

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur(s)	Gillet de Valbreuze, Robert (1877-1953)
Titre	Notions générales sur la télégraphie sans fil
Adresse	Paris ; Liège : Librairie polytechnique Ch. Béranger, éditeur successeur de Baudry et Cie, 1910
Edition	4e édition entièrement remaniée, complétée et mise à jour
Collation	1 vol. (III-484 p.) : ill. ; 25 cm
Nombre de vues	494
Cote	CNAM-BIB 8 Ca 361 bis
Sujet(s)	Radiotéléphonie Télégraphie sans fil Téléphonie sans fil Électricité
Thématique(s)	Technologies de l'information et de la communication
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	21/01/2021
Date de génération du PDF	06/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/023968117
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8CA361BIS

NOTIONS GÉNÉRALES
SUR
LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL
ET
LA TÉLÉPHONIE SANS FIL



NOTIONS GÉNÉRALES

SUR

8^e Ca 361 bis

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

ET

LA TÉLÉPHONIE SANS FIL

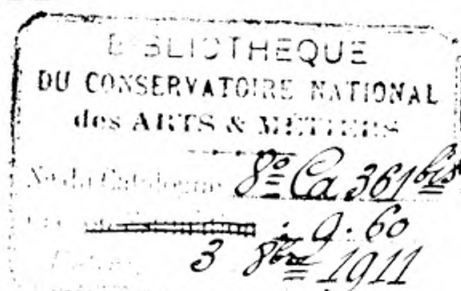
PAR

R. DE VALBREUZE

Ancien Officier du Génie,
Ingénieur-Électricien.

4^e ÉDITION

ENTIÈREMENT REMANIÉE, COMPLÉTÉE, ET MISE A JOUR



PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER, ÉDITEUR

SUCCESSEUR DE BAUDRY ET C^{ie}

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MÊME MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1910

PRÉFACE

Le succès qu'a remporté notre petit livre, et la rapidité avec laquelle ont été épuisées ses trois premières éditions, nous ont déterminé à le remanier entièrement et à le compléter. Les anciens chapitres ont été considérablement étendus; plusieurs chapitres supplémentaires leur ont été adjoints; enfin, une partie nouvelle, consacrée à la Radiotéléphonie, a été ajoutée. Sous sa forme actuelle, le volume a vu presque tripler son nombre de pages, par suite de ces modifications et adjonctions.

Mais si la disposition générale et l'étendue des matières traitées ont subi un changement important, l'esprit de l'ouvrage est toujours resté le même. La lecture n'en est pas devenue plus difficile, bien au contraire: elle peut être entreprise avec profit par n'importe qui, car elle n'exige qu'une connaissance tout à fait rudimentaire des principales lois de la Physique.

Le plan de l'ouvrage est le suivant :

Une courte **Introduction**, destinée aux lecteurs qui n'ont aucune connaissance en **Électrotechnique**, leur permet d'acquérir rapidement et sans difficulté des notions nettes sur *le potentiel, les phénomènes de charge et de décharge, le courant électrique, le champ magnétique, l'induction électromagnétique (induction mutuelle et induction propre), les générateurs électri-*

ques, les machines à courant continu et à courant alternatif, les bobines de self-induction et les transformateurs.

La **Première Partie** est consacrée à l'étude des **Oscillations électromagnétiques**. Elle débute par une *explication générale des mouvements vibratoires et des lois de la Radiation*, après quoi nous avons essayé de bien faire comprendre de quelle façon sont engendrées les *vibrations propres d'un circuit oscillant* et comment sont produites les *oscillations amorties ou entretenues*, puis nous avons étudié en détail les *oscillations complexes de deux circuits accouplés ensemble et les effets de résonance* qui se manifestent quand ces circuits ont même période propre de vibration. Enfin nous avons rappelé les *découvertes de Hertz* et indiqué de quelle façon ce savant est parvenu à produire des ondes électromagnétiques ou des *rayons électriques*.

La **Deuxième Partie**, de beaucoup la plus volumineuse, est relative à la **Radiotélégraphie**. Après avoir rappelé brièvement les *premières découvertes et expériences* par lesquelles la télégraphie sans fil a vu le jour, nous avons décrit les *différents types de détecteurs d'ondes* et leur emploi, étudié les *modes de fonctionnement et d'utilisation des antennes transmettrices et réceptrices*, passé en revue les appareils imaginés pour la *mesure des longueurs d'onde*, examiné les difficultés du *problème de la syntonie et de la direction des ondes* ainsi que les diverses solutions proposées pour le résoudre. Ensuite, nous avons abordé la *description des différents dispositifs successivement utilisés en Radiotélégraphie*, puis de ceux qui ont été *nouvellement imaginés*. Enfin, nous avons donné des *indications sur les différents appareils employés dans la pratique* et décrit les *installations d'un certain nombre de postes radiotélégraphiques*.

Dans la **Troisième Partie**, consacrée à la **Radiotéléphonie**, nous avons rappelé sommairement les *conditions générales du problème de la transmission de la parole* et l'application de ces

conditions à la transmission par ondes électromagnétiques ; après quoi nous avons mentionné les *premières expériences de téléphonie sans fil*, passé en revue les *différents dispositifs adoptés*, et décrit les *appareils radiotéléphoniques employés actuellement*, qui ont permis de transmettre et d'entendre la parole à des distances de quelques centaines de kilomètres.

Pour terminer, nous tenons à rappeler que ce livre a un caractère général : son but n'est pas d'énumérer et de décrire les nombreux appareils construits ou proposés jusqu'à ce jour, mais de donner une idée exacte des phénomènes sur lesquels repose la Radiotélégraphie ou la Radiotéléphonie, et des méthodes mises en jeu pour la transmission et la réception des signaux ou de la parole.

Comme tel, il s'adresse à tous ceux qui désirent s'instruire et se tenir au courant des progrès de la science. En outre, il peut être utile à bon nombre d'ingénieurs, et même de spécialistes, car il indique les résultats de toutes les études théoriques et expérimentales les plus récentes, grâce auxquelles la Radiotélégraphie et la Radiotéléphonie ont pu progresser d'une façon si remarquable.

Paris, mai 1910.

NOTIONS GÉNÉRALES
SUR
LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL
ET
LA TÉLÉPHONIE SANS FIL

INTRODUCTION

NOTIONS SOMMAIRES D'ÉLECTROTECHNIQUE

CHAPITRE I

PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES, ÉLECTRODYNAMIQUES
ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Avant d'étudier les modes de production des ondes électromagnétiques, sur la propagation desquelles repose la Radiotélégraphie, il est nécessaire de passer rapidement en revue les principales notions relatives à l'état électrique d'un corps (phénomènes statiques) ou à la génération et aux effets du courant électrique (phénomènes dynamiques et électromagnétiques)⁽¹⁾.

(1) Cette *introduction* a pour but de permettre, aux lecteurs qui n'ont aucune connaissance en Électrotechnique, la compréhension de tous les phénomènes dont il sera question dans la suite.

Potentiel.

L'état électrique d'un corps est caractérisé par l'énergie de position ou énergie potentielle que possède ce corps.

Pour comprendre ce dont il s'agit, considérons un corps pesant placé à une certaine hauteur, sur une table par exemple. Si l'on enlève brusquement la table, le corps tombe, et, dans sa chute, il est capable de produire un certain travail dont la valeur dépend de son poids et de sa hauteur de chute.

Puisqu'il peut fournir un travail, c'est qu'il possédait, dans sa position primitive, une certaine énergie, dite *énergie de position* ou *énergie potentielle*. Cette énergie était égale en valeur au travail que le corps est susceptible de produire dans sa chute, lequel travail est équivalent à celui qu'on avait dû dépenser pour soulever le corps et l'amener sur la table en surmontant les forces de la pesanteur.

Au lieu d'une région de l'espace où s'exercent les forces de la pesanteur et où l'on envisage les propriétés d'un corps pesant, considérons maintenant une *région de l'espace où s'exercent des forces électriques* et un corps électrisé, c'est-à-dire chargé d'électricité (1).

Une région dans laquelle se manifestent des forces électriques est appelée champ électrique. Nous verrons dans la suite comment il peut exister des champs électriques.

Pour amener un corps électrisé depuis un point situé en dehors du champ électrique jusqu'en un point situé dans

(1) On apprend, dans la physique élémentaire, qu'il est possible d'électriser un corps par différents procédés.

ce champ, on devra développer un certain travail, puisqu'il faudra lutter contre l'action des forces électriques : réciproquement, le corps, parvenu en ce point, sera capable d'effectuer, sous l'action des forces électriques, un certain travail de même grandeur que le précédent.

En un point du champ électrique, le corps électrisé possède donc une certaine énergie de position, ou énergie potentielle. On dit qu'il a un certain potentiel.

Il est facile de voir, d'après ce qui vient d'être dit, que le potentiel est égal au travail qu'effectueraient les forces du champ électrique pour déplacer le corps depuis le point qu'il occupe dans le champ jusqu'à la limite de ce champ, travail égal en valeur au travail qu'il a fallu développer pour amener le corps depuis la limite du champ jusqu'au point qu'il occupe.

Le potentiel de la terre est pris comme point de comparaison et est supposé nul par définition : le potentiel d'un corps aura donc une valeur positive (+) ou négative (−) suivant qu'il sera supérieur ou inférieur au potentiel de la terre.

Certains appareils ou machines électriques, dont il sera question plus loin, permettent de produire entre deux points une *différence de potentiel* donnée.

Charge électrique.

Prenons un corps bon conducteur⁽¹⁾ de l'électricité, une sphère métallique par exemple, et, au moyen d'une machine électrique, portons cette sphère à un certain potentiel A ⁽²⁾.

(1) On sait qu'il existe des corps bons conducteurs de l'électricité, brièvement appelés *conducteurs*, et des corps mauvais conducteurs de l'électricité, brièvement appelés *isolants*.

(2) La machine électrique permet de produire une certaine différence de poten-

Nous pourrions constater, par des méthodes dans le détail desquelles il est inutile d'entrer, que, quand le potentiel a une valeur A , la sphère porte une charge d'électricité Q proportionnelle à A ,

$$Q = CA.$$

La constante de proportionnalité C s'appelle la capacité électrique de la sphère; elle caractérise celle-ci au point de vue de certaines de ses propriétés électrostatiques.

Tous les corps conducteurs isolés ont une certaine capacité électrique, en général très faible. Certains appareils particuliers présentent une capacité relativement grande que l'on utilise pour la production des oscillations électriques: ces appareils sont nommés *condensateurs*.

Condensateurs.

Prenons deux plaques métalliques isolées et plaçons-les à quelques millimètres l'une de l'autre, puis, en les reliant à une machine électrique, établissons entre elles une certaine différence de potentiel.

Nous pouvons constater que le système formé par les deux plaques de métal et la lame d'air qui les sépare prend une certaine charge électrique⁽¹⁾. Nous aurons réalisé ainsi un *condensateur*.

Si maintenant, au lieu d'une lame d'air, nous introduisons entre les deux plaques une autre substance isolante, une

tiel: on pourra donc créer cette différence de potentiel entre la sphère et la terre, et, comme le potentiel de celle-ci est nul par définition, la sphère se trouvera portée à un certain potentiel, dont la valeur sera égale à la valeur de la différence de potentiel produite par la machine.

(1) On pourra mettre cette charge en évidence en elevant la machine électrique et en reliant les deux plaques à un appareil de mesure, à travers lequel le système se déchargera.

lame de verre par exemple, nous constatons que la charge électrique prise par le système, pour la même différence de potentiel que précédemment et pour le même écartement des plaques, a augmenté d'une façon importante. Avec une lame de verre par exemple, la valeur de la charge électrique sera devenue six ou sept sept fois plus grande. Cela prouve que la capacité du système a augmenté.

La charge électrique d'un condensateur est due à une déformation permanente (probablement de même nature qu'une déformation élastique) d'un certain milieu hypothétique, nommé éther, qui fait partie de la substance (gazeuse, liquide ou solide) comprise entre les plaques. L'augmentation de capacité constatée quand on remplace la lame d'air par une lame de verre provient de ce que les déformations élastiques de l'éther interposé entre les plaques ne sont pas les mêmes pour les différents isolants au sein desquels se trouve l'éther.

Les corps isolants, solides, liquides ou gazeux, peuvent seuls présenter de telles déformations élastiques de l'éther qu'ils contiennent : ces corps sont appelés diélectriques.

Dans les corps conducteurs au contraire, il ne peut jamais y avoir de déformations permanentes, mais seulement des phénomènes de propagation.

En général, les condensateurs employés en télégraphie sans fil sont du type de la *bouteille de Leyde*, formée d'un vase ou d'un tube en verre dont les surfaces intérieure et extérieure sont revêtues chacune d'une feuille métallique, nommée armature. On emploie aussi des condensateurs composés de plusieurs lames plates en verre revêtues d'une armature métallique sur chacune de leurs faces et immergées dans un liquide isolant, tel que le pétrole.

Pour obtenir une capacité plus ou moins grande, on ac-

couple entre eux un nombre plus ou moins considérable de condensateurs semblables.

Dans la pratique de la radiotélégraphie et de la radiotéléphonie, on se sert constamment de *condensateurs réglables*, dont on peut faire varier facilement et commodément la capacité d'une manière progressive. En général, ces appareils comprennent une série de plaques ou armatures fixes et une série de plaques mobiles : un dispositif quelconque à pivotement ou à glissement permet de modifier la surface de recouvrement des plaques mobiles par rapport aux plaques fixes, et de faire varier ainsi la capacité de l'ensemble.

Décharge électrique.

Considérons, comme précédemment, une sphère métallique A (fig. 1) que nous chargeons au potentiel A. Plaçons à

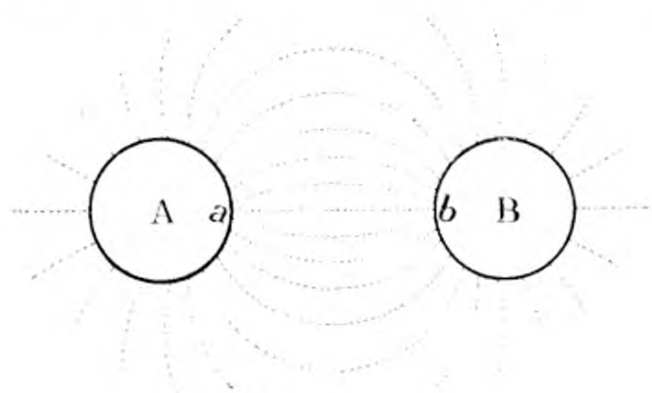


FIG. 1.

une certaine distance de cette sphère A une seconde sphère B que nous chargeons au potentiel B. Il existe entre les deux sphères une *différence de potentiel* (A-B) dont la valeur est déterminée d'après les valeurs du potentiel A et du potentiel B. Sous l'effet de cette différence de potentiel (A-B), il se manifeste, entre les deux sphères, certaines *forces électriques*,

dont la valeur est proportionnelle à la différence de potentiel (A-B) qui les crée.

La région de l'espace dans laquelle s'exercent les forces électriques, dues à la présence des sphères chargées A et B, est appelée champ électrique.

*La direction des forces électriques est caractérisée par certaines lignes imaginaires, nommées **lignes de force électriques** : celles-ci sont représentées en pointillé sur la figure 1.*

L'intervalle entre les deux sphères A et B est supposé rempli par de l'air, ou par tout autre isolant gazeux, liquide ou solide (diélectrique). La plus petite épaisseur du diélectrique qui sépare les deux sphères est la distance *ab*. Si cette épaisseur *ab* est suffisante pour résister à l'action des forces électriques, proportionnelles à la différence de potentiel (A-B), les deux sphères conservent leurs potentiels respectifs. Si, au contraire, l'épaisseur *ab* n'est pas suffisante pour résister à l'action des forces électriques, celles-ci occasionnent un percement ou une rupture violente du diélectrique, et une *étincelle* jaillit entre les points *a* et *b* : cette étincelle produit un certain travail, qui se manifeste par des effets lumineux et calorifiques ; ce travail est fourni au dépens de la charge des deux sphères.

*L'ensemble de ce phénomène est appelé **décharge électrique**.*

C'est lui qui donne lieu, lors des orages, à la production d'éclairs jaillissant entre deux nuages chargés à des potentiels inégaux par leur frottement contre les couches supérieures de l'atmosphère.

Après la décharge, on constate que les potentiels des deux sphères se sont égalisés, chacun d'eux prenant une valeur à peu près égale à la moyenne des potentiels A et B. Si, en particulier, les deux sphères étaient chargées à des potentiels égaux en valeur absolue, mais de signes contrai-

res (+ et -), le potentiel de chacune d'elles est à peu près nul après la décharge.

Courant électrique.

Supposons maintenant que le diélectrique compris entre les deux sphères chargées A et B soit suffisamment épais pour résister à l'action des forces électriques : dans ces conditions, la décharge ne peut pas se produire.

Relions les deux sphères l'une à l'autre par un fil bon conducteur. Nous pourrions constater qu'il se produit dans ce fil un certain phénomène dynamique, par lequel les potentiels des deux sphères tendent à s'égaliser comme dans le cas précédent.

Ce phénomène dynamique est appelé courant électrique, car il se présente sous la forme d'un flux d'électricité allant d'une sphère à l'autre. Son passage se manifeste par des effets déterminés tels que l'échauffement du fil conducteur qui, s'il est assez fin, peut être amené au blanc incandescent ou même être fondu.

Le courant électrique qui passe dans le fil reliant les deux sphères prend fin aussitôt que les potentiels de celles-ci se sont égalisés. Sa durée, toujours très courte, dépend de la résistance qu'oppose à son passage le fil métallique, c'est-à-dire de la **résistance électrique** du conducteur reliant les deux sphères ⁽¹⁾ : elle dépend aussi de la valeur de la différence de po-

(1) La résistance électrique d'un conducteur dépend de sa nature, et de sa grosseur. Les différents métaux sont plus ou moins bons conducteurs : on dit qu'ils ont une certaine *conductibilité électrique*. Le cuivre ayant une conductibilité électrique beaucoup plus élevée que tous les autres métaux usuels, c'est lui que l'on emploie généralement dans l'établissement des appareils et des circuits électriques. On se sert parfois aussi d'aluminium à cause de sa légèreté.

tentiel qui donne naissance au courant. Quand celui-ci a pris fin, aucun phénomène électrique ne se manifeste plus entre les deux sphères A et B, puisqu'il n'existe plus entre elles aucune différence de potentiel.

Pour pouvoir produire, d'une façon permanente, un courant électrique dans un circuit conducteur ininterrompu ⁽¹⁾, on a dû inventer des appareils ou des machines électriques capables de maintenir d'une façon permanente, entre deux points de ce circuit, une **différence de potentiel** déterminée. Cette différence de potentiel est due à une certaine force interne, dite **force électromotrice**, qu'engendre l'appareil ou la machine électrique au détriment d'une source d'énergie quelconque (énergique chimique, ou mécanique, ou calorifique). Tant que dure la force électromotrice, la différence de potentiel entre les deux points du circuit entre lesquels est intercalée la machine électrique donne naissance, dans ce circuit, à un courant électrique permanent.

L'intensité du courant est proportionnelle à la différence de potentiel qui lui donne naissance et est inversement proportionnelle à la résistance électrique du circuit.

L'unité d'intensité de courant est appelée un ampère.

L'unité de différence de potentiel est appelée un volt ⁽²⁾.

Les appareils servant à la mesure du courant sont appelés des *ampèremètres*; les appareils servant à la mesure de la différence de potentiel sont appelés des *voltmètres*.

(1) Comprenant, par exemple, des lampes électriques, des moteurs électriques, etc., reliés entre eux par des fils métalliques : un tel ensemble est appelé brièvement *circuit électrique*.

(2) L'énergie électrique (produite par une machine, ou dissipée dans un circuit) est donnée par le produit de l'intensité de courant par la différence de potentiel.

L'unité de puissance (un volt \times un ampère) est appelée un *watt*. En pratique, on emploie comme unité le *kilowatt*, ou 1000 watts.

Parmi les différents types d'ampèremètres, il en est un dont on fait très souvent usage en radiotélégraphie : c'est l'*ampèremètre thermique*. Dans cet appareil, on utilise, pour la mesure de l'intensité du courant, la dilatation d'un fil fin, due à l'échauffement que produit dans ce fil le passage du courant à mesurer.

La figure 2 indique l'un des montages que l'on peut réaliser à cet effet. Le fil fin f est tenu entre deux bornes BB' . En son milieu est fixé un fil de soie s qui passe sur une petite poulie P et est tiré par un ressort R . Quand le fil f se dilate, il prend, par exemple, sous l'effet de la traction du fil s , la position figurée en pointillé. La poulie P

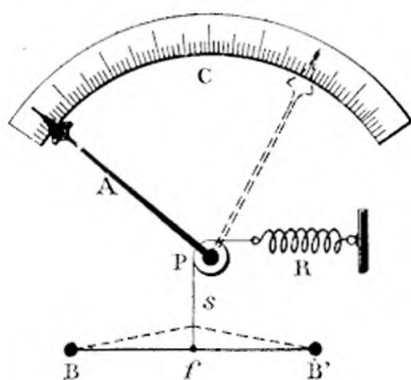


FIG. 2.

tourne alors d'un certain angle rendu visible par le déplacement de l'aiguille A , fixée sur elle, et disposée devant un cadran C . Le ressort R est généralement un ressort à lame, plus commode et moins encombrant.

D'après les connaissances actuelles, il est très probable que le courant électrique dans un conducteur est dû à un déplacement ou transport de petites charges d'électricité, nommées *électrons*, qui sont supposées former les parties constitutives de tous les atomes matériels.

Dans les corps bons conducteurs de l'électricité, les atomes auraient la propriété de pouvoir échanger de proche en proche leurs électrons, d'où résulterait le phénomène de propagation que l'on appelle courant électrique.

Dans les corps mauvais conducteurs (diélectriques), au

contraire, de tels déplacements des électrons ne pourraient pas se produire.

Quoi qu'il en soit, nous avons vu que le courant électrique circulant dans un conducteur a une intensité proportionnelle à la différence de potentiel qui l'engendre et inversement proportionnelle à la résistance qui s'oppose à son passage. *La résistance électrique est proportionnelle à la longueur du conducteur et inversement proportionnelle à sa section et à sa conductibilité électrique* ⁽¹⁾. Elle est analogue à la résistance qu'oppose un tuyau à la circulation d'un liquide, résistance qui dépend évidemment de la longueur du tuyau et de sa section.

Champ magnétique.

Les propriétés des aimants sont bien connues. Si l'on place une feuille de papier au-dessus d'un barreau aimanté et si l'on saupoudre celle-ci avec de la limaille de fer, on voit que les grains de limaille s'agglomèrent suivant certaines lignes en formant des chaînettes (fig. 3).

Ces lignes sont dites lignes de force magnétiques : leur ensemble

(1) On a fréquemment besoin, pour régler l'intensité du courant, d'augmenter ou de diminuer la résistance que présente un circuit électrique. Pour cela, on intercale dans ce circuit une plus ou moins grande longueur de fils d'un métal peu conducteur, tel que le maillechort, le ferro-nickel, etc.

Certains appareils, nommés *rhéostats*, permettent de graduer la longueur du fil résistant mis en circuit. Ils comprennent un grand nombre de boudins ou de bobines de fil reliés à des touches sur lesquelles vient frotter un contact mobile.

Dans le langage courant, on appelle brièvement *Résistance* un groupe plus ou moins important de fils résistants. On dit simplement qu'on intercale une résistance dans un circuit ou qu'on met une résistance en circuit. Inversement, on dit qu'on met une résistance hors circuit ou qu'on *court-circuite* une résistance, pour exprimer qu'on retire des fils résistants de ce circuit ou qu'on annule leur effet en les doublant par un fil non résistant.

constitue un **flux magnétique** qui semble sortir de l'aimant par

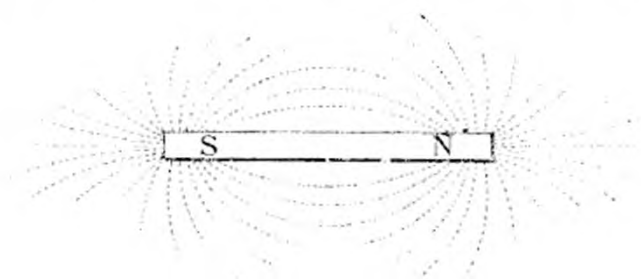


FIG. 3,

le pôle Nord pour y rentrer par le pôle Sud, les lignes de force s'étalant en éventail aux deux extrémités du barreau et se resserrant à l'intérieur de celui-ci, où elles semblent aller du pôle Sud au pôle Nord.

Toute région de l'espace dans laquelle il existe des lignes de force magnétiques est appelée **champ magnétique**.

Le champ magnétique est caractérisé par sa direction, d'une part, et par son intensité, d'autre part, cette intensité dépendant de la grandeur des forces magnétiques.

Si l'on considère un fil conducteur parcouru par un courant électrique, et si l'on place perpendiculairement à ce fil une

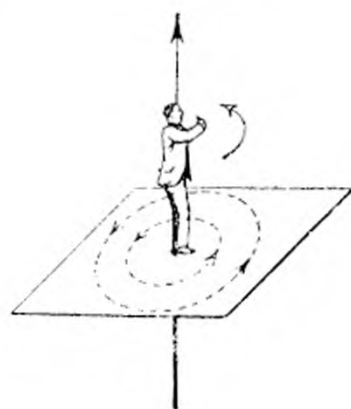


FIG. 4.

feuille de papier qu'il traverse, on constate, en saupoudrant cette feuille de limaille de fer, que les grains s'agglomèrent encore suivant certaines lignes circulaires, indiquant l'existence de lignes de force magnétiques. Le sens de ces lignes de force est facile à trouver de la façon suivante : si l'on suppose un observateur placé le long du fil (fig. 4) de telle façon que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête, les lignes

lui entrent par les pieds et lui sortent par la tête, les lignes

de force se dirigent de la droite vers la gauche de l'observateur.

Ainsi donc, *tout conducteur parcouru par un courant électrique est environné par un champ magnétique*. On démontre théoriquement et l'on vérifie expérimentalement que *toute variation d'intensité d'un champ magnétique détermine, dans un conducteur qui coupe ce champ, l'apparition d'une force électromotrice*. La valeur de celle-ci est proportionnelle à la vitesse de variation du champ magnétique. Sous l'effet de cette force électromotrice, il existe, entre les extrémités du conducteur, une certaine différence de potentiel qui peut engendrer un courant électrique dans un circuit relié à ces extrémités.

Revenons au fil rectiligne parcouru par un courant (fig. 4). Ployons ce fil en forme de boucle et considérons les lignes de force magnétiques circulaires qui entourent chacun des points du conducteur : pour simplifier, fixons notre attention sur les deux points d'intersection de la boucle et d'une feuille de papier (fig. 5). Le sens de ces lignes de force, déterminé comme précédemment, est indiqué par les flèches : toutes les lignes de force de même sens s'ajoutant les unes aux autres, la boucle de fil est traversée par un flux magnétique dont la direction est indiquée par les flèches centrales (fig. 5).

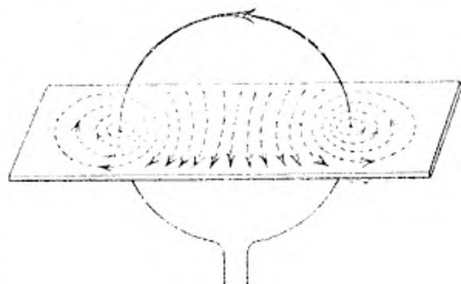


FIG. 5.

La boucle de fil parcourue par un courant est donc équivalente à un aimant plat ayant son pôle nord sur une face (celle qui se trouve du côté du lecteur), et son pôle sud sur l'autre face (du côté opposé au lecteur). Le pôle nord se trouve à

la gauche de l'observateur couché sur le fil comme précédemment et regardant le centre de la boucle : on dit plus simplement qu'il est à la gauche du courant circulaire.

Le flux magnétique produit par une boucle de fil est proportionnel à l'intensité du courant qui passe dans ce fil.

Si, au lieu d'une boucle, on forme avec du fil conducteur 10, 100, 1 000 boucles de même diamètre juxtaposées en une bobine et parcourues dans le même sens par le même courant, le flux produit par chaque boucle s'ajoutant aux flux produits par les boucles voisines, la bobine donnera un flux total 10, 100, 1 000 fois plus grand que le flux d'une seule boucle parcourue par un courant de même intensité : on réalise ainsi un *solénoïde*.

En plaçant à l'intérieur de ce solénoïde un noyau de fer, dont la présence augmente la conductibilité magnétique ⁽¹⁾ du chemin suivi par les lignes de force, on obtient un *électro-aimant*. D'après ce qui précède, il est évident que la puissance d'un électro-aimant augmente avec le nombre de tours de fil et avec l'intensité du courant.

La figure 6 représente un électro-aimant : le pôle nord se

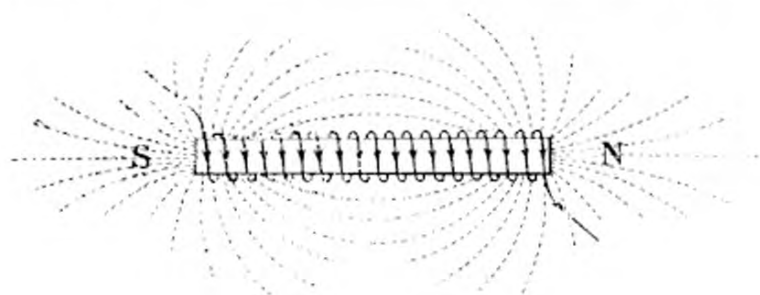


FIG. 6.

trouve à la gauche des courants circulaires et le pôle sud à

(1) La conductibilité magnétique s'appelle *perméabilité* : la perméabilité de l'air, des isolants et de tous les métaux non magnétiques (c'est-à-dire en pratique tous les métaux autres que le fer, le nickel et leurs alliages), est égale à l'unité. La perméa-

leur droite. La répartition du champ magnétique existant au voisinage d'un électro-aimant est identique à celle du champ magnétique qui existe au voisinage d'un aimant.

On sait que les pôles de même nom de deux aimants s'attirent et que les pôles de nom contraire se repoussent. Puisqu'une boucle de fil parcourue par un courant équivaut à un aimant, il se produira des attractions ou des répulsions analogues entre elles et un barreau aimanté, de même qu'entre deux boucles différentes ou entre deux conducteurs parcourus par des courants électriques. Par exemple, la boucle de fil de la figure 7, parcourue par un courant dans le sens de la flèche, sera repoussée par le pôle nord N de l'aimant voisin, puisqu'elle présente un pôle nord N sur la face tournée vers cet aimant. Si le courant dans la boucle était de sens inverse, la boucle aurait un pôle sud sur sa face tournée vers l'aimant, et elle serait attirée par lui.

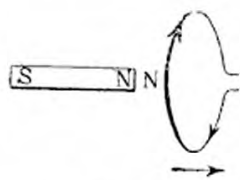


FIG. 7.

Induction électromagnétique.

Considérons un aimant ou un électro-aimant dont le flux magnétique s'épanouit dans l'espace comme cela a été dit. Prenons une boucle de fil métallique fermée sur elle-même

bilité du fer est d'autant plus grande que ce métal est plus pur : elle peut atteindre 2 500 fois celle de l'air. Le fer très pur, exclusivement employé dans la fabrication des machines électriques, est appelé *fer doux*.

La résistance opposée au passage des lignes de force magnétiques est appelée *réluctance*.

L'introduction d'un noyau de fer à l'intérieur d'un solénoïde a pour effet d'augmenter le flux magnétique produit par ce solénoïde, parce que la réluctance est diminuée.

et plaçons-la à une certaine distance de l'aimant, perpendiculairement aux lignes de force magnétiques qui en émanent (fig. 8), puis approchons-la peu à peu de l'aimant. Le flux

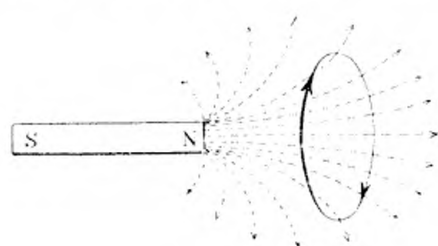


FIG. 8.

magnétique qui traverse la boucle de fil varie pendant ce mouvement, puisque le nombre de lignes de force embrassées par la boucle va en augmentant.

Cette variation de flux donne naissance à une force

électromotrice induite, qui engendre, dans cette boucle fermée, un courant induit.

Si l'on cesse de déplacer la boucle, la force électromotrice induite et le courant s'annulent, puisqu'il n'y a plus de variation de flux.

