machinerie au Commissariat général des États-Unis de l'Exposition de 1900, délégué au Congrès par le Gouvernement des États-Unis.

DUCHESNE (Georges), Ingénieur civil, 8, quai Marcellis, Liége (Belgique).

DUCRETET (E.), Constructeur électricien, 75, rue Claude-Bernard, Paris.

DUDDELL (W.), Ingénieur-électricien, 47, Hans Place, London S. W.

DULAIT (Julien), Administrateur gérant de la *Société anonyme Électricité et Hydraulique,* 1, rue Prunéeau, Charleroi (Belgique).

DUPORTAL (Armand), Ingénieur civil des Mines, attaché à la Pharmacie centrale de France.

DUQUENOŸ (Gabriel-Joseph), Étudiant, 2, rue du Château, Saint-Omer (Pas-de-Calais).

DUQUENOŸ (Gustave-Louis), Membre fondateur de la *Société internationale des Électriciens*, propriétaire, 2, rue du Château, Saint-Omer.

DUQUENOŸ (Mme Marie-Victorine-Josèphe), 2, rue du Château, Saint-Omer.

DURAND (Albert), Ingénieur diplômé de l'*École supérieure d'Électricité,* chef de travaux au *Laboratoire central d'Électricité,* 9, rue du Val-de-Grâce, Paris.

DURAND (José-E.), Capitan de fragata, ingeniero inspector de Electricidad de la Marina, Ministerio de Marina, Buenos-Ayres (République Argentine).

DUSAUGEY (Ernest), Ingénieur Directeur du service électrique de la *Société des Forces motrices de Grenoble,* 4, place du Parc, Grenoble (Isère).

DUTAIT (Émile), avocat, Président du Comité d'administration de la *Société suisse d'Électricité,* 1, place Pépinet, Lausanne (Suisse).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

DUTAIT (Gaston), Étudiant, 1, place Pépinet, Lausanne (Suisse).

DUVAL (Charles-Léon), Ingénieur diplômé de l'*École supérieure d'Électricité*, Ingénieur à la *Société d'Éclairage électrique*, 16, boulevard d'Enghien, Argenteuil (Seine-et-Oise).

DZIESLEWSKA (Mme Hedwige), Lemberg (Galicie-Autriche).

DZIESLEWSKI (Roman), Professeur d'Électrotechnique à l'École Polytechnique de Lemberg (Galicie-Autriche).

EBEL (Georges), Directeur de la *Compagnie d'Éclairage électrique du secteur des Champs-Élysées*, 92, boulevard de Courcelles, Paris.

EDELBERG (Alexandre), Électricien, 27, Newsky, Saint-Pétersbourg.

EGOROFF (N.), Professeur émérite et Académicien à l'Académie impériale de Médecine, délégué au Congrès par la Société impériale technique de Russie (Section Électrotechnique), 19, Zabalkanski, Saint-Pétersbourg.

ELEKTROTECHNISCHER VEREIN, représenté par M. Franz Krizik, 7, Nibelungengasse Vienne I. (Autriche).

ERNST (L.-J.-M.), Capitaine d'artillerie, Professeur de Physique à l'École supérieure de Guerre, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre du Danemark.

ESCALANTE GONZALEZ (José), Docteur ès sciences, Professeur à l'Institut et Directeur de l'École des Arts et Métiers de Santander, 19, rue Mendez-Nunez, Santander (Espagne).

ESPANET, Ingénieur, 2, rue Berthollet, Paris.

ESSON (W.-B.), Ingénieur civil, 127, Adelaïde Road, Hampsted, London N. W.

ÉTIENNE (Paul), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Bulgarie, 8, rue de Solférino, Paris.

EVANS, Membre de *The Institution of Electrical Engineers*, 108, Castelnau Barnes, London S. W.

FADDA (Gioachino), Ingénieur, 2III, Schrandolf-Strasse, Munich (Bavière).

FARNY (J.-L.), Professeur adjoint à l'École polytechnique fédérale suisse, 15, rue Dassier, Genève (Suisse).

FATIO (Henry), Banquier, Administrateur de la *Société suisse d'Industrie électrique*, de la *Volta*, Société anonyme suisse de l'Industrie électrochimique, de la *Volta*, Société lyonnaise de l'Industrie électrochimique, de la Société piémontaise d'électricité, de la Société anonyme d'Études électrochimiques, de la Société italo-suisse de constructions mécaniques, 11, rue Diday, Genève (Suisse).

FELTEN et GUILLEAUME, Ingénieurs-constructeurs, Électriciens, Carlswerk-Aktien-Gesellschaft, à Mülheim-sur-Rhin (Allemagne).

FERNET (Émile), Inspecteur général de l'Instruction publique, 23, avenue de l'Observatoire, Paris.

FÉRON (Albert), Ingénieur-électricien, Administrateur-délégué de la Société anonyme de Transports urbains et vicinaux; 37, rue du Monastère, Bruxelles (Belgique).

FERRANTI (Sebastian Ziani DE), Ingénieur, délégué au Congrès par *The Institution of Electrical Engineers*, Broomhurst Werneth, à Oldham (Angleterre).

FERRARIS (Lorenzo), Ingénieur, Professeur d'Électrotechnique au *R. Museo Industriale Italiano*, R. Museo Industriale Italiano, Turin (Italie).

FERRET, Délégué au Congrès par le Gouvernement de la Corée, 44, rue Bouret, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

FERRIÉ (Gustave), Capitaine du génie, 51 *bis*, boulevard de Latour-Maubourg, Paris.

FEUSSNER (Dr Karl), Professeur à la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt*, 1, Leibnitzstrasse, Charlottenburg (Allemagne).

FILLEUL-BROHY (Georges), Administrateur-délégué de la *Compagnie générale de Constructions électriques*, 12, rue d'Anjou, Paris.

FINZI (Dr Giorgio), Corso Sempione. Milan (Italie).

FITZGERALD (George-Francis), Professor of Experimental Science, Fellow of Trinity College Dublin, Fellow of the Royal Society, délégué au Congrès par *The Institution of Electrical Engineers*, Trinity College, Dublin (Irlande).

FOCQUET (Ch.), Constructeur-électricien, 88, chaussée Saint-Pierre, Etterbeek-Bruxelles (Belgique).

FODOR (Étienne DE), Directeur de la *Société générale d'Électricité* à Budapest, VIII Kazinczy-utcza, 21, Budapest (Hongrie).

FODOR (Jules), Ingénieur des Postes et Télégraphes, à Zágráb (Croatie-Autriche).

FONTAINE (Hippolyte), Ingénieur-électricien, Administrateur de la *Société Gramme*, 52, rue Saint-Georges, Paris.

FOREGGER (Richard DE), Représentant de *The general Electric Company of New-York*, Hôtel Saint-Pétersbourg, rue Caumartin, Paris.

FORGET (Robert), Administrateur-délégué de la *Société anonyme de Transmission, Transport et Traction*, 1, square Labruyère, Paris.

FORQUENOT (Louis), Ingénieur civil des Mines, attaché au *Crédit Lyonnais*, Crédit Lyonnais, Bureau des Études financières, 19, boulevard des Italiens, Paris.

FORTIN-HERRMANN (Adolphe), Ingénieur-constructeur; 138, boulevard de Montparnasse, Paris.

FOUCAULT (Charles), Ingénieur-électricien, 36, rue Beaurepaire, Paris.

FRANQUELO (Eduardo), Ingeniero de Caminos, à Malaga (Espagne).

FREUNDLER (Henri), Ingénieur des Arts et Manufactures, Service de l'électricité de *MM. Schneider et Cie*, 42, rue d'Anjou, Paris.

FROUIN (André), Ingénieur des Télégraphes, Chef du Bureau des correspondances téléphoniques intérieures et internationales de l'Administration des Postes et Télégraphes, 64, rue Madame, Paris.

FUMERO (Ernesto), Ingénieur, rédacteur en chef de la revue *L'Elettricità*, 63, via Madama Christina, Turin (Italie).

GAIFFE (Georges), Ingénieur-électricien, 40, rue Saint-André-des-Arts, Paris.

GAILLARD (Emmanuel), Ingénieur-mécanicien-électricien, Inspecteur des installations électriques; 5B, rue Martheray, Lausanne (Suisse).

GAISBERG (DE), Inspecteur des Ponts et Chaussées, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Allemagne,

GALLMANN (Th.), Ingénieur, 8, rue Jules-Van-Praet, à Bruxelles (Belgique).

GAMARD (Gustave), Professeur honoraire à l'*Association philotechnique*, 24, rue Sainte-Croix-de-la-Bretonnerie, Paris.

GAMBLE (Gaston), Chef de section à la *Compagnie générale du Gaz*, 5, rue Bonaparte, Paris.

GARFIELD (Alexander-Stanley), Ingénieur-électricien, 67, avenue de Malakoff, Paris.

GASNIER, Chef des travaux pratiques à l'École municipale de Physique et de Chimie de la Ville de Paris, 42, rue Lhomond, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

GATTA (Dino), Ingénieur, 7, via Dante, Milan (Italie).

GAULTIER (Georges), Ingénieur, 14, rue Dumont-d'Urville, Paris.

GAUMY (René-Marcel), Ingénieur-électricien, E. S. E.; 8, avenue d'Orléans, Paris.

GAUTHIER-VILLARS (Albert), Imprimeur-Éditeur, 55, quai des Grands-Augustins, Paris.

GAVEY (John), Assistant Engineer in chief and Electrician, general Post office, Member of the Institution of Civil Engineers, Member of the Council of the Institution of Electrical Engineers, délégué au Congrès par le Gouvernement britannique (Administration des Postes) et par l'*Institution of the Electrical Engineers,* Fairlight, Church Grove, à Hampton Wick near London (Angleterre).

GEE (William-Winson-Haldane), B. Sc., Associate Member of Institution of Electrical Engineers, Chief Lecture Electrical Engineering Technical School, Manchester, Carola Villa, à Sale (Cheshire, Angleterre).

GELLENS (Charles), Lieutenant à la Compagnie de télégraphistes de place et d'artificiers du génie belge, Ingénieur-électricien, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre de Belgique, 16, rue de l'Étoile, Anvers (Belgique).

GENEUX (François), Directeur de la *Société des Forces motrices de la Goule,* Saint-Imier (Suisse).

GÉNON (Henri), Ingénieur-électricien, E. S. E., 137, boulevard Saint-Michel, Paris.

GENTEUR (A.-Désiré), Ingénieur civil électricien, 88, boulevard de Versailles, Suresnes (Seine).

GÉORGIEWSKY (Nicolas), Professeur à l'Institut technologique de Saint-Pétersbourg, délégué au Congrès par la Société Impériale technique russe (Section électrotechnique), Institut technologique, 8, Saint-Pétersbourg.

GERARD (Eric), Professeur à l'Université de Liége, Directeur de l'*Institut électrotechnique Montefiore,* délégué au Congrès par le Ministère de l'Intérieur de Belgique; 35, rue Saint-Gilles, Liége (Belgique).

GERARD (E.-A.-J.), Chef de cabinet, Ingénieur en chef au Ministère des Chemins de fer, Postes et Télégraphes, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Belgique.

GERARD (Léon), Ingénieur-électricien, Vice-Président de la *Société belge des Électriciens,* Administrateur délégué de la Compagnie générale de Traction électrique sur les voies navigables, à Oisquercq, près Bruxelles (Belgique).

GILLON (Gustave), Ingénieur-électricien, chargé de cours à l'Université de Louvain, 3, rue de Tournai, à Courtrai (Belgique).

GIN (Gustave), Administrateur technique de la *Compagnie électro-métallurgique des procédés Gin et Leleux,* 43, rue Lévis, Paris.

GINDRE (Eugène), Ingénieur à la Société *Le Carbone,* 12 et 33, rue de Lorraine, Levallois-Perret (Seine).

GIORDANA (Giovanni), Ingénieur, 20, via Nanchiglia, Turin (Italie).

GIRAULT (Paul-Gabriel), Ingénieur de la Compagnie des accumulateurs électriques Blot, 71, rue Damrémont, Paris.

GKOPPITZ (Carl), Ingénieur-électricien de la *Société industrielle d'Électricité, procédé Westinghouse,* 45, rue de l'Arcade, Paris.

GODEFROY (Fernand-J.-F.), Directeur des Postes et Télégraphes, Directeur des Services de la *Compagnie française des Câbles télégraphiques,* 32, rue du Château, Brest.

GODIN (Jos.-Phil.-Eugène), Électricien, à Trois-Rivières, P. Q. (Canada).

GŒDECKER (Ernst-Heinrich), Ingénieur de l'*Elektrotechnische Fabrik Stöker und Cie, Filiale Karlsruhe;* 28¹, Beiertheimer Allee, Karlsruhe (Allemagne).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

GOFFIN (Joseph), Ingénieur-électricien-conseil; 97, rue de la Clinique, Bruxelles.

GOLDSBOROUGH (Winder-Elwell), Membre de l'*American Institute of Electrical Engineers*, etc., Professor of Electrical Engineering and director of the Electrical Laboratories, Purdue University, Lafayette, à Lafayette, État d'Indiana (États-Unis).

GOLDSCHMIDT (Paul), Ingénieur de la *Société Électricité et Hydraulique* à Jeumont (Nord) et Charleroi (Belgique), 19, avenue Mac-Mahon, Paris.

GONDREXON (Paul), Fondé de pouvoirs de la Société anonyme Force-Éclairage par l'Électricité, 42, rue Le Peletier, Paris.