Si l'on éloigne la boucle de l'aimant, la variation de flux (diminution) que produit ce mouvement donne naissance à une force électromotrice induite, inverse de la précédente (c'est-à-dire que le sens de la différence de potentiel engendrée et, par suite, du courant, est inversé).

Le sens du courant induit est tel que l'effet de ce courant tende à s'opposer au mouvement qui lui donne naissance.

Par exemple, quand on approche la boucle de l'aimant, le courant induit a le sens marqué par la flèche, de façon que la boucle présente sur sa face tournée du côté de l'aimant un pôle nord, dont l'action sur le pôle nord de l'aimant tende à empêcher le mouvement. Inversement, si l'on éloigne la boucle, le courant induit est de sens contraire, pour que la boucle présente un pôle sud sur sa face tournée du côté de l'aimant, et que l'action de celui-ci sur le pôle

nord de l'aimant tende à s'opposer au mouvement d'éloignement.

Si, au lieu de considérer une ou plusieurs boucles de fil embrassant une plus ou moins grande partie du flux magnétique d'un aimant, nous considérons un conducteur rectiligne qui se déplace à travers un champ magnétique, le résultat est le même, ce conducteur pouvant toujours être considéré comme la portion d'une circonférence de rayon infiniment grand.

On appelle induction le phénomène par lequel une force électromotrice est induite dans un conducteur par une variation du flux magnétique.

Au lieu d'être produit par un aimant, le flux magnétique peut être produit par un électro-aimant, par un solénoïde, par une boucle de fil, ou même par un simple conducteur parcouru par un courant : le résultat est toujours le même.

Induction mutuelle et self-induction.

L'induction qui s'exerce entre deux circuits distincts est appelée induction mutuelle.

Le circuit qui agit sur l'autre est dit circuit inducteur, ou primaire ; celui dans lequel apparaît une force électromotrice induite est dit circuit induit ou secondaire.

La variation de flux magnétique peut être obtenue, soit par un déplacement de l'un des deux circuits par rapport à l'autre, soit par une variation du courant dans le circuit inducteur, les deux circuits étant immobiles. Le premier mode de variation est utilisé dans les *machines génératrices électromécaniques*, et le second dans les *transformateurs*.

Étant donné un circuit parcouru par un courant variable

d'intensité maxima déterminée, la valeur de la force électromotrice induite dans un autre circuit dépend de la valeur de l'induction mutuelle entre ces deux circuits. Celle-ci est caractérisée par un certain coefficient, généralement désigné par la lettre m , qu'on appelle **coefficient d'induction mutuelle**. *Ce coefficient est égal à la valeur maxima du flux magnétique embrassé par l'un des circuits quand l'autre circuit est parcouru par un courant variable d'intensité maxima égale à l'unité.*

Il existe un autre phénomène d'induction extrêmement important que nous allons étudier : c'est l'*induction d'un conducteur sur lui-même*, nommée **self-induction** (*auto-induction ou induction propre*).

Tout courant électrique engendre, comme nous l'avons vu, un champ magnétique. Un fil métallique traversé par un courant est environné d'un tel champ ; si le courant cesse, le champ magnétique disparaît ; il y a donc une *variation de champ magnétique au moment de la cessation du courant*.

Nous savons que toute variation de champ magnétique engendre une force électromotrice induite dont le sens est tel qu'elle tende à s'opposer à la cause qui l'a fait naître. Donc, au moment où le courant va cesser, *le fil sera le siège d'une force électromotrice induite, dite force électromotrice de self-induction, dont la valeur sera d'autant plus grande que l'intensité du champ magnétique était plus grande et que sa variation est plus rapide*, c'est-à-dire d'autant plus grande que l'intensité du courant primitif était plus grande et que ce courant est plus vite rompu. Cette force électromotrice produit dans le circuit un courant de même sens que le courant précédent, puisque son sens est tel qu'elle s'oppose à la cause qui l'a fait naître, c'est-à-dire à la cessation du courant.

Inversement, si l'on fait agir sur un conducteur une certaine différence de potentiel u , le courant qui tend à s'établir

engendre un champ magnétique autour du conducteur. Il y a donc une variation du champ magnétique, qui était nul et qui va atteindre une certaine valeur. Cette variation de champ magnétique induit dans le conducteur une certaine force électromotrice e , dont le sens est tel qu'elle s'oppose à la cause qui lui donne naissance, c'est-à-dire à l'établissement du courant.

Dans ces conditions, la différence de potentiel disponible pour faire circuler le courant dans le conducteur est égale à $(u - e)$, différence entre la différence de potentiel agissante et la force électromotrice antagoniste de self-induction : le courant ne peut atteindre que peu à peu sa valeur normale.

La valeur de la force électromotrice de self-induction induite dans un conducteur parcouru par un courant variable d'intensité maxima donnée dépend de la valeur de la self-induction. Celle-ci est caractérisée par un certain coefficient, généralement désigné par la lettre l et appelé **coefficient de self-induction**. *Ce coefficient est égal à la valeur maxima du flux magnétique engendré quand le conducteur est parcouru par un courant variable d'intensité maxima égale à l'unité.*

En pratique, la self-induction d'un conducteur simple est très faible parce que le champ magnétique qui l'entoure est relativement peu important.

Mais si l'on enroule ce conducteur sous forme d'une bobine comprenant un certain nombre de tours, chaque tour embrasse la totalité du flux magnétique engendré par la bobine, c'est-à-dire la somme des lignes de force magnétiques produites par tous les tours. La self-induction de la bobine est donc considérable, puisque, d'une part, elle est proportionnelle au nombre de tours, et que, d'autre part, la self-induction de chaque tour augmente proportionnellement au

nombre de tours de la bobine. On voit, d'après cela, que la self-induction totale doit croître comme le carré du nombre de tours.

Si l'on introduit un noyau de fer dans une bobine, sa self-induction sera considérablement accrue, puisque le flux magnétique augmente, comme cela a été vu précédemment, par suite de la diminution de la réluctance ⁽¹⁾.

Il importe de bien comprendre et de bien retenir les phénomènes d'induction mutuelle et de self-induction qui, dans la production des oscillations électriques et, en particulier, en radiotélégraphie, jouent un rôle absolument capital.

⁽¹⁾ Il en résulte qu'en enfouant plus ou moins un noyau de fer dans la bobine, on fera varier plus ou moins la self-induction de celle-ci : ce mode de réglage est fréquemment adopté en pratique.

CHAPITRE II

PRODUCTION ET TRANSFORMATION DU COURANT ÉLECTRIQUE

Les appareils qui permettent de produire, entre deux points, une différence de potentiel permanente, s'appellent des machines électriques, ou des **générateurs électriques**: ils utilisent pour cela des réactions chimiques, thermiques ou mécaniques. Il faut bien se pénétrer de l'idée que *ces générateurs n'engendrent pas de l'énergie électrique: ils transforment une des formes de l'énergie en une autre forme de l'énergie.*

Générateurs électriques.

Les *appareils électrochimiques* (piles et accumulateurs) transforment en énergie électrique l'énergie chimique que possèdent certains sels en présence de certains métaux: les sels sont décomposés et les métaux sont dissous pendant cette transformation.

Dans les *piles*, les produits de décomposition sont jetés après épuisement de l'appareil.

Dans les *accumulateurs*, ces produits sont décomposés en sens inverse et ramenés à leur état initial par le passage d'un courant électrique, dit courant de charge, traversant l'appareil en sens inverse du courant de décharge. Après la charge, l'accumulateur est donc capable de fournir à nouveau le même service.

Les *appareils thermo-électriques* transforment de l'énergie calorifique en énergie électrique, en utilisant certains phénomènes, dits thermo-électriques, qui se manifestent au contact de deux métaux différents lorsqu'il existe, entre les soudures voisines de ces métaux, une différence de température sensible.

Les *appareils électromécaniques* transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique, en utilisant des réactions électromagnétiques que nous allons étudier : les générateurs électriques de ce type sont les seuls employés dans l'industrie.

Tous ces générateurs, électrochimiques, thermo-électriques ou électromécaniques, transformant de l'énergie d'une forme donnée en énergie d'une autre forme (énergie électrique), présentent forcément des pertes. Leur *rendement*, c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique recueillie à l'énergie d'une autre forme fournie au générateur, est donc toujours inférieur à l'unité. Il se rapproche beaucoup de l'unité dans les appareils électromécaniques ; il a une valeur médiocre dans les appareils électrochimiques ; et il est tout à fait mauvais dans les générateurs thermo-électriques, qui ne sont susceptibles d'aucun emploi pratique.

Un générateur électrique est caractérisé par la force électromotrice qu'il produit et par l'intensité de courant qu'il peut débiter dans un circuit sous l'action de la différence de potentiel créée par la force électromotrice. On confond souvent (à tort) dans le langage vulgaire, les mots *force électromotrice* et *différence de potentiel* : on emploie généralement, en pratique, le mot *tension* pour désigner l'une ou l'autre d'entre elles.

Machines à courant alternatif.

D'après ce qui précède, il est facile de comprendre le principe sur lequel reposent les générateurs qui transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Considérons un champ magnétique uniforme figuré par des flèches (fig. 9), et une boucle de fil placée dans ce champ et susceptible de tourner autour de son diamètre vertical.

Le champ magnétique est supposé invariable et conserve une valeur constante: il est produit par un système quelconque d'aimants ou d'électro-aimants.

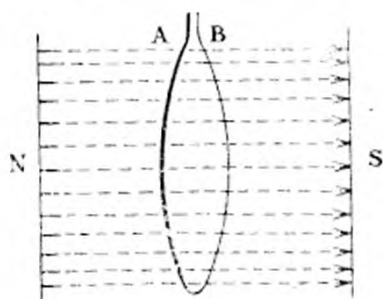


FIG. 9.

On voit que le flux magnétique embrassé par la boucle varie pendant sa rotation: il est maximum quand le plan de la boucle est perpendiculaire aux lignes de force, et il est nul quand le plan de la boucle est parallèle aux lignes de force. Si la boucle fait un tour complet en partant de la position perpendiculaire aux lignes de force, le flux magnétique embrassé par elle s'annule, change de sens relatif (puisqu'il ne pénètre plus par la même face de la boucle), croît en valeur jusqu'à ce que la boucle soit redevenue perpendiculaire aux lignes de force, décroît ensuite, s'annule à nouveau, change de sens relatif (il pénètre alors par la face primitive) et augmente jusqu'à sa valeur maxima.

Le taux de variation du flux n'est pas constant pendant la rotation: on voit sur la figure 10, représentant en plan une vue de la boucle et des lignes de force magnétiques, que, pour un même angle de rotation, le nombre de lignes de force em-

brassées varie d'autant plus vite que la boucle se rapproche

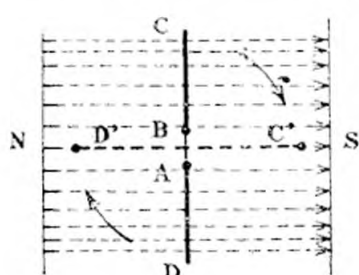


FIG. 10.

plus de la position $C'D'$ perpendiculaire à la position initiale CD . Dans ces conditions, pendant un tour de la boucle partant de la position CD , la force électromotrice induite va d'abord en croissant, atteint un maximum (qui correspond à la position $C'D'$ c'est-à-dire à un quart de

tour), décroît, s'annule (au bout d'un demi-tour), change de sens, croît en valeur jusqu'à un maximum M' (au bout de trois quarts de tour), puis décroît et s'annule.

Si l'on porte sur une droite horizontale les valeurs de l'angle de rotation de la boucle, ou, ce qui revient au même, les valeurs du temps écoulé depuis l'origine du mouvement, et si l'on trace, aux points correspondant aux différentes valeurs du temps, des verticales proportionnelles aux différentes valeurs qu'a la force électromotrice induite à ces instants successifs, on obtient une *courbe représentative*, telle que celle de la figure 11.

Une telle force électromotrice est dite **alternative**, parce qu'elle

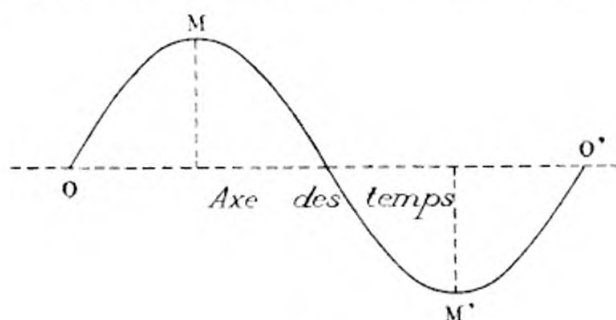


FIG. 11.

change de sens tous les demi-tours : elle est caractérisée par la

forme de sa courbe représentative, et par la valeur maxima qu'elle atteint.

Réunissons, par l'intermédiaire de bagues métalliques A et B et de frotteurs fixes *a* et *b*, les deux extrémités de la boucle S à un circuit fermé, ainsi que l'indique schématiquement la figure 12, sur laquelle le circuit est représenté par deux conducteurs CC aboutissant à une résistance R⁽¹⁾. Un certain courant traverse ce circuit sous l'action de la différence de potentiel qui existe entre les extrémités A et B de la boucle, et également entre les frotteurs *a* et *b* reliés aux extrémités du circuit. La forme de ce courant sera la même que celle de la différence de potentiel, et par suite, de la force électromotrice induite; la courbe représentative du courant en fonction du temps sera donc semblable à la courbe de la figure 11.

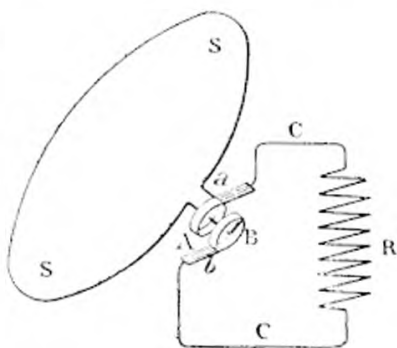


FIG. 12.

Un tel courant est dit **courant alternatif**.

On appelle **période du courant alternatif** le temps correspondant à la longueur OO' , c'est-à-dire la durée d'une variation complète (ici la durée d'un tour de la boucle) ⁽²⁾.

(1) Ce circuit est généralement nommé circuit d'utilisation ou *circuit extérieur*, par opposition aux conducteurs qui constituent le générateur électrique lui-même et dont l'ensemble forme ce qu'on appelle le *circuit intérieur* de la machine.

Le circuit extérieur est dit *circuit fermé* s'il est ininterrompu et si, par conséquent, un courant électrique peut y circuler. Il est dit *circuit ouvert* s'il est interrompu en un point et si, par conséquent, aucun courant électrique ne peut y circuler.

On dit qu'une machine (ou un appareil) électrique est à circuit ouvert pour exprimer qu'elle n'est reliée à aucun appareil d'utilisation et ne débite aucun courant.

(2) On appelle souvent *alternance* une demi-période, c'est-à-dire la durée d'une

On appelle fréquence du courant alternatif le nombre de périodes par seconde.

Les courants alternatifs industriels ont généralement une fréquence comprise entre 25 et 50 périodes par seconde, c'est-à-dire que la variation complète du courant dure $1/25$ ou $1/50$ seconde.

Il est évident que si, au lieu d'une boucle de fil, on fait tourner ensemble 10, 100, 1 000 boucles formant une bobine enroulée sur un cadre, la force électromotrice induite sera 10, 100, 1 000 fois plus élevée.

En pratique, on dispose convenablement, sur un noyau ou une carcasse de fer doux ⁽¹⁾, un très grand nombre de tours de fil, pour constituer le système induit, appelé brièvement *l'induit*.

D'autre part, on produit le flux magnétique nécessaire au moyen d'un système inducteur, appelé brièvement *l'inducteur*, qui comprend un certain nombre d'électro-aimants. Les bobines de ces électro-aimants sont parcourues par un

demi-variation. Du courant alternatif à 50 périodes, par exemple, présente 100 alternances par seconde, c'est-à-dire que, cent fois par seconde, il atteint une valeur maxima, positive ou négative.

(1) Si le noyau ou la carcasse de fer doux étaient massifs, ils présenteraient, dans leur propre masse, un très grand nombre de circuits conducteurs fermés sur eux-mêmes. Ces circuits, embrassant le flux magnétique variable qui circule dans le noyau, seraient, comme la boucle de fil considérée, parcourus par des courants induits. Les courants ainsi produits dans la masse du métal sont nommés *courants de Foucault* ou *courants tourbillonnaires*.

Afin d'éviter leur formation, qui provoque un échauffement des noyaux et qui occasionne une perte d'énergie, on constitue les noyaux de fer de tous les appareils à flux variable par des paquets de tôles très minces superposées et isolées les unes des autres par des feuilles de papier mince ou du vernis. Le passage du flux magnétique, qui circule dans le sens longitudinal des paquets de tôle, ne se trouve pas gêné, tandis que les courants de Foucault, qui circuleraient dans le sens transversal des paquets de tôle, ne rencontrent aucun circuit continu et sont considérablement réduits.

courant continu auxiliaire, dit *courant d'excitation*, fourni soit par une petite machine distincte, nommée *excitatrice*, soit par des accumulateurs, soit, exceptionnellement, par des piles.

L'un des deux systèmes, inducteur ou induit⁽¹⁾, est mobile à l'intérieur de l'autre et est calé sur un arbre entraîné par un moteur mécanique.

La fréquence du courant alternatif engendré dépend du nombre de variations du flux par seconde. Or celui-ci dépend du nombre de paires de pôles et de la vitesse de rotation de la partie mobile. La fréquence est donc égale au nombre de paires de pôles, multiplié par la vitesse de rotation par seconde.

Une machine destinée à produire des courants alternatifs est appelée un alternateur.

Machines à courant continu.

Si, au lieu de courant alternatif, on veut recueillir du *courant continu*, c'est-à-dire toujours de même sens, on adjoint au générateur électrique un organe appelé commutateur ou *collecteur*, composé d'un certain nombre de lames isolées les unes des autres et reliées aux différentes boucles ou bobines de l'induit.

Par exemple, relierons chacune des extrémités de la boucle

(1) Il importe peu que l'enroulement induit tourne et que le champ magnétique soit fixe, ou que le champ magnétique (inducteur) tourne, l'induit étant immobile : le résultat est le même. Il est possible également de laisser l'inducteur et l'induit fixes, et de faire tourner entre eux un volant muni de saillies en fer, qui viennent fermer périodiquement les circuits magnétiques des parties constitutives de l'inducteur et de l'induit et engendrent ainsi les variations de flux nécessaires. Cette disposition est particulièrement avantageuse pour les machines à grande vitesse de rotation, parce qu'aucune bobine n'est soumise aux effets de la force centrifuge.

de fil considérée S à un demi-cylindre métallique A ou B sur lequel s'appuie un frotteur (figure 13) : les deux demi-cylindres sont juxtaposés de façon à former un cylindre complet, mais sont isolés électriquement l'un de l'autre par

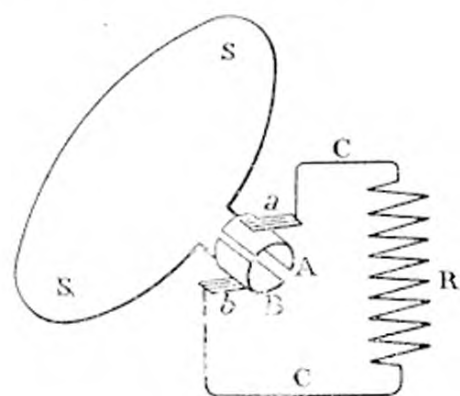


FIG. 13.

une matière isolante convenable (du mica en général) interposée entre eux. On peut régler la position des frotteurs fixes de telle façon que ce soient les parties isolantes séparant les deux cylindres qui viennent en contact avec eux au moment où la force électromotrice in-

duite dans la boucle s'annule. Dans ces conditions, à l'instant où le courant alternatif qui circule dans le circuit CRC vient de s'annuler et va changer le sens, le demi-cylindre qui était précédemment en contact avec l'un des balais va venir en contact avec l'autre balai : par exemple A vient en contact avec b et B avec a . On voit que, puisque les contacts changent de sens au moment où le courant change de sens, ce courant circule toujours dans la même direction dans le circuit électrique relié aux frotteurs a et b .

En définitive, le dispositif indiqué sur la figure 13 (collecteur rudimentaire) a pour effet de redresser les portions infé-

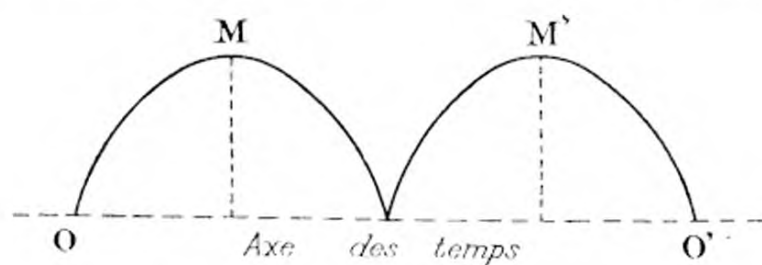


FIG. 14.

rieures de la courbe de courant, comme l'indique la figure 14

en comparaison de la figure 11. On obtient non plus un courant alternatif, mais un *courant pulsatoire*, c'est-à-dire un courant toujours de même sens, dont l'intensité va en croissant, puis en décroissant dans l'intervalle d'une demi-période. Ce courant est engendré dans le circuit par la différence de potentiel pulsatoire qui existe entre les extrémités *a* et *b* de ce circuit.

Pour atténuer l'amplitude des pulsations de la différence de potentiel disponible entre les points *a* et *b* (généralement nommée *différence de potentiel aux bornes*⁽¹⁾ ou *tension aux bornes*) et rendre pratiquement continu le courant qui circule dans le circuit d'utilisation, on établit les machines électriques avec un très grand nombre de boucles de fil ou de bobines, et l'on relie ensemble toutes ces bobines, qui occupent à un même instant des positions différentes par rapport au champ inducteur.

Par exemple considérons une machine formée de deux boucles seulement, perpendiculaires l'une à l'autre. Le collecteur sera formé de quatre quarts de cylindre isolés les uns des autres et reliés aux quatre extrémités, deux à deux opposées, des deux boucles. Traçons la courbe du courant pulsatoire qui serait engendrée dans le circuit extérieur CRC par chacune des boucles considérée, si cette boucle était seule comme dans le dispositif précédent de la figure 13. L'une de ces courbes est représentée en trait plein, et l'autre en trait interrompu sur la figure 15.

On peut voir qu'avec le dispositif à deux boucles et quatre

(1) L'expression *différence de potentiel aux bornes* ou *tension aux bornes* d'une machine ou appareil (générateur, bobine, transformateur, etc.) provient de ce que les machines ou appareils électriques portent, en général, aux extrémités de leur circuit électrique intérieur, des *bornes* ou prises de courant servant à établir d'une façon commode les connexions entre ce circuit intérieur et les conducteurs extérieurs.

lames⁽¹⁾ de collecteur, le courant qui circule dans le circuit extérieur est engendré tantôt par une boucle tantôt par l'autre, suivant que les frotteurs appuient sur l'une ou

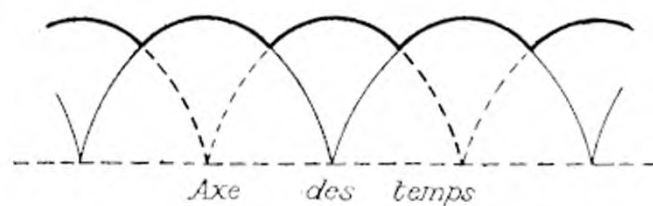


FIG. 15.

sur l'autre paire de lames du collecteur. La forme de ce courant est représentée par la courbe indiquée en gros traits sur la figure 15, et l'on voit que les pulsations du courant engendré (ou de la différence de potentiel entre les points *a* et *b*) ont une fréquence deux fois plus grande et une amplitude beaucoup plus faible que dans le cas précédent. Le courant est, pour ainsi dire, beaucoup plus continu.

En employant 4 boucles de fil ou bobines et 8 lames de collecteur, on doublerait la fréquence des pulsations et on

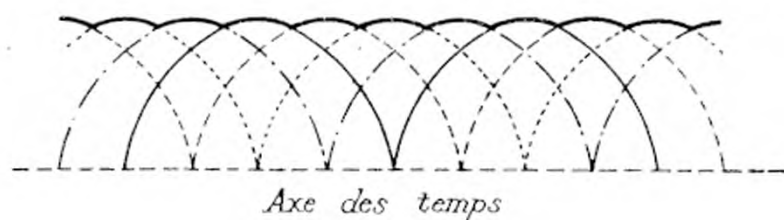


FIG. 16.

réduirait encore considérablement leur amplitude, comme le montre la figure 16.

(2) Les portions de cylindre métallique constituant un collecteur sont appelées *lames de collecteur*, parce que, en pratique, un collecteur consiste en un grand nombre de lames de cuivre de section trapézoïdale, juxtaposées les unes aux autres avec interposition de mica et maintenues aux deux extrémités par des manchons isolants et des joues coniques : l'ensemble est soigneusement tourné pour présenter une surface extérieure cylindrique bien lisse.

Dans la pratique, un générateur électrique à courant continu⁽¹⁾ comprend un certain nombre de paires d'inducteurs NS créant un champ magnétique dans lequel tourne, autour de son axe, un anneau ou un tambour de fer doux AA⁽²⁾ recouvert sur sa périphérie de conducteurs isolés qui forment un certain nombre de bobines comprenant chacune plusieurs boucles.

Sur le schéma de la figure 17, on a représenté seulement une paire de pôles inducteurs et quatre bobines BBBB, de l'organe mobile appelé l'*induit*. Ces bobines sont reliées entre elles et connectées, par des jonctions en cuivre, aux lames du collecteur *c*, dont le nombre est égal à celui des bobines. Sur le collecteur frottent des *balais* *a* et *b* reliés au circuit d'utilisation CRC.

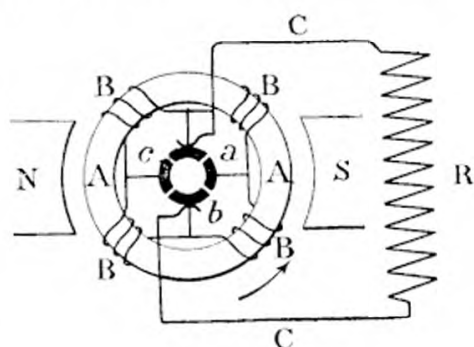


FIG. 17.

Dans les machines à courant continu, le courant d'excitation nécessaire pour produire le champ magnétique, c'est-à-dire pour aimanter les pôles inducteurs, est emprunté à la machine elle-même : il n'y a pas besoin, comme pour les alternateurs, d'une source de courant distincte, puisqu'on dispose du courant continu nécessaire.

(1) Appelé *machine dynamo-électrique* ou vulgairement « dynamo ».

(2) Cet anneau ou tambour est constitué par des paquets de tôles minces isolées, afin d'éviter la formation des courants de Foucault qu'engendreraient, dans un anneau métallique massif, les variations rapides du flux magnétique.

Bobines de self-induction.

Prenons une bobine comprenant un certain nombre de tours de fils conducteurs isolés les uns des autres, et relierons ses extrémités à une source de courant continu.

Conformément à ce qui a été expliqué précédemment (page 19), nous constatons que, sous l'action de la différence de potentiel produite par le générateur, le courant ne prend pas instantanément sa valeur normale : *la self-induction de la bobine s'oppose à l'établissement du courant, comme une inertie que celui-ci devrait vaincre avant de pouvoir circuler dans le conducteur.*

Inversement, quand on ouvre le circuit pour interrompre le courant, il se produit à la coupure une étincelle chaude et bruyante, due à un *extra courant* de même sens que le courant précédent : *la self-induction agit, comme une inertie⁽¹⁾, pour prolonger le passage du courant.*

Si l'on place un noyau de fer dans l'intérieur de la bobine, la self-induction de celle-ci augmente⁽²⁾. Si, au contraire, on déroule le fil de la bobine pour l'allonger sous forme d'un conducteur rectiligne, la self-induction diminue considérablement, parce que l'induction du conducteur sur lui-même est très faible.

Relions maintenant la bobine, avec ou sans noyau de

(¹) Si l'on veut imprimer un mouvement à un corps immobile, l'inertie de ce corps tend, au début, à empêcher l'établissement du mouvement. Inversement, si l'on veut arrêter le corps une fois qu'il a été mis en mouvement, l'inertie tend à prolonger le mouvement. On voit que, au point de vue électrique, la self-induction joue identiquement le même rôle : c'est pourquoi l'on dit qu'elle agit comme une inertie.

(²) On règle la valeur de la self-induction en enfouissant plus ou moins le noyau de fer dans la bobine.

fer⁽¹⁾, à un générateur électrique produisant une *différence de potentiel alternative*. Le courant que cette différence de potentiel tend à faire passer dans la bobine varie périodiquement comme elle : le flux qu'il produit présente donc les mêmes variations, et la *self-induction est perpétuellement en jeu pour s'opposer à l'accroissement du courant, chaque fois que la tension alternative va en croissant depuis zéro jusqu'à sa valeur maxima, ou pour s'opposer à sa diminution, chaque fois que la tension alternative décroît de sa valeur maxima à zéro*.

L'effet de ces phénomènes de self-induction est de limiter l'intensité du courant qui passe dans la bobine sous l'action d'une différence de potentiel alternative donnée. La self-induction joue donc, dans ce cas, le même rôle qu'une résistance.

On appelle résistance inductive cette résistance apparente opposée au passage d'un courant alternatif.

La résistance électrique réelle d'un conducteur, dont il a déjà été question, est appelée résistance ohmique⁽²⁾.

Le conducteur qui constitue la bobine présentant forcément lui-même une certaine résistance ohmique, les deux sortes de résistance, apparente et réelle, agissent simultanément pour limiter l'intensité du courant alternatif : l'ensemble de ces deux résistances, apparente et réelle, est appelé **impédance**.

Il est évident que, plus le flux varie rapidement, plus les

(1) Si la bobine contient un noyau de fer, ce dernier doit être en fils de fer ou en tôles pour éviter la production de courants de Foucault.

(2) Tandis que l'existence de la résistance ohmique occasionne une certaine perte d'énergie (convertie en chaleur) lorsqu'un courant électrique, continu ou alternatif, traverse un circuit, la résistance inductive, ou apparente, agit seulement pour limiter l'intensité du courant alternatif que peut faire circuler dans le circuit une différence de potentiel alternative donnée ; elle n'occasionne pas de perte d'énergie par elle-même.

phénomènes de self-induction sont accentués, puisque la force électromotrice induite est proportionnelle au taux de variation du flux. Par conséquent, *plus la fréquence du courant alternatif est grande, et plus est grande la résistance apparente d'un circuit donné* ⁽¹⁾.

Dans le chapitre précédent, on a vu que l'intensité du courant i passant, sous l'action d'une différence de potentiel u , dans un circuit de résistance ohmique r , est proportionnelle à la différence de potentiel u et inversement proportionnelle à la résistance r : sa valeur est donnée par la formule :

$$i = \frac{u}{r}.$$

Si le circuit présente, outre la résistance ohmique r , un coefficient de self-induction l , et est soumis à une différence de potentiel *alternative* u de fréquence f , l'impédance z que ce circuit oppose au passage du courant a pour valeur

$$z = \sqrt{r^2 + (2\pi f)^2 l^2}.$$

L'expression $2\pi f$ ou $\frac{2\pi}{T}$ ⁽²⁾ est généralement remplacée par le symbole ω pour simplifier l'écriture.

L'intensité i du courant est proportionnelle à la différence de potentiel u et inversement proportionnelle à l'impédance : sa valeur est donnée par la formule :

$$i = \frac{u}{\sqrt{r^2 + \omega^2 l^2}}.$$

(1) Quand on emploie des courants de très grande fréquence, comme en radiotélégraphie, les phénomènes de self-induction sont si importants qu'il suffit de quelques tours de fil (sans noyau de fer) pour que la résistance apparente opposée au passage du courant soit très considérable.

(2) Le symbole π représente le rapport de la longueur d'une circonférence à son diamètre : il a pour valeur 3,1416.

Transformateurs.

Au lieu de produire, comme dans les générateurs, une variation de flux par le déplacement d'un circuit par rapport à un autre circuit, on peut disposer les deux circuits de façon que leur induction mutuelle ait la plus grande valeur possible, et faire passer dans l'un des deux un courant périodiquement variable, tel qu'un courant alternatif. Le flux magnétique engendré par le circuit primaire variera comme le courant, et ses variations induiront dans le circuit secondaire une force électromotrice déterminée de forme semblable à celle du courant inducteur, c'est-à-dire alternative.

L'appareil ainsi réalisé s'appelle un transformateur.

En principe, un transformateur (fig. 18) comprend essentiellement un **circuit magnétique** composé de deux *noyaux* de fer N⁽¹⁾ reliés par deux *culasses* C de façon à présenter au flux magnétique un chemin continu fermé de faible réluctance magnétique : l'un des noyaux porte une *bobine primaire* P ; l'autre porte une *bobine secondaire* S⁽²⁾.