GORRIA (Hermenegildo), Ingénieur agronome et industriel, Dr ès sciences, licencié en pharmacie, Maître de bâtiments, etc., Directeur de la ferme expérimentale et de l'École départementale d'agriculture de Barcelone, Balmes, 23, Barcelone (Espagne).

GOSSART (Émile), Professeur de Physique expérimentale à la Faculté des Sciences de Bordeaux, 68, rue Eugène-Tenot, Bordeaux.

GOSSELIN (Xavier), Chef des travaux électriques à l'École centrale des Arts et Manufactures, 74, rue du Ranelagh, Paris.

GOTSHALL, 54, avenue Montaigne, Paris.

GOURÉ DE VILLEMONTÉE (Gustave), 31, rue de Poissy, Paris.

GRAIZIER (Jean), Chef du Service électrique de la Ville de Genève (Suisse).

GRAMME (Zénobe-Théophile), Ingénieur-électricien, 8, rue Mollet, Bois-Colombes (Seine).

GRAMONT (Comte Antoine-Arnaud DE), Docteur ès sciences physiques, 81, rue de Lille, Paris.

GRANGE (A.), Ingénieur-directeur de l'Usine électrique de Capdenac, à Viviez (Aveyron).

GRASSI (Pr Francesco), Représentant au Congrès de la *Società d'Incoraggiamento d'Arti e Mestieri* de Milan, 2, via Bossi, Milan.

GRASSI (Guido), Professeur d'Électrotechnique à l'École d'Électrotechnique G. Ferraris, délégué au Congrès par l'*Associazione electrotecnica italiana*, R. Museo Industriale, à Turin (Italie).

GRAY (Robert-Kaye), 106, Cannon street, London E. C.

GREEVES (Owden-Valentine), Membre de *The Institution of Electrical Engineers*, Portadown (Irlande).

GRIFFISCH (G.-J.), Ingénieur, Chef des Études de la Traction mécanique à la *Compagnie générale des Omnibus*, 27, rue Descombes, Paris.

GRIMALDI (Pr Giovan-Pietro), Docteur ès sciences, Directeur du Laboratoire de Physique de l'Université de Catane, 29, via Androne, Catania (Sicile).

GRISEL (Alexandre-Louis), Ingénieur E. C. P., ancien élève de l'*École supérieure d'Électricité*, 112, avenue de Suffren, Paris.

GRIVOLAS (Claude), Ingénieur-électricien, 16, rue Montgolfier, Paris.

GROSJEAN (Alexandre), Ingénieur aux *Établissements de Nœyer*, Willebrœck (Belgique).

GROSSELIN (Marie-Joseph), Ingénieur civil des Mines, Ingénieur du Service des Installations électriques de l'Exposition de 1900, 69, avenue Henri-Martin, Paris.

GROVE (Charles-Edward), Membre de *The Institution of Electrical Engineers* et de *The Institution of Civil Engineers*, Thames Ironworks, Blackwall, London.

GRUNBERG (J.), Ingénieur de la *Société Electricité et Hydraulique*, 97, avenue Victor-Hugo, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

GUÉNÉE (Albert-Charles-James), Constructeur électricien, Lieutenant de vaisse de réserve, 14, rue des Bois, Paris.

GUÉRIN (Charles), Électricien, 74, boulevard Malesherbes, Paris.

GUÉRIN (René), Délégué au Congrès par le Gouvernement de Guatémala, 11, r Edmond-Valentin, Paris.

GUÉROULT (Louis), Directeur de la Verrerie de Folembray (Aisne).

GUERQUIN (Léon), Ingénieur, Chef du Service télégraphique et électrique des Ch mins de fer Sud-Ouest de l'État russe, 26, rue Lévachovskaïa, Kiev (Russie

GUERRA (Paolo), Ingénieur, 10, via Bosco, Palerme (Sicile).

GUERREAU (Auguste), Ingénieur civil des Mines, 4, rue de Lorraine, Nancy.

GUÉRY (François-Charles), Attaché à l'*Inspection des Chemins de fer de l'Oues* 5, rue du Fort, Fontenay-sous-Bois (Seine).

GUILBERT (Cyrille), Ingénieur-électricien, 18, rue de la Jonquière, Paris.

GUILHEM (Eugenio), Ingénieur des Arts et Manufactures, Vice-Directeur d travaux de la Ville, 3 A, Sobrado rua Florencio d'Abren, à São Paul (Brésil).

GUILLAUME (Jacques), Ingénieur des Arts et Manufactures, 9, boulevard Males herbes, Paris.

GUILLEAUME (Émile), Ingénieur et fabricant, Mülheim-sur-Rhin (Allemagne).

GUILLEAUME (Max), Fabricant, Cologne (Allemagne).

GUILLEAUME (Théodore), Fabricant et Commerzienrath, Mülheim-sur-Rhin (Allemagne).

GUILLERME (Léon), Ingénieur, délégué au Congrès par le Gouvernement de l République de Libéria, 114, rue de Provence, Paris.

GUINOT (Jean), Ingénieur, Directeur des Tramways de Sedan, quai de la Régente Sedan (Ardennes).

GUITTON (Adrien), Ingénieur des Arts et Manufactures, Représentant des Atelier d'Œrlikon (Suisse), 22, rue de la Bourse, Saint-Étienne (Loire).

GUYE (Charles-Eugène), Professeur agrégé, 83, route de Chêne, Genève (Suisse).

HAINGLAISE (Pierre-Victor), Ingénieur chargé du Laboratoire d'études technique aux *Ateliers de construction de l'Artillerie* à Puteaux, 18, rue de la Sourdière, Paris.

HALPHEN (André), Ingénieur-électricien, 8 *bis*, chaussée de la Muette, Paris.

HAMBIJE (Paul), Ingénieur des Mines, Ingénieur-électricien à la *Société vormals Schuckert et Cie*, 97, avenue de la Bourdonnais, Paris.

HAMILTON (Georges-A.), Ingénieur de la *Western Electric C°*, 532, Morris avenue, Elisabeth, New-Jersey (États-Unis).

HAMM (Lucien-Auguste-André), Inspecteur principal au *Bureau de contrôle des Installations électriques*, 19, rue Germain-Pilon, Paris.

HAMMER (W.), Délégué au Congrès par l'*American Institute of Electrical Engineers*, 153 W., 46th street, New-York (États-Unis).

HAMMOND (Robert), Ingénieur-conseil, délégué au Congrès par *The Institution of Electrical Engineers*, 64, Victoria street, Westminster-London, S. W.

HANAPPE (Saturnin), Ingénieur, Professeur à l'École des Mines de Mons (Belgique). 44, boulevard Dolez, Mons (Belgique).

HARLÉ (Émile), Ingénieur-constructeur, 26, avenue de Suffren, Paris.

HARTMANN (Eugène), Ingénieur, Président de la *Société électrotechnique*, à Francfort-sur-Main, secrétaire de la *Maison Hartmann et Braun*, à Francfort-sur-Main (Allemagne).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

HAUMAN (Charles), Ingénieur directeur de la *Compagnie auxiliaire d'Électricité*, 47, rue Marie-Thérèse, Bruxelles.

HAWKINS (Tom), Ingénieur-électricien, 71, Queen Victoria street, London.

HEAVISIDE (A.-W.), Délégué au Congrès par *The Institution of Electrical Engineers*, 31, Culmington Road, à Ealing (Angleterre).

HEILMANN (F. Théod.), Ingénieur en chef du Service électrique de la *Société grenobloise de Force et de Lumière*, 8, avenue de la Gare, Grenoble (Isère).

HEILMANN (Jean-Jacques), Ingénieur-électricien, 20, rue Brunel, Paris.

HEINA (P.), Ingénieur des Postes et Télégraphes, 60, rue Caumartin, Paris.

HEINRICH (Richard-O.), Directeur de l'*European Weston Electrical Instrument C°* Ltd, 88, Ritterstrasse, Berlin S. 42.

HELMER (Oscar), Ingénieur en chef du Service électrique des *Usines Schneider et Cie*, au Creusot, château de Chanliau, par le Creusot (Saône-et-Loire).

HEMARDINQUER, Préparateur à la Faculté des Sciences, 7, rue de la Cerisaie, Paris.

HENRARD, Ingénieur en chef à la *Société lyonnaise des Forces motrices du Rhône*, Vice-Président des Ingénieurs sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore de Liége, 4, quai de la Guillotière, Lyon.

HENRY (Edmond-Charles-Louis), ancien Élève de l'École Polytechnique, 6, rue Clauzel, Paris.

HENRY (René), Ingénieur E. C. P., Ingénieur de la *Raffinerie A. Sommier et Cie*, 145, rue de Flandre, Paris.

HEPITES (Stefan C.), Docteur ès sciences, Ingénieur, Directeur de l'Institut météorologique de Roumanie, à Bucarest (Roumanie).

HERBAULT (Charles), Président honoraire du *Syndicat professionnel des Usines d'Électricité*, Président du Conseil d'administration de la *Compagnie générale d'Électricité*, 18, rue Roquépine, Paris.

HERING (Carl), Consulting Electrical Engineer, délégué au Congrès par le Gouvernement des États-Unis, par l'*American Institute of Electrical Engineers* et par le *Franklin Institute*, 929, Chesnut street, Philadelphie, Pa. (U. S. A.)

HEYLAND (Alexandre), Ingénieur-conseil de la *Société Électricité et Hydraulique*, à Charleroi (Belgique).

HILDBURGH (Walter-Leo), Ingénieur-électricien, c/o MM. Seligman Brothers, 18, Austin Friare, London E. C.

HILLAIRET (A.), Ingénieur-constructeur, 22, rue Vicq-d'Azir, Paris.

HIRST (Hugo), délégué au Congrès par *The Institution of Electrical Engineers*, 71, Victoria Street, London E. C.

HIRTZ (A.), Ingénieur, 24, rue de Dunkerque, Paris.

HOHO (Paul), Ingénieur, 42, rue Belliard, Bruxelles.

HOLLARD (Auguste), Chef du Laboratoire central de la *Compagnie française des Métaux*, 40, avenue du Chemin de fer, à Épinay (Seine).

HOLLISTER (John-Murray), Ingénieur-électricien, Président de *The Chicago Electrical Association*, Western Electric C°, Chicago (U. S. A.).

HOLLOS (Joseph), Ingénieur en chef des Postes et Télégraphes, délégué au Congrès par le Gouvernement de Hongrie, au Ministère du Commerce, Lánczhid utca, 3, Budapest.

HOLTZER (Charles-W.), Ingénieur-constructeur électricien, Président de *The Holtzer-Cabot Electric C°*, à Brookline, Massachusetts (États-Unis).

HOOR-TEMPIS (Dr Maurice DE), Professeur agrégé à l'Institut polytechnique royal, Ingénieur conseil de MM. Ganz et Cie, 11, Zsigmondubia, Budapest II (Hongrie).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

HOSPITALIER (Édouard), Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, 87, boulevard Saint-Michel, Paris.

HUBEAU (Jos.), 11, rue Mont-Saint-Martin, Liége (Belgique).

HUBER (Émil), Directeur des Ateliers de construction d'Œrlikon, Œrlikon (Suisse).

HUGON (Pierre), Ingénieur, 77, rue de Rennes, Paris.

HUGUET (Albert), Ingénieur-constructeur, ancien Président de section au Tribunal de Commerce de la Seine, 22, rue Vicq-d'Azir, Paris.

HUMBERT (Gustave-Edmond), Ingénieur E. C. P., 22, rue de l'Esplanade, Reims (Marne).

HUSSON (Léon), Inspecteur des câbles sous-marins, Membre de la *Société française de Physique* et de *The Institution of Electrical Engineers,* Haïphong (Tonkin) et 10, square du Croisic, Paris.

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS OF LONDON, 28, Victoria street, Westminster-London, S. W.

IRVINE (Henry-William-Kennedy), Membre de *The Institution of Electrical Engineers,* 49, Castelnau Carnes, Londres.

ITO (Yoshigara), Capitaine de vaisseau, Attaché naval à la Légation du Japon, 15, avenue de Tourville, Paris.

JACKSON (Dugald-C.), Consulting Engineer, Professor of Electrical Engineering in the University of Wisconsin, à Madison, Wisconsin (U.S.A.).

JANET (Paul), Professeur adjoint à l'Université de Paris, Directeur du *Laboratoire central* et de l'*École supérieure d'Électricité,* délégué au Congrès par la *Société française de Physique,* 8, rue du Four, Paris.

JASPAR (Albert), Ingénieur de la *Société anonyme d'Électricité,* anciennement Kolben et Cie de Prague, 95, rue de Monceau, Paris.

JAVAL (Jean-Félix), Ingénieur-électricien, 5, boulevard de la Tour-Maubourg, Paris.

JAVAUX (Émile), Administrateur-directeur de la *Société Gramme,* 20, rue d'Hautpoul, Paris.

JEANSON (Jacques), 20, rue Delambre, Paris.

JENSEN (J.-L.-W.-V.), Ingénieur en chef des Téléphones de Copenhague, Colbjomseegade, 15, à Copenhague (Danemark).

JESSER (Maurice), Ingénieur en chef du Chemin de fer sud-autrichien, Südbahnhof-Directiongebäude, Wien, X. (Autriche).

JOLLOCZKO (Louis DE), Ingénieur-électricien, Institut électrotechnique, 18, Novo-Isakiewskaïa, à Saint-Pétersbourg.

JOLY (Henri-Louis), Ingénieur-électricien, 20, Alfred Place, Bedford square, London, W. C. (Angleterre).

JORET (Léon-Jean), Ingénieur-électricien E. S. E., attaché au Service des Installations électriques de l'Exposition de 1900, 9, rue Montaigne, Paris.

JOSSE (Hippolyte), Ingénieur-conseil en matière de brevets d'invention, 17, boulevard de la Madeleine, Paris.

JOUBERT (Arigle), Ingénieur des Arts et Manufactures, Directeur de la Faïencerie de Gien, à Gien (Loiret).

JOUBERT (Jules), Inspecteur général de l'Instruction publique, délégué au Congrès par la *Société française de Physique,* 67, rue Violet, Paris.

JULLIG (Maximilien), K. k. Baurath, k. k. Professor, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Autriche (Administration des Chemins de fer), Colloredogasse 1, Vienne (Autriche).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

KALUS (Ferdinand), Ingénieur-inspecteur des ateliers des Chemins de fer, à Marburg (Allemagne).

KAMMERER (Victor), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur E. S. E., 8, rue de la Bourse, Mulhouse (Alsace).

KAPOUSTINE (Théodore), Professeur de Physique à l'Université, Tomsk (Russie).

KATCHALOFF (Nicolas DE), Directeur de l'Institut électrotechnique de l'Empereur Alexandre III, 18, Novo-Isakiewskaïa, Saint-Pétersbourg.

KELLER (Albert), Ingénieur, Chef du Service technique du Siège social de la *Compagnie électrométallurgique des Procédés Gin et Leleux,* 3, rue Vignon, Paris.

KELVIN (Lord), G. C. V. O., D. C. H., L. L. D., F. R. S., Emeritus Professor of natural Philosophy in the University of Glasgow, Netherhall, Larg. Ayrshire (Écosse).

KEMPF (Robert), Ingénieur, Francfort-sur-Mein (Allemagne).

KENNELLY (Arthur-E.), Sc. D., F. R. A. S., Ingénieur-électricien, délégué au Congrès par le Gouvernement des États-Unis, par l'*American Institute of Electrical Engineers,* et par le *Franklin Institute,* c/o R.-W. Pope, secretary of the American Institute, Havemeyer Building, Cortlandt street, New-York (N.-Y., U. S. A.).

KETTERER (Astère), Licencié ès sciences, Plänkestrasse, 21, à Bienne (Suisse).

KINSLEY (Carl), M. E., A. M., Electrical expert, Signal service of U. S. Army, Governors Island, New-York (U. S. A.).

KITTLER (Dr Erasmus), Geheimrath, Professor an der Tchnischen Hochschule Darmstadt, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Allemagne, Darmstadt (Allemagne).

KOGAN (Alexandre), Ingénieur en chef de l'Agence pour la Russie de la *Société anonyme d'Électricité « Hélios »*, 6, Ligowka, Saint-Pétersbourg.

KOHLRAUSCH (Dr Friedrich), Professor, Präsident der *Physikalisch-Technischer Reichsanstalt* in Charlottenburg, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Allemagne, 25 *bis,* Marchstrasse, Charlottenburg (Allemagne).

KOLBEN (Émile), Ingénieur-électricien, Chef de la Maison E. A. G., vorm. Kolben und Co, Vysocéan, Prague (Bohême).

KOLOSZVARY (André), Directeur des Postes et Télégraphes, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Hongrie, Ministère du Commerce, Lanczhid utcja, 3, Budapest.

KOLOSZVARY (Mlle Margueritte), Lanczhid utcja, 3, Budapest.

KÖNIG (Frédéric), Ingénieur et Électricien; Floragasse, 4, Vienne IV (Autriche).

KORDA (Désiré), Ingénieur en chef du Service électrique de la *Compagnie de Fives-Lille,* 64, rue Caumartin, Paris.

KOROMZAY (Frédéric), Ingénieur, Maison Ganz et Cie, à Budapest (Hongrie).

KOUBITZKI (Constantin-Domar), Ingénieur-électricien, 56, Beaver street, Room 85, c/o C. C. Martin esq., Londres.

KOULTCHITSKY (Michel), Ingénieur-conseil de Collège, École technique de Komisaroff, rue Tverskaja, à Moscou (Russie).

KOUPRIANOFF (Dimitri), Capitaine répétiteur à l'Académie d'artillerie Michel à Saint-Pétersbourg, 2, rue Bouquet-de-Longchamps, Paris.

KRAKAU (Alexandre), Professeur à l'Institut électrotechnique de l'Empereur Alexandre III, délégué au Congrès par le Ministère de l'Intérieur, 18, Novo-Isakiewskaïa, Saint-Pétersbourg.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

KRIÉGER (Louis), Ingénieur-électricien, Directeur technique de la *Société des voitures Kriéger*, Ingénieur-conseil de la *Société française d'automobiles électriques*, 8, rue Cardinet, Paris.

KRONG (Charles), Ingénieur-électricien, École impériale technique supérieure, Moscou (Russie).

KURZWEIL (Fritz), Ingénieur-électricien de la Station centrale électrique pour l'éclairage des théâtres de la Cour I. R. d'Autriche, 10, Schenkenstrasse, Vienne I (Autriche).

LAASS D'AGUEN, Directeur de la Compagnie d'assurances contre les accidents *Le Secours*, 15, rue des Pyramides, Paris.

LABOUR (Édouard), Ingénieur, Chef des ateliers de la Société *l'Éclairage électrique*, 250, rue Lecourbe, Paris.

LACAZE (Henri), Secrétaire général de la *Société anonyme continentale des Compteurs*, 9, rue Pétrelle, Paris.

LACAZE (Maurice), Ingénieur E. S. E., 12, rue de la Chaise, Paris.

LACK (Théodore), Ingénieur en chef de la *Industria Electrica*, 72, Pasco de Gracia, Barcelone (Espagne).

LAFFARGUE (Joseph-Clément), Ingénieur-électricien, 70, boulevard Magenta, Paris.

LAFLAMME (Mgr J.-C.-K.), Professeur à l'Université Laval, Québec (Canada).

LAFONT (Le Révérend Père Eugène), S. J., Professeur de Physique expérimentale à l'Université de Calcutta, Saint-François-Xavier's College, 10, Park-street, Calcutta (Indes britanniques).

LAMBERT (Alphonse-Aug.-Jos.), Ingénieur honoraire des Ponts et Chaussées, Ingénieur-électricien et des Constructions navales, 170, avenue des Fleurs, à Uccle (Belgique).

LAMOTTE (Marcel), Agrégé des Sciences physiques, Préparateur au Laboratoire d'Enseignement à la Sorbonne, 19 *bis*, boulevard de Port-Royal, Paris.

LAMY (Ernest), Ingénieur-électricien, 16, rue de l'Abbaye, Paris.

LANDRIN (P.), Ingénieur-électricien, 76, rue d'Amsterdam, Paris.

LANDRY (Jean), Ingénieur, Chef des Études de la *Compagnie de l'Industrie électrique* de Genève, Genève (Suisse).

LANGLOIS (Victor), Ingénieur constructeur électricien, 9, place du Parc, Sèvres (Seine-et-Oise).

LANINO (Barnabé), Ingénieur inspecteur de la *Compagnie des chemins de fer de l'Adriatique;* Direzione Trasporti, à Bologne (Italie).

LANINO (Pierre), Ingénieur-électricien de la *Compagnie des chemins de fer de l'Adriatique,* Direzione Trasporti, à Bologne (Italie).

LANNOY (Stéphane DE), Conservateur du Bureau des Étalons des poids et mesures, 14, rue du Cornet, Bruxelles (Belgique).

LANSINGH (Van Reusselaer), Electrical Engineer *Western Electric C°*, 5407, Woodlawn avenue, Chicago III (Ill., U. S. A.).

LAPORTE (Frédéric-Claude-Marie), Ingénieur civil des Mines, Chef de travaux au Laboratoire central d'Électricité, 2, rue Saint-Simon, Paris.

LARMOYER (G.), Ingénieur-électricien, 14, rue Dagnelies, Charleroi (Belgique).

LARNAUDE (André), Ingénieur des Arts et Manufactures, Administrateur-directeur de la *Compagnie française pour la fabrication des lampes électriques à incandescence,* 19, rue Camille-Desmoulins, à Issy-les-Moulineaux (Seine).

LATMIRAL (Josef), Ingénieur-électricien auprès de la *Maison Siemens et Halske* (Section tramways), 94, Markgrafenstrasse, Berlin (Allemagne).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

LATTÈS (Commandeur Oreste), Ingénieur des Mines, Inspecteur royal de l'Industrie, Trésorier de l'*Associazione elettrotecnica italiana,* à Sesia, province de Novare (Italie).

LAUDET (Georges-Alexandre-Célestin), Chef du Service électrique à l'Établissement central d'aérostation militaire de Meudon, Lieutenant de réserve au 1er régiment du génie, 3, place d'Alleray, Paris.

LAURAIN (Henri), Ingénieur à la *Compagnie anonyme continentale des Compteurs,* 9, rue Pétrelle, Paris.

LAURIOL (Pierre), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Ingénieur des *Services généraux d'éclairage de la Ville de Paris,* 1, avenue de l'Observatoire, Paris.

LAUTENSCHLAGER (Adolf), Représentant de la Maison Schuckert et Cie de Nuremberg à l'Exposition de 1900, 97, avenue de La Bourdonnais, Paris.

LAWSON (A. J.), Délégué de *The Institution of Electrical Engineers of London,* Moorgate Court, Moorgate Place, London E. C.

LEBLANC (Maurice), 1, avenue de Boufflers, villa Montmorency, Paris.

LE BLANT (Étienne), Ingénieur civil des Mines, Chef du Service des réceptions (Matériel et Traction) des Chemins de fer de l'Est, 168, rue Lafayette, Paris.

LEBRUN (B.), à Nimy près Mons (Belgique).

LECERF (Félix-Achille), Ingénieur des Arts et Manufactures, 47 *bis,* rue Boileau, Paris.

LECLANCHÉ (Maurice), Industriel et Électricien, 114, boulevard Malesherbes, Paris.

LEGENDRE (Louis-André), Électricien, 121, rue Vieille-du-Temple, Paris.

LEGRAND (Emmanuel), Ingénieur diplômé E. S. E., Dr ès sciences physiques, 18, rue Chauveau-Lagarde, Paris.

LEGROS (Lucien-Alphonse), Membre de l'*Institution of Mechanical Engineers,* de l'*Institution of civil Engineers,* de l'*Institution of Electrical Engineers,* 57, Brook Green, Hammersmith, London W. (Angleterre).

LE MERCIER-MOUSSEAUX, Capitaine de vaisseau, Chef du Service central des Torpilles et de l'Electricité, délégué au Congrès par le Ministère de la Marine.

LÉO (François-Henri-Auguste), Ingénieur-électricien, 42, rue du Ranelagh, Paris.

LEONARD (H.-Ward), Président of *Ward Leonard Electric Co,* à Bronxville (New-York, U. S. A.).

LESSING (Kurt-D.), Chef de la Maison *Fabrik galvanischer Kohlen Dr Alb. Lessing,* Nuremberg (Bavière).

LETHEULE (Paul), Ingénieur-électricien à la *Compagnie française Thomson-Houston,* 33, boulevard des Batignolles, Paris.

LÉVY (Amédée), Ingénieur adjoint à la Compagnie du Gaz de Bordeaux, 5, rue de Condé, Bordeaux.

LÉVY (Lucien), Ingénieur civil des Mines, 95, boulevard Malesherbes, Paris.

LÉVY (Raphaël-Georges), Banquier (*Compagnie française des Mines d'or et d'Exploration*), 20, rue Taitbout, Paris.

LEYDIER DE NÉRY (Mme Alice), Exposante au Palais de l'Électricité, groupe V, classe 23, 6, rue Antoine-Roucher, Paris.

L'HOEST, Ingénieur en chef aux Chemins de fer de l'État belge, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Belgique.

LIEB Jr (John-W.), Mechanical Engineer, General Manager The Edison Electric Illuminating Co of New-York, 166, West 97th street, New-York (U. S. A.).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

LIMB (Claudius), Dr ès sciences, Préparateur adjoint à la Sorbonne, Ingénieur-conseil électricien, 58, rue Coste, à Caluire-et-Cuire (Rhône).

LIMINGER, Ingénieur, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Autriche (Administration I. R. des Postes et Télégraphes), Vienne.

LINDÉ (Isidore), Ingénieur-électricien, Directeur de la succursale de Moscou de la *Société en commandite Duflou, Constantinovitch et Cie*, Morosseïka, *Maison Léonof*, Moscou (Russie).

LINDER (Leo), Ingénieur, Agent général directeur de la *Société pour l'exploitation des Procédés électriques Walker*, 6, rue Boudreau, Paris.

LINDERS (Olof), Ingénieur, 9, Davidstrasse, Leipzig (Allemagne).

LIOUVILLE, Ingénieur des Poudres et Salpêtres, Attaché au *Laboratoire des Poudres et Salpêtres*, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre, Paris.

LLOYD (Robert-Mc Allister), Electrical Engineer, Membre de l'*Institution of Electrical Engineers of London* et de l'*American Institute of Electrical Engineers*, 100, Broadway, New-York (N.-Y., U. S. A.).

LOBADH (Dr Walter), Ingénieur-électricien, 88, avenue des Champs-Élysées, Paris.

LOCHERER (Jacques-Joseph-Auguste), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 45, rue Ampère, Paris.