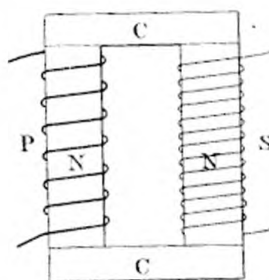


FIG. 18.

Chaque bobine est formée d'un certain nombre de tours de fil soigneusement isolés les uns des autres. Les extrémités de chaque *enroulement* (bobine) primaire ou secondaire aboutissent à deux bornes extérieures de prise de courant (bornes primaires et bornes secondaires).

(1) Ces noyaux sont lamellés, bien entendu, c'est-à-dire formés de tôles minces, pour les raisons indiquées précédemment.

(2) Dans le langage courant, on dit simplement *le secondaire* ou *le primaire* d'un transformateur.

Quand un courant alternatif passe dans l'enroulement P, un flux alternatif circule dans tout le circuit magnétique : chaque tour de l'enroulement S embrassant la totalité de ce flux, la force électromotrice totale induite dans la bobine S sera d'autant plus grande qu'il y aura plus de tours.

1° *Supposons d'abord que la bobine secondaire soit à circuit ouvert*, c'est-à-dire que les deux extrémités de cette bobine ne sont reliées à aucun circuit extérieur et sont isolées l'une de l'autre. L'enroulement secondaire ne joue alors aucun rôle, et sa présence n'intervient pas ; *le primaire du transformateur se comporte identiquement comme une bobine de self-induction.*

Les lignes de force magnétiques engendrées par la bobine primaire rencontrent dans leur trajet une très faible réluctance, puisqu'elles passent uniquement dans du fer. Dans ces conditions un courant de très faible intensité suffit pour produire un flux de valeur élevée, dont les variations induisent dans la bobine une force électromotrice de self-induction de valeur élevée. Celle-ci est opposée à la tension primaire⁽¹⁾, comme nous l'avons vu précédemment, et lui est presque égale en valeur : la différence de potentiel résultante, égale à la différence entre la tension primaire et la force électromotrice de self-induction, a donc une valeur très faible. Or c'est cette différence de potentiel résultante qui fait circuler le courant dans l'enroulement primaire : ce courant a donc une très faible intensité.

Si toutes les lignes de force magnétiques passent par le fer,

(1) La différence de potentiel aux bornes primaires, ou différence de potentiel entre les extrémités de la bobine primaire, est appelée pour abréger *tension primaire*. De même la différence de potentiel aux bornes secondaires est nommée, pour abréger, *tension secondaire*.

c'est-à-dire *s'il n'y a aucune fuite des lignes de force magnétiques* dans l'espace environnant ⁽¹⁾, la totalité du flux magnétique qui traverse la bobine primaire traverse aussi la bobine secondaire. C'est ce qu'on s'efforce d'obtenir dans les transformateurs industriels.

Le flux variable engendre dans chaque tour de l'enroulement secondaire une force électromotrice induite, de même grandeur que la force électromotrice de self-induction engendrée dans un tour de l'enroulement primaire : comme nous l'avons vu, cette force électromotrice de self-induction est presque égale à la différence de potentiel créée par la source extérieure entre les extrémités d'un tour de la bobine primaire.

Désignons par n_1 et n_2 les nombres de tours des enroulements primaire et secondaire, par e_1 et e_2 les tensions primaire et secondaire.

La tension primaire e_1 agissant sur les n_1 tours de la bobine primaire, la différence de potentiel entre les extrémités d'un seul tour a pour valeur $\left(\frac{e_1}{n_1}\right)$ ⁽²⁾. La force électromotrice de self-induction dans un tour de la bobine primaire a à peu près cette valeur : il en est de même de la force électromotrice induite dans un tour de la bobine secondaire. Si le secondaire a n_2 tours de fil, la tension secondaire est évidemment n_2 fois plus grande, et a pour valeur $n_2 \left(\frac{e_1}{n_1}\right)$.

En définitive, la valeur de la tension secondaire e_2 est

$$e_2 = n_2 \cdot \frac{e_1}{n_1} \quad \text{ou} \quad e_2 = \frac{n_2}{n_1} e_1.$$

⁽¹⁾ Dans la pratique, on appelle *transformateur sans fuites magnétiques* un transformateur dont toutes ou presque toutes les lignes de force passent par le fer des noyaux et de la culasse. On appelle *transformateur à fuites* un transformateur dont la plus grande partie ou la totalité des lignes de force magnétiques passent à travers l'air sur une longueur plus ou moins grande.

⁽²⁾ Si la bobine primaire contient 10 tours par exemple, et si l'on appelle e_1 la

Il en résulte que *la force électromotrice induite dans le secondaire, ou la tension secondaire est égale à la tension primaire multipliée par le rapport (n_2/n_1) du nombre de tours de l'enroulement secondaire au nombre de tours de l'enroulement primaire.*

Ce rapport est appelé rapport de transformation.

Par exemple, si la bobine secondaire contient 10 000 tours et la bobine primaire 10 tours, la tension secondaire sera 1 000 fois plus grande que la tension primaire.

2° *Supposons maintenant que les extrémités du secondaire soient reliées à un circuit extérieur.*

Ce circuit est parcouru par un courant dont l'intensité est proportionnelle à la tension secondaire et inversement proportionnelle à l'impédance totale (y compris celle de la bobine secondaire du transformateur).

Le courant secondaire tend à produire, à son tour, un flux magnétique opposé au flux qu'engendre le courant primaire: il faut donc que celui-ci augmente, par rapport à sa valeur primitive, pour rétablir l'équilibre. Le flux produit par une bobine étant proportionnel à l'intensité du courant multipliée par le nombre de tours d'enroulement, il faudra, pour que les flux primaire et secondaire se compensent, que l'augmentation du courant primaire soit égale à 10, 100, 1 000 fois l'intensité du courant secondaire si la bobine primaire a 10, 100, 1 000 fois moins de tours que la bobine secondaire, c'est-à-dire si le rapport de transformation est de 10, 100 ou 1 000.

En résumé on voit que, *dans un transformateur, la tension secondaire est égale à la tension primaire multipliée par la valeur du rapport de transformation, et l'intensité du courant se-*

différence de potentiel aux bornes de cette bobine, la différence de potentiel entre les extrémités de chaque tour aura pour valeur $(1/10) e_1$.

conculaire est égale à l'intensité du courant primaire divisée par la valeur du rapport de transformation⁽¹⁾.

Pour que les effets d'induction du primaire sur le secondaire soient maxima, il faut que le coefficient d'induction mutuelle soit aussi élevé que possible. En fait, les lignes de force magnétiques engendrées par le circuit primaire ne traversent pas toutes le circuit secondaire : un certain nombre d'entre elles passent par l'air et ne concourent pas à la production d'une force électromotrice secondaire. On dit que le transformateur présente de la *dispersion* ou qu'il a des *fuites*.

Théoriquement, s'il n'y avait pas de fuites, le coefficient d'induction mutuel m serait égal à la racine carrée du produit des coefficients de self-induction de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire pris isolément. En appelant m le coefficient d'induction mutuelle, l_1 et l_2 les coefficients de self-induction du primaire et du secondaire, on aurait :

$$m^2 = l_1 l_2 \quad \text{ou} \quad m = \sqrt{l_1 l_2}.$$

Pratiquement, à cause des fuites, le coefficient d'induction mutuelle a une valeur inférieure à celle-ci.

On appelle **accouplement** entre le primaire et le secondaire le rapport du coefficient réel d'induction mutuelle à la racine carrée du produit des deux coefficients de self-induction.

Le coefficient d'accouplement magnétique k est donné par la formule :

$$k = \frac{m}{\sqrt{l_1 l_2}}.$$

(1) En fait, l'intensité du courant secondaire est inférieure à cette valeur à cause des pertes d'énergie dans le transformateur, dont le rendement est un peu inférieur à l'unité. De même, la tension secondaire est légèrement inférieure au produit de la tension primaire par le rapport de transformation.

Quand il y a très peu de fuites, le numérateur et le dénominateur de cette expression sont presque égaux, et le coefficient k est égal à l'unité : on dit que l'accouplement est rigide ou serré (accouplement parfait).

Si, au contraire, les fuites sont assez importantes pour que la valeur de l'accouplement k soit petite, inférieure à 0,5 par exemple, on dit que l'accouplement est lâche ou faible (accouplement imparfait).

Les transformateurs sont des appareils extrêmement commodes toutes les fois que l'on dispose de courant alternatif, car ils permettent d'élever ou d'abaisser à volonté la tension suivant les applications.

Les effets d'induction entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire sont d'autant plus intenses que la fréquence du courant alternatif primaire est plus élevée. Les transformateurs employés avec des courants de très grande fréquence, tels que ceux utilisés en radiotélégraphie, ne contiennent pas de fer parce que les courants parasites produits dans ce métal acquerraient une trop grande importance et que les effets d'induction sont suffisamment puissants sans fer.

Bobine de Ruhmkorff.

Lorsqu'on a besoin de hautes tensions et qu'on dispose seulement de courant continu ⁽¹⁾, on peut le convertir en courant intermittent au moyen d'un commutateur approprié qui effectue des interruptions périodiques, et l'on utilise ce courant intermittent pour produire, dans le noyau d'un transformateur, un flux variable.

⁽¹⁾ Fourni, par exemple, par des piles ou des accumulateurs.

La *Bobine de Ruhmkorff* ou *Bobine d'induction*, souvent employée dans les petits postes radiotélégraphiques, repose sur ce principe.

Elle comprend (fig. 19) un noyau de fer⁽¹⁾ sur lequel sont enroulées une bobine primaire P contenant un petit nombre

de tours de gros fil et une bobine secondaire S contenant un très grand nombre de tours de fil fin. Le courant intermittent qui circule dans l'enroulement primaire P produit dans le noyau de fer un flux magnétique variable qui se referme

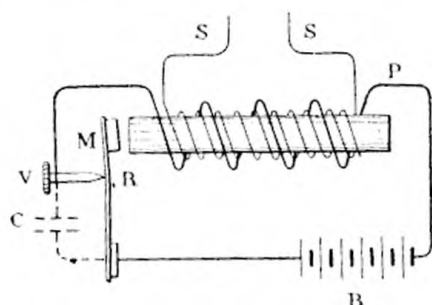


Fig. 19.

par l'air environnant⁽²⁾: ce flux induit dans l'enroulement secondaire une force électromotrice proportionnelle au rapport de transformation. Ce rapport étant, en général, très grand, la tension secondaire est très élevée et permet d'obtenir des étincelles électriques de plusieurs centimètres de longueur.

Sur le schéma de la figure 19, on a supposé que le courant, provenant d'une batterie de piles ou d'accumulateurs B, était rendu intermittent par le jeu d'un interrupteur-trembleur à marteau, d'après un dispositif fréquemment adopté. Le trembleur consiste en une lame métallique élastique portant une masselotte M : une vis V appuie sur un contact fixé à la lame. Dans la position du trembleur repré-

(1) Ce noyau est en fils de fer fins pour éviter la production de courants de Foucault.

(2) On voit que, les lignes de force magnétiques engendrées dans le noyau se refermant sur elles-mêmes à travers l'air qui environne la bobine, cet appareil constitue un *transformateur à fuites*.

sentée sur la figure, la vis V appuie sur le contact et le circuit primaire est fermé; le courant s'établit donc dans l'enroulement primaire. A ce moment, le noyau de fer s'aimante et attire la masse du trembleur; le contact s'éloigne de la vis V, le circuit est rompu, et le courant cesse. Le trembleur est ramené alors à sa position primitive par son élasticité, et le contact se rétablit, etc. Pour atténuer les étincelles produites entre les points de contact au moment des ruptures ⁽¹⁾, on place généralement en dérivation sur ceux-ci un condensateur C (figuré en pointillé).

Les bobines un peu puissantes ne sont pas munies d'un trembleur, dont les contacts se détérioreraient trop vite. Leur primaire est relié à un appareil établi pour produire des ruptures de courant très brusques. Plus les ruptures du courant primaire sont brusques, plus les variations de flux qui en résultent dans le noyau sont brusques, et plus les effets d'induction sont intenses.

Différents dispositifs, adoptés pour l'établissement de ces interrupteurs, permettent d'éviter la détérioration des points de contact. L'un des plus anciens comprend un vase contenant du mercure et une pointe métallique, reliée à l'un des pôles de la source du courant, qui vient plonger dans le mercure relié électriquement au primaire de la bobine. La pointe est mise en mouvement alternatif par l'action d'un petit moteur électrique et est immergée dans le mercure ou soulevée hors de celui-ci un certain nombre de fois par seconde, produisant ainsi l'établissement ou la rupture du courant dans le primaire de la bobine. Du pétrole, placé sur la surface du mercure, empêche l'effet destructeur des étincelles qui pren-

(1) Étincelles produites par l'extra-courant de rupture dû à la self-induction de l'enroulement primaire P.

nent naissance à chaque rupture de courant. D'autre part, le mercure étant liquide, le point où s'établit le contact avec la pointe change à chaque instant, et il ne peut pas y avoir de détérioration permanente.

Cet appareil, inventé par Foucault, a donné lieu à de nombreux perfectionnements ou modifications, mais son principe reste fréquemment utilisé.

Dans d'autres interrupteurs, une petite turbine, animée d'un mouvement de rotation rapide, projette autour d'elle un ou plusieurs jets de mercure. Ceux-ci rencontrent, en certains points, une ou plusieurs plaques métalliques avec lesquelles ils établissent des contacts électriques. Le tout est immergé dans un liquide isolant.

PREMIÈRE PARTIE

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA PRODUCTION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

CHAPITRE III

MOUVEMENT VIBRATOIRE ET RAYONNEMENT

Les actions électriques et magnétiques sont dues à un mouvement vibratoire propagé par un certain milieu : il en est de même des phénomènes de radiation lumineuse, chimique et calorifique. Le milieu qui vibre et par l'intermédiaire duquel se propagent les vibrations est nommé *éther* : on suppose qu'il existe partout, dans l'espace interplanétaire, dans le vide, et au sein de tous les corps, solides, liquides ou gazeux.

Ces notions vont être expliquées et étudiées en détail.

Mouvement vibratoire.

On dit qu'un point déterminé effectue un mouvement vibratoire quand il se déplace, sur une courbe ou sur une droite, de part et d'autre d'une position moyenne.

Un exemple mécanique fera comprendre cette définition.

Considérons (fig. 20) une lame plate d'acier A élastique fixée par l'une de ses extrémités B dans un étau. Écar-



FIG. 20.

tons de sa position normale l'autre extrémité C de cette lame et amenons-la en C' par exemple, puis abandonnons-la brusquement. La lame se met à vibrer : l'extrémité libre retourne vers sa position normale C qu'elle dépasse pour aller jusqu'en C'' ; là, elle s'arrête, puis revient en arrière vers la position C qu'elle dépasse à nouveau, etc.

Si le mouvement de la lame ne rencontrait aucune résistance (telle que celle due au frottement de l'air) les vibrations pourraient continuer indéfiniment. Dans le cas dont il s'agit, elles vont en s'éteignant peu à peu et l'on dit que le mouvement est amorti.

Fixons notre attention sur un point de l'extrémité C de la lame : pendant les vibrations de celle-ci, ce point est animé d'un *mouvement vibratoire* et décrit la courbe C'C'' qui, pour une longueur suffisante BC de la lame, peut être assimilée à une droite. Le mouvement vibratoire du point considéré est caractérisé par le fait que la vitesse de déplacement de ce point est variable suivant les différentes positions qu'il occupe. En effet, la vitesse est nulle en C' et va en croissant peu à peu jusqu'en C ; au delà du point C, l'élasticité de la lame agit pour ralentir le mouvement et la vitesse va en diminuant jusqu'au point C'' où elle s'annule. Ensuite le mouvement se produit en sens inverse, et la vitesse va en croissant jusqu'en C, pour décroître ensuite, etc.

On a donné le nom de mouvement vibratoire harmonique à ce genre de mouvement vibratoire, pour lequel la vitesse du point qui vibre atteint un maximum au moment du passage à la posi-

tion moyenne, et va en décroissant de part et d'autre de cette position.

On appelle fréquence du mouvement vibratoire le nombre de vibrations complètes par seconde : par vibration ou oscillation complète, on entend la vibration totale de part et d'autre de la position moyenne, et l'on compte comme demi-vibration ou demi-oscillation le mouvement, aller et retour, qui a lieu d'un seul côté de la position moyenne.

On appelle période du mouvement vibratoire la durée d'une vibration ou oscillation complète. Le nombre qui exprime la période T est l'inverse de celui qui exprime la fréquence f : par exemple, s'il y a 1000 vibrations par seconde ($f = 1000$), la durée d'une vibration est de un millièrne de seconde ($T = 1/1000$).

On appelle amplitude du mouvement vibratoire la distance d'une position extrême du point par rapport à la position moyenne (CC' ou CC'' par exemple), ou, autrement dit, la grandeur d'une demi-vibration ou demi-oscillation.

Si le mouvement est amorti, comme dans l'exemple indiqué, l'amplitude de chaque demi-vibration est plus petite que l'amplitude de la demi-vibration précédente ; on dit que *l'amplitude du mouvement va en décroissant, et cette décroissance est déterminée par un certain facteur, dit facteur d'amortissement, qui dépend du rapport de l'amplitude d'une demi-oscillation à celle de la demi-oscillation précédente.*

On pourrait, en employant un procédé quelconque, par exemple en faisant agir sur la lame une force périodique convenable, empêcher les oscillations d'aller en s'éteignant et faire en sorte que leur amplitude conserve toujours la même valeur : le mouvement vibratoire serait alors un *mouvement entretenu*.

Enfin on pourrait aussi, par l'application d'une force pé-

riodique convenable, faire en sorte que l'amplitude des oscillations aille en croissant : il sera question de ce cas dans le chapitre relatif à la Résonance.

En désignant par t le temps écoulé, à un instant quelconque, depuis le passage du point à sa position moyenne, et par T la durée ou période de la vibration, on appelle **phase du mouvement vibratoire** une grandeur proportionnelle au rapport de t à T .

On conçoit sans peine que, connaissant la phase, la période et la loi de variation du mouvement, on puisse en déduire la position du point à un instant t quelconque ⁽¹⁾.

L'exemple mécanique qui précède permet de se rendre compte du mouvement vibratoire harmonique d'un point. Ce point peut représenter une particule d'un corps matériel quelconque, solide, liquide ou gazeux qui, sous l'action de certaines forces, effectue des vibrations, amorties ou non amorties. Il peut aussi représenter une particule d'un milieu particulier, nommé *éther*, dont il va être question.

L'éther.

L'étude de la lumière et des différents phénomènes qui s'y rattachent a conduit Huygens à formuler, depuis plus de deux siècles, l'hypothèse que la propagation des rayons lu-

⁽¹⁾ On démontre mathématiquement que, dans le mouvement vibratoire harmonique, la distance d qui sépare le point de sa position moyenne au bout du temps t est liée à l'amplitude a et à la période T par la formule

$$d = a \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

La phase a pour valeur $\frac{2\pi}{T} t$, ou $2\pi ft$, que l'on écrit pour abrégé ωt .

mineux est due à des vibrations d'un milieu particulier qu'il a appelé l'éther. Toutes les découvertes successives de la science ont confirmé cette manière de voir, et l'existence de l'éther est devenue presque certaine.

Il n'y a pas lieu de s'étonner de ce que l'éther soit répandu au sein de ce que nous appelons la matière (corps solides, liquides ou gazeux) puisque celle-ci est formée d'une agglomération d'atomes entre lesquels existent d'innombrables intervalles ou interstices, et que, d'après les théories les plus récentes, les atomes eux-mêmes semblent constitués par un assemblage de petits centres portant chacun une charge électrique (électrons). Les intervalles ou interstices sont de dimensions beaucoup trop faibles pour pouvoir être perçus par notre œil, même avec un puissant microscope, de même que les intervalles existant entre les hommes d'une troupe ne peuvent être perçus par un observateur placé dans un ballon à une certaine hauteur.

L'éther est donc un agent répandu dans tout l'univers, et les phénomènes lumineux (y compris les radiations chimiques et calorifiques, comme nous le verrons plus loin), ainsi que les phénomènes électriques ou magnétiques, consistent, soit en une vibration (effets de propagation, ou effets dynamiques), soit en une déformation (effets statiques) de l'éther, cette vibration ou cette déformation étant produite par l'action d'une cause extérieure.

La constitution réelle de l'éther n'est pas connue, mais certaines des propriétés principales de ce milieu ont pu être déterminées d'après les lois auxquelles obéissent les phénomènes lumineux ou électriques.

Nous allons voir comment les vibrations produites par une cause extérieure (source lumineuse, par exemple) peuvent se propager dans l'éther et donner lieu à une transmission de l'énergie.

Rayonnement.

Supposons que l'éther soit formé d'un assemblage de particules qui, en temps normal, se tiennent toutes en équilibre sous l'action des forces mutuelles qu'elles exercent les unes sur les autres. Si l'une des particules, que, pour plus de commodité, nous appellerons dans la suite *particule initiale*, est écartée de sa position d'équilibre par l'action d'une cause extérieure, l'équilibre des forces mutuelles est rompu et les particules voisines de la particule initiale se mettent en mouvement pour chercher une nouvelle position d'équilibre. A leur tour, les particules voisines de celles qui se déplacent vont se mettre en mouvement, puis il en sera de même des suivantes, etc. ⁽¹⁾

Cette transmission de proche en proche, ou propagation du mouvement imprimé à la particule initiale, est appelée rayonnement, ou radiation.

Il est évident que la propagation du mouvement de la particule initiale a lieu dans toutes les directions autour de cette particule, toutes les particules qui l'entourent prenant part au mouvement. *On appelle rayon l'une quelconque des directions suivant laquelle se propage le mouvement.*

Supposons que le mouvement imprimé à la particule initiale *c*, située primitivement en C (fig. 21), soit un mouvement vibratoire harmonique de période T dirigé suivant la droite C'C'' et ayant une amplitude constante CC'. Considérons un rayon CA suivant lequel le mouvement se propage de proche

⁽¹⁾ On suppose que le mouvement de chaque particule est de même nature que le mouvement de la particule voisine qui lui a donné naissance.

en proche. Les *vibrations* sont dites *transversales* parce qu'elles sont perpendiculaires au rayon, c'est-à-dire à la direction de

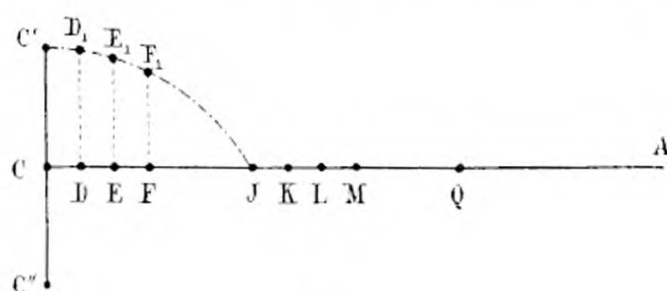


FIG. 21.

propagation. Soient d la particule voisine de c dans cette direction, e la particule voisine de d , f la particule voisine de e , etc.

La particule initiale c se mettant en mouvement, la particule d va suivre peu après, puis e , puis f , puis..., etc. Quand la particule c est parvenue à la position C' qui marque le terme de son déplacement dans la direction CC' , la particule d , qui a commencé son mouvement un peu après elle, n'est encore qu'en D_1 ; la particule e n'est parvenue qu'en E_1 , la particule f a atteint la position F_1 ..., etc.: la particule j , qui est au point J , n'a pas encore commencé son mouvement; il en est de même de toutes les particules situées à droite de J dans la direction JA . A ce moment, le temps t écoulé depuis le début du mouvement vibratoire de la particule c est égal à un quart de période, ou $T/4$, puisque la particule c a effectué la moitié d'une demi-oscillation, ou un quart d'oscillation complète.

Après avoir atteint la position C' , la particule c va revenir vers la position C : la particule d continue son mouvement pour atteindre la position qui correspond à l'amplitude maxima du mouvement vibratoire (égale, par hypothèse, à l'amplitude CC'): de même les particules e , f ..., etc. continuent à se déplacer dans la même direction qu'auparavant,

et la particule j commence son mouvement. Un instant après, d , ayant atteint son plus grand déplacement, commence à revenir vers la position D , tandis que $e, f, \dots j$ continuent à se mouvoir dans le sens primitif, pour atteindre leurs positions extrêmes : la particule k , située au point K , se met en mouvement. Tour à tour, les particules $e, f, \dots j$ atteignent chacune leur position extrême puis reviennent en arrière, leur mouvement changeant de sens, tandis qu'à leur tour les particules l, m, \dots situées primitivement aux points L, M, \dots commencent leur mouvement.

Considérons le moment où la particule j atteint sa position extrême J_2 (fig. 22). Nous avons vu plus haut qu'elle commençait son mouvement au bout d'un temps $t = T/4$:

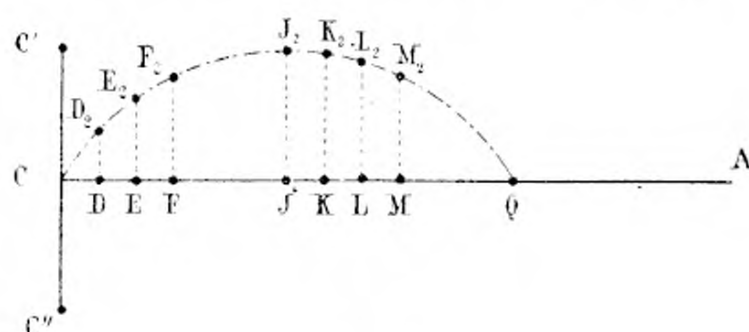


FIG. 22.

il lui faut, comme cela a été expliqué, un quart de période ($T/4$) pour atteindre sa position extrême. A ce moment, il s'est donc écoulé, depuis le début du mouvement de la particule c , un intervalle de temps égal à deux quarts de période ($T/4 + T/4$) ou une demi-période ; par conséquent, la particule c repasse alors par sa position moyenne C après avoir effectué une demi-vibration ou oscillation. Les particules d, e, f, \dots descendent aussi vers leurs positions moyennes D, E, F ; elles sont en D_2, E_2 et F_2, \dots ; les particules k, l, m, \dots sont en K_2, L_2, M_2, \dots et continuent leur mouvement ascendant pour atteindre à leur tour leurs positions extrêmes ;

la particule q , située en Q , n'a pas encore bougé, mais elle va commencer son mouvement.

Après cet intervalle de temps égal à une demi-période, la particule c dépasse sa position moyenne C et se dirige vers C'' : il en est de même, tour à tour, des particules d , e , f ... Au bout d'un nouveau quart de période, c'est-à-dire trois quarts de période après le début du mouvement de la particule c , cette particule atteint le point C'' (fig. 23); les particules d , e , f ... ont atteint les positions D_3 , E_3 , F_3 ... et conti-

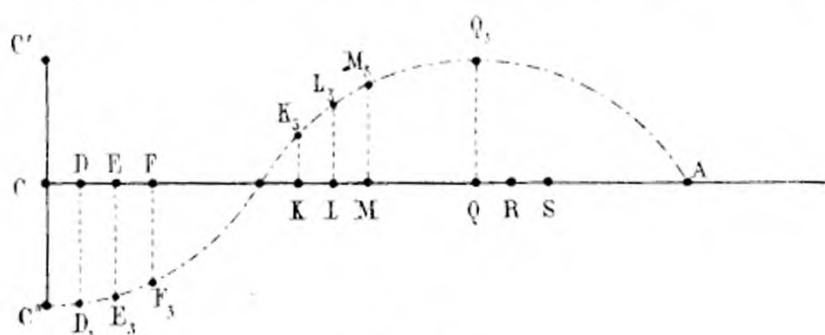


FIG. 23.

nent leur mouvement vers le bas. La particule j se trouve à sa position moyenne J puisque, un quart de période auparavant, elle était à sa position extrême J_2 . Les particules k , l , m ... se dirigent vers leurs positions moyennes K , L , M ... et sont en K_3 , L_3 , M_3 ... : quant à la particule q , elle se trouve à sa position extrême Q_3 , puisqu'elle a commencé son mouvement au bout d'une demi-période et qu'il s'est écoulé depuis lors un temps égal à un quart de période. Enfin, la particule a , située en A , n'a pas encore bougé, mais va commencer son mouvement.

Après avoir atteint la position C'' , la particule c remonte vers sa position moyenne C , les particules d , e , f ... continuent leur mouvement pour atteindre leurs positions extrêmes inférieures : la particule j se déplace vers le bas ; les particules k , l , m ... q redescendent ; les particules situées à

droite de q continuent leur mouvement vers le haut pour atteindre à leur tour leurs positions extrêmes supérieures; la particule a commence son mouvement; les particules qui sont à droite n'ont pas encore bougé mais vont commencer tour à tour leur mouvement. Au bout d'un quart de période, c'est-à-dire quatre quarts de période, ou une période entière T après le début du mouvement (fig. 24), la particule c est revenue en C ; les particules $d, e, f...$ sont en $D_1, E_1, F_1...$ etc., et se dirigent vers D, E, F : la particule j a atteint sa

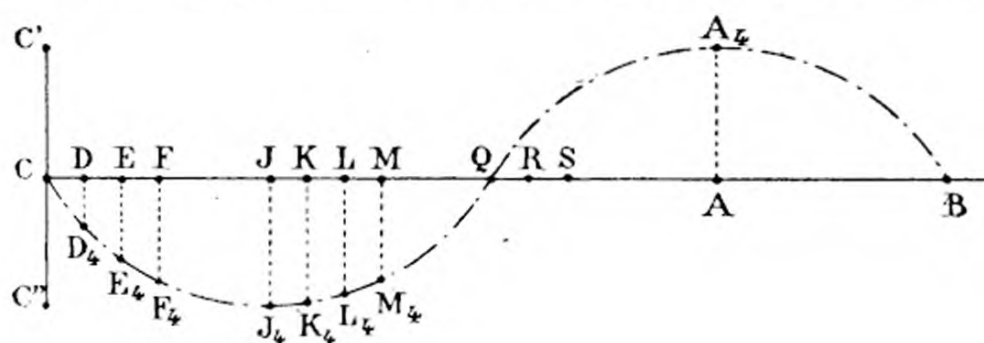


FIG. 24.

position extrême inférieure J_1 ; les particules $k, l, m...$ sont en $K_1, L_1, M_1...$ et continuent leur mouvement vers le bas; la particule q est revenue en Q après une demi-oscillation et va se déplacer vers le bas; la particule a a atteint sa position extrême supérieure A_1 et va redescendre; les particules placées à sa droite continuent leur mouvement vers le haut; la particule b , située en B , n'a pas encore bougé, mais va commencer son mouvement.

A partir de ce point B , tout va se passer identiquement de la même manière qu'à partir du point C , à la différence près que le mouvement aura commencé une période plus tard. Au bout d'un nouvel intervalle de temps T , c'est-à-dire au bout d'un temps $2T$ après le commencement du phénomène, le mouvement aura progressé d'une longueur égale à 2 fois la longueur CB ; au bout d'un temps $3T$,

il atteindra une particule située à une distance $3CB$ du point C..., etc.

On voit que le mouvement vibratoire se propage, dans une direction donnée, sous forme d'une onde qui progresse de proche en proche, comme l'onde que produit sur une surface liquide le choc d'une pierre tombant dans ce liquide.

Les courbes tracées en trait-point sur les figures 21, 22, 23 et 24 donnent une idée de la propagation de cette onde.

On appelle **longueur d'onde** la longueur dont progresse le mouvement vibratoire pendant une période T c'est-à-dire le chemin parcouru par la tête de l'onde pendant le temps T . Ce chemin correspond, sur la figure 24, à la longueur CB qui représente, par conséquent, la longueur d'onde.

Il est évident que la longueur d'onde dépend de la *vitesse de propagation* du mouvement vibratoire. Si l'on désigne par v cette vitesse, on voit que le chemin parcouru par la tête de l'onde en un temps T a pour valeur vT . La longueur d'onde (que l'on désigne généralement par le symbole λ) est donc donnée par la formule

$$\lambda = vT$$

qui permet de déterminer la longueur d'onde quand on connaît la période, ou, inversement, la période quand on connaît la longueur d'onde. Quant à la vitesse v , elle a une valeur constante, indépendante de la cause extérieure qui a provoqué le mouvement vibratoire de l'éther (phénomènes lumineux ou phénomènes électriques). Cette valeur est d'environ 300 000 kilomètres ou 300 000 000 mètres par seconde dans l'éther libre⁽¹⁾.

(1) C'est-à-dire dans l'espace, l'éther semblant posséder une densité un peu plus grande quand il est au sein de solides ou de liquides, et la vitesse de propagation étant, par suite, un peu plus faible.

Nous avons vu plus haut que la fréquence f du mouvement vibratoire (nombre de vibrations complètes par seconde) est égale à l'inverse de la période T : la longueur d'onde λ est donc liée à la fréquence par la formule

$$\lambda = v \left(\frac{1}{f} \right) \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{300\,000\,000}{f} \text{ en mètres.}$$

Par exemple, une fréquence 1 000 000 (fréquemment employée dans les petits postes radiotélégraphiques) correspond à une longueur d'onde de 300 mètres. Inversement, une longueur d'onde de 5 dix-millièmes de millimètre, par exemple (0,0005 millimètre) telles que celle des vibrations lumineuses, correspond à une fréquence de 600 000 000 000 ~~000~~, ou de 600 billions par seconde.

Comme on peut le voir d'après les figures 23 et 24, les déplacements de deux particules distantes d'une demi-longueur d'onde (par exemple des particules d et r , e et s , etc.), sont toujours égaux et de sens contraire.

Les phases⁽¹⁾ des mouvements vibratoires de deux particules distantes d'une demi-longueur d'onde sont toujours égales et opposées.

Les phases des mouvements vibratoires de deux particules distantes d'une longueur d'onde sont toujours égales et concordantes, puisque, à partir du point B, tout se passe de la même manière qu'à partir du point C.

(1) La phase a été définie à la page 48.

CHAPITRE IV

RADIATION CHIMIQUE, LUMINEUSE, CALORIFIQUE ET ÉLECTRIQUE

Le mouvement vibratoire de l'éther se manifeste sous forme de phénomènes très dissemblables suivant la fréquence des vibrations. Ces phénomènes, appelés *phénomènes de radiation*, sont caractérisés par l'apparition d'effets chimiques, d'effets lumineux, d'effets calorifiques ou d'effets électriques et magnétiques.

Les *effets chimiques* correspondent à la radiation caractérisée par les plus petites longueurs d'onde (ou les plus grandes fréquences): ces longueurs d'onde sont comprises à peu près entre 0,1 et 0,4 micron⁽¹⁾.

Les *effets lumineux* (accompagnés aussi, d'une façon plus ou moins marquée, d'effets chimiques et d'effets calorifiques) correspondent à la radiation caractérisée par des longueurs d'onde comprises à peu près entre 0,4 et 0,75 micron.

Les *effets calorifiques* correspondent à la radiation caractérisée par des longueurs d'onde comprises entre 0,75 et 60 μ environ.

Enfin les *effets électriques et magnétiques* correspondent à la radiation caractérisée par des longueurs d'onde comprises entre 4 millimètres (actuellement) et quelques kilomètres.

(1) Le micron, que nous désignerons dans la suite par la lettre μ , est une unité ayant pour valeur un millièème de millimètre: $1 \mu = 0,001$ millimètre.

Les vibrations correspondant à des longueurs d'onde comprises entre 60μ (0,06 millimètre) et 4 millimètres nous échappent actuellement.

Il y a lieu d'ajouter à cette énumération deux catégories de rayons dont la découverte est d'origine récente : ce sont les rayons Röntgen et les rayons γ du radium⁽¹⁾, dont la longueur d'onde s'abaisse jusqu'à un dix-millième de micron.

Rayons lumineux. Rayons chimiques et calorifiques.

La nature nous a dotés d'un appareil optique particulier, l'œil, qui, sous l'action d'un mouvement vibratoire dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 0,75 μ , c'est-à-dire sous l'action de vibrations dont la fréquence est comprise entre 750 et 400 billions par seconde, perçoit une certaine sensation que nous appelons la lumière.

Une expérience de Physique bien connue consiste à faire passer à travers un prisme en verre un faisceau de lumière blanche. On constate alors, en plaçant un écran au delà du prisme, que ce faisceau de lumière blanche est décomposé en une bande de faisceaux lumineux de différentes couleurs rangées dans l'ordre suivant : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Cela tient à ce que le mouvement vibratoire complexe qui donne à notre rétine la sensation que nous nommons lumière blanche est formé par la superposition de mouvements vibratoires simples de différentes longueurs d'onde, comprises entre 0,4 et 0,75 μ . Autrement dit, le rayon de lumière blanche est formé par la superposition d'un certain nombre de rayons différents qui correspondent chacun à des vibra-

(1) Le radium émet simultanément plusieurs sortes de rayons nettement distinctes, désignées par les lettres α , β , γ .

tions d'une fréquence donnée. La présence du prisme en verre ayant pour effet de dévier d'une quantité différente chacun des rayons simples qui constituent le rayon complexe, ce dernier se trouve décomposé en ses éléments constitutifs, et l'on voit apparaître une série de rayons qui donnent à notre rétine des sensations individuelles variables, comprises entre ce que nous appelons lumière violette et ce que nous appelons lumière rouge.

A chaque mouvement vibratoire simple d'une longueur d'onde déterminée correspond une sensation, ou couleur, déterminée : le violet correspond à une longueur d'onde de $0,4 \mu$; le jaune correspond à la longueur d'onde de $0,54 \mu$; le rouge correspond à la longueur d'onde de $0,75 \mu$.

Les vibrations correspondant à des longueurs d'onde inférieures à $0,4 \mu$ ou supérieures à $0,75 \mu$ n'exercent aucune impression sur notre œil. Cependant on peut constater que, en deçà du violet, pour des longueurs d'onde inférieures à $0,4 \mu$, il existe dans les rayons solaires des rayons invisibles, appelés ultra-violets, qui produisent des effets chimiques, faciles à déceler, par exemple au moyen d'une plaque photographique. De même, au delà du rouge, il existe encore des rayons invisibles, dont les longueurs d'onde s'étendent entre $0,75$ et 60μ , et qui produisent des effets calorifiques, faciles à déceler, par exemple au moyen d'un thermomètre recouvert de noir de fumée. Ces rayons sont appelés infra-rouges.

Il ne faut pas croire que les rayons chimiques, lumineux et calorifiques soient nettement distincts les uns des autres : ils forment toujours ensemble une radiation complexe et sont engendrés simultanément par tous les corps portés à l'incandescence⁽¹⁾.

(1) L'énergie dépensée pour échauffer un corps met en vibration les molécules ou

Le soleil, formé de gaz et de vapeurs incandescents, est une puissante source lumineuse dont les radiations éclairent et chauffent la terre. Il était tout naturel que l'esprit des physiciens s'attachât à chercher les causes et les lois de ces radiations : c'est pourquoi la théorie des phénomènes lumineux et les lois de l'optique sont connues depuis un grand nombre d'années et nous sont, pour ainsi dire, devenues familières.

Rayons électriques.

Tandis que les lois auxquelles obéissent les phénomènes lumineux étaient bien déterminées, celles auxquelles obéissent les phénomènes électriques l'étaient infiniment moins, et l'analogie entre ces deux sortes de phénomènes, quoique pressentie par quelques savants et, en particulier, par Maxwell, n'avait pu être démontrée expérimentalement.

Il y a un quart de siècle, un physicien allemand, H. Hertz, réussit à produire, au moyen d'un appareil que nous étudierons dans la suite, des oscillations électriques susceptibles de communiquer à l'éther un mouvement vibratoire ayant une longueur d'onde de quelques mètres.

Sur les *rayons électriques* ainsi engendrés, il renouvela, avec des appareils appropriés, les expériences fondamentales de l'optique (réflexion, réfraction, etc.) et constata que les rayons électriques obéissent exactement aux mêmes lois que les rayons lumineux. L'identité des deux mouvements vibra-

les atomes de ce corps. Plus la température à laquelle le corps est chauffé est élevée, et plus est grande la fréquence des vibrations, c'est-à-dire plus est courte la longueur d'onde des rayons émis. Aux températures inférieures à celle de l'incandescence, le corps émet seulement des rayons de grande longueur d'onde, c'est-à-dire des rayons calorifiques. A mesure que la température s'élève, il émet de plus en plus de rayons lumineux.

toires était ainsi nettement démontrée : la théorie électromagnétique de la lumière, énoncée par Maxwell, recevait une éclatante confirmation, et la Physique générale franchissait un grand pas.

Pour diminuer l'intervalle qui sépare les rayons électriques des rayons calorifiques, Hertz et différents expérimentateurs, parmi lesquels il convient de citer M. Righi, s'attachèrent à diminuer autant que possible la longueur d'onde du mouvement vibratoire ainsi produit, en augmentant la fréquence des vibrations électriques.

Ils sont parvenus à obtenir des ondes de 4 millimètres environ de longueur d'onde, c'est-à-dire des vibrations électriques ayant une fréquence de 75 000 000 000.

En principe, il n'y aurait aucune impossibilité à ce que l'on obtienne des ondes encore plus courtes, mais, on est limité dans cette voie par des difficultés d'ordre mécanique et par la sensibilité des appareils employés pour déceler la présence des ondes électriques.

Énergie rayonnante.

On appelle souvent *énergie rayonnante* l'énergie propagée par rayonnement, sans spécifier quels sont les effets produits par le mouvement vibratoire de l'éther. Comme nous l'avons vu, la nature de ces effets dépend uniquement de la longueur d'onde des rayons, ou de la fréquence des vibrations, et quels que soient ces effets, les ondes sont toujours de même nature.

Les mouvements vibratoires que nous connaissons correspondent à des longueurs d'onde comprises entre 0,0001 ¹⁰ et 60 μ , puis entre 4 millimètres et l'infini, c'est-à-dire qu'ils

ont des fréquences comprises entre 3 trillions et 5 billions, puis entre 75 milliards et zéro.

Notre œil est impressionné par les rayons de longueurs d'onde de 0,4 à 0,75 μ , c'est-à-dire par des fréquences de 750 à 400 billions par seconde : c'est là une portion extrêmement faible de la gamme totale des vibrations.

Quant aux mouvements vibratoires de longueurs d'onde comprises entre 60 μ (onde calorifique la plus longue) et 4 millimètres (onde électrique la plus courte), nous ne connaissons pas, à l'heure actuelle, leurs propriétés particulières, mais, suivant toute probabilité, ils sont semblables aux rayons électriques. D'ailleurs MM. Rubens et Aschkinass ont pu isoler, par réflexions successives, des ondes calorifiques de 61 μ de longueur et ont constaté que ces ondes ressemblent beaucoup plus aux ondes électriques qu'aux ondes lumineuses.

Les mouvements vibratoires de l'éther se propagent non seulement dans l'espace libre, mais encore dans les corps solides, liquides ou gazeux, puisque ceux-ci sont comme imprégnés d'éther.

Dans certains de ces corps, ils subissent une absorption très considérable, parfois même une transformation, et sont ainsi arrêtés.

Dans d'autres, au contraire, ils ne subissent qu'une absorption très faible et semblent les traverser librement.

Ainsi, comme on le sait fort bien, tous les corps opaques arrêtent les rayons lumineux, tandis que les corps transparents, comme le verre, les laissent passer avec une très faible absorption ; le verre arrête, par contre, les rayons ultraviolets, que le quartz laisse passer. Les rayons électriques sont arrêtés par les métaux et, en général, par les corps bons conducteurs de l'électricité : ils traversent librement,

au contraire, les isolants, tels que le verre, le bois, la pierre, etc., etc.

On peut résumer les propriétés des corps matériels par rapport aux mouvements vibratoires de l'éther en disant que chacun d'eux absorbe fortement les rayons ayant certaines longueurs d'onde, et faiblement les rayons d'autres longueurs d'onde.

En outre, quelques corps ont la propriété curieuse de transformer les rayons d'une longueur d'onde donnée en rayons d'une longueur d'onde un peu différente : ces corps sont dits fluorescents : la rhodamine en est un exemple ; elle transforme les rayons violets en rayons rouges.

Transmission de l'énergie par le mouvement vibratoire.

D'après ce qui précède, on conçoit facilement que le mouvement vibratoire de l'éther puisse être utilisé en radiotélégraphie pour transmettre, au moyen de rayons électriques, des signaux déterminés, de même que la télégraphie optique utilise pour cela des rayons lumineux.

Il existe une différence, non de principe, mais d'application, entre ces deux systèmes de télégraphie à distance : c'est que, dans la télégraphie optique, on peut concentrer les rayons lumineux en un faisceau parallèle au moyen d'un système de miroirs et de lentilles, tandis qu'en radiotélégraphie, le même procédé n'est pas applicable à cause des dimensions énormes qu'il faudrait donner aux appareils. En effet, les longueurs d'onde employées en radiotélégraphie sont d'environ cinq cent millions de fois plus grandes que les longueurs d'onde des rayons lumineux, et les dimensions des appareils devraient être accrues à peu près dans les mêmes proportions.

Un poste transmetteur émet donc des rayons électriques dans toutes les directions ⁽¹⁾. Au poste récepteur, on emploie un détecteur d'ondes électriques, jouant, vis-à-vis de celles-ci, le rôle que jouent, vis-à-vis des ondes lumineuses, les parties constitutives de notre œil. Les rayons électriques ont, sur les rayons lumineux, l'avantage d'être beaucoup plus difficilement absorbés parce que leur longueur d'onde est beaucoup plus grande.

(1) Sauf lorsqu'on utilise certains dispositifs, dont il sera question dans la suite, et qui permettent d'obtenir une intensité de radiation beaucoup plus grande suivant une direction donnée que suivant les autres directions.

CHAPITRE V

PRODUCTION DES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES

La radiotélégraphie repose sur la production d'ondes électromagnétiques qui progressent dans l'espace. Pour obtenir de telles ondes, il faut engendrer, en un point donné, un mouvement vibratoire de l'éther : ce mouvement vibratoire est produit par des oscillations électromagnétiques ⁽¹⁾ fournies par des systèmes nommés *oscillateurs* ou *excitateurs*, dont le fonctionnement va être étudié dans ce chapitre.

Circuits oscillants.

Formons un circuit contenant un condensateur α^2 de capacité c (fig. 25), une bobine de self-induction L ⁽²⁾ et un appareil, nommé *éclateur*, composé de deux pièces métalliques A et B, généralement sphériques ou cylindriques ⁽³⁾, que sépare un certain intervalle d'air. Relions les deux pié-

(1) On verra plus loin en quoi consiste une *oscillation électromagnétique*. D'autre part, on désigne sous le nom d'*oscillation électrique* un courant alternatif de grande fréquence.

(2) Comprenant quelques tours de fil et ne contenant pas de fer.

(3) Ces pièces sont appelées *électrodes* de l'éclateur.

D'une façon générale, le mot *électrodes* est employé en électrochimie pour désigner les pièces métalliques (pointes, plaques, fils, etc.) plongées dans un liquide que l'on soumet à une certaine différence de potentiel ou dont l'action sur ces pièces métalliques engendre une certaine différence de potentiel.

Par extension, on a pris l'habitude de désigner souvent sous le nom d'électrodes les

ces A et B aux extrémités de l'enroulement secondaire d'une bobine de Ruhmkorff ou d'un transformateur capable de

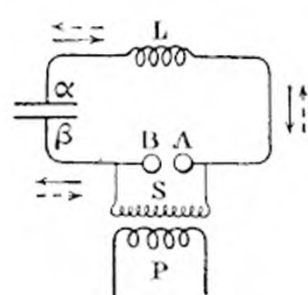


FIG. 25.

produire une différence de potentiel élevée. Le primaire P de cette bobine ou de ce transformateur est alimenté soit par du courant intermittent, soit par du courant alternatif produit par un générateur électrique.

Quand le primaire P est relié au générateur électrique, la différence

de potentiel secondaire agit pour charger peu à peu le condensateur dont les deux armatures α et β prennent des potentiels croissants, égaux et de signes contraires. Pendant toute la durée de la charge, le circuit est parcouru par un certain courant, dont la valeur ne nous importe pas en ce moment. La différence de potentiel V , qui existe à un instant quelconque entre les deux armatures du condensateur, existe aussi entre les deux pièces A et B de l'éclateur, puisque chacune de celles-ci est reliée métalliquement à l'une des armatures⁽¹⁾. A un moment donné, cette différence de potentiel, qui va en croissant avec la charge du condensateur⁽²⁾, atteint la valeur pour laquelle l'intervalle d'air com-

pièces constitutives d'un appareil quelconque, entre lesquelles existe une certaine différence de potentiel.

(1) Nous avons vu (p. 8), que deux corps conducteurs reliés ensemble par un fil métallique sont au même potentiel.

(2) En effet, la charge Q d'un condensateur est proportionnelle à la capacité C et à la différence de potentiel V (voir p. 4). Pour une capacité donnée, la différence de potentiel entre les armatures va donc en croissant avec la charge que prend le condensateur. Normalement, si aucune autre cause n'intervient, la charge s'arrête lorsque la différence de potentiel V entre les armatures du condensateur est égale à plus grande différence de potentiel qu'est capable de produire le transformateur, alimenté par le générateur électrique. La durée de charge est toujours relativement très courte, si le circuit ne présente pas une résistance électrique anormalement élevée.

pris entre les sphères A et B ⁽¹⁾ de l'éclateur ne peut plus résister à la tension électrostatique qui agit sur lui. A ce moment, une étincelle jaillit en AB.

Cette étincelle électrique, formée de particules incandescentes entourées de gaz chauds, a une conductibilité électrique relativement bonne ; elle établit donc entre les sphères A et B une jonction conductrice qui ferme le circuit. Le condensateur, qui se trouve alors relié au circuit ininterrompu α LDAB β , se décharge dans celui-ci en donnant naissance à un courant dont la direction est, par exemple, indiquée par les flèches en trait plein (fig. 25). Mais la self-induction de la bobine L joue, ainsi qu'on l'a vu (page 32), un rôle analogue à celui de l'inertie : lorsque le courant de décharge prend fin, l'énergie absorbée par la self-induction, au moment de l'établissement du courant, pour la création d'un champ magnétique, se trouve libérée et intervient, sous forme d'une force électromotrice induite, pour prolonger le courant qui circule dans le circuit. Le nouveau courant, ainsi créé dans le même sens que le courant de décharge précédent, produit une recharge du condensateur en sens inverse de la charge primitive ⁽²⁾. Quand le courant de self-induction prend fin, le condensateur rechargé se décharge à nouveau : le sens du courant de cette nouvelle décharge est inverse du précédent, et est indiqué sur la figure 25 par les flèches pointillées. Pendant cette décharge, la self-induction absorbe

(1) Cet intervalle d'air est nommé *distance explosive*, et sa valeur est réglée d'après la différence de potentiel que peut produire la source de courant. S'il est trop grand, l'étincelle ne peut pas jaillir ; s'il est trop faible, la charge du condensateur est relativement faible lorsque l'étincelle jaillit. Au lieu d'air, il peut y avoir entre les boules de l'éclateur un diélectrique quelconque (gaz comprimé, ou raréfié ; liquide isolant tel que le pétrole, etc.).

(2) C'est-à-dire que, si, par exemple, l'armature α était chargée à un potentiel positif et l'armature β à un potentiel négatif lors de la charge primitive, ces armatures vont être chargées à des potentiels inverses, celui de α devenant négatif et celui de β positif.

à nouveau de l'énergie pour la création d'un champ magnétique et la restitue, à la fin de la décharge, sous forme d'un courant induit : le condensateur se recharge donc en sens inverse, puis se décharge à nouveau, etc.

Ces phénomènes se passent pendant un temps très court, et le circuit est le siège de courants alternatifs de grande fréquence nommés **oscillations ou vibrations électriques**.

Tout circuit présentant de la self-induction et de la capacité, et excité par un moyen approprié, est le siège d'oscillations électriques. Un tel circuit est appelé circuit oscillant.

Dans le cas considéré, l'excitation est produite par les décharges jaillissant entre les boules de l'éclateur. Les oscillations électriques sont engendrées, comme cela vient d'être expliqué, par les phénomènes d'échange d'énergie⁽¹⁾ qui se manifestent entre la capacité et la self-induction.

Tout courant électrique engendrant un champ magnétique, proportionnel à son intensité, le circuit oscillant considéré est environné d'un **champ magnétique oscillant**, dont les variations sont identiques à celles du courant oscillant.

De même, entre les armatures du condensateur soumis à une décharge oscillante, il existe un **champ électrique oscillant**.

On désigne sous le nom d'**oscillation électromagnétique** l'ensemble du phénomène : courant oscillant, champ magnétique oscillant, et champ électrique oscillant.

Oscillations amorties.

Si, dans le mécanisme d'échange d'énergie entre la bobine de self-induction et le condensateur, il ne se produisait au-

(1) L'énergie en jeu dans le circuit oscille entre la forme électrostatique (charge du condensateur) et électrocinétique (création d'un champ magnétique).

cune perte, les oscillations électriques engendrées conserveraient une amplitude constante. Mais il n'en est pas ainsi : à chaque recharge, le condensateur reçoit une quantité d'électricité inférieure à celle de la charge précédente, car différentes pertes interviennent pour réduire peu à peu l'énergie en jeu dans le système oscillant. Ces pertes proviennent principalement de la résistance électrique (du circuit métallique et surtout de l'étincelle).

C'est pourquoi, après un nombre relativement petit de décharges et recharges successives, la différence de potentiel agissant entre les sphères A et B de l'éclateur n'est plus suffisante pour maintenir l'étincelle : celle-ci cesse de jaillir, et le circuit est interrompu.

A ce moment, les parties constitutives du circuit oscillant se retrouvent dans les mêmes conditions qu'au début, et la différence de potentiel produite par le secondaire S du transformateur recommence à charger le condensateur : quand la charge est suffisante, la différence de potentiel entre A et B ayant atteint la valeur qui correspond à la rupture de la couche diélectrique interposée, l'étincelle jaillit à nouveau et les phénomènes décrits se reproduisent, en engendrant un nouveau groupe d'oscillations électriques.

*Le phénomène par lequel est engendré un groupe d'oscillations électriques est appelé **décharge oscillante**.*

Les oscillations électriques successives appartenant à un même groupe n'ont pas une valeur constante mais décroissent rapidement, puisque les recharges successives du condensateur sont de plus en plus faibles : *ces oscillations sont amorties, et l'on dit que le circuit oscillant présente de l'amortissement* ⁽¹⁾.

(1) Si l'amortissement est très faible, la décroissance des oscillations est peu rapide, et l'on dit souvent alors que les oscillations sont *persistantes*.

Si, comme pour la représentation d'un courant alternatif, on porte sur une droite horizontale les valeurs du temps écoulé, et, sur les verticales correspondant à différentes valeurs du temps, les intensités du courant qui circule dans le circuit, on obtient, pour chaque groupe d'oscillations électriques, une courbe analogue à celles que montrent les figures 26 et 26 bis⁽¹⁾.



FIG. 26.

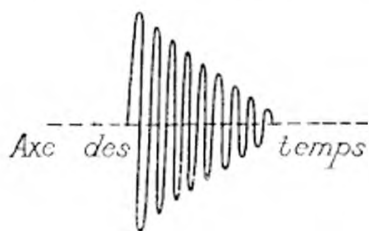


FIG. 26 bis.

Quant au champ magnétique oscillant et au champ électrique oscillant, leurs variations suivent exactement celles des oscillations électriques: ils présentent donc l'un et l'autre le même amortissement qu'elles. On dit que *les oscillations électromagnétiques engendrées sont amorties*.

On appelle période des oscillations la durée d'une oscillation complète, et fréquence des oscillations le nombre d'oscillations par seconde.

La fréquence des oscillations représentées par la figure 26 bis est environ trois fois plus grande que celle des oscillations représentées par la figure 26 et leur période est environ trois fois plus petite. Par exemple, les oscillations représentées par la figure 26 ont une fréquence de 10 000 par seconde, ou une période de un dix millième de seconde ;

(¹) Pour plus de clarté, on a représenté sur ces figures des oscillations assez fortement amorties et de fréquences relativement faibles : dans un circuit oscillant fermé, l'amortissement est moindre, et un groupe comprend un plus grand nombre d'oscillations.

les oscillations représentées par la figure 26 bis ont une fréquence de 30 000 par seconde ou une période de un trente millième de seconde.

La fréquence des oscillations libres⁽¹⁾ d'un circuit ou, autrement dit, la fréquence propre d'oscillation d'un circuit oscillant dépend des valeurs de la capacité et de la self-induction que présente ce circuit : elle est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de la capacité par la self-induction⁽²⁾.

Inversement, la période propre d'oscillation d'un circuit est proportionnelle à la racine carrée du produit de la capacité par la self-induction.

En appelant T la période, on démontre théoriquement et on vérifie expérimentalement qu'elle est donnée par la formule

$$T = 2\pi\sqrt{cl},$$

c et l désignant la capacité et la self-induction du circuit total, ou, en pratique, la capacité du condensateur et la self-induction de la bobine, puisque la capacité et la self-induction des fils de jonction ont des valeurs extrêmement faibles.

On voit immédiatement que, si l'on augmente la valeur de la capacité, ou de la self-induction, ou de ces deux grandeurs ensemble, on augmente la période des oscillations, et l'on diminue leur fréquence; inversement, pour obtenir des oscillations de très grande fréquence, il faut employer un circuit présentant une faible self-induction et une faible capacité. En général, pour une période donnée, il vaut mieux

(1) On entend par *oscillations libres* ou *oscillations propres* les oscillations d'un circuit qui oscille librement et indépendamment de tout autre. Nous verrons plus loin qu'un circuit peut effectuer, dans certaines conditions, des *oscillations forcées* sous l'action d'une cause extérieure ayant pour effet de lui imposer un mouvement vibratoire dont la fréquence diffère de sa fréquence propre d'oscillation.

(2) En négligeant la résistance du circuit, qui est généralement faible et joue un rôle très minime dans la détermination de la fréquence d'oscillation du circuit.

adopter la plus grande capacité possible et la plus faible self-induction possible.

La période ou la fréquence des oscillations peut être mesurée par le procédé suivant : l'étincelle qui jaillit entre A et B est une étincelle oscillante, puisqu'elle correspond au passage d'un courant oscillant. Au moment où ce courant oscillant s'annule pour changer de sens, l'étincelle cesse de jaillir pendant un temps très court et se rétablit aussitôt. Ce phénomène ne peut pas être perçu par l'œil à cause de la persistance des impressions rétinienne, mais, si l'on regarde l'étincelle dans un miroir tournant autour d'un axe avec une rapidité suffisante, on la voit décomposée en une série de points lumineux séparés par des espaces obscurs⁽¹⁾. En photographiant cette image et en mesurant la vitesse de rotation du miroir, on peut déterminer la période des oscillations d'après l'écartement des points lumineux. On vérifie ainsi qu'elle correspond bien à la formule indiquée plus haut.

Nous avons vu qu'après une décharge oscillante, c'est-à-dire après la production d'un groupe d'oscillations amorties, l'étincelle cesse de jaillir et la charge du condensateur s'effectue à nouveau sous l'action de la différence de potentiel secondaire de la bobine : ensuite une nouvelle décharge oscillante se produit quand l'étincelle jaillit entre les sphères A et B, et ainsi de suite.

On obtient donc dans le circuit oscillant une série de groupes d'oscillations amorties : deux groupes sont séparés l'un de l'autre par un intervalle de temps qui est très grand par rapport à la durée d'un groupe d'oscillations.

(1) Si l'étincelle était continue au lieu d'être oscillante, on verrait, dans le miroir tournant, une bande lumineuse ininterrompue.

Le nombre de groupes d'oscillations produits par seconde avec un dispositif analogue à celui qui a été décrit, est, en général, voisin de 15 ou 20 (nombre d'étincelles par seconde).

Les oscillations électriques ainsi engendrées sont, en quelque sorte, analogues aux vibrations acoustiques que l'on obtient en frappant une cloche à intervalles réguliers avec son battant : chaque choc donne lieu à un certain nombre de vibrations amorties, et ces groupes se succèdent, comme les chocs, à des intervalles réguliers.

En général, en Radiotélégraphie, les oscillations électriques employées ont une fréquence comprise à peu près entre 100 000 et 3 000 000 par seconde et sont très fortement amorties, de sorte que chaque groupe n'en comprend que deux ou trois.

Les figures 27 et 28 représentent deux groupes d'oscilla-



FIG. 27.



FIG. 28.

tions de même fréquence, mais d'amortissements différents.

L'intervalle de temps qui s'écoule entre deux groupes consécutifs d'oscillations est extrêmement grand par rapport à la période d'une oscillation ou à la durée d'un groupe. Par exemple, en supposant que l'intervalle de temps soit de $1/25$ seconde (25 étincelles par seconde) et la période de $1/1\,000\,000$ seconde, et que chaque groupe comprenne deux oscillations complètes, la durée de production d'un groupe sera de deux milliardièmes de seconde, tandis qu'il s'écoulera entre deux groupes consécutifs un intervalle de temps de

(1/25) — (2/1 000 000) ou 39 998 millionnièmes de seconde. L'intervalle entre deux groupes d'oscillations sera donc environ 20 000 fois plus grand que la durée d'un groupe d'oscillations

Diverses causes d'amortissement.

L'amortissement des oscillations provient des *pertes d'énergie*, qui sont dues aux causes suivantes :

- I. — à la résistance électrique de l'étincelle ;
- II. — à la résistance électrique des conducteurs ;
- III. — aux courants parasites induits dans les conducteurs ;
- IV. — aux pertes dans le diélectrique des condensateurs ;
- V. — aux effluves sur les bords des armatures des condensateurs.

I. — *Amortissement dû à l'étincelle.* — La résistance électrique de l'étincelle est toujours relativement élevée, et c'est là la principale cause d'amortissement. L'étude de cette résistance est fort complexe car, contrairement à ce qui a lieu dans les conducteurs métalliques, *elle varie énormément avec l'intensité du courant*, et diminue quand celle-ci augmente. Elle dépend aussi des valeurs de la capacité et de la self-induction du circuit oscillant. Plus la capacité est forte, plus la résistance de l'étincelle est faible ; plus la self-induction est forte, plus la résistance de l'étincelle est grande.

Pour une intensité de courant invariable, la résistance électrique de l'étincelle dépend :

- 1° de la distance explosive ;
- 2° de la forme des électrodes ;
- 3° de la nature des électrodes ;
- 4° du milieu interposé (gaz ou liquide).

1° Si l'on mesure la résistance de l'étincelle en augmen-

tant progressivement la distance explosive d'un éclateur, sans que l'intensité du courant oscillant puisse varier, on trouve qu'elle augmente, d'abord lentement, puis rapidement. Si, au contraire, on modifie simplement l'intervalle explosif de l'éclateur qui sert à exciter un circuit oscillant, on constate une diminution, d'abord très rapide, puis plus lente, de la résistance quand la longueur augmente.

Ces deux résultats contradictoires peuvent être expliqués par le fait que, dans le second cas, les valeurs de l'amplitude de la tension et du courant dépendent de l'intervalle explosif de l'éclateur. Plus cet intervalle est grand, plus l'amplitude initiale du courant est grande. La résistance de l'étincelle diminuant quand le courant augmente, cet effet contrebalance l'augmentation de longueur, et prédomine dans les étincelles courtes.

Si, au lieu d'un seul éclateur, on emploie plusieurs éclateurs en série, c'est-à-dire si, pour une même longueur totale, on subdivise l'étincelle unique en plusieurs étincelles courtes (étincelle fractionnée) on constate que la résistance de l'ensemble est sensiblement plus élevée que celle d'une seule étincelle. On augmente donc l'amortissement en subdivisant l'étincelle⁽¹⁾.

2° La forme des électrodes exerce une influence importante sur la résistance de l'étincelle. Les résultats ne sont pas les mêmes si l'on emploie des pointes, des plateaux, des cylindres, ou des sphères. Dans ces deux derniers cas, la résistance diminue un peu quand on augmente la grosseur des électrodes.

(1) Ce résultat est important à retenir. On en trouvera plus loin une application dans le nouveau dispositif Telefuntren.

3° La nature du métal dont sont constituées les électrodes joue aussi un rôle. Le laiton semble donner la plus faible résistance d'étincelle ; l'emploi de zinc, au contraire, conduit à des résistances élevées.

4° Le gaz interposé entre les électrodes exerce une action très marquée. La présence d'hydrogène, dont la bonne conductibilité calorifique permet un rapide refroidissement de l'étincelle, provoque une augmentation marquée de la résistance. Dans un gaz comprimé, la résistance est plus grande que dans un gaz à la pression atmosphérique : l'inverse a lieu dans un gaz raréfié.

II. — *Amortissement dû à la résistance des conducteurs.* — Le passage d'un courant électrique dans un conducteur produit un échauffement d'autant plus grand que la résistance électrique est plus élevée. Cet échauffement correspond à une perte d'énergie.

On a constaté que les courants alternatifs de grande fréquence ont une tendance à passer, non pas dans toute la masse des conducteurs, mais seulement dans les couches superficielles de ceux-ci. Plus la fréquence est élevée, plus cet effet, nommé *effet pelliculaire*, est marqué.