LODYGUINE (Alexandre DE), c/o. Professor F. Schmid, 6, Stockton-avenue, à Allegheny (Pensylvanie, U. S. A.).

LOHMANN (R.-W.), Electrical contractor, à Schenectady (N.-Y., U. S. A.).

LOMBARDI (Luigi), Professeur de Physique technique, R. Museo Industriale, à Turin (Italie).

LOPEZ (Pedro), Director de telegrafos de la Republica Argentina, injeniero electrico, Telegrafo nacional, à Buenos-Ayres (République Argentine).

LOPPÉ (François), Ingénieur des Arts et Manufactures, 240, rue de Vaugirard, Paris.

LORAIN, Ingénieur des Télégraphes, 24, rue Bertrand, Paris.

LORIN (Charles-Louis), Ingénieur, Attaché aux Services électriques de l'Exposition de 1900, 21, avenue de Tourville, Paris.

LORSAY (Georges), *Compagnie de la lampe à incandescence sans culot système Hollub*, 76, boulevard Magenta, Paris.

LOURME (Ernest), Directeur des Postes et des Télégraphes de la Cochinchine, du Cambodge et du Bas-Laos, à Saïgon (Cochinchine).

LUTOSLAWSKI (DE), Ingénieur-chef, Jasna, 6, Varsovie (Russie).

LUX (Frédéric), Directeur de la *Société anonyme Luxwerke* de Ludwigshafen, chez M. Frédéric Frey, 16, Grande-Rue, Saint-Mandé (Seine).

LYON (Max), Ingénieur, 83, avenue du Bois-de-Boulogne, Paris.

MACKIEWICZ (Paul), Ingénieur-électricien, Maison Siemens et Halske et Co, P. B, Charlottenburg (Allemagne).

MC MILLAN (Walter-George), Secretary of *The Institution of Electrical Engineers of London*, 28, Victoria street, London S. W.

MAFFEZZINI (Amatore), Ingénieur, Consiglio superiore dei Lavori pubblici, à Rome (Italie).

MAGENTIES (Louis), Ingénieur du Service électrique à l'*Association lyonnaise des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 37, cours du Midi, Lyon.

MAILLOUX (C. Odilon), Ingénieur-électricien, délégué au Congrès par l'*American Institute of Electrical Engineers* et par la *New-York Electrical Society*, 150, Nassau street, New-York (U. S. A.).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

MAQUET (Auguste), Directeur de l'École des Mines du Hainaut, Professeur d'Électricité et de Physique, Ingénieur au Corps des Mines, 22, boulevard Dolez, Mons (Belgique).

MARÇAY (Edgard-Jules DE), Industriel électricien, 28, avenue de l'Opéra, Paris.

MARCHAND (Jules-Edouard), Bureau de la Goule, Saint-Imier (Suisse).

MARIÉ (Georges), Ingénieur de la Compagnie des Chemins de fer P.-L.-M., en retraite, chez Mme Colmet, à Pontault-Combault (Seine-et-Marne).

MARTIN (T.-C.), Editor *Electrical World and Engineer*, délégué au Congrès par le Gouvernement des États-Unis, 120, Liberty street, New-York (U. S. A.).

MARTINAZZO (Lodovico), Chef du service des Mines de Monteponi, Monteponi (Sardaigne).

MARTINE (Gaston), Ingénieur associé de la Maison A. et G. Martine, Administrateur délégué de la *Société générale des Industries électriques de Lille*, 15, rue de Roubaix, Lille (Nord).

MARTINETTI (Mattia), Docteur en physique, Inspecteur de l'exploitation des Chemins de fer de la Méditerranée, c/o M. G. Giordana, 20, via Vanchiglia, Turin (Italie).

MASCART (E.), Membre de l'Institut, délégué au Congrès par le Ministère du Commerce, 176, rue de l'Université, Paris.

MASCART (Léon), Lieutenant de vaisseau, 176, rue de l'Université, Paris.

MASSALSKI, Ingénieur maritime, 9, boulevard Malesherbes, Paris.

MASSON (Georges), Libraire-Éditeur, Président de la Chambre de Commerce de Paris, 120, boulevard Saint-Germain, Paris.

MATERNINI (François), Ingénieur aux Chemins de fer de la Méditerranée, service du matériel, c/o M. G. Giordana, 20, via Vinchiglia, Turin (Italie).

MAUDUIT (Alexandre), Ingénieur-électricien, 55, rue Isabey, Nancy (Meurthe-et-Moselle).

MAUGAS (Gabriel-Émile-Marie), Ingénieur de la marine, Professeur à l'*École d'application du Génie maritime*, délégué au Congrès par le Ministère de la Marine, 31, rue Saint-Placide, Paris.

MAURAIN (Charles), Maître de conférences à la Faculté des Sciences de Rennes, Rennes (Ille-et-Vilaine).

MAURER (H.), Directeur des *Usines électriques de Montbavon*, à Montbavon (Suisse).

MAVOR (James), Professeur d'Économie politique à l'Université de Toronto, délégué au Congrès par le Gouvernement du Canada, à Toronto (Canada).

MAVOR (Sam), Membre de *The Institution of Civil Engineers* et de *The Institution of Electrical Engineers*, 47, King street, Mile-End, Glasgow (Écosse).

MAYORAL (Diego), Ingénieur, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Espagne, à Puerto Santa-Maria, près Cadix (Espagne).

MAZEN (Antoine-Natalis), Inspecteur principal du Matériel et de la Traction des Chemins de fer de l'Ouest, délégué au Congrès par la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest, 35, rue Magenta, Asnières (Seine).

MAZEROLLE, Ingénieur des Ponts et Chaussées, délégué au Congrès par le Ministère de l'Agriculture.

MEDINA (Juan-Gomez), dueno y director de una fabrica de luz electrica fundada él 1886, Calle de Lain-Calvo, Burgos (Espagne).

MEILLET, Chef d'escadron d'artillerie, adjoint à l'Inspection permanente des fabrications de l'artillerie, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre.

MELMS (Gustave-G.), Directeur de la *Compagnie internationale d'Électricité*, à Liége (Belgique).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

MÉLOTTE (Félix), Ingénieur-électricien, rue du Parc, à Liége.

MENDELSSOHN (Dr M.), Professeur agrégé à l'Université de Saint-Pétersbourg, 27, Liteiny, Saint-Pétersbourg.

MENDES GUERREIRO (Jean-Verissimo), Ingénieur en chef des Travaux publics, 14, Calcada do Sacramento, Lisbonne (Portugal).

MENIER (Henri), Manufacturier, Officier de la Légion d'honneur, 8, rue de Vigny, Paris.

MERCADIER (Ernest-Jules-Pierre), Directeur des Études à l'*École Polytechnique,* Professeur à l'École supérieure des Postes et Télégraphes, 21, rue Descartes, Paris.

MERK (Frédéric), Ingénieur, 66/0, Nymphenburgerstrasse, Munich (Bavière).

MEUNIER (Gustave), Ingénieur aux *Aciéries de France.* à Isbergues (Pas-de-Calais).

MEYER (Louis), ancien Élève de l'École Polytechnique, industriel, 6, rue Bérenger, Paris.

MEYER (Louis-Ferdinand), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Directeur de la *Compagnie continentale Edison,* 28, rue de Châteaudun, Paris.

MEYER (N.), Directeur en chef des Télégraphes danois, Chevalier du Danebrog, délégué au Congrès par le Gouvernement du Danemark, à Copenhague.

MEYER-MAY (Albert), ancien Élève de l'École Polytechnique, Directeur des constructions électriques à la *Société Industrielle des Téléphones,* 7, rue Théodore-de-Banville, Paris.

MEYLAN (E.), Ingénieur au *Laboratoire Volta,* 88, quai du Parc, Parc Saint-Maur.

MEYSZTOWICZ (Oscar), Ingénieur diplômé, 58, rue Jacob, Paris.

MICHAUD, délégué au Congrès par la *Chambre de Commerce de Paris,* 1, rue de Béthune, Versailles.

MICHEL (Joseph-Édouard-Alexandre), Ingénieur, 22, rue Robert-Fleury, Paris.

MIERISCH (Arthur), Électro-Ingénieur, 200, quai de Jemmapes, Paris.

MIET (Maurice), Directeur de l'Usine de la *Compagnie du Secteur électrique de la Rive gauche de Paris,* 39, quai d'Issy, à Issy-les-Moulineaux (Seine).

MILLER, Ingénieur, délégué au Congrès par la Russie (Ministère des Voies et Communications).

MILLER (Oskar von), Ingénieur, 3, Ferdinand-Miller Platz, Munich (Bavière).

MILLIS (John), Captain in Corps of Engineers U. S. Army, délégué au Congrès par le Gouvernement des États-Unis, Willits Point Borough of Queen, New-York (U. S. A.).

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS DE ROUMANIE, service des Études et Constructions, 9, strada Mikai Voda, Bucarest.

MIX (Edgard-W.), Ingénieur électricien, Ingénieur en chef de la Société des *Etablissements Postel-Vinay,* 12, boulevard des Invalides, Paris.

MOÏSE, délégué au Congrès par la *Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest,* 2, rue du Grandchamp, Nanterre (Seine).

MOISSAN (Henri), Membre de l'Institut, 7, rue Vauquelin, Paris.

MOLERA (Eusèbe-J.), Ingénieur civil et électricien, 2025, rue de Sacramento, à San Francisco (U. S. A.).

MONMERQUÉ (A.), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 71, rue de Monceau, Paris.

MONNIER (D.), Ingénieur, Professeur à l'École Centrale des Arts et Manufactures, 3, impasse Cothenet (22, rue de la Faisanderie), Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

MONTEFIORE-LEVI (Georges), Sénateur, 35, rue de la Science, à Bruxelles (Belgique).

MONTEL (Luigi), Ingénieur, 1, Piazza Lagrange, Turin (Italie).

MONTPELLIER (J.-A.), Rédacteur en chef de l'*Électricien,* 3, rue Lecourbe, Paris.

MONTU (Carlo), Ingegnere civile, assistente di fisica tecnica nel R. Museo Industriale Italiano in Torino, Segretario della Sezione di Torino dell' Associazione elettrotecnica italiana, 39, via di Po, Turin (Italie).

MORIN (Paul), Ingénieur de la Marine, 55, rue Bellechasse, Paris.

MORNAT (Louis), Constructeur électricien, 56, boulevard Voltaire, Paris.

MORRIS (David-King), Associate Member of the *Institution of Electrical Engineers*, Mason University College, 6, Holly-Road, Edgbaston, Birmingham (Angleterre).

MORRIS (John-Turner), Associate Member of the *Institution of Electrical Engineers,* 13, Somers Place, Hyde Park Square, London W.

MORSIER (Auguste DE), Ingénieur publiciste, 25, rue Decamps, Paris.

MOUCHARD (Victor), Ingénieur de l'*Office tunisien des Postes et Télégraphes,* à Tunis.

MULLER (Eugène), Directeur de l'Institut *Salus,* à Zurich (Suisse).

MUNIER (Adolphe), Directeur des ateliers de la *Compagnie des Mines de Vicoigne et de Nœux,* à Nœux-les-Mines (Pas-de-Calais).

MURALT (C.-L. DE), Ingénieur, Directeur du Bureau de Paris de la *Société Hélios,* de Cologne, 9, avenue de la Bourdonnais, Paris.

NAKAMOURA (Riuzo), Ingénieur-électricien, chez Mme Jourdain, 4, rue Troyon, Paris.

NAMBA (Massashi), Professeur d'Électrotechnique à l'Université de Kioto, Kioto (Japon).

NEGREANO (D.), Professeur à la Faculté des Sciences de Bucarest, 17, strada Popa Rudu, Bucarest (Roumanie).

NERVILLE (Ferdinand DE), Ingénieur des Télégraphes, 59, rue de Ponthieu, Paris.

NEU (Lucien), ancien élève de l'École Polytechnique, Ingénieur conseil, 60, rue Brûle-Maison, Lille (Nord).

NEUFVILLE (H. DE), Ingénieur des Mines, 6, rue Halévy, Paris.

NEUMAN (Félix), Directeur des Postes et Télégraphes du Luxembourg, délégué au Congrès par le Gouvernement du Grand-Duché du Luxembourg.

NEW-YORK ELECTRICAL SOCIETY, 120, Liberty street, New-York (U. S. A.).

NORBERG (Aven), Ingénieur à la Société *Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget,* à Westeras (Suède).

NOUVELLE (Georges), Ingénieur civil, 25, rue Brézin, Paris.

NYSSENS (Paul), Ingénieur électricien, Administrateur-délégué de la *Société anonyme Chantier,* à Flawinne, près Namur (Belgique).

OBATA (B.), Ingénieur de la Marine Japonaise, c/o M. Ohdatchi, 22, avenue de Tourville, Paris.

ODAGIRI (Enju), Ingénieur de la Marine Japonaise, 178, Buckingham Palace Road, London S. W.

ODENT (Marie-Albert), Ingénieur E. C. P., diplômé E. S. E., Ingénieur de la *Quintera Mining C°,* à Alamos, province de Sonora (Mexique).

O'GORMAN (Mervyn), Membre de *The Institution of Electrical Engineers,* 82 Victoria street, London S. W.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

OHDATCHI (Gentaro), Mécanicien en chef de la Marine Japonaise, 22, avenue de Tourville, Paris.

OLIVA (Luigi), Consigliere delegato della *Società anonima per industrie elettriche « L'Agognetta »*, à Voghera (Pavie, Italie).

OLIVETTI (Camillo), Ingegnere, à Ivrea (Italie).