Pour les très grandes fréquences utilisées en radiotélégraphie, le passage du courant s'effectue uniquement dans une couche superficielle extrêmement mince des conducteurs : il faut donc, pour que la résistance électrique de ceux-ci ne soit pas trop élevée, employer des tubes⁽¹⁾ de grand diamètre ou des bandes métalliques larges et minces. C'est ce dernier procédé qui est généralement adopté.

(1) Un tube a une aussi bonne conductibilité qu'un conducteur plein de même diamètre, puisque le courant ne passe qu'à la surface.

III. — *Amortissement dû aux courants parasites induits dans les conducteurs.* — Si l'on employait des gros conducteurs massifs, il pourrait s'y produire des courants de Foucault, qui, occasionnant une perte d'énergie, provoqueraient une augmentation de l'amortissement.

D'autre part, il importe de veiller qu'aucune partie du circuit ou des conducteurs de jonction employés ne forme de boucle fermée capable d'embrasser un flux magnétique oscillant : les courants induits qui y prendraient naissance occasionneraient encore une perte d'énergie.

IV. — *Amortissement dû aux pertes dans le diélectrique des condensateurs.* — Les variations du champ électrique oscillant dans le diélectrique compris entre les armatures des condensateurs produisent, dans ce diélectrique, un échauffement qui correspond à des pertes d'énergie.

Ces pertes dépendent de la constitution chimique du diélectrique : elles ont une valeur nulle dans l'air, et très faible dans certains verres spéciaux, dans la paraffine et dans l'huile de paraffine ; au contraire, elles sont très élevées dans le verre ordinaire, dans le mica, dans l'ébonite, etc.

Les pertes dans le diélectrique des condensateurs dépendent aussi de la température et de la charge de ces appareils.

D'une façon générale, les pertes dans le diélectrique ne sont jamais négligeables dans les installations radiotélégraphiques, où l'on est obligé d'employer des condensateurs de grande capacité et de très fort isolement.

V. — *Amortissement dû aux effluves sur les bords des armatures des condensateurs.* — Dans la plupart des condensateurs en fonctionnement, on voit se former des séries d'aigrettes lumineuses ou d'effluves brillants sur les bords des arma-

tures, où se manifeste le maximum de tension. Ces effluves entraînent une perte d'énergie et doivent être supprimés autant que possible. Pour cela, on évite soigneusement les angles aigus, les pointes, ou les bords minces dans les armatures des condensateurs : en outre, on les immerge souvent dans un liquide isolant.

Oscillations entretenues.

Le très fort amortissement des oscillations électriques produites par le mode d'excitation du circuit oscillant qui vient d'être décrit, et l'intervalle de temps important qui sépare deux groupes consécutifs d'oscillations, présentent de sérieux inconvénients au point de vue de l'utilisation

des ondes électromagnétiques engendrées.

Aussi certains expérimentateurs ont-ils cherché à produire des oscillations régulièrement entretenues au lieu de groupes d'oscillations amorties.

Dès 1892, M. E. Thomson proposait pour cela le dispositif que représente la figure 29. Une source de courant continu, reliée aux fils de ligne *m* et *n*,

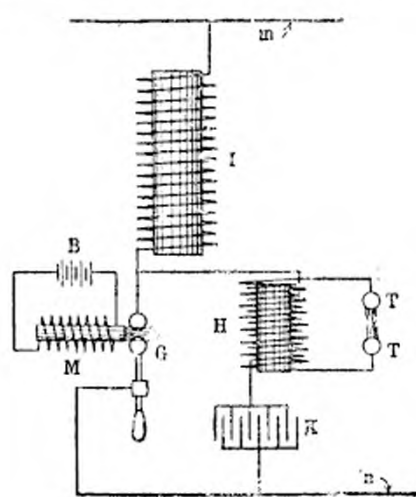


FIG. 29.

alimente un éclateur *G* sur lequel est branché un circuit contenant un condensateur *K* et une bobine de self-induction *H*. Un électro-aimant *M*, alimenté par une batterie *B*, agit sur l'arc qui jaillit en *G* pour le souffler et le rendre instable⁽¹⁾. Enfin une bobine de self-induction *I* est intercalée

(1) D'après les lois de l'induction, on sait qu'il existe, entre un flux magnétique

dans le circuit principal pour limiter l'intensité du courant à l'instant où l'arc jaillit. Sur la figure 29, la bobine H est supposée former l'enroulement primaire d'un transformateur, dont le secondaire aboutit à un second éclateur TT.

La même année, M. Janet faisait d'intéressantes expériences avec le dispositif de M. E. Thomson, et signalait la grande différence qui existe entre l'amortissement des oscillations entretenues par ce procédé et celui des oscillations obtenues par le procédé précédent.

Dans la suite, M. Blondel imaginait différents dispositifs dans lesquels un éclateur, muni d'électrodes simples ou multiples et plongé dans un liquide isolant (du pétrole par exemple), est alimenté par une source de courant continu à haute tension et engendre des oscillations entretenues dans un circuit oscillant placé en dérivation sur lui, comme dans le montage de M. E. Thomson.

En 1900, M. Duddell signalait que, si l'on fait jaillir entre deux crayons de charbon homogènes un arc électrique A alimenté par une source S de courant continu (fig. 30), et si l'on branche en dérivation sur cet arc, comme dans le montage précédent, un circuit oscillant contenant une capacité C et une bobine de self-induction L, on peut constater que *ce circuit est le siège d'oscillations électriques régu-*

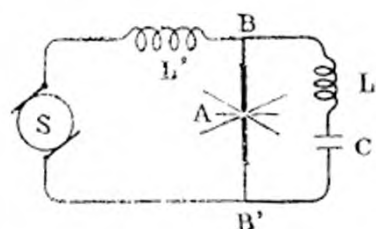


FIG. 30.

et un conducteur parcouru par un courant électrique, des forces d'attraction ou de répulsion dont la valeur dépend de la valeur du flux et de l'intensité du courant. L'arc électrique, constitué par un conducteur (colonne de gaz chauds et de vapeurs conductrices) parcouru par un courant, est donc influencé par un flux magnétique transversal qui tend à le chasser de sa position. Ce phénomène est appelé *soufflage magnétique de l'arc*.

lières entretenues dont la fréquence dépend, dans certaines conditions, de la capacité et de la self-induction du circuit oscillant.

On a reconnu, avantageux, dans la suite, d'intercaler dans le circuit d'alimentation une bobine de self-induction L' dont l'effet est de s'opposer à toute augmentation brusque du courant dans l'arc.

Le dispositif de Duddell, appelé *arc chantant*, a été étudié minutieusement par M. Blondel, ainsi que par MM. Simon et Reich. Ces savants ont pu déterminer exactement les conditions dans lesquelles prennent naissance les oscillations électriques, dont la superposition au courant continu de l'arc donne lieu à des vibrations de la colonne gazeuse comprise entre les charbons. La hauteur du son musical produit par ces vibrations dépend de la fréquence des oscillations. Cette fréquence est extrêmement variable, comme l'a reconnu M. Blondel.

Si l'arc A (fig. 30) est relativement long et si le circuit d'alimentation présente peu ou pas de self-induction, la fréquence des oscillations engendrées ne diffère pas énormément de la fréquence propre du circuit oscillant (qui dépend de la capacité du condensateur C et de la self-induction de la bobine L).

Si, au contraire, l'arc A est court par rapport à la tension aux bornes, et si le circuit d'alimentation contient une bobine de self-induction L' relative-

ment importante, la fréquence des oscillations engendrées n'a plus aucun rapport avec la fréquence propre du circuit oscillant.

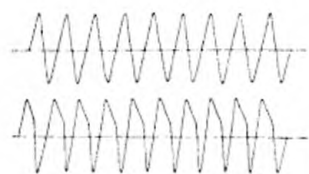


FIG. 31.

La figure 31 montre les courbes représentatives du courant oscillant dans le condensateur C, obtenues par M. Blondel avec

un arc relativement long. La courbe supérieure correspond au cas où la self-induction du circuit d'alimentation est nulle, et la courbe inférieure au cas où cette self-induction a une valeur moyenne.

La figure 32 montre les courbes représentatives du courant oscillant dans le condensateur C, obtenues par M. Blondel avec un arc relativement court. La courbe supérieure correspond au cas où la self-induction du circuit d'alimentation est nulle; la courbe intermédiaire, au cas où cette self-induction a une valeur moyenne; et la courbe inférieure, au cas où elle a une valeur élevée.

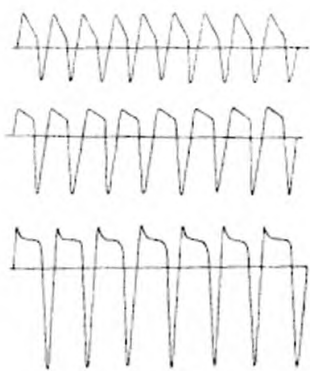


FIG. 32.

Les courbes des figures 31 et 32 donnent une représentation très nette des oscillations entretenues engendrées par un arc chantant.

L'arc chantant de Duddell ne permet pas normalement de produire des oscillations de fréquence suffisamment grande pour que son emploi soit applicable à la radiotélégraphie.

Plusieurs expérimentateurs, parmi lesquels M. Blondel, l'auteur, et MM. Simon et Reich, ont songé à employer, au lieu d'un arc entre charbons, un arc entre électrodes métalliques, dans le but d'élever la fréquence des oscillations. Plus tard, M. Poulsen, la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie (Telefunken), et différents expérimentateurs sont parvenus à réaliser, sur le principe de l'arc chantant, des appareils relativement pratiques permettant de produire des oscillations entretenues utilisables en radiotélégraphie et en radiotéléphonie.

Dans tous ces appareils, qui seront décrits au chapitre xiv,

on s'est efforcé de rendre l'arc aussi instable que possible. M. Poulsen a employé d'abord deux crayons de charbon de gros diamètre, tournant lentement autour de leur axe et placés dans une atmosphère d'hydrogène ou d'hydrocarbures (gaz d'éclairage ou vapeur d'alcool) où l'arc subit un refroidissement important par suite de la bonne conductibilité calorifique des gaz environnants : en outre, un champ magnétique puissant agit transversalement sur lui pour le souffler. Plus tard, l'un des charbons a été remplacé par un cylindre de cuivre refroidi par une circulation d'eau intérieure.

Dans l'appareil Telefunken, l'arc jaillit entre un cylindre creux en cuivre et un crayon de charbon : le cylindre est rempli d'eau.

Dans d'autres appareils, l'arc éclate entre deux électrodes métalliques maintenues froides par une circulation d'eau intérieure, ou bien entre des disques de charbon ou de métal tournant en sens inverses avec une grande vitesse, ou bien entre des fils métalliques croisés qui se déplacent rapidement... etc.

Production directe de courants alternatifs de très grande fréquence.

Dans le chapitre II, nous avons étudié le fonctionnement des machines électromécaniques. Il est évident que, si l'on pouvait produire directement, au moyen d'un alternateur, un courant de très grande fréquence (100 000 par seconde au moins), ce courant pourrait être avantageusement utilisé en radiotélégraphie et en radiotéléphonie, pour l'excitation de l'antenne transmettrice.

La fréquence du courant produit par un alternateur dépend du nombre de variations du flux magnétique par se-

conde, c'est-à-dire de la vitesse de rotation de la partie mobile et du nombre de paires de pôles de l'inducteur.

Or, par suite des effets de la force centrifuge, il est impossible d'admettre des vitesses périphériques ⁽¹⁾ supérieures à une limite déterminée : pour un diamètre donné de la partie mobile, on est donc limité à une vitesse de rotation maxima.

D'autre part, même en réduisant au minimum les dimensions des pôles inducteurs, il y a une limite au delà de laquelle il est impossible de porter le nombre de ces pôles pour le diamètre choisi.

Donc, dans l'établissement d'un alternateur à haute fréquence, si l'on cherche à augmenter le diamètre de la partie mobile afin de pouvoir augmenter le nombre de pôles inducteurs, on est obligé de réduire la vitesse de rotation pour ne pas dépasser la vitesse périphérique limite. Inversement, si l'on cherche à diminuer le diamètre afin de pouvoir augmenter la vitesse de rotation pour une vitesse périphérique déterminée, on est obligé de réduire le nombre de pôles inducteurs pour pouvoir les loger.

Comme on le voit, le problème de l'établissement d'un alternateur à haute fréquence est très difficile à résoudre, si l'on veut réaliser une machine d'une puissance suffisante présentant un rendement admissible. Jusqu'à présent, un seul constructeur est parvenu à obtenir des résultats encourageants. Nous allons néanmoins passer rapidement en revue les différents alternateurs qui ont été établis

M. Tesla a construit un alternateur produisant un courant

⁽¹⁾ La vitesse périphérique est la vitesse avec laquelle se déplace la périphérie, c'est-à-dire la surface extérieure, de la partie mobile. Pour une vitesse de rotation donnée (nombre de tours par minute), il est facile de voir que la vitesse périphérique augmente avec le diamètre de la partie mobile. La vitesse périphérique s'évalue généralement en mètres par seconde.

de 10 ampères à 5 100 périodes par seconde, et une tension de 100 volts. L'inducteur fixe avait 75 centimètres de diamètre et portait 384 pôles : l'induit mobile, en fils de fer, portait autant de bobines : la vitesse de rotation était de 1 600 tours par minute.

Dans une autre machine, l'induit avait la forme d'un disque portant un bobinage en zigzag : il tournait entre les deux moitiés d'un inducteur double, dont les pôles étaient disposés face à face. Le nombre de pôles était de 480, la vitesse de rotation de 2 500 tours par minute, et la fréquence de 15 000 périodes par seconde.

M. E. Thomson a employé un alternateur à double inducteur fixe enveloppé par un induit tournant : chaque inducteur portait 50 pôles ; la vitesse de rotation était de 5 000 tours par minute et la fréquence de 4165 par seconde. L'alternateur pouvait débiter un courant de 1 ampère sous 1 000 volts.

M. Steinmetz a construit une machine à induit tournant produisant 20 ampères sous 100 volts à la vitesse de rotation de 3 750 tours par minute : la fréquence était de 10 000.

M. Salomons a fait tourner en sens inverses l'inducteur et l'induit et a obtenu ainsi une fréquence de 8 700 pour une vitesse de rotation de 1 500 tours par minute : la puissance de la machine était de 1 ampère sous 200 volts.

M. Ewing, avec un alternateur à inducteur en disque accouplé à une turbine à vapeur Parsons, a atteint une fréquence de 14 000 pour une vitesse de rotation de 12 000 tours par minute : l'alternateur produisait 5 ampères sous 100 volts.

M. Thury a construit une machine à inducteur et induit fixe. La roue polaire tournait à 3 000 tours par minute ; la fréquence était de 10 000 ; la puissance de 8 ampères sous 200 volts ou de 16 ampères sous 100 volts.

M. Leblanc a fait établir un alternateur à 10 000 périodes

par seconde : l'inducteur et l'induit étaient fixes ; la roue polaire portait 200 projections et tournait à une vitesse de 3 000 tours par minute, la puissance était de 2 kilowatts.

M. Duddell s'est servi de plusieurs machines de très faible puissance. Dans chacune d'elles, l'inducteur et l'induit fixes étaient bobinés dans un anneau de tôles présentant deux saillies polaires pointues. Dans la première machine, capable de produire 0,25 ampère sous 22 volts, la roue polaire avait 30 projections et tournait à 30 000 tours par minute : la fréquence était de 15 000. Le deuxième et le troisième alternateurs pouvaient produire seulement, 0,1 ampère sous 2 volts : dans l'un, la roue polaire, avait trente dents et tournait à 60 000 tours par minute ; la fréquence était de 30 000 : dans l'autre, elle avait 204 dents et tournait à 33 400 tours par minute : la fréquence atteignait 120 000.

M. Fessenden, dont les dispositifs radiotélégraphiques et radiotéléphoniques seront décrits au chapitre xiv, a fait construire plusieurs alternateurs de différents types. En donnant aux pôles des dimensions très réduites et en adoptant des vitesses de rotation extrêmement élevées, il a obtenu une fréquence de 80 000. Dans la dernière machine construite, la fréquence du courant peut atteindre 100 000 pour une vitesse de rotation de 20 000 tours par minute. La puissance disponible est de 2 kilowatts.

CHAPITRE VI

LA RÉSONANCE

Il est nécessaire, pour comprendre les actions qu'exercent entre eux plusieurs circuits oscillants, d'étudier une catégorie de phénomènes généraux, nommés *phénomènes de résonance* par analogie avec certains phénomènes de l'Acoustique. Ces phénomènes de résonance se rencontrent dans toutes les applications de la Physique où il s'agit de mouvements vibratoires, et ils jouent toujours un rôle extrêmement important. Nous commencerons par l'étude de quelques cas relatifs à la mécanique, et nous étendrons ensuite la notion de résonance aux circuits oscillants électriques.

Résonance mécanique.

Considérons un pendule composé d'une petite sphère très pesante fixée au bout d'une tige qui peut osciller autour d'un point de suspension. Écartons le pendule de la position verticale et abandonnons-le à lui-même. Il effectue un certain nombre d'oscillations, la sphère dépassant sa position d'équilibre, remontant au delà, s'arrêtant, redescendant pour dépasser à nouveau sa position d'équilibre, etc. Ces oscillations sont amorties : chacune d'elles est plus petite que la précédente à cause du frottement de l'air sur le pendule et des frottements qui existent au point de suspension.

Le mouvement oscillant du pendule libre présente une fréquence naturelle ou *fréquence propre d'oscillation* f , égale à l'inverse de la période propre T : la période est la durée d'une oscillation complète.

Faisons agir maintenant, sur ce pendule qui oscille librement, une force périodique de fréquence f' . Cette force périodique pourrait être obtenue par l'action intermittente d'un électro-aimant; supposons, pour simplifier, qu'elle consiste en chocs réguliers ou impulsions que l'on imprime avec la main au pendule, à des intervalles de temps égaux; la fréquence f' d'une telle force périodique est égale au nombre d'impulsions par seconde.

Deux cas peuvent se produire :

ou bien la fréquence f' de la force agissante est différente de la fréquence propre f du pendule ;

ou bien la fréquence f' de la force agissante est égale à la fréquence propre f du pendule.

Dans le premier cas (f' différente de f), on se rend compte assez facilement que, après une période transitoire pendant laquelle la fréquence du mouvement résultant a une valeur mal déterminée, le pendule arrive à osciller avec la fréquence f' de la force périodique qui agit sur lui : on dit qu'il effectue des **oscillations forcées**. Ces oscillations forcées ont une amplitude d'autant plus faible que la fréquence de la force agissante diffère plus de la fréquence propre d'oscillation du pendule ; elles ont une amplitude d'autant plus grande que la fréquence de la force agissante se rapproche plus de la fréquence propre d'oscillation du pendule.

Dans le second cas (f' égale à f), chacune des impulsions agit pour augmenter l'effet de la précédente, et l'amplitude des oscillations du pendule devient extrêmement grande, même pour une valeur très faible de la force périodique agissante. On

dit qu'il y a résonance entre les oscillations naturelles du pendule libre et la force périodique agissante.

A cet exemple mécanique correspond à peu près celui de la balançoire sur laquelle on fait agir une impulsion périodique provenant du mouvement des jarrets. Le système comprenant la balançoire et l'opérateur possède une fréquence propre d'oscillation qui est celle du mouvement de la balançoire. On sait fort bien que, pour atteindre une grande hauteur, il faut faire concorder la fréquence des impulsions périodiques avec la fréquence propre d'oscillation : dans ce cas, il y a résonance entre les oscillations naturelles du système et la force périodique agissante.

Un autre exemple est celui d'une troupe d'infanterie traversant au pas cadencé un pont métallique qui possède une certaine élasticité. Si la fréquence de la force périodique agissante (ici la cadence du pas) diffère de la fréquence propre d'oscillation du pont, ce dernier effectue des oscillations forcées qui sont d'autant plus petites que les fréquences sont plus différentes. Si, par hasard, la fréquence de la force périodique agissante est égale à la fréquence propre du pont, ou en est suffisamment voisine, il y a résonance, et les oscillations deviennent tellement grandes que le pont peut se rompre. Dans ce dernier cas, un pont établi, par exemple, pour résister à une charge normale de 5 tonnes peut être rompu par l'action périodique d'une charge de moins de 1 tonne dont la fréquence est suffisamment voisine de la fréquence propre d'oscillation.

Enfin un dernier exemple de résonance mécanique, qui illustre bien ce phénomène, est le suivant : dans des essais de roulage, une compagnie de chemins de fer constata que certains wagons, dont la suspension était excellente aux vitesses inférieures à 85 kilomètres à l'heure et

supérieures à 95 kilomètres à l'heure, présentaient des oscillations intolérables pour les vitesses voisines de 90 kilomètres à l'heure. Cela provenait d'un phénomène de résonance, la fréquence des chocs des roues sur les joints de rails étant égale, pour ces vitesses, à la fréquence propre d'oscillation des wagons.

Une application très intéressante des phénomènes de résonance a été réalisée dans certains appareils servant à mesu-

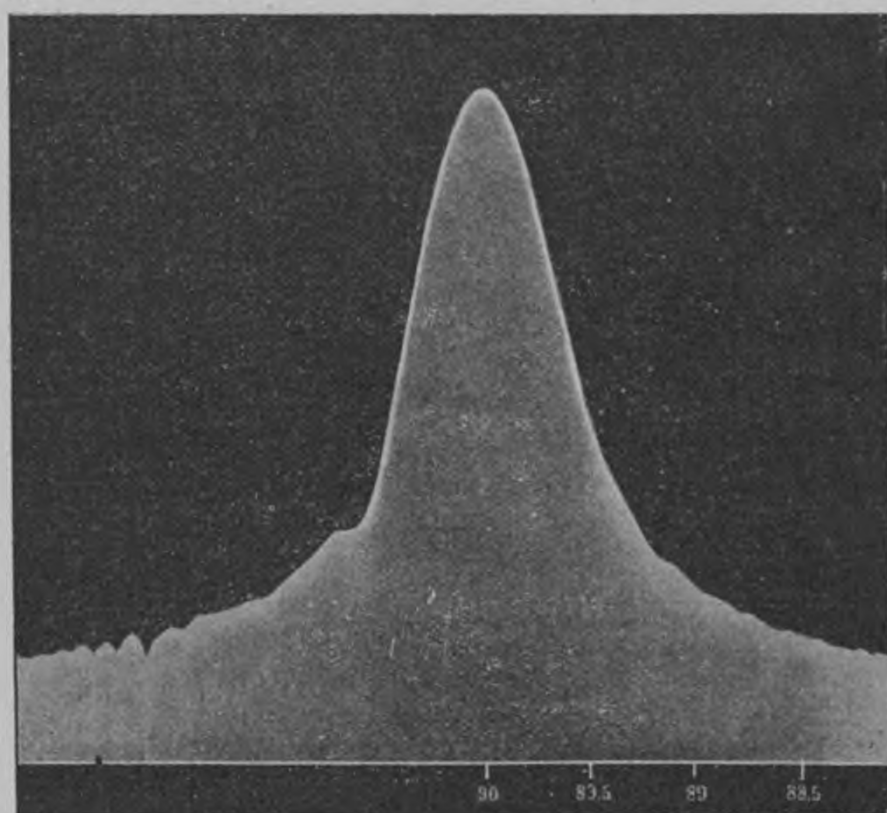


FIG. 33.

rer la fréquence des courants alternatifs (fréquencemètres Hartmann-Kempf). Si l'on fait agir sur une lame élastique en acier le champ magnétique d'un électro-aimant dont la bobine est parcourue par un courant alternatif, cette lame effectue des vibrations dont l'amplitude est d'autant plus

grande que la fréquence du courant agissant se rapproche plus de la fréquence propre d'oscillation de la lame. Quand les deux fréquences sont égales, c'est-à-dire quand il y a résonance, l'amplitude des vibrations atteint un maximum très nettement accentué.

Par exemple, en faisant agir sur une lame vibrante, dont la

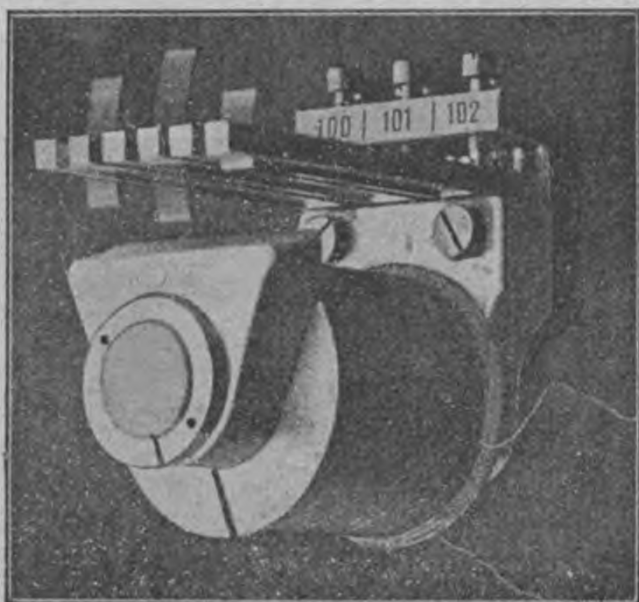


Fig 34.

fréquence propre d'oscillation était de 90 périodes par seconde, un électro-aimant dont la bobine était parcourue par un courant alternatif de fréquence variable, on a obtenu photographiquement la courbe de la figure 33, dans laquelle les longueurs horizontales sont proportionnelles aux valeurs de la fréquence du courant alternatif, et les longueurs verticales aux valeurs de l'amplitude des oscillations correspondantes.

Pour réaliser un fréquencesmètre basé sur les phénomènes de résonance, on dispose, en face de l'un des pôles d'un électro-aimant (fig. 34) un certain nombre de lames vibrantes présentant des fréquences propres d'oscillation graduel-

lement croissantes. Lorsqu'un courant alternatif parcourt la bobine de l'électro-aimant, la lame dont la fréquence propre d'oscillation correspond à la fréquence du courant alternatif, ou les deux lames qui possèdent les fréquences propres les plus voisines de la fréquence du courant alternatif, effectuent des vibrations dont l'amplitude est maxima. Par exemple, on voit sur la figure 34, d'après les amplitudes de vibration des lames, que la bobine de l'électro-aimant est parcourue par un courant alternatif dont la fréquence est comprise entre 100 et 101 périodes par seconde et se rapproche plus de 101 que de 100.

Les différents exemples qui précèdent montrent nettement les phénomènes de résonance mécanique qui peuvent se produire. D'une façon générale, tout système susceptible d'osciller peut être amené, dans certaines conditions, à présenter des oscillations de très grande amplitude sous l'effet de très petites forces périodiques, agissant avec une fréquence égale à la fréquence propre d'oscillation du système.

Résonance électrique.

Dans le domaine des oscillations électriques, les phénomènes de résonance jouent un rôle extrêmement important, sur lequel on ne saurait trop insister, car ils conduisent à des amplifications considérables.

1° *Circuit isolé.* — Nous avons vu qu'un circuit oscillant, excité par les décharges d'un éclateur E (figure 25, page 66) entre en vibration et est parcouru par un courant oscillant. Ce sont là des *oscillations libres* du circuit : leur fréquence (qui dépend des valeurs de la capacité et de la self-induction) est la *fréquence propre d'oscillation* du circuit.

On peut aussi faire effectuer à ce circuit des *oscillations forcées*. Pour cela, il suffit d'enlever l'éclateur E et de relier les deux conducteurs à une source de courant alternatif: celui-ci circulera dans le circuit, auquel il imposera sa fréquence.

Supposons que le condensateur C et la bobine L soient réglables, et que l'on puisse augmenter la capacité et la self-induction jusqu'à des valeurs assez élevées pour que la fréquence propre d'oscillation du circuit s'abaisse jusqu'à la fréquence du courant alternatif agissant. Nous constatons que, quand les valeurs des deux fréquences se rapprochent, l'amplitude des oscillations du circuit augmente; *quand les deux fréquences sont égales, le circuit est en résonance avec le courant alternatif, et l'amplitude des oscillations est maxima*: quand les valeurs des deux fréquences s'éloignent, l'amplitude des oscillations diminue.

On peut suivre facilement le phénomène de résonance en branchant entre les plaques du condensateur C, ou entre les extrémités de la bobine L, un appareil capable de mesurer la différence de potentiel. On voit celle-ci croître, atteindre une valeur élevée, puis décroître, quand la fréquence propre du circuit oscillant est modifiée graduellement. Il n'est pas superflu de faire remarquer que cette augmentation et cette diminution de tension entre les plaques du condensateur ou entre les extrémités de la bobine n'ont rien à voir avec la différence de potentiel produite par la source du courant alternatif, laquelle reste invariable.

Au moment de la résonance, l'amplification de tension est telle que, si le condensateur ou la bobine n'ont pas été spécialement établis pour cet usage, il se produit des ruptures de l'isolant.

(1) On verra au chapitre XIII le parti que l'on tire en Radiotélégraphie de ce phénomène de résonance d'un circuit sur le courant alternatif agissant.

2° *Circuits accouplés.* — Considérons maintenant un circuit oscillant 2 (fig. 35) contenant un condensateur C_2 et une bobine de self-induction L_2 : mettons ce circuit en vibration en faisant agir sur lui, par induction magnétique, un autre circuit oscillant 1, contenant un condensateur C_1 et une bobine de self-induction L_1 , et excité par l'éclateur E relié à une source de courant S (transformateur ou bobine d'induction). La

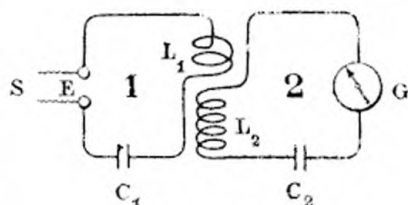


FIG. 35.

bobine L_2 étant placée à proximité de la bobine L_1 de façon à embrasser une plus ou moins grande partie des lignes de force magnétiques qui émanent de celle-ci, les deux circuits se trouvent accouplés inductivement ensemble et les oscillations engendrées dans le circuit primaire 1 agissent sur le circuit secondaire 2.

Intercalons dans le circuit 2 un ampèremètre thermique G , mesurant l'intensité du courant oscillant, de façon à étudier les effets produits. Le condensateur C_2 est supposé réglable, c'est-à-dire qu'on peut modifier à volonté la valeur de sa capacité. Nous admettrons que l'amortissement est très faible dans chacun des circuits oscillants, c'est-à-dire que la résistance électrique de ceux-ci est très minime, ce qui est généralement le cas. Les oscillations électriques qui prennent naissance dans le circuit primaire sont alors des oscillations persistantes.

Les circuits 1 et 2 possèdent chacun une fréquence propre d'oscillation : c'est la fréquence des oscillations qui prennent naissance lorsque l'un ou l'autre des circuits, n'étant pas accouplé avec le second, est mis en vibration au moyen d'un éclateur alimenté par une bobine de Ruhmkorff. Nous appellerons f_1 la fréquence propre du circuit primaire et f_2 la fré-

quence propre du circuit secondaire : cette dernière peut être modifiée à volonté par variation de la capacité du condensateur réglable. Nous supposons d'abord que la fréquence f_2 est plus grande que la fréquence f_1 .

Les deux circuits étant accouplés inductivement ensemble, comme le montre la figure 35, on met en fonctionnement la source de courant S de façon à engendrer dans le circuit primaire des oscillations électriques. La déviation de l'ampèremètre G indique que le circuit secondaire est le siège d'un courant oscillant : il effectue des *oscillations forcées*.

Quand les fréquences propres f_1 et f_2 des circuits primaire et secondaire sont sensiblement différentes, le courant oscillant secondaire a une faible intensité.

Si l'on augmente progressivement et d'une façon continue la valeur de la capacité du circuit secondaire, pour diminuer sa fréquence propre f_2 et la rapprocher de la fréquence propre f_1 du circuit primaire, on constate que l'intensité du courant secondaire, indiquée par l'ampèremètre G, va en augmentant. Cette augmentation d'intensité, d'abord très lente quand les valeurs des fréquences f_1 et f_2 diffèrent sensiblement, devient de plus en plus rapide lorsque les valeurs des deux fréquences propres sont suffisamment voisines. Ensuite, l'intensité du courant secondaire atteint une valeur maxima, correspondant au moment où les fréquences propres f_1 et f_2 sont égales, puis elle diminue, d'abord très vite et ensuite plus lentement, quand les deux fréquences s'écartent l'une de l'autre, la fréquence propre f_2 du secondaire étant plus petite que la fréquence propre f_1 du primaire.

En résumé, *quand la fréquence propre f_2 du circuit secondaire est égale à la fréquence propre f_1 du circuit primaire, c'est-à-dire quand les deux circuits sont en résonance, l'intensité du courant oscillant secondaire atteint une valeur maxima, très*

élevée par rapport à la valeur qu'elle présentait peu auparavant : les deux circuits sont dits *accordés* ou *syntonisés*.

Si l'on porte sur une horizontale les valeurs de la capacité du circuit secondaire (en unités arbitraires), et sur les verticales correspondantes les intensités du courant oscillant, mesurées par l'ampèremètre G (également en uni-

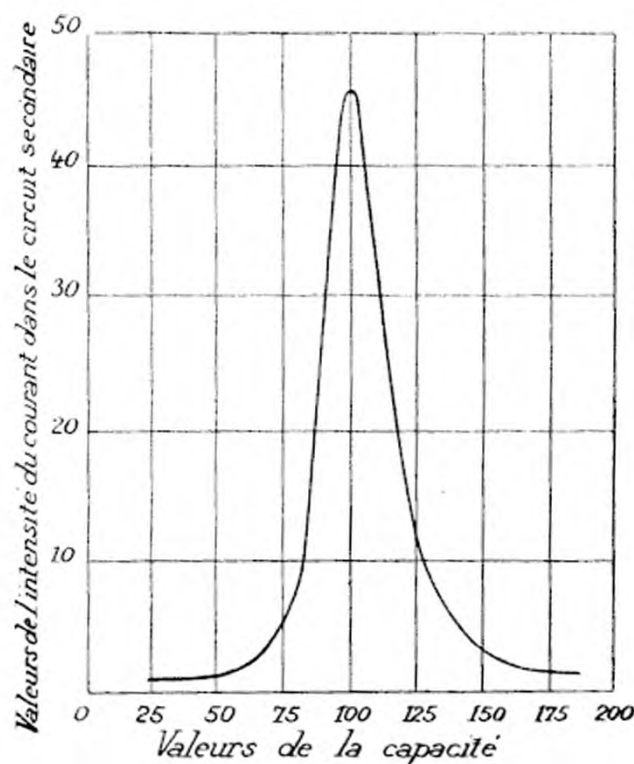


FIG. 36.

tés arbitraires), on obtient une courbe dont la forme générale est analogue à celle de la figure 36 : une telle courbe est appelée *courbe de résonance* ⁽¹⁾.

On voit que, dans la portion de courbe située au voisinage de la résonance, une faible variation de la capacité

(1) On remarquera combien cette courbe, déterminée expérimentalement sur un circuit électrique oscillant, est semblable à la courbe de la figure 33 qui représente la résonance mécanique d'une lame vibrante.

du circuit secondaire détermine une très grande variation de l'intensité du courant oscillant secondaire; au contraire, une modification de même grandeur relative de la capacité, quand les fréquences f_1 et f_2 diffèrent sensiblement, produit une faible variation du courant oscillant secondaire.

Si l'on introduit dans le circuit primaire une résistance de valeur relativement élevée, de manière à augmenter l'amortissement, on constate que la résonance est moins nette, moins aiguë. La courbe de la figure 36 devient beaucoup moins pointue: elle s'aplatit et s'élargit, et l'augmentation d'amplitude du courant oscillant, due à la résonance, est beaucoup moins importante. Cela montre l'intérêt qu'il y a à réduire autant que possible l'amortissement dans les systèmes en résonance.

En examinant la courbe de la figure 36, on voit toute l'importance que présente le phénomène de résonance, puisqu'il permet d'obtenir, dans un circuit secondaire accordé, des oscillations dont l'amplitude est infiniment plus grande que dans un circuit secondaire non accordé. Il y a là une amplification remarquable dont on tire le plus grand parti en radiotélégraphie.

Accouplement de deux circuits par induction.

Étudions de plus près les phénomènes en jeu dans deux circuits accouplés, tels que ceux de la figure 35.

Nous avons vu (page 39), que l'accouplement inductif entre deux circuits est lâche (imparfait) ou rigide (parfait) suivant qu'une faible partie ou la majeure partie des lignes de force magnétiques émanant de l'un des circuits est embrassée par l'autre circuit. La valeur de l'accouplement est indiquée par le coefficient d'accouplement, égal au quotient du coefficient

d'induction mutuelle par la racine carrée du produit des deux coefficients de self-induction.

Dans le premier cas (accouplement lâche), le circuit secondaire a une certaine indépendance par rapport au circuit primaire et réagit très peu sur celui-ci.

Dans le second cas (accouplement rigide), le circuit secondaire est intimement lié au circuit primaire et réagit fortement sur lui.

I. — Supposons d'abord que l'amortissement de chacun des deux circuits soit *négligeable*.

On démontre mathématiquement que, dans un système constitué par les deux circuits accouplés, il se produit deux groupes simultanés d'oscillations, ayant chacun une fréquence particulière ; ces deux fréquences diffèrent l'une et l'autre des fréquences propres d'oscillation de l'un et l'autre circuit.

1° *Si les circuits sont en résonance*, c'est-à-dire s'ils avaient la même fréquence propre avant d'être accouplés ensemble, les fréquences des deux groupes d'oscillations qui prennent naissance après l'accouplement sont l'une supérieure et l'autre inférieure à la valeur commune de la fréquence propre de chaque circuit. Les oscillations complexes, résultant de la superposition de ces deux groupes d'oscillations de fréquence différente, présentent des battements et répondent à peu près à la courbe de la figure 37.

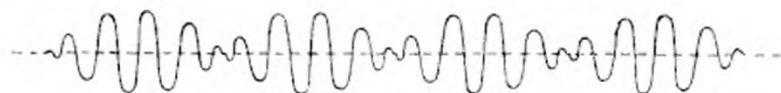


FIG. 37.

Si l'accouplement entre les circuits est rigide, les fréquences des deux groupes d'oscillations diffèrent beaucoup de la fréquence propre commune des circuits.

Si l'accouplement est lâche, ces deux fréquences ont des valeurs voisines de la fréquence propre commune des circuits et tendent à se confondre pour un accouplement extrêmement lâche ⁽¹⁾.

2° Si les circuits accouplés ne sont pas en résonance, c'est-à-dire s'ils possédaient, avant leur accouplement, des fréquences propres différentes, et si l'accouplement est rigide, les oscillations primaire et secondaire ont une seule fréquence commune, qui est intermédiaire entre les fréquences propres des circuits.

II. — Supposons maintenant que les circuits présentent chacun un *amortissement non négligeable*.

Dans ce cas, le calcul montre que le circuit secondaire est le siège de deux groupes d'oscillations; les unes, oscillations forcées, ont même fréquence et même amortissement que celles du circuit primaire; les autres, oscillations libres, ont même fréquence et même amortissement que celles du circuit secondaire. Le courant oscillant dans le circuit secondaire résulte de la combinaison de ces deux groupes d'oscillations de fréquences différentes et d'amortissements différents. Plusieurs cas particuliers peuvent se présenter :

1° Les deux circuits sont complètement accordés, c'est-à-dire qu'ils ont même fréquence propre et même amortissement.

Dans ce cas, les oscillations du circuit secondaire vont en croissant jusqu'à une certaine valeur qu'elles conservent (fig. 38).

2° Les deux circuits ont même fréquence propre, mais n'ont pas le même amortissement.

(1) Ces deux cas, importants pour la pratique de la radiotélégraphie, sont envisagés dans le chapitre x où la description d'un modèle mécanique facilite la compréhension des phénomènes en jeu.

Dans le cas général, les oscillations du circuit secondaire croissent d'abord jusqu'à une certaine valeur, sensiblement plus faible que dans le cas précédent, puis décroissent peu à peu (fig. 38).

Mais si le circuit primaire présente un fort amortissement et le circuit secondaire un amortissement beaucoup plus

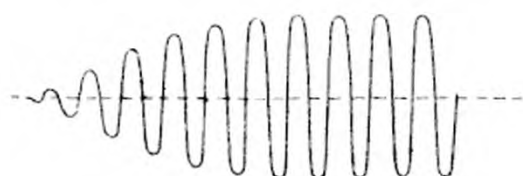


FIG. 38.

faible, on peut obtenir, même avec un accouplement relativement rigide, un seul groupe d'oscillations dans le secondaire. Celles-ci ont pour fréquence la fréquence propre du circuit secondaire, qui semble effectuer des *oscillations libres* sous l'effet d'*impulsions* communiquées par le circuit pri-

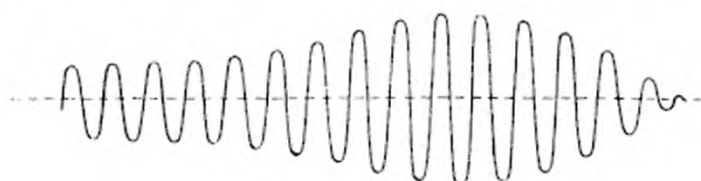


FIG. 39.

maire. Ce résultat, indiqué par M. Wien, provient de ce que le courant oscillant primaire a une durée extrêmement courte à cause du très fort amortissement : l'étincelle est rompue presque immédiatement après sa formation, et le circuit primaire, se trouvant ouvert, n'exerce plus aucune action sur le secondaire qui vibre comme s'il était seul. Cela n'est obtenu, toutefois, que pour une valeur bien déterminée de l'accouplement, valeur qui dépend des constantes des circuits accouplés.

3° *Les deux circuits ont des fréquences propres différentes et des amortissements égaux ou différents.*

Les oscillations résultantes du circuit secondaire vont en croissant jusqu'à une valeur maxima, puis décroissent jusqu'à zéro pour croître à nouveau, et présentent des battements analogues à ceux qu'indique la figure 37. A cause de l'amortissement, l'amplitude des oscillations maxima dans chaque battement va en diminuant.

Ce dernier cas n'a pas d'intérêt en pratique, puisqu'on place toujours les circuits dans les conditions de résonance, ou tout au moins très près de ces conditions, pour obtenir le maximum d'effet.

Transformateurs pour oscillations électriques.

Les bobines L_1 et L_2 des circuits accouplés de la figure 35 réalisent un transformateur. En radiotélégraphie, on fait très fréquemment usage de tels transformateurs, avec accouplement lâche ou rigide, pour exciter inductivement un circuit oscillant au moyen d'un autre. On appelle parfois ces appareils des transformateurs Tesla, du nom de M. Nikola Tesla qui, le premier, en a fait usage pour la production d'oscillations électriques.

Les actions réciproques qu'exercent l'un sur l'autre les deux enroulements parcourus par des oscillations électriques sont différentes de celles qui se manifestent dans les transformateurs ordinaires pour courants de basse fréquence, car, ici, les circuits sont généralement accordés ou syntonisés, c'est-à-dire en résonance.

Si le transformateur a un accouplement lâche et si les deux circuits, présentant un amortissement négligeable, sont en résonance, le rapport de transformation ne dépend pas du rapport

des nombres de tours des bobines L_1 et L_2 ; il dépend seulement du rapport des capacités des deux circuits.

Si, au contraire, l'accouplement est rigide et si les deux circuits ne sont pas accordés, le rapport de transformation dépend, comme pour les transformateurs ordinaires à basse fréquence, du rapport des nombres de tours secondaires et primaires.

Accouplement direct de deux circuits.

Deux circuits oscillants peuvent être accouplés directement. Soient par exemple les circuits oscillants 1 et 2 (fig. 40) qui ont une portion commune AB. Le circuit 1 contient un éclateur E, un condensateur C_1 et une bobine de self-induction L_1 ; le circuit 2 contient un condensateur C_2 et une bobine de self-induction L_2 .

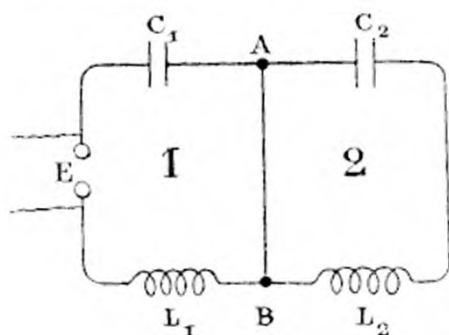


FIG. 40.

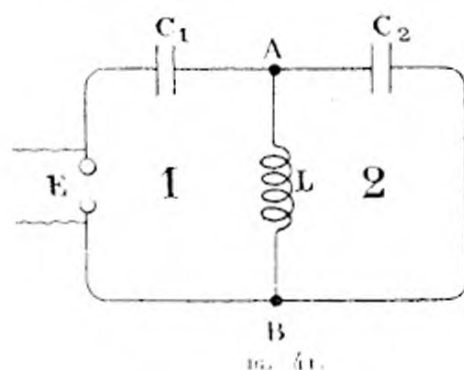
Si l'on met en vibration le circuit 1, en reliant l'éclateur E à une source de courant convenable (bobine ou transformateur), le circuit 2 entre aussi en vibration et effectue des oscillations forcées. En modifiant la valeur de la capacité ou de la self-induction de ce circuit, on peut l'amener à être en résonance avec le circuit 1, et l'on constate alors que les oscillations engendrées atteignent une amplitude maxima, comme dans le cas de l'accouplement inductif.

Soit z l'impédance ⁽¹⁾, de la portion commune AB. Si cette impédance a une faible valeur, la différence de potentiel en-

⁽¹⁾ Comme cela a été expliqué au chapitre II, page 34, l'impédance qu'un circuit ou une portion de circuit oppose au passage d'un courant alternatif de fré-

tre les points A et B est faible, pour une intensité donnée i du courant oscillant primaire⁽¹⁾. Dans ces conditions, l'accouplement entre les deux circuits est lâche (imparfait).

Si, au contraire, l'impédance z de la portion commune AB a une valeur élevée, c'est-à-dire représente une portion importante de l'impédance totale du circuit 1 (ce qui a lieu,



par exemple, si la majeure partie de la self-induction est contenue dans la portion AB, sous forme d'une bobine L (fig. 41), la différence de potentiel entre les points A et B a une valeur élevée, et l'accouplement entre les deux circuits est rigide.

Nous avons rencontré déjà, dans les dispositifs capables d'engendrer des oscillations entretenues (fig. 29 et 30), un exemple de circuits oscillants accouplés directement. Dans ces dispositifs, le circuit oscillant a, avec le circuit principal, une portion commune contenant l'arc électrique.

quence f dépend de la résistance ohmique r , de la self-induction l et de la fréquence f . Sa valeur z est donnée par l'expression

$$z = \sqrt{r^2 + \omega^2 l^2},$$

dans laquelle le symbole ω a pour valeur

$$\omega = 2\pi f.$$

(1) Nous avons vu, au chapitre II (page 22) que, dans un circuit, l'intensité du courant est proportionnelle à la différence de potentiel agissante et inversement proportionnelle à l'impédance z du circuit, c'est-à-dire que l'on a

$$i = \frac{e}{z} \quad \text{ou} \quad e = zi.$$

Sous la seconde forme, cette égalité montre que, quand une portion de conducteur d'impédance z est parcourue par un courant d'intensité i , la différence de potentiel entre les extrémités de cette portion de conducteur est égale au produit de l'impédance par l'intensité du courant. Plus l'impédance est grande, et plus la différence de potentiel est élevée pour une intensité de courant donnée.

Accouplement mixte de deux circuits.

On peut réaliser aussi des montages dans lesquels l'accouplement des circuits est en même temps direct et inductif.

La figure 42 en donne un exemple. Le circuit 1 contient une portion plus ou moins importante de la bobine L qui est intercalée en totalité ou en partie dans le circuit 2. La portion commune agit comme dans le cas précédent : en outre, la portion intercalée dans le circuit 1 et la portion intercalée dans le circuit 2 agissent inductivement l'une sur l'autre.

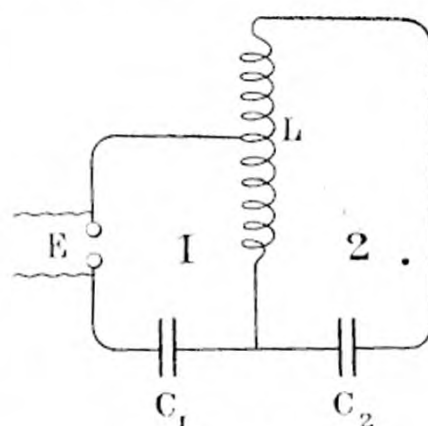


FIG. 42.

Ce mode de montage est fréquemment employé en radiotélégraphie : il permet des réglages commodes par modification de la longueur commune de la bobine L .

CHAPITRE VII

PRODUCTION ET PROPAGATION DES ONDES ÉLECTRO MAGNÉTIQUES. — EXPÉRIENCES DE HERTZ

Comme cela a été dit au début, H. Hertz a fait une découverte capitale en parvenant à produire, au moyen d'oscillations électromagnétiques, un ébranlement périodique de l'éther, et en vérifiant que les rayons électriques ainsi engendrés obéissent aux mêmes lois que les rayons lumineux.

Excitateur ou oscillateur.

Les circuits oscillants dont il a été question dans le chapitre précédent ne peuvent pas communiquer à l'éther qui les entoure un ébranlement intense. En effet, ces circuits sont fermés sur eux-mêmes et, sauf au voisinage du petit intervalle explosif de l'éclateur et dans la lame isolante très mince du condensateur, il n'existe dans l'espace environnant aucune ligne de force électrique. Pour obtenir des phénomènes de radiation, il faut employer, non plus un circuit fermé, mais un circuit ouvert produisant des lignes de force électriques qui embrassent une certaine portion de l'espace, comme nous allons le voir.

L'excitateur ou oscillateur utilisé par Hertz dans ses pre-

mières expériences comprenait deux sphères métalliques A et B de 30 centimètres de diamètre situées à 1^m,50 l'une de l'autre (fig. 43). Un conducteur de 5 millimètres de diamètre, interrompu en *ab* par un éclateur, reliait ces deux sphères.

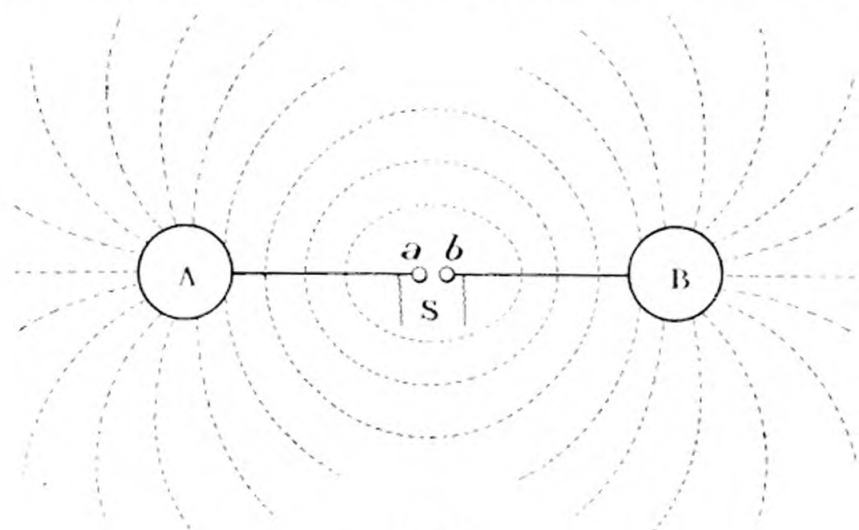


FIG. 43.

Les deux boules de l'éclateur étaient connectées au secondaire d'une bobine de Ruhmkorff.

Un tel système forme un circuit oscillant ouvert.

Les circuits oscillants fermés qui ont été étudiés précédemment comprennent une certaine self-induction, concentrée dans une bobine, et une certaine capacité, concentrée dans un condensateur. Dans le circuit ouvert dont il s'agit maintenant, la self-induction est réduite à celle des conducteurs et la capacité est celle des deux sphères, qui forment, en quelque sorte, les deux armatures d'un condensateur.

Dans ces conditions, lorsque le système se charge sous l'effet de la différence de potentiel secondaire de la bobine, l'espace situé tout autour de l'excitateur est le siège de lignes de force électriques qui relient l'une des moitiés du circuit,

chargée par exemple au potentiel $+$, à l'autre moitié, chargée au potentiel $-$. Une partie de ces lignes de force est représentée schématiquement par des lignes pointillées sur la figure 43. Quand la charge a atteint une valeur suffisamment élevée, la différence de potentiel entre les boules a et b de l'éclateur est suffisante pour qu'une étincelle jaillisse entre elles.

A ce moment, une série d'oscillations électriques prend naissance dans le circuit, par suite des modifications alternatives de l'énergie en jeu, qui passe de la forme électrostatique à la forme électrocinétique et inversement, comme cela a été expliqué en détail dans le chapitre précédent. Les lignes de force existant dans l'espace qui environne l'excitateur subissent alors des oscillations correspondantes, puisque le potentiel de chaque moitié du système s'inverse périodiquement. Il en résulte un ébranlement violent de l'éther, et cet ébranlement donne naissance à une perturbation qui se propage sous forme d'une onde électromagnétique.

Ce phénomène de propagation est appelé radiation.

En étudiant les circuits oscillants fermés, nous avons vu que toute perte d'énergie occasionne un amortissement des oscillations électriques produites. Les causes d'amortissement ont été indiquées en détail : la principale d'entre elles est due à la résistance de l'étincelle.

Dans les circuits oscillants ouverts, tels que l'excitateur de Hertz, il se produit en outre une perte ⁽¹⁾ très importante

(1) Cette énergie est perdue pour le circuit, mais ce n'est pas de l'énergie réellement perdue, au contraire, puisqu'elle reparait sous forme d'ondes électromagnétiques que l'on utilise. Il n'en est pas de même de l'énergie absorbée par la résistance du circuit, qui est dépensée en pure perte pour échauffer les conducteurs de ce circuit. Pour les applications de la radiotélégraphie, par exemple, on s'attache à augmenter le plus possible la première perte (radiation) et à diminuer autant que possible la seconde.

d'énergie par suite de la radiation. Par conséquent, *les oscillations électriques qui prennent naissance dans un circuit oscillant ouvert sont très fortement amorties : les ondes électromagnétiques qu'elles engendrent sont elles-mêmes amorties et d'une nature complexe.*

Il ne faut pas croire qu'il existe une différence marquée entre les circuits oscillants fermés et les circuits oscillants ouverts. Si l'on éloigne progressivement l'une de l'autre les deux armatures du condensateur d'un circuit fermé, on passe peu à peu au cas du circuit ouvert. Quand la distance entre les deux armatures est faible par rapport aux dimensions de celles-ci, le circuit doit être considéré comme fermé ; quand la distance entre les armatures est grande par rapport à leurs dimensions, le circuit agit comme un excitateur de Hertz.

La fréquence des oscillations dépend toujours des valeurs de la capacité et de la self-induction. Dans l'oscillateur de Hertz qui vient d'être décrit, les oscillations électriques avaient une fréquence de 56 millions par seconde environ. La longueur d'onde des ondes électromagnétiques produites était donc de 5^m,35 environ.

Afin d'obtenir des oscillations de plus grande fréquence et, par suite, des ondes de plus faible longueur d'onde, Hertz a réduit le plus possible la capacité et la self-induction dans un petit excitateur qui lui a servi pour un certain nombre d'expériences.

L'appareil qu'il a employé (fig. 44) était constitué simplement par deux cylindres métalliques, d'une douzaine de centimètres de longueur et de trois centimètres de diamètre, arrondis à une extrémité et placés dans le prolongement l'un de l'autre. Chacun d'eux était relié à



FIG. 44.

l'une des extrémités du secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. Les oscillations produites par cet excitateur avaient une fréquence de 450 millions par seconde; les ondes engendrées avaient donc une longueur d'onde de $66^{\text{cm}},6$ environ.

Différents savants, continuant les travaux de Hertz, se sont efforcés d'augmenter encore la fréquence des oscillations produites. M. Righi a employé pour cela un excitateur composé exclusivement de deux petites sphères métalliques de 8 millimètres de diamètre placées à 1 millimètre environ l'une de l'autre et immergées dans l'huile. Il a pu obtenir ainsi des fréquences de 12 milliards par seconde, c'est-à-dire des ondes de $2^{\text{cm}},5$ de longueur d'onde. M. Böse est descendu plus bas et a obtenu des longueurs d'onde de 6 millimètres; enfin M. Lebedew a obtenu des longueurs d'onde de 4 millimètres. La très faible intensité des oscillations d'aussi grande fréquence et l'extrême petitesse des effets qu'elles produisent rendent très difficile leur observation⁽¹⁾.

Résonateur.

Pour pouvoir étudier la propagation du mouvement vibratoire créé par son excitateur, il fallait à Hertz un appareil susceptible d'être influencé par les ondes électromagnétiques et de les déceler.

Cet appareil, nommé par Hertz *résonateur*, consistait simplement en un circuit oscillant formé d'une boucle de fil interrompue en un point par un éclateur dont les deux boules étaient très rapprochées (fig. 45).

(1) En effet, la quantité d'énergie en jeu dans un circuit est proportionnelle à la capacité de ce circuit. Pour obtenir de grandes fréquences d'oscillation, il faut réduire la capacité; on réduit donc en même temps la quantité d'énergie en jeu.

Quand un tel résonateur est mis en vibration par l'action du mouvement vibratoire de l'éther, des étincelles jaillissent entre les deux boules sous l'effet de la différence de potentiel qui existe entre elles ⁽¹⁾. Évidemment, cet effet est maximum si les conditions de résonance sont remplies, c'est-à-dire si le résonateur a pour fréquence propre d'oscillation la fréquence du mouvement vibratoire, égale elle-même à la fréquence propre d'oscillation de l'excitateur.

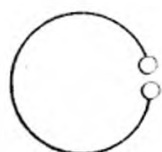


FIG. 45.

Le résonateur constitue un *détecteur d'ondes* d'une sensibilité médiocre, mais néanmoins suffisante pour les expériences que Hertz avait à réaliser. Au lieu d'introduire dans le résonateur une coupure, on pourrait avantageusement y intercaler un appareil de mesure.

Afin d'éviter toute confusion, il faut bien remarquer que l'action à distance produite par l'excitateur sur le résonateur ne provient pas de l'induction mutuelle des deux circuits telle que nous l'avons étudiée précédemment. L'excitateur donne naissance à un mouvement vibratoire de l'éther qui se propage par rayonnement sous forme d'une onde électromagnétique : ce mouvement vibratoire met à son tour en vibration le résonateur placé sur le trajet de l'onde.

D'après ce qui a été dit précédemment sur l'amortissement, on voit que les vibrations ou oscillations électriques du

⁽¹⁾ Il peut exister une différence de potentiel entre ces deux boules, bien qu'elles soient reliées métalliquement entre elles, parce qu'il ne s'agit pas ici d'un régime permanent mais d'un régime variable. Les oscillations électriques rencontrent, dans le conducteur métallique qui relie les deux boules, une *résistance inductive* d'autant plus grande que la fréquence est plus grande. C'est à cause de cette résistance apparente qu'il existe entre les boules une certaine différence de potentiel quand le résonateur est en vibration.

résonateur de Hertz sont peu amorties, puisque la seule perte d'énergie dans ce circuit provient de sa résistance électrique, toujours très faible.

Au contraire, les oscillations de l'excitateur et, par suite, les ondes engendrées sont fortement amorties, à cause de la radiation.

Dans ces conditions, les oscillations électriques qui prennent naissance dans le résonateur ont pour fréquence la fréquence propre d'oscillation de ce circuit, et non la fréquence des oscillations de l'excitateur. Il ne faut donc pas compter pouvoir déterminer, avec le résonateur, la fréquence des oscillations de l'excitateur ou la longueur d'onde réelle de la perturbation produite par celui-ci dans l'éther.

Certaines modifications ont été apportées au résonateur de Hertz par différents expérimentateurs.

C'est ainsi que M. Blondlot a intercalé un condensateur dans la boucle de fil qui le constitue : il se servait d'ailleurs d'un circuit semblable comme excitateur, en reliant les deux boules au secondaire d'une bobine de Ruhmborff.

M. Righi, pour déceler les ondes de son excitateur à très grande fréquence, a réalisé un résonateur extrêmement sensible. L'appareil consistait en une couche mince d'argent déposée sur une feuille de verre et ayant la forme d'un rectangle allongé ; cette couche était rayée transversalement par un trait de diamant extrêmement étroit. Quand l'excitateur était en fonctionnement, on observait au microscope les étincelles qui jaillissaient entre les deux bords voisins de la couche d'argent.

Actuellement, on possède divers types de détecteurs d'ondes infiniment plus sensibles que le résonateur. Ces appareils reposent sur des phénomènes très différents et seront décrits dans la suite.

*Propagation des ondes électromagnétiques dans l'espace.
Réflexion, réfraction et interférence.*

En se servant du résonateur, Hertz a pu étudier la propagation des ondes dans l'air et constater que cette propagation obéit aux principales lois de l'Optique. Nous allons rappeler brièvement quelques-unes de ses expériences.

Réflexion. — Pour étudier la réflexion des ondes, Hertz prit deux surfaces paraboliques en zinc de 2 mètres de hauteur et de 1^m,20 d'ouverture qui devaient agir comme des miroirs pour concentrer les rayons électriques.

L'un de ces miroirs contenait, suivant son axe focal (fig. 46), le petit excitateur à tiges décrit plus haut; l'autre contenait, suivant son axe focal, un résonateur ouvert rectiligne formé de deux fils A et B reliés à un petit éclateur *a* (fig. 47).

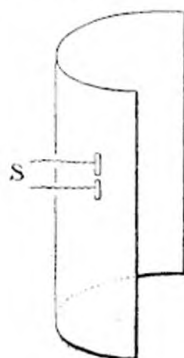


FIG. 46.

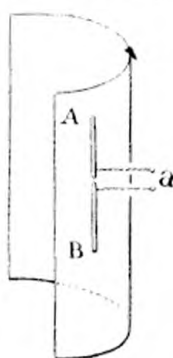


FIG. 47.

En plaçant les deux appareils en face l'un de l'autre et en mettant en fonctionnement l'excitateur, Hertz constata que les feuilles de zinc agissent bien comme des miroirs paraboliques vis-à-vis des rayons électriques. En effet, quand elles étaient disposées exactement en face l'une de l'autre,

des étincelles apparaissaient à la coupure *a* du résonateur; dès qu'on tournait autour de son axe l'une des deux surfaces, cette action cessait.

Hertz vérifia ensuite que, quand les rayons électriques tombent obliquement sur une surface plane métallique, ils sont réfléchis suivant un angle égal à l'angle d'incidence,

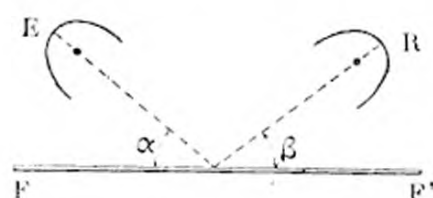


FIG. 48.

comme les rayons lumineux.

Pour cela il dirigea sur une grande feuille métallique FF' le faisceau de rayons parallèles émanant du miroir parabolique de l'excitateur E, et il constata que, pour recueillir sur le résonateur R les rayons réfléchis, il fallait placer le miroir parabolique de celui-ci dans une position telle que l'angle de réflexion β fût égal à l'angle d'incidence α (fig. 48).

Toute surface métallique agit donc bien comme un miroir vis-à-vis des rayons électriques, et les lois sont les mêmes que celles auxquelles obéissent les rayons lumineux.

Réfraction. — Les lois de la réfraction purent être vérifiées de la même manière.

Hertz prit un prisme en substance isolante (résine ou asphalte) de 1^m,50 de côté, et l'intercala entre les deux miroirs des fig. 46 et 47. Il constata (fig. 49), en déplaçant le résonateur jusqu'à ce que celui-ci fût impressionné par les rayons électriques, que ces rayons avaient subi dans le prisme une déviation semblable à celles que subissent les rayons lumineux dans un prisme transparent.

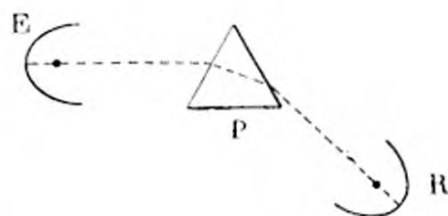


FIG. 49.

Interférence. — Quand un rayon lumineux ou un rayon électrique tombe sur un miroir auquel il est perpendiculaire, il se réfléchit sur lui-même et revient en arrière. Le résultat produit est le même que si deux rayons, suivant le même chemin, mais en sens inverses, se superposaient l'un à l'autre. Le premier rayon, qui va vers le miroir, est dit *rayon incident*; le second rayon, venant du miroir, est dit *rayon réfléchi*.

Chaque rayon représentant la direction de propagation d'un mouvement vibratoire, on voit qu'il y aura *superposition de deux mouvements vibratoires de même fréquence et de même amplitude progressant en sens inverses*. Par conséquent, chaque particule d'éther, située primitivement sur le chemin du rayon incident, va se trouver soumise à un mouvement qui résulte de la combinaison des deux mouvements vibratoires agissant simultanément sur elle.