OOLGAARDT (J.-J.), Ingénieur de *The General Electric Company of New-York* (U. S. A.).

ORAW (Juhan), Ingénieur, 70, rue Vaneau, Paris.

ORBAN (Gustave), Ingénieur-électricien, Tramways électriques d'Ekaterinoslaw (Russie).

ORNELLAS (Baron Carlos D'), délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Équateur, 3, rue Margueritte, Paris.

OSSADTCHY (Pierre), Professeur à l'Institut électrotechnique de l'Empereur Alexandre III, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Russie (Ministère de l'Intérieur), 92, Moïka, Saint-Pétersbourg.

OSSENT (Charles), 1, rue Pépinet, Lausanne.

OSTERBERG (Max), Electrical Engineer, Master of Arts, 11, Broadway, New-York (U. S. A.).

OTTAVI (Ludovic), Ingénieur chef de service à la *Compagnie auxiliaire d'Électricité* de Bruxelles, 127, rue la Croix-de-Fer, Bruxelles.

OTTLI (E.), Ingénieur, Représentant de l'*Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* à l'Exposition de 1900, 22, Schiffbauerdamm, Berlin N. W.

OYUWA, Ingénieur au Ministère de la Communication, délégué au Congrès par le Gouvernement du Japon.

OZANT (H.), 56, rue de Dunkerque, Paris.

PAALZOW, Geheimer Regierungsrath, Professor Doctor, 50, Wilhemstrasse, II, Berlin.

PAGE (Davidge), Journaliste, c/o Cassiers Magazine, 33, Bedford Street, Strand, London.

PAGLIANI (Professeur Stefano), Vice-Président de l'*Associazione electrotecnica italiana*, Vice-Président de la Section technique silicienne, 60, piazza Ignazio Florio, Palerme (Italie).

PALAZ (Adrien), Professeur d'électricité industrielle à l'Université de Lausanne (Suisse).

PALLIER (Félix), Ingénieur diplômé E. S. E, 20, rue Delambre, Paris.

PANZARASA (Alessandro), Ingénieur-électricien conseil, 36, rue Montebello, Milan (Italie).

PAQUIN (Alonzo), Électricien, à Trois-Rivières, boîte de poste 265 (Canada).

PARSONS (Frédérik-J.), Sous-Directeur de la *Compagnie française pour l'exploitation des procédés Thomson-Houston*, 10, rue de Londres, Paris.

PARVILLÉE (Louis), Administrateur-délégué de la *Société des anciens Établissements Parvillée frères et Cie*, 29, rue Gauthey, Paris.

PASTEUR (J.-D.), Inspecteur des Postes et Télégraphes aux Indes orientales néerlandaises, à Batavia (Ile de Java).

PAYOT (Henri), Ingénieur à la Société électrique *Vevey-Montreux*, à Montreux (Suisse).

PELLAT (Joseph-Solange-Henri), Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 23, avenue de l'Observatoire, Paris.

PELLETIER (M.), Ingénieur au Service du Matériel et de la Traction à la *Compagnie des Chemins de fer de l'Est*, 168, rue Lafayette.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

PELLIN (Ph.), Ingénieur des Arts et Manufactures, Constructeur d'instruments de précision, 21, rue de l'Odéon, Paris.

PELLISSIER (G.), 16, rue Singer, Paris.

PERNOLLET (Louis-Maurice), Ingénieur des Arts et Manufactures, diplômé E. S. E., 129, boulevard Richard-Lenoir, Paris.

PÉROT (Alfred), Professeur de Physique industrielle à la Faculté des Sciences de Marseille, 119, boulevard Longchamp, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

PERRIN (Paul), Ingénieur-Directeur de la *Maison Richard frères*, 52, rue Saint-Louis-en-l'Ile, Paris.

PERRY (John), D. Sc., F. R. S., Professor of Mechanics and Mathematics, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Grande-Bretagne et par l'Institution of electrical Engineers, au Royal College of Science, London S. W.

PERSKYI (Constantin), Capitaine de l'artillerie de la garde impériale, Chef des ateliers de précision militaire, électricien de l'usine des fusées et des instruments, collaborateur du Gouvernement général d'artillerie (Section physique et électrotechnique), Membre de la Société électrotechnique, Wassily Ostrow. 9 ligne, log. n° 25, maison n° 39/42, Saint-Pétersbourg (Russie).

PESCETTO (Federico), Ingénieur, Colonel du Génie, à Cornigliano (Italie, province de Gênes).

PETIT, Ingénieur au Creusot, 1, boulevard Malesherbes, Paris.

PETIT (Charles), Industriel, rue Saint-Géry, Cambrai (Nord).

PETIT-MANN (Francis), Ingénieur-électricien, 31, rue Descartes, Paris.

PETSCHE (Albert), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Directeur de la *Société lyonnaise des Eaux et de l'Éclairage*, 73, boulevard Haussmann, Paris.

PICHERY (Lucien), Administrateur-Directeur de l'*Ardoisière La Renaissance*, 7, boulevard Daviers, Angers (Maine-et-Loire).

PICOU (Gustave), Industriel, 153, rue de Paris, Saint-Denis (Seine).

PICOU (R.-V.), Ingénieur en chef des installations électriques de l'Exposition de 1900, 41, rue Saint-Ferdinand, Paris.

PIEPER (Henri), Administrateur délégué, Directeur général de la *Compagnie Internationale d'Électricité*, à Liége (Belgique).

PIÉRARD (Emile-L.-J.), Ingénieur des Télégraphes belges, Professeur d'Électrotechnie à l'Université libre de Bruxelles, 77, rue Le Corrège, Bruxelles.

PILLEUX (L.), Ingénieur-électricien, 79, rue Claude-Bernard, Paris.

PILTSCHIKOFF (Nicolas), Professeur de Physique à l'Université impériale d'Odessa (Russie), Odessa (Russie).

PILZ (Eugène), Ingénieur-mécanicien, Propriétaire d'une filature de coton, à Graslitz (Bohême).

PINNA (M.-Raphaël), Ingénieur, Directeur de la *Société piémontaise d'Électricité*, Secrétaire général de l'Associazione elettrotecnica italiana, 9, via Bogino, Turin (Italie).

PINTÉR (Joseph), Directeur de la *Société anonyme réunie d'Électricité*, à Budapest, 7, rue Huszar utjca, Budapest (Hongrie).

PIRANI (Émile), Docteur ès sciences, Ingénieur principal de la *Société alsacienne de constructions mécaniques*, 8 *bis*, rue Alexandre-Lange, Versailles (Seine-et-Oise).

PISTOR, Colonel breveté à l'État-Major particulier de l'artillerie, sous-chef du cabinet du Ministre de la Guerre, délégué au Congrès par le Ministère de la Guerre.

PITMAN (C.-E.), ancien Directeur général des Télégraphes aux Indes Britanniques, délégué au Congrès par le Gouvernement des Indes Britanniques.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

PLACE (Gabriel), Ingénieur à la *Société l'Éclairage électrique,* 1, rue Saint-Lazare, Colombes (Seine).

PLACET (Paul-Émile), Ingénieur des Arts et Manufactures, 18, rue Denfert-Rochereau, Paris.

POINCARÉ (Lucien), Docteur ès sciences, Recteur de l'Université de Chambéry, délégué au Congrès par la *Société française de Physique*, à Chambéry (Savoie).

POINSOT (Paul-Hippolyte), Directeur, Président, Professeur honoraire de l'*École dentaire de Paris,* chef du Service dentaire de l'*Asile clinique Sainte-Anne,* Membre de la Société odontalgique de la Grande-Bretagne, 184, rue de Rivoli, Paris.

POIRRIER (Marius), représentant de la *Société Alsacienne de constructions mécaniques,* 61, rue de l'Hôtel-de-Ville, Lyon (Rhône).

POLLAK (Charles), Directeur des *Accumulatoren-Werke système Pollak,* 17, rue du Lycée, Sceaux (Seine).

POLLARD (Jules), Ingénieur en chef de 1re classe au Génie maritime, attaché à l'inspection du Génie maritime, délégué au Congrès par le Ministère de la Marine, 28, rue Bassano, Paris.

POLONCEAU, ancien Ingénieur en chef du Matériel et de la Traction, Conseil de la Compagnie des Chemins de fer d'Orléans, ancien Président de la *Société des Ingénieurs civils de France,* 55, rue de Verneuil, Paris.

PONSOLLE (Léon), Chef des services électriques, préparateur et suppléant du cours de Physique et Chimie à l'École nationale des Arts et Métiers, 5, rue Montauban, Angers (Maine-et-Loire).

PONTECORVO (Lello), Ingénieur à la *Maison Ganz et Cie* (*Section électrotechnique*), à Budapest (Hongrie).

POPE (Ralph-W.), Secrétaire de l'*American Institute of Electrical Engineers,* 26, Cortland Street, New-York (U. S. A.).

POPOFF (A.), Professeur à l'École des Torpilleurs de la Marine, Cronstadt (Russie).

POSTEL-VINAY (A.), Constructeur-électricien, délégué au Congrès par le Ministère du Commerce, 41, rue des Volontaires, Paris.

POTIER (A.), Ingénieur en chef des Mines, Professeur à l'*École Polytechnique* et à l'*École des Mines,* Membre de l'Institut, 89, boulevard Saint-Michel, Paris.

POWER PUBLISHING COMPANY, publishers of *Power and Steam Engineering Monthly,* 146, World Building, New-York (U. S. A.).

PRANDONI (Eugenio), Ingénieur, Direzione generale Ferrovie sicule, à Palerme (Italie).

PREECE (W.-H.), K. C. B., F. R. S., Civil Engineer, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Grande-Bretagne, Gothic Lodge, à Wimbledon (comté de Surrey, Angleterre).

PRICE (William-Horman), Membre associé à l'*Institution of Electrical Engineers,* 10, Noel-Road, Edgbatton, Birmingham (Angleterre).

PROST (Aimé), Directeur de la *Compagnie des Phosphates de Gafsa,* 60, rue de la Victoire, Paris.

PULSFORD (Émile), Président de la *Société centrale d'Électricité,* 10, rue Taitbout, Paris.

PULUJ (Dr Johann), Professor an der K. K. deutschen technischen Hochschule in Prag, Prague (Bohême).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

QUELLENEC, Ingénieur en chef de la *Compagnie de Suez*, 9, rue Charras, Paris.

QUERTON (Louis), Médecin assistant à l'*Institut Solvay*, Institut Solvay, Parc Léopold, Bruxelles (Belgique).

QUEVEDO (Miguel-A. DE), Ingénieur des Ponts et Chaussées, délégué au Congrès par le Gouvernement du Mexique.

RACAPÉ (Anselme-Louis), Ingénieur des classes 26 et 27 à l'Exposition universelle de 1900, 52, rue Gay-Lussac, Paris.

RADIGUET (Arthur-Honoré), Constructeur-électricien, 13 et 15, boulevard des Filles-du-Calvaire, Paris.

RAMBERT (Maurice), Administrateur-délégué de la *Compagnie de l'Industrie électrique*, à Genève (Suisse).

RAMIREZ (Ignacio), Ingénieur adjoint aux groupes IX et XVI de la Commission mexicaine à l'Exposition de 1900, délégué au Congrès par le Gouvernement du Mexique.

RAOUX (Floriant), Étudiant, 1, place Pépinet, Lausanne (Suisse).

RAOUX (Léon), Ingénieur, Directeur de la *Société suisse d'Électricité*, 1, place Pépinet, Lausanne (Suisse).

RASKOWSKY (Edmond), Ingénieur en chef, 11, avenue Victor-Hugo, Paris.

RASMÜSSEN (Jonas-Séverin), Directeur général des Télégraphes de Norvège, Christiania (Norvège).

RATEAU (Auguste), Ingénieur au Corps des Mines, 105, quai d'Orsay, Paris.

RATHENAU (Émile), Directeur général de l'*Allegemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* et des *Berliner Elektrizitätswerke*, 22, Schiffbauerdamm, Berlin.

RATTNER (Paul), Directeur général pour la Russie de la *Société anonyme d'Électricité Helios*, Directeur de la *Société de constructions électriques de Saint-Pétersbourg*, 7, Spasskaïa, Saint-Pétersbourg (Russie).

RAU (Louis), Administrateur-délégué de la Compagnie continentale Edison, rue Montchanin, Paris.

RAVEAU (Camille), Préparateur à la Sorbonne, 5, rue des Écoles, Paris.

RAVEROT (Émile), 15, rue de Madrid, Paris.

REBUT (Gaston-Marie), Ingénieur de la *Maison Niclausse*, 24, rue des Ardennes, Paris.

RÉMON-CASAS (Lucien), Ingénieur civil, 275, boulevard Pereire, Paris.

RENARD (Louis-M.-J.-Ch.), Lieutenant-Colonel du Génie, 7, avenue des Tuvaux, Meudon (Seine).

RENAUD (Paul), Secrétaire général du *Mois scientifique et industriel*, Sous-Directeur de la *Maison Gaiffe et Cie*, 76, rue de la Pompe, Paris.

RENÉVILLE (Paul-Henri DE), 41, rue de l'Élysée, Grenoble (Isère).

RENNER (Guillaume), Ingénieur civil, 12, Augustinerplatz, à Cologne-sur-Rhin (Allemagne).

RENTELL (Sydney), Membre associé de l'*Institution of Electrical Engineers*, Rédacteur au journal *Electricity*, 2, Exeter Street, Strand, Londres.

REVEL (François), Ingénieur-électricien, Capitaine d'artillerie, Poudrerie de Fontana Livi (Italie).

REY (Jean), Ingénieur civil des Mines, 76, rue Mozart, Paris.

REY-PAILHADE (J. DE), Ingénieur civil des Mines, 18, rue Saint-Jacques, Toulouse (Haute-Garonne).

REYNIER (André), Ingénieur-électricien, 129, rue du Ranelagh, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

RICH (Francis-Arthur), B. Sc., Member Amer. Inst. Mechan. Eng., assoc. Member Amer. Inst. Electr. Eng., electrical. hydraulic and mining Engineer, general Manager Woodstock G. M. C°, Karangahar, à Auckland (Nouvelle-Zélande, Océanie).

RICHARD (Jules), Chevalier de la Légion d'honneur, Ingénieur constructeur, 25, rue Mélingue, Paris.

RIDEL (Adrien-Lucien), Constructeur-électricien, 6, rue du Paradis, Lisieux (Calvados).

RIEUNIER (Paul), Ingénieur des Arts et Manufactures, attaché à la *Compagnie de Fives-Lille*, 1, square Latour-Maubourg, Paris.

RILLIET (Albert), Professeur de Physique à l'Université de Genève, 16, rue Bellot, Genève (Suisse).

RILLIET (Frédéric), Étudiant en Médecine, 16, rue Bellot, Genève (Suisse).

RIZZO-DERY (Guillaume), Ingénieur mécanicien et électricien, Directeur des Constructions mécaniques aux Tramways du Caire (Égypte).

ROBARD (René), Administrateur-délégué de la Société *l'Éclairage électrique*, 141, rue de Rome, Paris.

ROBERT (Alexandre-Charlemagne), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur-conseil de l'Institut Pasteur, 14, rue de Hambourg, Paris.

ROBINSON (Mark-Heaton), Member of the Institution of civil Engineers, of Mechanical Engineers, of Electrical Engineers, of Naval Architects, Chairman of Willans and Robinson Limited Engine Builders Rugby; Overslade, Rugby (Angleterre).

ROCHEFORT (Octave), Ingénieur des Arts et Manufactures, 4, rue Capron, Paris.

RÖDLAND, Délégué au Congrès par le Gouvernement de la Norvège, Christiania.

ROMILLY (Félix DE), ancien Président de la *Société française de Physique*, 25, avenue Montaigne, Paris.

ROOSEN (Al.), Ingénieur des Télégraphes, délégué au Congrès par le Ministère des Chemins de fer, Postes et Télégraphes de Belgique, Hôtel des Postes et Télégraphes, Bruxelles (Belgique).

ROSENHECK (Leo), Ingénieur-électricien, 2 p., Palaswiesenstrasse, Darmstadt (Allemagne).

ROSSI (Luigi), Rappresentante tecnico: 8, piazza Paolo Ferrari, Milan (Italie).

ROTHER (Charles), Ingénieur, Sous-Directeur près la direction des Chemins de fer d'Autriche, Délégué au Congrès par le Gouvernement autrichien (Administration des chemins de fer), à Innsbruck (Autriche).

ROUART (Alexis), Constructeur mécanicien, 36, rue de Lisbonne, Paris.

ROUBANOWITCH (Wladimir), Électricien en chef du Bureau central télégraphique à Moscou, Inspecteur des installations électriques, rue Miasmitzkaïa, Moscou (Russie).

ROUSSEAU (Ernest), Professeur à l'*Université libre* de Bruxelles, 20, rue Vautier, Bruxelles (Belgique).

ROUSSEL (Maurice-Charles), Ingénieur attaché à la *Société industrielle des Téléphones*, 19, avenue Henri-Regnault, Sèvres (Seine-et-Oise).

ROUTIN (J.-L.), ancien Élève de l'*École Polytechnique*, Ingénieur-conseil, 15, rue Saint-Dominique, Lyon (Rhône).

ROUVILLE (DE), Directeur de la *Compagnie de Suez*, 9, rue Charras, Paris.

ROUX (Gaston-Henri-Charles), Ingénieur-conseil, Directeur du *Bureau de contrôle des installations électriques*, 12, rue de Clichy, Paris.

RUBINI (Alberto), Ingénieur, 8, via Giulini, Milan (Italie).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

RÜCKER (Hermann VON), Docteur ès Sciences, 10, avenue Mac-Mahon, Paris.

RUMI (Serens-A.), Ingénieur et Professeur à Gênes, via S. Luca, 3 B., Gênes (Italie).

RUNDO (Alfred), Élève de l'*Institut des Ingénieurs des Voies et Communications* de Saint-Pétersbourg, 9 Zabalkanski-Prospekt, Saint-Pétersbourg (Russie).

SABOURAIN (J.-A.), Inspecteur des Télégraphes, 32, rue du Four, Paris.

SABOURET (Victor), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Ingénieur principal de la Voie et des Travaux à la *Compagnie du Chemin de fer d'Orléans,* 132, rue de Rennes, Paris.

SACERDOTE (Paul), Docteur ès Sciences, 97, boulevard Saint-Michel, Paris.

SACQUET (Edmond), Ingénieur-électricien, 39, rue des Vignes, Paris.

SAMOYLOVITCH, Ingénieur-électricien à la Société russe électrique *Union*, Tramways électriques de Smolensk (Russie).

SANDOR BAK, Ingénieur-électricien, Budapest (Hongrie).

SANTERRE, 5, quai Malaquais, Paris.

SARAZIN (C.), Professeur aux Écoles d'Arts et Métiers et de Médecine d'Angers, Angers (Maine-et-Loire).

SARTIAUX (Albert), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Chef de l'Exploitation à la *Compagnie des Chemins de fer du Nord,* 40, boulevard de Courcelles, Paris.

SARTIAUX (Eugène), Ingénieur chef des services électriques au *Chemin de fer du Nord,* 48, rue de Dunkerque, Paris.

SAUTTER (Gaston), Ingénieur constructeur, 26, avenue de Suffren, Paris.

SAVATIER (Lucien), Ingénieur des *Forges et Chantiers de la Méditerranée,* à La Seyne (Var).

SCHADEN (Frédéric), Ingénieur en chef des Postes et Télégraphes, 10, Csömöri utca, Budapest VII (Hongrie).

SCHANSCHIEFF (Alexandre DE), Ingénieur-électricien, The Wells Burnley Road, à Halifax (Yorkshire, Angleterre).

SCHMIDT (Dr Oscar), Ingénieur, 10, Freigutstrasse, Zurich (Suisse).

SCHNEIDER et Cie, au Creusot, représentés par M. Lichtenberger, 1, boulevard Malesherbes, Paris.

SCHŒFFER (Louis), Ingénieur-électricien, 25, rue Mozart, Anvers (Belgique).

SCHŒN (Jean-Auguste), Ingénieur-conseil, 22, rue Margnolles, à Caluire-et-Cuire (Rhône).

SCHOULENBOURG (Comte Sergey DE), Ingénieur, Répétiteur à l'*Institut des Ingénieurs des Voies et Communications* de Saint-Pétersbourg, 6, Osernoï, Saint-Pétersbourg.

SCHOULTZ (Max DE), Lieutenant de la Marine Impériale Russe, 23, Possadskaja, à Cronstadt (Russie).

SCHULZ (Charles-Alex.), Ingénieur, Maschinenfabrik, à Königgrätz (Bohême).

SCHULZE (Otto), Ingénieur-électricien, Directeur de la *Société alsacienne d'Électricité,* 10, rue de l'Arc-en-Ciel, Strasbourg (Alsace-Lorraine).

SCHWAN (DE), Conseiller de cour, Sous-chef de service à la Chancellerie particulière de S. M. l'Empereur, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Russie (Administration des Institutions de l'Impératrice Marie).

SCHWARBERG (Eugène-Gustave), Ingénieur civil, Directeur de la *Compagnie électro-mécanique,* 11, avenue Trudaine, Paris.

SCHWEINGRUBER, Bureau de la Goule, Saint-Imier (Suisse).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

SCIAMA (Gaston), Membre de la Chambre de Commerce de Paris, Directeur de la *Maison Breguet,* 19, rue Didot, Paris.

SEBERT (le général H.), Membre de l'Institut, 14, rue Brémontier, Paris.

SECOURS (LE), Compagnie française d'assurances à primes fixes contre les accidents de toute nature, 15, rue des Pyramides, Paris.

SEEFEHLNER (Dr Egon-E.), Membre de la Société des Ingénieurs et des Architectes de Hongrie, IV. Ker., Ujvilág-Utca 2. Szám, Budapest (Hongrie).

SEKUTOWICZ (L.), Ingénieur des Arts et Manufactures, 28, rue des Rosselins, Suresnes (Seine).

SELLERIER (Carlos), Ingénieur des Mines, Inspecteur des Mines de la République Mexicaine, délégué au Congrès par le Gouvernement du Mexique, Secretaria de Fomento, Mexico (via New-York).

SELLON (R.-P.), délégué au Congrès par l'*Institution of Electrical Engineers of London,* 4, Chandos Street, Cavendish Square, London W.

SEMENOV (Jules), Licencié ès Sciences physiques, 28, rue du Moulin-de-Pierre, Clamart (Seine).

SEMENZA (Guido), Ingénieur-électricien en chef de la *Società italiana Edison d'Elettricità,* Società Edison, à Milan (Italie).

SERRA DI CASSANO (Louis), Ingénieur civil et Électricien, Palazzo Cassano, 14, Monte di Dio, Naples (Italie).

SERRIN (Henri), Ingénieur-électricien, 13, boulevard du Temple, Paris.

SHEPHERD, Engineer, 47, King Street, Mile-End, Glasgow (Écosse).

SHORT (Professeur Sydney-H.), Electrical Engineer, late Engineer in chief to *The Walker C°,* Cleveland (Ohio, U. S. A.), délégué au Congrès par le Gouvernement des États-Unis.

SICK (Paul), Électricien, à Thann (Alsace).

SIEMENS (Alexandre), Ingénieur civil, Délégué au Congrès par le Gouvernement de la Grande-Bretagne et par l'*Institution of Electrical Engineers of London,* 12, Queen Anne's Gate, Westminster-London W.

SILVANO (Emilio), Ingénieur, 8 Corso Re Alberto, Turin (Italie).

SIMONOT (Ernest), Ingénieur de la Marine, Ministère de la Marine, Paris.

SIRACUSA (Carminé), Ingénieur, Directeur technique de la *Société industrielle d'Électricité,* 1, via Barbaroux, Turin (Italie).

SIRE DE VILAR (Henri), Ingénieur des Arts et Manufactures, diplômé E. S. E., 3, rue Brown-Séquard, Paris.

SKOUGAARD (Jens), Ingénieur, The Dakota, New-York city (N.-Y., U. S. A.).

SKRZYNSKI (Cz. DE), Électricien, Ekatherinehofsky, prosp. 67, Saint-Pétersbourg (Russie).

SLATER (William-Paul), Électricien, 41, Breakspears R., Brockley (Angleterre).

SMIRNOFF (Alexandre), Colonel, Ingénieur-électricien, Président de la Section électrotechnique de la *Société Impériale Technique de Russie,* Rédacteur en chef du journal russe *Électricité,* 134, Canal Catherine, Saint-Pétersbourg.

SMITH (Jesse-M.), Consulting electrical and Mechanical Engineer, 220, Broadway, New-York (N.-Y., U. S. A.).

SNELL (Albion-J.), Ass. M. J. C. E., M. I. E. E.; Southview, Brondesbury Nd. (Angleterre).

SOCIETÀ D'INCORAGGIAMENTO D'ARTI E MESTIERI, représentée par M. le Professeur Francesco Grassi, 18, via Santa-Maria, Milan (Italie).

SOCIÉTÉ AMICALE DES INGÉNIEURS SORTIS DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ, 14, rue de Staël, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

SOCIÉTÉ ANONYME D'ÉLECTRICITÉ, ci-devant W. LAHMEYER et Cie (Francfort-sur-Main), représentée par M. Gino Dampieri, Ingénieur, 221, rue de l'Université, Paris.

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET ARCHITECTES HONGROIS, représentée par M. le Dr de Hoor-Tempis; Zsigmond-utca, 11, Budapest II (Hongrie).

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE, 44, rue de Rennes, Paris.

SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DE MULHOUSE, représentée par M. V. Kammerer, Mulhouse (Alsace).

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS, 14, rue de Staël, Paris.

SOCIÉTÉ LYONNAISE DE MÉCANIQUE ET D'ÉLECTRICITÉ, 40, avenue de Suffren, Paris.

SOMERHAUSEN (Georges), Ingénieur à la *Société Éclairage électrique* de Saint-Pétersbourg, 37, rue Fossé-aux-Loups, Bruxelles (Belgique).

SÖPKÉSZ (Alexandre), Ingénieur en chef des chemins de fer hongrois, Délégué au Congrès par le Gouvernement de la Hongrie, Lanczhid-utca, 3, Budapest II.

SÖPKÉSZ (Mme Alexandre), Lanczhid-utca, 3, Budapest II.

SOSNOWSKI (Kasimir), Ingénieur civil, Administrateur-Directeur de la *Société de Laval,* 13, rue Clément-Marot, Paris.

SOULIER (Alfred), Secrétaire de rédaction du journal *l'Industrie électrique,* 110, boulevard Arago, Paris.

SOUZA (Edgard DE), Ingénieur des Mines, Ingénieur-électricien, Caixa postal, 162, Saô-Paulo (Brésil).