Les phénomènes auxquels donne lieu la combinaison des deux mouvements vibratoires s'appellent phénomènes d'interférence.

Soit AB (fig. 50) le rayon perpendiculaire au miroir M, suivant lequel progressent, en sens inverses, les deux mouvements vibratoires dont il vient d'être question. Appelons I le premier mouvement, qui progresse dans la direction AB, et II le second mouvement, qui progresse dans la direction BA. Considérons une particule d'éther située primitivement sur la ligne AB et étudions le mouvement résultant auquel cette particule va être soumise.

Du fait de la propagation du mouvement vibratoire I, la particule doit se déplacer suivant une perpendiculaire à AB en effectuant un mouvement vibratoire harmonique. Du fait de la propagation du mouvement vibratoire II, la particule doit se déplacer encore suivant la même perpendiculaire en effectuant un second mouvement vibratoire harmonique.

Ces deux mouvements vont se composer en un mouvement résultant dont l'amplitude dépendra de la différence des phases des deux mouvements composants.

Si les deux mouvements composants ont la même phase⁽¹⁾, ils sont concordants et leurs effets s'ajoutent : la particule est soumise alors à un mouvement vibratoire d'amplitude double de celle des mouvements composants.

Si, au contraire, les phases des mouvements I et II sont égales et opposées, ces deux mouvements se détruisent l'un l'autre à chaque instant et la particule reste toujours immobile.

Si enfin les phases des deux mouvements diffèrent d'une quantité quelconque, la particule effectue un mouvement vibratoire dont l'amplitude dépend de la valeur de la différence des phases : cette amplitude est d'autant plus grande ou d'autant plus petite que les phases se rapprochent plus de la concordance ou de la discordance.

Dans tous les cas, la fréquence du mouvement résultant de chaque particule est égale à la fréquence commune des mouvements vibratoires I et II.

Par exemple considérons une particule quelconque p , située au point P, pour laquelle les phases des deux mouvements vibratoires diffèrent d'une quantité quelconque. La différence des phases des mouvements vibratoires I et II en P a une valeur qui dépend uniquement de la position du point P par rapport à l'origine A du rayon. L'amplitude du mouvement vibratoire qu'effectue la particule p , située primitivement au point P, est donc bien déterminée : elle a, par exemple, pour valeur PP_1 .

Examinons le mouvement des particules successives qui sont à la droite de p . Quand on va vers B, la phase du mou-

(1) La notion de phase a été expliquée au chapitre III, page 48.

vement vibratoire I augmente (puisqu'on s'éloigne de l'origine A), et la phase du mouvement vibratoire II diminue (puisqu'on se rapproche de l'origine B). L'une des phases augmentant, et l'autre diminuant⁽¹⁾, la différence des phases des deux mouvements composants varie rapidement quand on passe d'une particule à la suivante, et, par conséquent, l'amplitude du mouvement vibratoire de chaque particule diffère sensiblement de celle du mouvement vibratoire de la particule précédente. On arrive donc assez vite à une particule pour laquelle cette amplitude est maxima (les phases

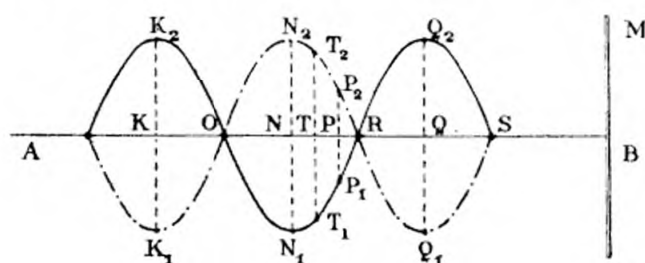


FIG. 50.

des mouvements vibratoires I et II étant égales et concordantes) ou nulle (les phases des mouvements vibratoires I et II étant égales et opposées).

Soit r la particule, située au point R, pour laquelle l'amplitude du mouvement vibratoire résultant est nulle, les phases des mouvements vibratoires I et II étant égales et opposées. La particule r n'effectue aucun mouvement et reste immobile.

Considérons les particules situées à une distance d'une demi-longueur d'onde de part et d'autre du point R: soient o et s ces particules, situées en O et S.

D'après ce qui a été dit au chapitre III, page 56, les phases des mouvements de deux particules distantes d'une demi-longueur d'onde dans chacun des mouvements vibratoires I

⁽¹⁾ L'augmentation de l'une est d'ailleurs égale à la diminution de l'autre.

et II sont égales et opposées. Donc puisque les phases se trouvent inversées dans chacun des mouvements vibratoires I et II, elles sont encore égales et opposées en O et en S si elles étaient égales et opposées en R: les particules *o* et *s* sont donc immobiles, comme la particule *r*.

De même, les particules situées à $1, 1\frac{1}{2}, 2, 2\frac{1}{2}, 3, \dots$, etc. longueurs d'onde de part et d'autre du point R sont immobiles.

Les points O, R, S..., etc., où les particules restent immobiles, sont appelés des nœuds de vibration.

Il est facile de voir que, pour les particules situées primitivement à un quart de longueur d'onde des points O, R, S... etc., les mouvements vibratoires composants ont des phases égales concordantes. Ces particules *k, n, q...* situées primitivement aux points K, N, Q..., effectuent donc des vibrations dont l'amplitude de $K_1K_2, N_1N_2, Q_1Q_2, \dots$ est double de celle des mouvements vibratoires composants I et II.

Les points K, N, Q... etc., où les particules effectuent des mouvements vibratoires d'amplitude maxima sont nommés des ventres de vibration.

On voit qu'à mi-distance entre deux nœuds, il existe toujours un ventre, et qu'à mi-distance entre deux ventres il existe toujours un nœud. *Deux nœuds ou deux ventres successifs sont séparés l'un de l'autre par une distance égale à une demi-longueur d'onde: un ventre et un nœud voisins sont séparés par une distance égale à un quart de longueur d'onde.*

L'ensemble des particules qui vibrent sous l'action des deux mouvements interférents et qui présentent des nœuds et des ventres de vibration, constitue une onde stationnaire.

Il faut bien se garder de confondre les mouvements vibratoires qu'effectuent les particules successives dans une onde qui se propage (chapitre III) ou dans une onde stationnaire comme celle dont nous venons de déterminer l'existence. Dans la première, chaque particule effectue un mou-

vement de même amplitude que celui de la particule voisine, et il se produit une sorte de déplacement latéral de l'onde⁽¹⁾. Dans l'onde stationnaire, au contraire, chaque particule effectue un mouvement dont l'amplitude est toujours différente de celle du mouvement de la particule voisine et est plus ou moins grande suivant que la particule considérée est plus ou moins rapprochée d'un ventre. *La position des nœuds et des ventres est invariable dans l'espace.*

En employant un excitateur qui comprenait, au lieu de sphères, deux plaques carrées de 1600 centimètres carrés, et en plaçant, parallèlement à cet appareil, une grande feuille métallique, Hertz a constaté, au moyen d'un résonateur, que les rayons électriques donnent lieu aux mêmes phénomènes d'interférence que les rayons lumineux, et qu'il se produit une onde stationnaire présentant des nœuds et des ventres.

En réalité, ces expériences n'étaient pas très concluantes, à cause de l'intervention d'un phénomène complexe dû à la grande différence des valeurs de l'amortissement dans le résonateur et dans l'excitateur : elles ont été reprises depuis, et les résultats fondamentaux en ont été reconnus exacts.

Propagation des ondes électromagnétiques dans les fils.

Si l'on fait agir sur un fil ouvert ⁽²⁾ les oscillations pro-

(1) Ce déplacement est analogue à celui que l'on observe sur la surface de l'eau, par exemple, lorsqu'on laisse tomber en un point un caillou qui amène une perturbation brusque dans la position des particules liquides. L'onde qui prend naissance et qui se propage est bien visible sous forme de rides qui se dilatent et progressent en s'amortissant peu à peu.

(2) C'est-à-dire dont l'extrémité est isolée et n'aboutit pas à une capacité.

duites par un excitateur, la perturbation créée dans ce fil se propage, et se réfléchit sur l'extrémité du fil : la perturbation directe et la perturbation réfléchie interfèrent et donnent lieu à une onde stationnaire, qui présente des nœuds et des ventres.

Le courant⁽¹⁾ étant forcément nul à l'extrémité libre du fil⁽²⁾ puisqu'il ne peut y avoir d'accumulation d'électricité en ce point, il y a un nœud de courant à cette extrémité. Donc il y aura d'autres nœuds de courant à des distances $l/2$, l , $3l/2$, $2l$, $5l/2$..., etc. de l'extrémité, l étant la longueur d'onde de la perturbation. Puisqu'il y a un nœud de courant à l'extrémité du fil, nous savons qu'il y aura un ventre de courant à une distance $l/4$ de l'extrémité, et d'autres ventres de courant aux distances $3l/4$, $5l/4$, $7l/4$... de l'extrémité.

On montre mathématiquement et on vérifie expérimentalement que l'onde de courant et l'onde de potentiel qui se propagent dans le fil ne sont pas en phase. Leurs phases diffèrent d'un quart de période.

L'onde de potentiel présente aussi des nœuds et des ventres, mais, puisque les deux ondes ont une différence de phase d'un quart de période, les ventres de potentiel se trouvent aux points où il existe des nœuds de courant, et les nœuds de potentiel⁽³⁾ se trouvent aux points où il existe des ventres de courant⁽⁴⁾.

(1) On a coutume de dire brièvement « le courant » au lieu de « l'intensité de courant ». De même, on dit « nœud ou ventre de courant » au lieu de « nœud ou ventre d'intensité du courant ».

(2) À moins que celle-ci n'aboutisse à une capacité.

(3) On dit généralement nœud ou ventre de tension au lieu de nœud ou ventre de potentiel.

(4) En effet, si l'onde de potentiel et l'onde de courant étaient en phase, les ventres de potentiel et les ventres de courant se trouveraient aux mêmes points.

Mais les phases de l'onde de potentiel et de l'onde de courant différant d'un quart de période, l'onde de potentiel se trouve d'un quart de longueur d'onde en arrière de l'onde de courant : donc les ventres de potentiel se trouvent à un quart de longueur d'onde en arrière des ventres de courant, c'est-à-dire qu'ils sont aux

Ce phénomène est absolument analogue à celui que présentent, en Acoustique, les vibrations de l'air dans un tuyau sonore fermé à une extrémité. Le potentiel, ou la tension électrique, est analogue à la pression de l'air, et le courant électrique est analogue à la vitesse de l'air. Aux ventres de vibration, où la pression est forte, la vitesse est nulle; aux nœuds de vibration, où la pression de l'air est nulle, la vitesse de l'air est maxima. D'après ce qui a été dit précédemment, on voit que l'amplitude du mouvement vibratoire à un ventre de tension est double de la valeur maxima de la tension alternative agissante.

Pour étudier la propagation le long des fils, Hertz, puis M. Lecher et MM. Sarasin et de la Rive, ont employé le dispositif suivant (fig. 51).

L'excitateur comprend deux plaques métalliques carrées A et B reliées par un conducteur interrompu en son milieu par un éclateur E. En face des deux plaques A et B sont disposées deux plaques A' et B' formant avec elles deux condensateurs. Chacune de ces deux plaques est reliée à un fil, et les deux fils, soigneusement isolés à leur extrémité, sont tendus parallèlement l'un à l'autre.

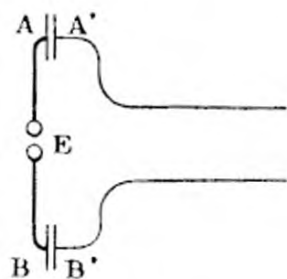


FIG. 51.

Il se produit le long de ces fils des nœuds et des ventres de tension et de courant. On peut rendre visibles les ventres de tension au moyen d'un tube à gaz raréfié (tube de Geissler), placé transversalement entre les deux fils, qui devient très lumineux aux points où il existe des ventres de ten-

mêmes points que les nœuds de courant. De même les nœuds de potentiel, qui sont à un quart de longueur d'onde des ventres de potentiel, se trouvent aux mêmes points que les ventres de courant.

sion, et reste complètement obscur aux points où il existe des nœuds de tension⁽¹⁾. Au lieu d'un tube à vide, on peut employer d'autres appareils appropriés.

Quant aux nœuds et aux ventres d'intensité du courant, ils peuvent également être mis en évidence si l'on intercale dans l'un des fils, en des points variables, un appareil de mesure (ampèremètre thermique par exemple) ou simplement une lampe électrique à incandescence dont le filament rougit aux points où il y a des ventres de courant et reste obscur aux points où il y a des nœuds de courant.

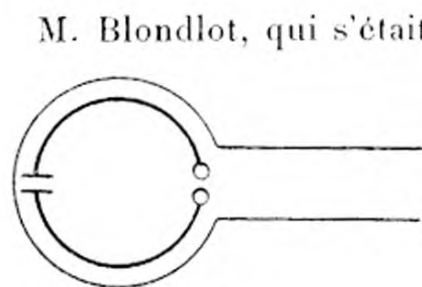


FIG. 52.

M. Blondlot, qui s'était proposé de mesurer la vitesse de propagation des ondes dans les fils, excitait ceux-ci par induction électromagnétique d'après le dispositif que représente la figure 52.

Dans ce dispositif, un excitateur circulaire agit inductivement sur un fil qui l'entoure à très faible distance et dont les deux extrémités sont tendues parallèlement l'une à l'autre : la self-induction d'un tel circuit circulaire peut être exactement

(¹) Le tube à gaz raréfié ou « tube à vide » est fréquemment utilisé dans les ondemètres (chapitre XI) pour déceler le maximum de tension. Il se compose essentiellement d'un tube en verre fermé, d'une quinzaine de centimètres de longueur, muni à chaque extrémité d'un renflement. Dans chaque renflement est placée une électrode métallique, généralement une tige de platine, de nickel ou d'aluminium, traversant le verre auquel elle est soudée ou fixée par un mastic imperméable aux gaz. Le tube, préalablement rempli d'air ou d'un gaz approprié, est placé sur la machine pneumatique et on y fait le vide par un petit appendice que l'on ferme ensuite au chalumeau. L'étincelle électrique passe beaucoup plus facilement dans un gaz raréfié que dans l'air à la pression atmosphérique : sous l'action d'une différence de potentiel suffisante, le tube est rendu lumineux par la décharge qui le traverse.

Les tubes les plus sensibles sont ceux qui contiennent comme gaz raréfié du *néon* ou de l'*hélium*.

déterminée par le calcul ; de même, la capacité du condensateur intercalé dans ce circuit est connue. On peut donc, connaissant la valeur du produit cl (capacité et self-induction), déterminer exactement la fréquence des oscillations produites.

D'autre part, on peut facilement déterminer sur le fil la distance $\lambda/2$ qui sépare deux nœuds ou deux ventres et en déduire la valeur de la longueur d'onde λ . Or, comme nous l'avons vu à la fin du chapitre III, la vitesse de propagation v , la fréquence f et la longueur d'onde λ sont liées par la relation

$$v = \lambda f.$$

On peut par conséquent déterminer ainsi la valeur de v .

Ces expériences, complétées par celles de MM. Trowbridge et Duane ⁽¹⁾, ont conduit à trouver pour la vitesse de propagation dans les fils la même valeur que pour la vitesse de propagation dans l'air, soit 300 000 kilomètres par seconde, vitesse de la lumière.

⁽¹⁾ Ces expérimentateurs déterminaient la fréquence des oscillations au moyen d'un miroir tournant, d'après la méthode expliquée au chapitre V.

DEUXIÈME PARTIE

LA RADIOTÉLÉGRAPHIE

CHAPITRE VIII

LES DÉBUTS DE LA RADIOTÉLÉGRAPHIE

Les expériences de Hertz, décrites dans le chapitre précédent, permettent de réaliser des actions à distance et peuvent servir à la transmission de signaux, puisque un appareil récepteur est impressionné par un appareil transmetteur dont les oscillations sont engendrées à volonté pendant un intervalle de temps plus ou moins long. Mais l'énergie propagée par les ondes ainsi créées est extrêmement faible et, en outre, le résonateur constitue un détecteur d'ondes très peu sensible : on ne pouvait donc pas songer à établir des communications à distance avec ce système avant d'avoir trouvé d'une part un détecteur d'ondes assez sensible, et d'autre part un radiateur ou émetteur suffisamment puissant.

Radioconducteur de M. Branly.

Plusieurs expérimentateurs, parmi lesquels on peut citer

Varley (¹), avaient signalé qu'un tube rempli de limailles métalliques ou d'un mélange de poudres métalliques et de poudres non conductrices présente une résistance électrique extrêmement élevée lorsque ses extrémités sont soumises à une faible différence de potentiel, et une résistance électrique très faible lorsque la différence de potentiel agissante est grande.

D'autre part, le Pr Hughes s'aperçut, dans des expériences faites vers 1880, que la résistance d'un contact imparfait entre acier et charbon diminuait considérablement sous l'influence d'étincelles voisines.

Enfin le Pr Branly signala, en 1890, que, d'après un grand nombre d'observations faites par lui, *la résistance électrique d'une colonne de limaille métallique comprise entre deux électrodes métalliques est grandement influencée, à distance, par les étincelles d'une bobine de Ruhmkorff*. Parmi les limailles étudiées par lui, la majorité présentait une diminution de résistance et quelques-unes présentaient une augmentation de résistance.

L'appareil de M. Branly, nommé *radioconducteur* par son inventeur, consistait en un tube de verre T (fig. 53) contenant deux cylindres métalliques EE dont les bases étaient

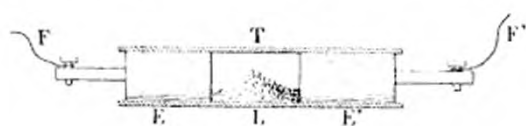


FIG. 53.

soigneusement polies : entre ces deux surfaces était placée la limaille métallique L. Les fils F et F', aboutissant aux

deux électrodes EE', étaient reliés à une pile et à un appareil de mesure. En temps normal, aucun courant appré-

(¹) Les frères Varley avaient établi sur ce principe, en 1866, un parafoudre pour appareils télégraphiques.

ciable ne traversait le circuit, à cause de la résistance élevée de la limaille L comprise entre les cylindres E et E'. Au contraire, dès que l'étincelle de décharge d'une bobine de Ruhmkorff ou d'une bouteille de Leyde éclatait à quelque distance du radioconducteur, la résistance électrique de la limaille métallique L diminuait brusquement et l'appareil de mesure indiquait le passage d'un courant relativement important.

M. Branly étudia différentes sortes de limaille et différentes formes de contacts; il trouva qu'un simple contact imparfait entre des tiges d'acier ou de cuivre oxydées présente les mêmes variations de résistance que les limailles métalliques.

Expériences de Sir O. Lodge.

Après la découverte de M. Branly, Sir Oliver Lodge, qui travaillait à répéter les expériences de Hertz, eut l'idée d'employer, dans ses expériences, un tube à limaille comme détecteur d'ondes.

Le tube qu'il utilisa, et auquel il donna le nom de *cohéreur*⁽¹⁾, contenait de la limaille de fer ou de laiton placée dans une atmosphère d'air ou d'hydrogène, ou bien dans le vide.

L'action des ondes avait pour effet de *cohérer* la limaille, c'est-à-dire de diminuer sa résistance électrique. Cette diminution de résistance de la limaille persistant après l'action

(1) Sir Lodge a choisi ce mot de *cohéreur* à cause du phénomène par lequel il explique le fonctionnement des tubes à limaille. Comme on le verra plus loin, il admet en effet que la limaille s'agglomère, sous l'effet des ondes électriques, et forme de petites chaînes de particules juxtaposées que de microscopiques étincelles soudent ensemble. Un choc rompt ces chaînettes et décohère la limaille que les ondes ont précédemment rendue cohérente.

des ondes électriques, il fallait imprimer une légère secousse au tube pour le *décohérer*, c'est-à-dire lui rendre sa résistance normale élevée. Pour cela, Sir Lodge communiquait au support du tube une trépidation régulière en faisant agir sur lui une petite roue en étoile entraînée par un mécanisme d'horlogerie. Il essaya aussi de faire agir sur ce support le marteau d'une petite sonnerie électrique, mais il trouva que les étincelles de rupture de cette sonnerie, produites à proximité du cohéreur, impressionnaient cet appareil.

Sir Lodge employa aussi comme cohéreur un appareil à contact imparfait unique, dans lequel une vis de réglage permettait de donner aux surfaces adjacentes la pression pour laquelle la sensibilité était maxima.

Expériences de M. Popoff.

Le Pr Popoff, de l'École de marine de Cronstadt, songea en 1895 à employer le cohéreur pour déceler et enregistrer les orages éloignés. Pour cela, il relia à un fil aérien vertical, soutenu par un mât en bois, un circuit récepteur comprenant un cohéreur et un enregistreur.

La façon dont était établi ce circuit récepteur est indiquée schématiquement par la figure 54.

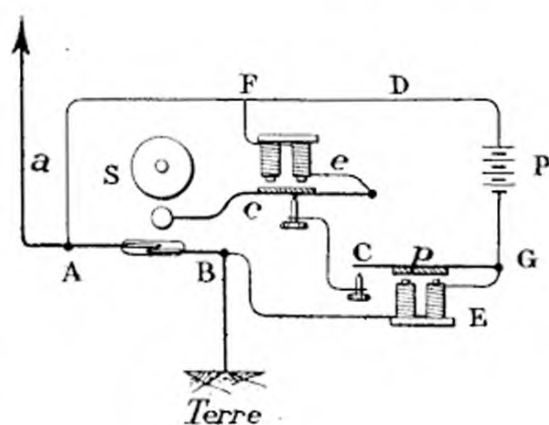


FIG. 54.

Le fil aérien *a* était relié en A à l'une des électrodes du cohéreur dont l'autre électrode B était connectée à la

terre⁽¹⁾. Le cohéreur faisait partie d'un autre circuit ADPEB, contenant la pile P et l'électro-aimant E. Lorsque, sous l'action des oscillations de grande fréquence produites par des décharges atmosphériques lointaines, la résistance du cohéreur tombait à une faible valeur, un courant circulait dans le circuit ADPEB, et l'électro-aimant E attirait la palette *p*. Celle-ci portait une plume enregistreuse qui marquait un trait sur une feuille de papier portée par un cylindre. D'autre part, la palette *p* établissait en C un contact qui fermait le circuit PGpCcFDP contenant l'électro-aimant *e* d'une sonnerie. Le marteau de celle-ci, lorsqu'il vibrait sous l'action de l'électro-aimant *e*, frappait tantôt contre un timbre de sonnerie S, tantôt contre le support du cohéreur pour décoherer celui-ci.

Le dispositif de M. Popoff se montra très efficace pour enregistrer les ondes électriques provenant de décharges atmosphériques : il permettait ainsi de connaître l'existence d'orages éclatant à une grande distance, et de prévoir les perturbations météorologiques. Dans le compte rendu de ses expériences, le P^r Popoff concluait en indiquant que son dispositif pourrait parfaitement servir à recevoir les signaux d'un transmetteur éloigné, si l'on parvenait à créer avec un tel appareil des perturbations électromagnétiques suffisamment intenses.

Premières expériences de M. Marconi (1896-1897).

Le transmetteur capable de produire des perturbations

(1) C'est-à-dire à une plaque métallique ou un réseau de fils métalliques enfouis assez profondément dans le sol, de préférence humide, de façon à obtenir un bon contact. Cette jonction avec le sol est appelée une prise de terre ou parfois simplement une terre.

suffisamment intenses fut inventé par M. Marconi, élève du P^r Righi, qui s'était consacré depuis plusieurs années à l'étude des oscillations électriques.

Le principe de ce transmetteur repose sur l'emploi d'un ou plusieurs conducteurs isolés, de surface plus ou moins grande, supportés en l'air par un ou plusieurs mâts, et reliés à l'une des boules d'un éclateur dont l'autre boule est connectée à la terre : l'éclateur est alimenté par le secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. L'ensemble constitue un demi-radiateur de Hertz, ayant la terre comme contre-partie.

Le système de conducteurs aériens, nommé *l'antenne* ou parfois *l'aérien*, a pour fonction de communiquer à l'éther environnant un ébranlement qui donne naissance à des ondes électromagnétiques. Bien que le mode d'action de l'antenne ne soit pas bien complètement connu, il est à peu près évident que, plus celle-ci est haute, plus est grand le volume d'éther ébranlé, et plus sont puissants les effets obtenus. Quant aux ondes électromagnétiques qui prennent ainsi naissance, elles se propagent vraisemblablement suivant des anneaux concentriques à l'antenne, qui progressent en se dilatant horizontalement.

Nous allons étudier très rapidement les premiers appareils utilisés par M. Marconi, appareils avec lesquels il a pu réaliser, en 1897, des communications atteignant 15, puis 22 kilomètres.

Transmetteur. — Le transmetteur comprenait (fig. 55) une bobine Ruhmkorff à trembleur dont le primaire était alimenté par une batterie d'accumulateurs B. Un interrupteur *i*, ayant la forme d'une clé Morse, permettait de fermer ou d'ouvrir le circuit. Le secondaire de la bobine était relié à un éclateur E dont les boules étaient connectées d'une

part à l'antenne A et d'autre part à une prise de terre T formée d'une plaque métallique enfouie dans le sol.

L'antenne était formée d'un fil unique isolé supporté par un mât ou par un cerf-volant. A l'extrémité supérieure de ce fil était disposée une plaque métallique ou une surface présentant une certaine capacité; dans le cas où un cerf-volant supportait le fil, il était recouvert d'une feuille d'étain ('). M. Marconi a aussi essayé différentes formes d'aériens, constitués par des plaques, des cylindres ou différentes surfaces métalliques placées à quelques mètres en l'air, ou des réseaux de fils de différentes formes.

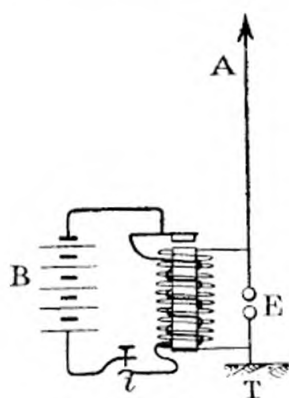


FIG. 55.

L'éclateur E était d'abord un éclateur de Righi avec étincelle jaillissant dans l'huile; dans la suite, M. Marconi employa un simple éclateur à boules placé dans l'air. En fermant l'interrupteur *i*, on mettait en fonctionnement la bobine de Ruhmkorff: des étincelles jaillissaient entre les boules de l'éclateur, et l'antenne entraînait en vibration.

Pour émettre des signaux brefs ou prolongés, il suffisait de fermer l'interrupteur *i* pendant un temps court ou long: on donnait ainsi naissance à des trains d'ondes d'une durée plus ou moins longue.

Récepteur. — Au poste récepteur, une antenne semblable à l'antenne émettrice était mise en vibration par les ondes électromagnétiques provenant du poste transmetteur. M. Marconi a constaté que, plus les antennes de trans-

(L'emploi de cette capacité terminale a été abandonné dans la suite.

mission et de réception étaient élevées, plus la distance à laquelle on pouvait communiquer était grande.

L'antenne de réception aboutissait à l'une des électrodes d'un cohéreur dont l'autre électrode était reliée à la terre, comme dans le dispositif Popoff. En dérivation sur le cohéreur était branché un premier circuit contenant un élément de pile et un relais, dont le fonctionnement déterminait la fer-

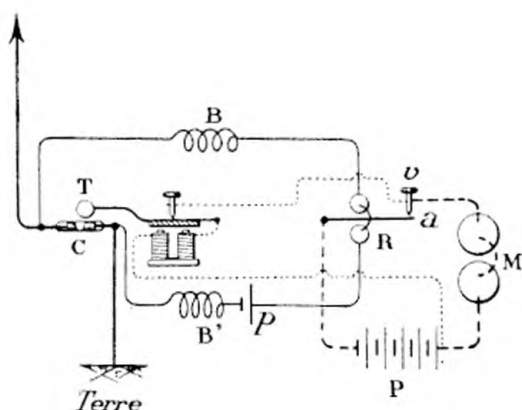


FIG. 56

meture d'un second circuit contenant un enregistreur Morse.

La figure 56 représente ce montage.

Le cohéreur C, établi par M. Marconi, consistait en un petit tube de verre de 4 à 5 centimètres de longueur et de 0,5 centimètre de diamètre environ. Les deux électrodes



FIG. 57.

étaient taillées en biseau comme le montre la figure 57.

La limaille intercalée entre les deux électrodes était composée de 94 parties d'argent et 6 parties de nickel: elle avait été passée au tamis de façon à présenter une grosseur de grains bien régulière. Les fils de

La limaille intercalée entre les deux électrodes était composée de 94 parties d'argent et 6 parties de nickel: elle avait été passée au tamis de façon à présenter une grosseur de grains bien régulière. Les fils de

platine aboutissant aux électrodes étaient soudés dans le verre du tube fermé aux deux bouts : on faisait le vide dans l'appareil par une petite tubulure *t*, scellée ensuite au chalumeau.

Le cohéreur était intercalé entre l'antenne et la terre. En outre, il faisait partie d'un circuit contenant un élément de pile *p* et un relais R très sensible ⁽¹⁾. Deux bobines de self-induction B et B' étaient destinées à empêcher, par leur grande résistance inductive, le passage des oscillations dans le circuit dérivé : la résistance ohmique de ces bobines étant faible, elles ne créaient pas d'obstacle au passage du courant continu de la pile *p*. Le deuxième circuit, que le relais fermait en *av* lorsque le premier circuit était parcouru par un courant, même très faible, comprenait une forte pile P et un enregistreur Morse ordinaire M à électro-aimants ⁽²⁾. Enfin un

(1) Le relais est un appareil qui, agissant sous l'effet d'un courant extrêmement faible, a pour fonction de fermer un second circuit dans lequel peut passer un courant plus intense. Il comprend toujours un système fixe, formé d'électro-aimants ou d'aimants, et un système mobile, formé d'une palette aimantée ou d'un cadre portant un grand nombre de tours de fil. Le courant traverse soit les électro-aimants, soit le cadre mobile.

Sous l'effet des attractions et des répulsions électromagnétiques qui se produisent, soit entre les électro-aimants fixes et la palette mobile, soit entre les aimants fixes et le cadre mobile, le système mobile oscille et établit, dans ce mouvement, un contact qui ferme le second circuit. Dès que le courant cesse de passer dans le premier circuit, le système mobile revient à sa position normale en rompant le second circuit. Sur la figure, on a représenté le relais sous forme d'un double électro-aimant et d'une palette oscillante *a*.

(2) Pour transmettre télégraphiquement les différentes lettres de l'alphabet, Morse a imaginé de les remplacer par des combinaisons de traits et de points (par exemple la lettre *v* est représentée par 3 points et un trait). De là est né l'alphabet Morse.

Au poste transmetteur, un interrupteur, appelé souvent *manipulateur* ou clé Morse, permet d'envoyer sur la ligne des émissions de courant brèves ou prolongées, figurant les points ou les traits.

Au poste récepteur, la ligne aboutit aux bobines d'un électro-aimant qui attire une palette de fer doux pendant tout le temps que dure une émission de courant. Cette palette appuie, contre une molette encreée, une bande de papier qui se déroule

troisième circuit, également fermé en *av* par la palette du relais R, permettait au courant de la pile P d'actionner le tapeur T pour décoherer le tube. Sur le schéma de la figure 56, les trois circuits ont été représentés différemment, pour plus de netteté, le premier étant indiqué en trait plein, le deuxième en trait interrompu, et le troisième en pointillé.

Avec ce dispositif, lorsque des trains d'ondes atteignent l'antenne, celle-ci se met à vibrer; les oscillations, agissant sur le cohéreur C, abaissent considérablement la résistance électrique de celui-ci. Un courant produit par la pile *p* circule alors dans le circuit du relais: l'armature mobile oscille et ferme en *av* les deuxième et troisième circuits. L'enregistreur Morse est actionné par le courant de la pile P et inscrit un signal; le tapeur est également actionné, et décohere le tube C. La résistance du cohéreur revenant à sa valeur primitive, le courant cesse de passer dans le circuit du relais; l'armature mobile de celui-ci revient à sa position normale, et le courant est rompu dans les deuxième et troisième circuits. Si le train d'ondes agit encore sur l'antenne, le cohéreur est à nouveau influencé, et les mêmes phénomènes se reproduisent. Si l'action du train d'ondes a cessé, tout reste dans l'ordre normal jusqu'au signal suivant.

Si le poste transmetteur a émis un signal relativement

d'un rouleau et s'enroule sur un autre rouleau mû par un mécanisme d'horlogerie. L'ensemble de l'électro-aimant, des rouleaux, et du mécanisme d'horlogerie constitue l'enregistreur Morse.