STAMPA (Manuel-L.), délégué au Congrès par le Gouvernement du Mexique, 130, rue de Rennes, Paris.

STANDARD ELECTRIC COMPANY OF CALIFORNIA, Room 238, Crocker Building, San Francisco (California, U. S. A.).

STANOÏEVITCH (G.-M.), Professeur à la Faculté des Sciences de Belgrade, Directeur de l'observatoire de Belgrade, Belgrade (Serbie).

STANSFIELD (Hubert), B. Sc., 20, Halley, Blackburn (Angleterre).

STEELS (O.), Ingénieur, 10 *bis,* boulevard de Bruxelles, à Gand (Belgique).

STEFANESCU (Jon), Ingénieur-électricien, 81.r., Schlüterstrasse, Charlottenburg (Allemagne).

STEINGRABER (Charles), Ingénieur-électricien de la Société d'Électricité *Union,* 9, Rueppgasse, Vienne II (Autriche).

STEINMETZ (Charles-Proteus), Electrician *General Electric Co,* Schenectady (N.-Y., U. S. A.).

STJERNBERG (G.), Ingénieur, 221, rue de l'Université, Paris.

STRAUB (Alexandre), Professeur au Musée royal technologique de Budapest, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Hongrie, 6, József-Körút, Budapest VIII.

STRECKER (Dr Karl), Kaiserl. Ober-Telegrapheningenieur, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Allemagne, 20, Keithstrasse, Berlin W.

STREET (Charles), Ingénieur des Arts et Manufactures, 60, boulevard Haussmann, Paris.

SUENSON (Édouard), Commodore, Président et Directeur-administrateur de la *Grande Compagnie des Télégraphes du Nord,* 26, Kongens Nytorv, Copenhague (Danemark).

SWINTON (Campbell-A.), délégué au Congrès par l'*Institution of Electrical Engineers,* 66, Victoria Street, London S. W.

SYNDICAT PROFESSIONNEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES, 19, rue Blanche, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

SYNDICAT PROFESSIONNEL DES USINES D'ÉLECTRICITÉ, représenté par M. E. Fontaine, 27, rue Tronchet, Paris.

SZALAY (Pierre DE), Président de la Direction royale hongroise des Postes et Télégraphes, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Hongrie, Lánczid utcza, 3, Budapest.

SZARVADY (Géza), Répétiteur des cours d'Électricité à l'École centrale des Arts et Manufactures, 21, rue du Mont-Thabor, Paris.

TACHARD (André), Ingénieur civil, 7, rue Drouot, Paris.

TAINTURIER (Camille), Sous-Directeur de l'*Usine électrique des Moulineaux*, 5, rue du Départ, Meudon (Seine-et-Oise).

TÄUBER (Karl-Paul), Ingénieur, 34, Turnerstrasse, Zurich (Suisse).

TAVERNIER (René), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 7, rue de Bonnel, Lyon (Rhône).

TFINCH (Benjamin-J.), Directeur général du Département des Télégraphes indo-européens, délégué au Congrès par le Gouvernement des Indes Britanniques, India Office, Whitehall, Londres.

THEUNIS (Georges), Ingénieur-électricien, Ingénieur à la *Compagnie russe-française des Chemins de fer et Tramways*, 25, rue Charles-Martel, Bruxelles (Belgique).

THÉVENIN, Directeur de l'École professionnelle supérieure de Télégraphie, délégué au Congrès par le Ministère du Commerce, 103, rue de Grenelle, Paris.

THIERCELIN (Pierre), Directeur général de la *Compagnie pour l'éclairage des villes et la fabrication des compteurs et appareils divers*, 174, rue Lafayette, Paris.

THOMAS (Hippolyte), Ingénieur des Télégraphes, 44, rue Vaneau, Paris.

THOMAS (R.), Lieutenant de vaisseau, Officier d'ordonnance du Ministre de la Marine, détaché au Ministère de la Guerre, délégué au Congrès par le Ministère de la Marine, 15, rue Clément-Marot, Paris.

THOMINE, Lieutenant de vaisseau, délégué au Congrès par le Ministère de la Marine.

THOMPSON (Sylvanus-P.), F. R. A. S., Directeur du Collège technique de la Ville de Londres à Finsbury, Morland Chrislett Road West Hampstead, London N. W.

THOMSON (Elihu), Electrician *Thomson-Houston C°* and *General Electric C°*, à Swampscott (Mass., U. S. A.).

THRELFALL (Richard), F. R. S., Électrochimiste, 259, Hagley Road, Birmingham (Angleterre).

THURNAUER (E.), Administrateur-délégué de la *Compagnie française pour l'exploitation des procédés Thomson-Houston*, 60, rue Pierre-Charron, Paris.

THURY (René), Ingénieur en chef de la *Compagnie de l'Industrie électrique*, à Genève (Suisse).

TICIER (Armand), Ingénieur de la *Compagnie des Tramways de l'Est parisien*, 12, rue Halévy, Paris.

TISENHAUSEN (baron Gustave DE), Ingénieur du Palais d'hiver à Saint-Pétersbourg, Palais d'hiver, Saint-Pétersbourg.

TISSOT, Lieutenant de vaisseau, Professeur à l'École navale, délégué au Congrès par le Ministère de la Marine.

TISSOT (Édouard), Ingénieur, Directeur adjoint de la *Société suisse de l'Industrie électrique*, Bâle (Suisse).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

TOMITA (Tadanori), Examinateur au Bureau des Brevets au Ministère de l'Agriculture et du Commerce, délégué au Congrès par le Gouvernement du Japon, Bureau des Brevets, Tokio (Japon).

TORJUSSEN, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Norvège.

TOUANNE (DE LA), Ingénieur des Télégraphes, 8, rue de Tournon, Paris.

TOULON (Paul-Donat), Ingénieur principal du Matériel fixe à la *Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest,* délégué au Congrès par la Compagnie de l'Ouest, 75, rue Madame, Paris.

TOUNARD (André), Directeur des ateliers de la Société *Le Carbone,* 12 et 33, rue de Lorraine, Levallois-Perret (Seine).

TOWNSEND (Fitzhugh), Assistant Instructor in the Electrical Engineering Department, Columbia University, New-York City (N.-Y., U. S. A.).

TREMONTANI (Vittorio), Ingénieur à la Direction générale des Chemins de fer de la Méditerranée, chez M. J. Giordana, 20, via Vanchiglia, Turin (Italie).

TRIPIER (Henri), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur à la *Compagnie des Transports électriques de l'Exposition de* 1900, 17, rue Carvallotti, Paris.

TRNOVSKY (Johann), Ingénieur, délégué au Congrès par le Gouvernement de l'Autriche (Ministère de l'Intérieur), 5, Hoher Markt, Vienne, I (Autriche).

TURCHI (Carlo), Ingénieur-électricien, 89, via Giovecca, à Ferrare (Italie).

TURRETTINI (Théodore), Ingénieur, Directeur de la *Société genevoise pour la construction d'instruments de physique*, délégué au Congrès par la ville de Genève et l'*Association suisse des Électriciens,* à Genève (Suisse).

TYPALDO-BASSIA (A.), Député, Avocat à la Cour suprême, agrégé de l'Université, ancien délégué officiel de la Conférence télégraphique, délégué au Congrès par la Société grecque *Le Parnasse* et par la *Société biotechnique hellénique,* 23, rue des Philhellènes, Athènes (Grèce).

UHDE (Otto), Ingenieur der Bau-Deputation, 29, Ackermannstrasse, Hambourg (Allemagne).

ULMANN (Édouard), Ingénieur en chef de la *Compagnie d'Éclairage électrique* de Saint-Pétersbourg, 37, Podolskaïa, Saint-Pétersbourg (Russie).

UTINGER (Albert), Directeur des eaux, du gaz et de l'électricité, Membre de l'*Association suisse des Électriciens,* Bahnhofstrasse, Zoug (Suisse).

UYLIE (Alexandre), Ingénieur, Membre de l'*Institution of Electrical Engineers,* Kirkfield, Johnstone (Écosse).

VALTON (Henry), Ingénieur de la Marine, 10, rue de la Trémoille, Paris.

VAN DEN BERGHE (Charles), Ingénieur, Directeur des usines de la *Société anonyme Électricité et Hydraulique,* 9, rue de l'Athénée, Charleroi (Belgique).

VANDERSMISSEN (Prosper), Ingénieur, Administrateur-délégué de la Société anonyme *Electrorail,* 84, boulevard Anspach, Bruxelles (Belgique).

VANDEVELDE (Henri), Ingénieur de l'*Institut industriel du Nord,* Ingénieur de la *Compagnie générale électrique,* 33, rue Oberlin, Nancy (Meurthe-et-Moselle).

VAN DE WELL (G.-J.), Ingénieur, Professeur à l'École moyenne de Delft, Delft (Hollande).

VAN DE WIEL (Fernand), fondé de pouvoirs de M. Henri Tudor, 79, rue Joseph II, Bruxelles (Belgique).

VAN NES (J.-F.-A.), Ingénieur représentant de la *Maison Siemens et Halske* de Berlin, 9, rue Sédillot, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

VANONI (Louis), Chef de la section technique de la *Direction générale des Télégraphes* à Berne, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Suisse, à Berne (Suisse).

VAN VLOTEN (Paul-Édouard), Ingénieur honoraire des Mines, Ingénieur-électricien, 391, avenue Louise, Bruxelles (Belgique).

VAUGHAN-SHERRY (John), Electrical Engineer and Chemist, 28, Victoria street, London S. W.

VAUTIER, Professeur de Physique à la Faculté des Sciences de Lyon, 46, rue Centrale, Lyon (Rhône).

VEDOVELLI (Édouard), Ingénieur-constructeur, 160 et 162, rue Saint-Charles, Paris.

VERDOUX (Jean), négociant-électricien, 482, Grande-Rue de Péra, Constantinople (Turquie).

VERNIER (Charles), Ingénieur des Arts et Manufactures, constructeur-électricien, 22, avenue Victoria, Paris.

VÉRY (Hector), Ingénieur-électricien, 40, boulevard de Strasbourg, Paris.

VICARINO (Charles-Auguste), Administrateur-délégué de la *Compagnie générale électrique de Nancy,* 33, rue Oberlin, Nancy (Meurthe-et-Moselle).

VICTOR (E.), Ingénieur-électricien, Chef du service électrique à l'usine à gaz de Reims (Marne).

VIEUSSA (François), Chef des travaux de la *Compagnie de Suez,* 9, rue Charras, Paris.

VIGNON (Léo), Professeur à l'Université de Lyon, Institut de Chimie, rue de Béarn, Lyon (Rhône).

VIOLA (Georges-Navarro), Ingénieur-électricien, Membre de l'Association des Ingénieurs électriciens de Liége, Correspondant de la *Revista technica* de Buenos-Ayres, chalet Marie-Hector, à Berck-Plage (Pas-de-Calais).

VIOLET (Léon), Directeur des Ateliers *J. Carpentier,* 20, rue Delambre, Paris.

VIOLLE (J.), Membre de l'Institut, délégué au Congrès par le Ministère du Commerce, 89, boulevard Saint-Michel, Paris.

VIVAREZ (Henry), Ingénieur civil des Mines, expert près les Tribunaux, 12, rue de Berne, Paris.

VOJNAROVSKY (Paul DE), Ingénieur-électricien, Professeur à l'Institut électrotechnique de Saint-Pétersbourg, délégué au Congrès par le Gouvernement de la Russie (Ministère de l'Intérieur), Institut électrotechnique, Saint-Pétersbourg (Russie).

VOLLER (Dr A.), Professor und Director des Physikalischenstaats-Laboratoriums, Hambourg (Allemagne).

VOYER (Jules), Capitaine du Génie, Établissement central d'aérostation militaire, à Meudon (Seine-et-Oise).

WALCKENAER (Charles), Ingénieur en chef des Mines, 218, boulevard Saint-Germain, Paris.

WALMSLEY (Robert-Mullinem), D. Sc., F. R. S. E., Principal and Professor of Physics, Northampton Institute, London E. C.

WALTER (Louis-Georges), Ingénieur-électricien, à Apeldoorn (Hollande).

WATTIEZ, Professeur d'Électricité à l'Institut technique de Roubaix, 37, rue du Collège, à Roubaix (Nord).

WEAVER (William-D.), Editor of *Electrical World and Engineer,* 7, West 26th street, New-York (U. S. A.).

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

WEBBER (Charles-Edmund), Major général du Génie, en retraite, ancien président de *The Institution of Electrical Engineers*, commissaire britannique de l'Exposition d'Électricité à Paris en 1881, 27, Chancery Lane, London W. C.

WEBER (Dr H.-F.), Professeur à l'École Polytechnique fédérale suisse, délégué au Congrès par le Gouvernement helvétique, à Neumünster (Suisse).

WEST (Jul.-H.), Ingénieur, rédacteur à la revue *Elektrotechnische Zeitschrift*, Hollesche strasse, 20, Berlin (Allemagne).

WEILER (Max), Ingénieur électricien à la *Société Électricité et Hydraulique*, 34, rue d'Assaut, Charleroi (Belgique).

WEISS (Pierre), Maître de conférences à l'Université, 35, cours d'Herbouville. Lyon (Rhône).

WEISSKOPF (Sigmund), Ingénieur, délégué au Congrès par l'Administration des Chemins de fer autrichiens, 24, Vitekgape, Prague-Karlin (Bohême).

WEISSMANN (Gustave), Ingénieur des constructions civiles, E. C. P., 3, rue Chaptal, Paris.

WEKER (Ladislas DE), Ingénieur-technologue électricien, chef de la section électrique de la Fabrique des wagons de Saint-Pétersbourg, Porte de Moscou, à Saint-Pétersbourg (Russie).

WELLES (François), industriel, 46, avenue de Breteuil, Paris.

WELZ (Maurice DU), Ingénieur des Mines, Ingénieur-électricien, 76, la Villette. Charleroi (Belgique).

WEYDE (J.-F.), Professeur à l'École supérieure des Arts et Métiers de Kaschau, délégué au Congrès par le Ministère du Commerce de Hongrie, à Kaschau (Hongrie).

WHITE (J.-Gilbert), Electrical Engineer, 29, Broadway, New-York (U. S. A.).

WILLOT (Joseph), Inspecteur général des Postes et Télégraphes, 103, rue de Grenelle, Paris.

WITTMANN (François), Professeur à l'Université technique de Budapest (Hongrie).

WORMS (Jacques), Ingénieur des Arts et Manufactures, ingénieur de la Société *Le Carbone*, 12, rue de Lorraine, Levallois-Perret (Seine).

WRÓBLEWSKI (Witold), Ingénieur-électricien, *Electrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert und Cie*, Nuremberg (Allemagne).

WROUBLEWSKI (Félix), Électricien, 9, Bolchaja Moskowskaja, Saint-Pétersbourg (Russie).

WÜNSCHENDORFF (Eugène), Inspecteur général des Postes et Télégraphes, 92, rue de Rennes, Paris.

WYBAUW (Joseph), Ingénieur en chef, Directeur du Service d'Électricité de la ville de Bruxelles, délégué au Congrès par la ville de Bruxelles, 7, rue du Beau-Site, Bruxelles (Belgique).

WYLD (William), Electrical Engineer, Brontë Villa, Oakeswell, Wedmsbury (Angleterre).

WYSSLING (Walther), Ingénieur-électricien, Professeur à l'École Polytechnique de Zurich, Directeur de l'usine d'électricité *An der Sihl*, à Wädensweil près Zurich (Suisse).

YARKOWSKI (Wladislas), Ingénieur-chimiste, Institut technologique, Saint-Pétersbourg (Russie).

YVON (Paul), Directeur du Laboratoire de Micrographie de la Faculté de Médecine, 26, avenue de l'Observatoire, Paris.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

MM.

ZANARDO (Giovanni-B.), agent de brevets, 9, via Due Macelli, Rome (Italie).

ZEGERS (Luis-L.), Ingénieur et Professeur, à Santiago (Chili).

ZENGER (Charles-Venceslas), Conseiller de la Cour I. R., Professeur à l'École Polytechnique slave, rue du Belvédère, 18, III, à Prague (Bohême).

ZETTER (Charles), Directeur de la *Compagnie française d'Appareillage électrique*, 49, rue de Maubeuge, Paris.

ZINDER (Alfredo), Inspecteur technique du Télégraphe national de la République Argentine, Seccion Telegrafos, à Buenos-Ayres (République Argentine).

FIN.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES MATIÈRES.

COMMISSION D'ORGANISATION.

Composition 1
Règlement 3
Circulaire 4
Programme provisoire 5

RAPPORTS PRÉLIMINAIRES.

Première Section.

Récapitulation des décisions des Congrès antérieurs; par M. E. Hospitalier. 11
Unités et étalons 22
Photométrie; par M. J. Violle 23
Mesure précise des courants alternatifs et polyphasés; par M. G.-L. Addenbrooke 45

Deuxième Section.

Sous-Section A.

Sur la construction des machines dynamo-électriques; par M. Leblanc 63
Sur l'excitation des machines d'induction; par M. Leblanc 80
Conduite des alternateurs couplés en parallèle; par M. G. Chevrier 92
Sur les transformateurs statiques; par M. J.-L. Routin 105
Quelques idées nouvelles sur le mécanisme de l'électrolyse par les courants de retour des tramways; par M. G. Claude 154
Commutatrice et transformateurs redresseurs; par M. P. Janet 177
Condensateurs électriques pour hautes tensions; par M. L. Lombardi 183
Sur l'emploi des condensateurs; par M. P. Boucherot 190
Sur les mécanismes électromagnétiques; par M. P. Sylvanus Thompson 201

Sous-Section B.

Sur les progrès des lampes électriques; par M. A. Blondel 210
Intensité lumineuse de l'arc à courant continu; par Mme Ayrton 250
Rendement lumineux des lampes électriques à incandescence à filament de carbone; par M. C. Weissmann 269
Proposition d'un nouveau mode de tarification de courant électrique; par M. E. de Fodor 277
La lumière et la force motrice dans les théâtres; par M. L. Mornat 281

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

SOUS-SECTION C.

Prises de courant pour tramways; par M. POSTEL-VINAY 280

Troisième Section.

Dépôts électrochimiques; par M. HENRI BOUILHET 301
Les fours électriques; par M. KELLER 301

Quatrième Section.

État actuel et progrès de la Télégraphie sans fil par ondes hertziennes; par MM. A. BLONDEL et G. FERRIÉ 321

PROCÈS-VERBAUX.

SÉANCES GÉNÉRALES.

Séance d'ouverture du samedi 18 août 1900.

Discours de M. MOUGEOT 345
Discours de M. MASCART 346

Séance de clôture du samedi 25 août 1900.

Discours de M. MAILLOUX 355
Discours de M. MASCART 360
Réponses de MM. Ayrton, Kohlrausch, Turrettini, Eric Gerard, de Fodor 365

COMMISSION DES DÉLÉGUÉS OFFICIELS DES GOUVERNEMENTS.

Séance du 24 août 1900 368

SÉANCES DES SECTIONS.

Première Section.

Séance du lundi 20 août 1900.

Commission des unités 372
La Photométrie; par M. CORNU 373
Représentation des radiations; par M. CROVA 373

Séance du mardi 21 août 1900.

Redressement des courants alternatifs; par MM. CLAUDE et HILDBURGH 374
Étalon de force électromotrice; par M. ARNOUX 377
Applications mécaniques des phénomènes électriques; par M. WEYDE 378

Séance du mercredi 22 août 1900.

Les oscillographes; par M. BLONDIN 378
Mesure précise des courants alternatifs; par M. ADDENBROOKE 380

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Séance du jeudi 23 août 1900.

La Photométrie; par M. VIOLLE 380
Appareils de mesure de la fréquence des courants alternatifs; par M. KEMPF-HARTMANN 381
Étude d'alternateurs diphasés et triphasés; par M. BLONDIN 381

Séance du vendredi 24 août 1900.

Rapport de la Commission des unités; par M. HOSPITALIER 382
Galvanomètre thermique; par M. ARNOUX 385
Télévision au moyen de l'électricité; par M. PERSKYI 386

Deuxième Section.

SOUS-SECTION A.

Séance du lundi 20 août 1900.

Système de prise de courant; par M. BÈDE 387
Sur la prédétermination de la chute de tension dans les alternateurs polyphasés; par M. A. BLONDEL 388
Compoundage des alternateurs; par M. BLONDEL. (Ces deux Notes sont présentées par M. REY.) 389
Sur l'application des dynamos survoltrices au réglage automatique de la force électromotrice des batteries d'accumulateurs; par M. THURY 389

Séance du mardi 21 août 1900.

Mécanismes électromagnétiques; par M. S. THOMPSON 390
Construction des machines dynamo-électriques; par M. LEBLANC 391
Résistance des voitures automotrices à la traction; par M. Ernest GERARD. 391
Système de traction à contacts superficiels; par M. DOLTER 393

Séance du mercredi 22 août 1900.

Essais et mesure d'une installation à haute tension; par M. SEMENZA 393
Compoundage des alternateurs; par M. BOUCHEROT 394
Sur les transports à haute tension au moyen de courant continu en série.. 397
Sur l'accouplement des alternateurs au point de vue des harmoniques; par M. PÉROT 403

Séance du jeudi 23 août 1900.

Sur les alternateurs compound et les transformateurs statiques; par M. ROUTIN 404
Résistance des voitures à la traction; par M. E. GERARD 404
Sur le mécanisme de l'électrolyse par les courants de retour; par M. CLAUDE. 406
Sur le halage électrique des bateaux par remorqueurs et automobiles; par L. GERARD 406

Séance du vendredi 24 août 1900.

Sur la théorie et les essais d'une commutatrice; par M. P. JANET 407
Sur l'emploi des condensateurs à haute tension; par MM. LOMBARDI et BOUCHEROT 411

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Sur la théorie graphique de la régulation des convertisseurs rotatifs; par M. BLONDEL..... 415
Sur la manière de calculer la hauteur d'enroulement des électros connaissant l'excitation en ampères-tours et l'épaisseur de l'enroulement; par M. WEYLER. 415
Sur l'emploi des condensateurs; par M. LEBLANC..... 416
Sur la puissance virtuelle dans les réseaux à courants alternatifs; par M. BOUCHEROT..... 423

SOUS-SECTION B.

Séance du lundi 20 *août* 1900.

Sur les progrès des lampes électriques; par M. A. BLONDEL..... 426

Séance du mardi 21 *août* 1900.

Sur la proposition d'un nouveau mode de tarification du courant électrique; par M. DE FODOR..... 428
Sur l'électricité et la force motrice au théâtre; par M. MORNAT..... 430
Sur l'emploi des condensateurs dans les lampes à arc à courant alternatif; par M. CLAUDE..... 431

Séance du mercredi 22 *août* 1900.

Sur l'emploi des lampes à gros filament et à basse tension; par M. WEISSMANN..... 436
Sur l'emploi des lampes à arc; par M. BOCHET..... 436
Sur les progrès des lampes à incandescence; par M. AYRTON..... 437

Séance du jeudi 23 *août* 1900.

Sur l'intensité lumineuse de l'arc à courant continu; par Mme AYRTON..... 439
Sur le rendement comparatif des arcs à courant continu et alternatifs; par MM. BLONDEL et JIGOUZO..... 440
Tarif différentiel; par M. PELLISSIER..... 442

Séance du vendredi 24 *août* 1900.

Sur les lampes à incandescence sans culot; par M. LORÇAY..... 443
Sur l'essai des charbons des lampes à arc; par M. BLONDEL..... 443
Installations électriques gratuites; par M. STANOIEVITCH..... 443
Sur les lampes à incandescence à gros filament; par MM. BAINVILLE et WEISSMANN..... 444 et 446
Résistances métallo-céramiques Parvillée; par M. BLONDIN..... 447

SOUS-SECTION C.

Séance du jeudi 23 *août* 1900.

Pavé de contact magnétique; par M. DOLTER..... 448
Système de traction électromagnétique; par M. VEDOVELLI..... 449

Séance du vendredi 24 *août* 1900.

Prises de courant pour tramways; par M. POLLAK..... 449
Système de pavé à double boîte; par M. DOLTER..... 451
Sur l'utilisation de l'électricité pour les grandes vitesses; par M. VEDOVELLI. 451

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Troisième Section.

Séance du mardi 21 *août* 1900.

Désignations unitaires proposées par le Congrès de Chimie; par M. BLONDIN. 453
Les fours électriques; par M. KELLER 454
Principes de l'analyse électrolytique; par M. HOLLARD 456

Séance du mercredi 22 *août* 1900.

Utilisation des eaux de mer à la production de l'énergie électrique; par M. ZENGER 457

Quatrième Section.

Séance du 20 *août* 1900.

Réseaux téléphoniques à grande capacité; par M. ANDRÉ 458
Dirigeabilité des appareils de télégraphie par les ondes électriques; par M. BLOCHMANN 459

Séance du mardi 21 *août* 1900.

Sur les applications des récepteurs téléphoniques à la télégraphie sans fil; par M. DE CHATELAIN 460
Sur la télégraphie sans fil; par MM. WILLOT, TISSOT et GAVEY 462
Applications des microphones sous-marins à la sécurité des pêcheurs de Terre-Neuve; par M. CHAYE-PACHA 463
Sur les canalisations téléphoniques souterraines; par M. ROOSEN 463

Séance du mercredi 22 *août* 1900.

Sur l'état actuel et les progrès de la Télégraphie sans fil; par MM. BLONDEL et FERRIÉ 464
Télégraphe rapide écrivant de MM. Pollak et Viràg; par M. PINTÉR 465
Sur les transformateurs unipolaires; par M. O. ROCHEFORT 466

Séance du jeudi 23 *août* 1900.

Transmetteur télégraphique à ondes sinusoïdales; par MM. SQUIER et CREHORE 467
Sur les cohéreurs décohérents; par M. FERRIÉ 468
Sur les mouvements de la limaille dans les cohéreurs; par M. SEMENOV 469
Sur l'utilisation de la télégraphie sans fil pour éviter les collisions en mer; par M. BODDE 470

Cinquième Section.

Séance du lundi 20 *août* 1900.

Analogies entre la constitution des lignes de force magnétiques et électromagnétiques dans les machines et les dispositions des cellules dans les plantes; par M. STANOÏEVITCH 472

Séance du mardi 21 *août* 1900 474

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

LISTE DES MEMBRES DU CONGRÈS.

Délégués officiels des Gouvernements..... 475
Délégués des Sociétés savantes et techniques..... 481
Liste générale des Membres..... 484

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

Les Mémoires présentés pendant le Congrès seront publiés en **Annexes,** in extenso *ou* en analyse, *dans un second Volume actuellement en préparation.*

LE RAPPORTEUR GÉNÉRAL.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires

29046 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins, 55.

Droits reservés au Cnam et à ses partenaires