Quand le poste transmetteur fait une émission de courant brève ou longue, la palette de l'électro-aimant appuie, pendant un intervalle de temps court ou long, la bande de papier contre la molette encree qui y trace ainsi un trait court (point) ou un trait long (trait). Quand le poste transmetteur ne fait pas d'émission, la bande de papier présente « un blanc » plus ou moins long.

long figurant un trait de l'alphabet Morse, le train d'ondes a une certaine durée : le cohéreur se cohère et est décohéé par le teneur plusieurs fois de suite, et l'enregistreur Morse inscrit une série de points très rapprochés qui, par suite de l'inertie de la palette, forment un trait continu. Si le poste transmetteur émet au contraire un point, le train d'ondes dure peu de temps, le cohéreur se cohère et est décohéé peu de fois, et l'enregistreur Morse inscrit un trait très court figurant un point.

Chaque poste ne possédant, en général, qu'une seule antenne, celle-ci est reliée tantôt aux appareils transmetteurs, tantôt aux appareils récepteurs suivant que le poste doit émettre ou recevoir des signaux. Pour protéger les appareils récepteurs contre l'action des ondes produites par le poste lui-même lors de la transmission des signaux, on enferme ces appareils dans un coffret métallique, relié à la terre, qui agit comme un écran.

Le poste récepteur est influencé, non seulement par les ondes électromagnétiques provenant du poste transmetteur avec lequel il désire communiquer, mais aussi par les ondes provenant de postes étrangers plus ou moins voisins. Il est aussi influencé par une catégorie de phénomènes électriques dus aux décharges atmosphériques éloignées ou à l'accumulation de certaines charges d'électricité statique. Les pseudo-signaux qu'enregistrent les appareils récepteurs sous l'effet de ces phénomènes sont nommés *signaux parasites* : ils constituent une très grande gêne pour les communications radiotélégraphiques, quand on a recours aux dispositifs simples décrits ci-dessus ; nous verrons que les dispositifs actuellement adoptés permettent d'atténuer fortement les inconvénients dues à la présence de signaux parasites.

*Expériences de transmission à travers la Manche
(1899).*

En 1898, M. Marconi s'appliqua surtout à perfectionner ses appareils récepteurs pour obtenir une plus grande sensibilité. Dans le premier montage adopté, le cohéreur était directement embroché sur l'antenne au voisinage du sol, comme nous l'avons vu. Or le cohéreur est un appareil influencé par la différence de potentiel qui agit entre ses électrodes, et il est facile de comprendre que, la terre étant à un potentiel nul, l'antenne en vibration doit avoir un nœud de tension à sa base reliée à la plaque de terre⁽¹⁾. Dans ces conditions, la différence de potentiel agissant sur le cohéreur est faible. Au contraire, si l'on peut, par un artifice, placer le cohéreur en un point où il existe un ventre de tension, on doit obtenir

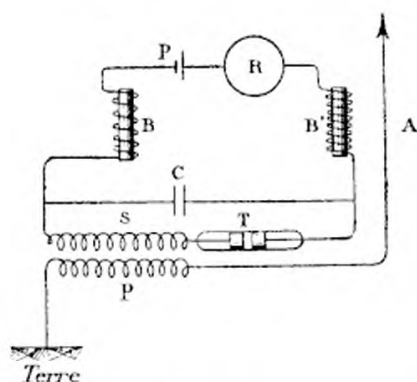


FIG. 58.

de bien meilleurs résultats. C'est ce que fit empiriquement M. Marconi en intercalant le cohéreur dans un second circuit accouplé par induction avec l'antenne et mis en résonance avec celle-ci.

Le montage adopté par M. Marconi est représenté par la figure 58. Sur celle-ci, A représente le fil allant à l'antenne; les bobines *ps* constituent un transformateur d'os-

(1) La formation d'une onde stationnaire dans l'antenne, avec des nœuds et des ventres de courant et de tension, sera étudiée plus loin (chap. x). D'après ce qui a été dit au chapitre précédent sur la production d'ondes stationnaires dans les fils, on

cillations⁽¹⁾; C représente un condensateur, BB' deux bobines de self-induction, souvent appelées bobines de réactance, destinées à arrêter le passage des oscillations; P est une pile et R un relais sensible. Le cohéreur T était placé dans le circuit oscillant sCT accordé de façon à présenter la même fréquence propre d'oscillation que l'antenne.

En 1899, M. Marconi adoptait le dispositif que représente la figure 59 et dans lequel le cohéreur est bien nettement à un ventre de tension.

L'enroulement primaire p du transformateur est intercalé entre l'antenne A et la terre: deux enroulements secondaires s_1s_2 , reliés entre eux par le condensateur C, aboutissent au cohéreur T.

Le circuit oscillant Ts_1s_2C est accordé sur la fréquence propre d'oscillation de l'antenne.

En dérivation sur le condensateur C est branché le circuit à courant continu contenant la pile P, le relais R et les deux bobines de self-induction BB' qui arrêtent les oscillations.

Le condensateur C est absolument infranchissable pour le courant continu de la pile P, qui passe par le cohéreur T lorsque la résistance de celui-ci s'abaisse sous l'action des ondes électriques, et est interrompu quand cette résistance reprend sa valeur initiale.

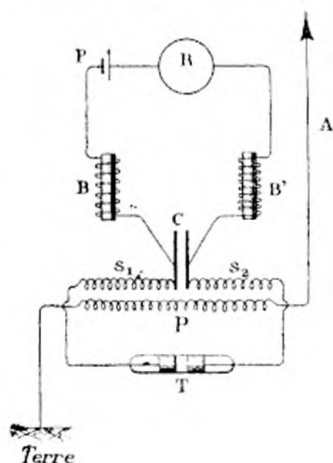


Fig. 59.

peut voir dès maintenant que l'antenne, présentant un nœud de tension à sa base doit présenter en ce même point un ventre de courant.

(1) Ces appareils ont été étudiés au chapitre VI, page 100.

Le relais R agit comme primitivement pour fermer un circuit contenant une forte pile et un enregistreur Morse.

Au début de l'année 1899, M. Marconi établit une communication radiotélégraphique entre Wimereux et Douvres (50 kilomètres). Les antennes

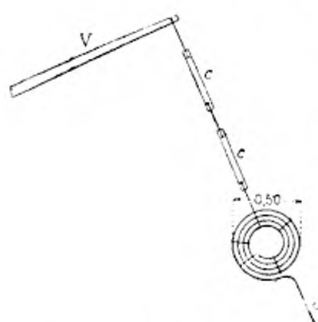


FIG. 60.

étaient de simples fils, sans plaque terminale, et avaient 46 mètres de hauteur: elles étaient supportées par des mâts en bois et isolées par plusieurs tiges d'ébonite. L'extrémité supérieure du fil était enroulée sur elle-même sous forme d'une bobine plate comprenant quatre ou cinq tours comme l'indique la figure 60, sur laquelle *cc* représentent des tiges isolantes en ébonite auxquelles était suspendue la partie supérieure de l'antenne *a*.

Le système transmetteur était le même que dans les premières expériences et consistait en une bobine de Ruhmkorff alimentant un éclateur à boules ordinaire embroché sur l'antenne.

Tous les appareils constituant le système récepteur (sauf l'enregistreur Morse) étaient placés dans une boîte métallique destinée à empêcher l'action des ondes lorsque le poste émettait lui-même des signaux pour la transmission.

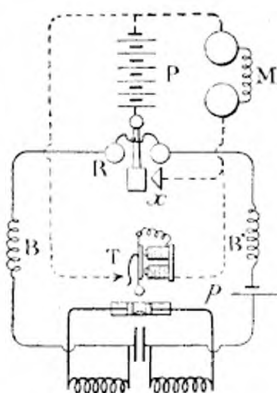


FIG. 61.

La figure 61 montre les connexions des circuits. Le montage du cohéreur était le même que sur la figure 59: le premier circuit à courant continu, fermé par

le cohéreur, contenait la pile p , les deux bobines de self-induction BB' et le relais R . Le deuxième circuit, fermé en x par le relais R , contenait l'enregistreur Morse M et une pile P de plusieurs éléments. Le troisième circuit, fermé également en x , contenait le teneur T : ce circuit était alimenté aussi par la pile P .

Des condensateurs ou des résistances étaient placés en dérivation sur les contacts où pouvaient se produire des étincelles de rupture, de façon à empêcher la formation de celles-ci, qui auraient réagi sur le cohéreur.

Les bons résultats obtenus dans ces expériences montrèrent les services que peut rendre, en pratique, la Radiotélégraphie et, depuis lors, les progrès réalisés par divers inventeurs ont permis d'atteindre des portées de quelques milliers de kilomètres.

CHAPITRE IX

LES DÉTECTEURS D'ONDES

L'invention du cohéreur a rendu possible, comme nous l'avons vu, la réalisation pratique de la Télégraphie par ondes hertziennes. Depuis lors, un certain nombre de perfectionnements ont été apportés à cet appareil pour augmenter sa sensibilité. Mais, pour différentes raisons, son emploi tend à disparaître de plus en plus, et il fait place, dans la plupart des postes radiotélégraphiques à des détecteurs nouveaux, basés sur des phénomènes physiques tout différents, qui donnent, au point de vue de la sensibilité et de la commodité, des résultats très supérieurs à ceux obtenus avec les cohéreurs. Nous allons passer rapidement en revue ces divers appareils.

Cohéreurs.

Aux débuts de la Radiotélégraphie, l'esprit inventif des expérimentateurs s'est attaché à réaliser différents types de cohéreurs, et le nombre d'appareils qui ont ainsi vu le jour est considérable : nous décrirons seulement quelques-uns d'entre eux.

Les tubes employés par Sir Lodge et par M. Marconi ont été déjà mentionnés dans le chapitre précédent. M. Marconi, pour augmenter la sensibilité de son cohéreur, ajoutait

souvent à la limaille métallique quelques traces de mercure.

Le cohéreur utilisé par M. Popoff avait la constitution suivante (fig. 62) : deux électrodes en platine, formées chacune par une portion de cylindre métallique creux, étaient enfoncées dans un tube de verre et maintenues par deux

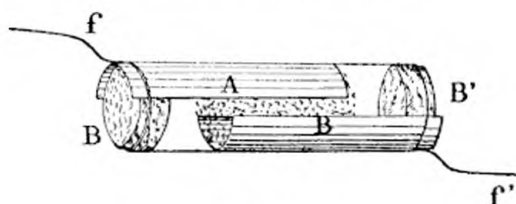


FIG. 62.

bouchons BB' : entre les deux électrodes était placée de la limaille d'acier. Deux fils f et f' servaient à relier les électrodes au reste du circuit.

Le cohéreur de M. Ducretet est représenté par la figure 63. Un tube T en écaille ⁽¹⁾ contient deux électrodes P' et P'' : on

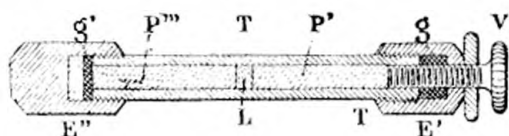


FIG. 63.

peut déplacer l'une d'elles au moyen de la vis V, de façon à régler la pression supportée par la limaille L. Deux calottes métalliques E' et E'' ferment le tube, et sont en contact électrique avec les électrodes en g et g' : il suffit donc de les relier aux fils constituant le circuit récepteur, et cette liaison est effectuée très simplement par des lames à ressorts qui

(¹) Cet isolant, qui a l'avantage de n'être pas fragile, n'est pas altéré par l'humidité et la chaleur, ce qui est précieux pour certains pays.

servent de support au cohéreur. Pour son emploi dans les pays très humides, on adjoint au tube de ce cohéreur un petit réservoir contenant de la chaux.

Dans le cohéreur imaginé par M. Blondel, le tube en verre porte une tubulure latérale soudée à l'endroit où se trouve la limaille. Cette tubulure, recourbée et fermée à son extrémité inférieure, contient de la limaille que l'on peut faire passer en plus ou moins grande quantité entre les deux électrodes.

Le même résultat est obtenu, d'une façon plus commode, dans le cohéreur Ferrié (fig. 64). L'une des électrodes E porte un évidement longitudinal r communiquant avec une

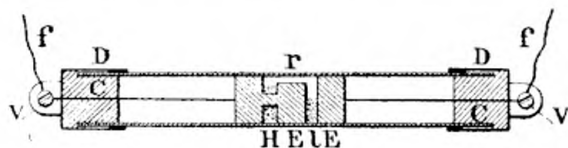


FIG. 64.

gorge circulaire H qui contient la réserve de limaille : l'évidement r permet de faire passer de la limaille de H en l ou inversement, suivant les besoins. Les deux extrémités du tube sont fermées par des pièces métalliques mastiquées sur le verre : ces pièces sont reliées aux électrodes et portent des vis V servant de bornes de contact. La limaille est en argent ou en or : les électrodes sont en acier poli.

M. Tommasina a employé un *cohéreur autodécohérant* à grains de charbon placés entre des électrodes de laiton : il s'est servi aussi d'une goutte de mercure intercalée entre ces mêmes électrodes. Un tel appareil présente la propriété de revenir spontanément à son état primitif quand l'action des ondes cesse (ou tout au moins, il exige, pour revenir à cet

état, un ébranlement moins fort que les cohéreur à limaille métallique).

M. Castelli a réalisé un cohéreur très sensible avec une ou plusieurs gouttes de mercure *Hg* interposées entre deux ou plusieurs électrodes (fig. 65 et 66). Ces électrodes sont en fer ou en charbon et leurs extrémités sont très soigneusement polies : le diamètre des gouttes de mercure doit être

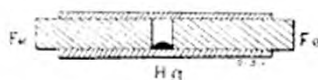


FIG. 65.



FIG. 66.

compris entre 1^{mm},5 et 3 millimètres. Tant qu'aucune oxydation ne se produit sur les surfaces de contact et sur le mercure, l'appareil se décohere spontanément : aussi M. Castelli a-t-il employé simplement comme récepteur un téléphone ⁽¹⁾ branché, avec un élément de pile, en dérivation sur le cohéreur.

MM. Lodge et Muirhead se sont servis avec succès d'un disque de fer, tournant d'un mouvement continu et effleurant la partie supérieure d'une surface de mercure, recouverte d'une mince couche d'huile.

(1) Un récepteur téléphonique comprend essentiellement une petite bobine munie d'un noyau en fils de fer fins, et une membrane (disque très mince) en fer doux placée contre l'extrémité de ce noyau.

Quand la bobine est parcourue par des courants variables, le noyau présente des aimantations variables et attire ou repousse la membrane avec une force variable. Si les variations du courant correspondent aux modulations de la voix ou à un son, la membrane du téléphone reproduit ces modulations ou ce son. Si les variations sont quelconques, le téléphone fait entendre un bruit rappelant le bruit initial qui a donné lieu aux variations de courant.

En particulier, quand on emploie le téléphone dans les réceptions radiotélégraphiques, on perçoit dans cet appareil des crachements reproduisant le bruit des étincelles qui jaillissent dans l'éclateur du poste transmetteur. Une série prolongée de ces crachements indique un trait de l'alphabet Morse ; une courte série indique un point.

Quelques expérimentateurs, au lieu d'utiliser des limailles ou du mercure, ont eu recours à un ou plusieurs contacts imparfaits entre corps solides. On a ainsi employé, par exemple, deux ou plusieurs billes en acier poli placées côte à côte dans un tube incliné ; des baguettes métalliques disposées en croix ; des fragments de perles métalliques remplaçant la limaille, etc. M. Branly a réalisé aussi un détecteur consistant en un trépied à branches pointues en acier posé sur une surface plane en acier poli.

M. Walter emploie un cohéreur auto-décohérant compre-

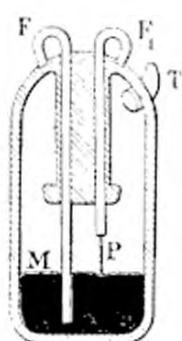


FIG. 67.

nant du mercure M (fig. 67) placé dans une ampoule de verre et une pointe de tantale P de cinq centièmes de millimètre de diamètre effleurant le mercure. Un fil de platine F permet de relier le mercure au pôle positif de la pile, tandis que la tige de tantale est reliée, par l'intermédiaire du fil F_1 , au pôle négatif. On peut faire le vide dans l'ampoule par la tubulure T. Ce cohéreur présente, paraît-il,

une grande sensibilité : il est employé simplement avec un récepteur téléphonique.

M. de Forest a inventé un détecteur auquel on a donné le nom d'*anticohéreur*, parce que sa résistance électrique augmente sous l'action des ondes (au lieu de diminuer, comme dans les cohéreurs ordinaires). Cet appareil comprend deux ou trois électrodes $e_1 e_2 e_3$ (fig. 68) entre lesquelles est interposée

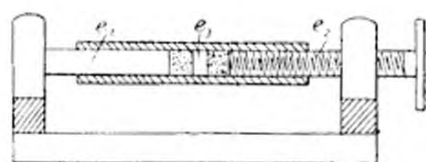


FIG. 68.

une pâte formée de limaille métallique assez grosse, d'un oxyde (oxyde de plomb tel que de la litharge), de glycérine ou de vaseline, et d'un peu d'eau ou d'alcool.

Si on l'introduit dans un circuit local contenant une pile, un très faible courant le traverse, et la limaille s'agglomère, d'après l'inventeur, sous forme de chainettes relativement conductrices. Quand des oscillations électriques se superposent au courant local, l'eau ou l'alcool de la pâte se décompose ; de très petites bulles de gaz (oxygène et hydrogène) sont libérées, et ces bulles, se plaçant entre chaque grain de limaille métallique et son voisin, ainsi que sur la surface des électrodes, augmentent considérablement la résistance électrique du système.

Les figures 69 et 70 montrent la formation et la rupture de ces chainettes de particules conductrices. Aussitôt que l'ac-



FIG. 69.



FIG. 70.

tion des oscillations cesse, les bulles d'hydrogène sont absorbées par l'oxyde de plomb qui se combine avec elles, les bulles d'oxygène produisent une oxydation des surfaces métalliques et disparaissent, et la résistance de l'appareil retombe à sa valeur primitive.

Pour utiliser ce détecteur, l'inventeur l'intercalait sur l'antenne et branchait en dérivation un circuit contenant une pile et un récepteur téléphonique.

Théorie du fonctionnement des cohérents. — Plusieurs explications, plus ou moins différentes, ont été données sur le fonctionnement des cohérents. Chacune d'elles permet de se rendre compte d'une partie des phénomènes en jeu, mais est impuissante à expliquer la totalité des effets observés.

M. Branly a émis l'opinion que la nature de l'isolant com-

pris entre les particules métalliques est modifiée par l'action des ondes qui augmente sa conductibilité: c'est pourquoi il a proposé, pour cette sorte d'appareils, le nom de radioconducteurs. Cette hypothèse est à rejeter, parce qu'aucun effet de ce genre n'a été observé dans les isolants, et, en outre, parce que le fonctionnement du cohéreur n'est pas modifié si l'on fait le vide dans le tube ou si l'on y introduit un gaz quelconque.

Sir Lodge croit que la conductibilité est due à la formation de très petites étincelles qui percent les couches d'oxydes mauvais conducteurs recouvrant les particules, et qui établissent entre ces particules une continuité métallique, ou même une sorte de soudure. D'après cet auteur, l'attraction électrostatique qui s'exerce entre les particules faciliterait la production des étincelles en provoquant un rapprochement des particules. Cette théorie intéressante peut être vérifiée dans certains cas, mais il semble que l'on ait affaire alors à des effets secondaires, dus à l'échauffement que produit le passage du courant. Elle se trouve tout à fait en défaut dans certains autres cas, par exemple pour expliquer le fonctionnement des cohéreurs à grains de charbon.

M. Eccles suppose que les particules s'orientent sous l'action du champ électrique et s'agglomèrent pour former des chaînettes: cette théorie n'est applicable qu'aux cohéreurs contenant des grains de limaille très légers.

M. Shaw admet, d'après des expériences détaillées, que les particules métalliques subissent, aux points de contact, une orientation déterminée qui assure le minimum de résistance. Cet auteur a trouvé que les phénomènes dépendent de la présence d'une mince couche formée soit par de l'air raréfié, soit par de la vapeur d'eau raréfiée, soit par un oxyde métallique, et que la cohérence ne peut se produire que si cette couche est percée: ses expériences l'ont conduit, en

outre, à admettre l'hypothèse d'une fusion superficielle aux points de contact. -

Le commandant Ferrié admet que le diélectrique interposé entre les particules joue un rôle important. Le système composé de deux particules voisines et de la petite couche de diélectrique interposé constitue un petit condensateur. Celui-ci, sous l'action de la différence de potentiel permanente agissant aux bornes du tube par l'action de la pile, atteint la charge maxima qu'il peut supporter : si, à ce moment, une cause extérieure vient augmenter la valeur de cette différence de potentiel, la couche diélectrique est rompue, et il se produit une soudure entre les deux particules : tel est le cas des cohéreurs ordinaires. On peut admettre aussi qu'avant de se rompre, la couche diélectrique a pu laisser passer un effluve plus ou moins important, d'où résulte une conductibilité qui peut atteindre une valeur relativement grande avec certains corps : tel est le cas des cohéreurs autodécohérents. Enfin, si l'on remplace le diélectrique par un liquide conducteur, celui-ci est plus ou moins décomposé sous l'action de la différence de potentiel agissante, et les gaz mis en liberté augmentent la résistance : tel est le cas des antiohéreurs.

M. Blanc, après des expériences minutieuses, a été amené à penser que le diélectrique ne joue pas le rôle essentiel dans le fonctionnement des cohéreurs, pas plus que la présence d'oxyde ou de gaz condensé. Il a trouvé qu'il ne se produit ni fusion ni soudure des points en contact, mais que tout se passe dans les couches purement superficielles des corps juxtaposés. Il a constaté qu'il existe une grande analogie entre les phénomènes produits par la pression et les phénomènes de cohérence. L'explication qu'il donne est la suivante : quand le courant passe, il se produit une attraction entre les surfaces qui limitent la

couche de passage; cette attraction peut être très considérable et agit comme une forte augmentation de pression. En outre, le passage du courant élève la température des couches superficielles, ce qui facilite le contact, et il doit se produire une diffusion d'une couche superficielle vers la couche adjacente.

Enfin M. Guthe base l'explication des phénomènes sur la théorie électronique d'après laquelle il existe dans tous les métaux des électrons libres en mouvement (1). Les ondes électriques ont pour effet de créer un champ électrostatique qui permet aux électrons de quitter le métal, et il apparaît un courant électrique dont ces électrons sont les véhicules. Une fois le courant établi, son intensité va en augmentant, et il se produit une jonction conductrice métallique. Dans les cohéreurs autodécohérents, les parties en contact sont toujours très petites, et il ne peut passer qu'un nombre restreint d'électrons. Il existe bien alors, sous l'effet des ondes électriques, un courant résultant d'un déplacement d'électrons, mais l'intensité de ce courant ne peut atteindre une valeur suffisante pour qu'il s'établisse une jonction conductrice permanente.

Comme on le voit, d'après ce résumé rapide des principales théories, l'explication du fonctionnement des cohéreurs n'a pu être encore donnée d'une façon complète: il semble que les théories de M. Blanc et de M. Guthe soient celles qui rendent le mieux compte de la plupart des faits.

Au point de vue de la sensibilité, les cohéreurs, quel que soit leur type, sont bien inférieurs à quelques-uns des dé-

(1) Nous avons vu déjà que l'électron est un petit corpuscule portant une charge d'électricité.

tecteurs dont il va être question. Mais ils présentent l'avantage que la variation de courant à laquelle ils donnent naissance, quand ils sont soumis aux effets des ondes électromagnétiques, est suffisante pour actionner un relais commandant un récepteur-enregistreur Morse ordinaire. Avec les autres détecteurs, au contraire, on est obligé d'employer un récepteur téléphonique, ce qui offre l'inconvénient qu'aucune trace ne subsiste de la réception des dépêches.

Appareils thermiques.

Nous savons que le passage d'un courant électrique dans un conducteur produit un échauffement de celui-ci. Si le courant a une très faible intensité, il faut évidemment que le fil conducteur soit extrêmement fin pour que son échauffement soit perceptible.

Différents détecteurs d'ondes ont été basés sur ce principe dès 1890, et ont été employés, en particulier par M. Rubens, pour l'étude des oscillations électriques. Le lieutenant de vaisseau Tissot s'en est servi avec habileté dans plusieurs séries de mesures qu'il a entreprises, et a su en tirer d'intéressants résultats.

Le premier détecteur thermique qui ait été utilisé pratiquement dans des dispositifs de radiotélégraphie est le *baretter* de M. Fessenden, que représente la figure 71.

Pour obtenir un fil suffisamment fin, on opère généralement de la façon suivante : un fil très fin de platine, de moins de $0^{\text{mm}},1$ de diamètre, est recouvert d'une couche d'argent jusqu'à ce que son diamètre atteigne envi-

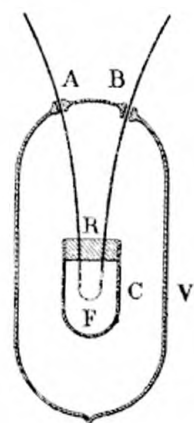


FIG. 71.

ron 2 millimètres, puis le fil bimétallique ainsi préparé est étiré jusqu'au plus petit diamètre possible, 0^{mm},05 par exemple. On le replie alors sous forme d'un U dont on fixe les branches dans une petite rondelle isolante R, et l'on plonge la partie inférieure dans de l'acide nitrique qui attaque l'enveloppe d'argent en laissant intacte l'âme de platine. On peut obtenir ainsi, sur une petite longueur, un fil de platine d'environ 1,5 micron (0^{mm},0015) de diamètre : on est même parvenu à fabriquer, par ce procédé, des fils de 1 micron de diamètre.

La boucle de fil F (fig. 71) est placée dans une petite capsule d'argent C que ferme la rondelle isolante R : cette capsule a pour effet de diminuer autant que possible le rayonnement de la chaleur. L'ensemble est disposé dans un récipient V en verre dans lequel on fait le vide. Les deux conducteurs A et B, qui aboutissent à la boucle de fil fin, traversent le récipient dans la paroi duquel ils sont mastiqués.

Le détecteur est intercalé entre l'antenne réceptrice et la prise de terre. Quand l'antenne est mise en vibration par les ondes électromagnétiques provenant du poste transmetteur, les oscillations électriques traversent le fil fin F et celui-ci s'échauffe, même si l'énergie en jeu est très faible.

Pour déceler cet échauffement, on s'appuie sur une propriété commune à tous les métaux, dont la résistance électrique croît en valeur quand la température augmente. Il suffit d'intercaler le détecteur dans un circuit local permettant de mesurer cette variation de résistance. On peut aussi, pour les applications radiotélégraphiques, brancher en dérivation sur le détecteur un circuit contenant un récepteur téléphonique et une pile : dès qu'il se produit une variation de la résistance du fil fin, l'intensité du courant qui circule dans le circuit local varie, et le récepteur téléphonique fait entendre un son.

Au lieu d'un fil de platine très fin, M. Fessenden a employé aussi, dans la suite, une petite colonne d'un liquide conducteur contenu dans un tube capillaire de diamètre extrêmement faible : l'échauffement de cette colonne liquide se traduit par une augmentation de résistance électrique.

Ensuite, il a modifié ce dernier détecteur en trempant simplement, dans un liquide convenable, deux fils de platine très courts et très fins, et en disposant, entre ces deux électrodes, un diaphragme en verre mince percé d'un trou extrêmement petit. Dans ce détecteur à liquide muni d'un diaphragme, il est très probable que les phénomènes en jeu ne sont plus de nature calorifique, mais de nature électrolytique, comme dans les appareils étudiés plus loin.

Détecteurs thermo-électriques.

M. Duddell a établi un appareil qui tient à la fois des détecteurs thermiques, dont la description précède, et des détecteurs thermo-électriques, dont il va être question.

Cet appareil, nommé *thermogalvanomètre* ⁽¹⁾, consiste en un petit élément thermo-électrique et un puissant électro-

(1) Les *galvanomètres* sont des appareils fréquemment employés pour mesurer l'intensité d'un courant continu : ils sont impropres à la mesure des courants alternatifs.

Un galvanomètre comprend essentiellement un cadre mobile convenablement suspendu et un système d'aimants ou d'électro-aimants fixes entre les pôles desquels le cadre peut osciller. Un fil, enroulé en un certain nombre de tours sur le cadre, est parcouru par le courant à mesurer.

Quand le courant circule dans la bobine mobile, l'action électromagnétique qui s'exerce entre elle et le système fixe (aimants ou électro-aimants) la fait tourner d'un certain angle. La valeur de cet angle est mesurée par le déplacement d'une aiguille ou d'un rayon lumineux réfléchi par un petit miroir fixé au cadre : elle donne, par une lecture directe sur un cadran gradué, l'intensité de courant cherchée.

aimant. Une bande métallique très mince et très étroite est traversée par les oscillations électriques : elle s'échauffe sous l'effet du courant oscillant, et la chaleur rayonnée par elle agit sur l'élément thermo-électrique suspendu librement entre les pôles de l'électro-aimant.

Le courant qu'engendre le thermo-élément réagit sur le champ magnétique produit par l'électro-aimant, et le système mobile tourne d'un certain angle : la valeur de cet angle dépend du courant que produit le thermo-élément et qui est proportionnel à la chaleur dégagée, c'est-à-dire à l'intensité du courant oscillant.

Parmi les détecteurs thermo-électriques proprement dits, peu fréquemment employés dans la pratique de la radiotélégraphie, on peut citer celui dont s'est servi Drude au cours

de ses remarquables travaux sur l'amortissement des oscillations électriques.

Le thermo-élément est constitué (fig. 72) par un fil de cuivre ou de fer, et un fil de constantan (alliage de cuivre, de zinc et de manganèse) de 0^{mm},05 de diamètre et de 0^{cm},5 à 1 centimètre de longueur. Une croix en ébonite E porte quatre tiges D auxquelles sont fixés des fils

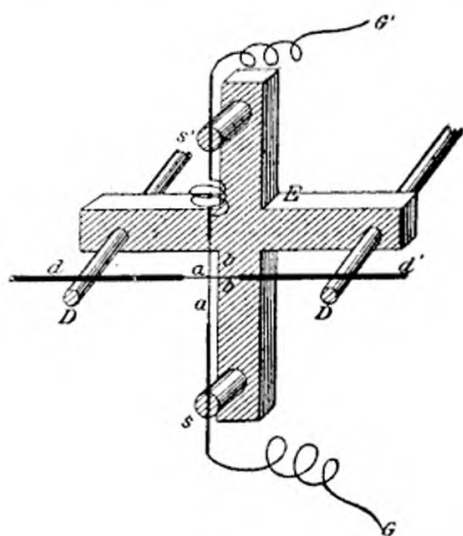


FIG. 72.

de cuivre d et d' , s et s' de 1 millimètre de diamètre. Ces fils supportent le thermoélément de la façon suivante : au fil d est soudé le fil a de constantan, qui, après avoir replié à

angle droit, est soudé au fil s ; au fil d' est soudé le fil de cuivre ou de fer b dont l'autre extrémité est soudée au fil s' après être passée dans l'angle du fil de constantan. Un ressort en hélice, intercalé sur le gros fil s' , exerce sur celui-ci une traction qui assure un bon contact entre les fils aa et bb en leur point de croisement. Les fils d et d' sont reliés au circuit oscillant : les fils ss sont connectés à un appareil de mesure très sensible.

Lorsqu'un courant oscillant passe par les fils $dabd'$, il produit, au point de croisement des fils a et b , un échauffement qui, par suite de la nature différente des métaux, donne lieu à une force électromotrice de nature thermo-électrique. Celle-ci, agissant dans le circuit de l'appareil de mesure relié en GG' aux fils ss' , engendre dans ce circuit un certain courant dont l'intensité est indiquée par la déviation de l'aiguille. Cette intensité est proportionnelle à la force électromotrice qui apparaît dans le thermo-élément : elle correspond donc à la quantité de chaleur développée au point de croisement des deux fils et, par suite, à l'intensité du courant oscillant qui traverse l'appareil.

On peut augmenter la sensibilité des détecteurs thermo-électriques en les plaçant dans un récipient où l'air est raréfié jusqu'à la pression de $0^{\text{mm}},1$ de mercure. M. Schaefer s'est servi d'un appareil de ce genre, comprenant un fil de fer et un fil de constantan.

Détecteurs électrolytiques.

En plongeant deux fils métalliques dans de l'eau additionnée d'une petite quantité d'un acide ou d'un sel qui la rend conductrice (de l'acide sulfurique par exemple), et en re-

liant ces deux fils à un générateur électrique capable de produire une certaine différence de potentiel, on réalise un appareil nommé *voltamètre*. Si la différence de potentiel agissante est inférieure à une valeur déterminée, nommée *tension critique*, aucun courant ne traverse le voltamètre ; si au contraire elle est supérieure à cette valeur, un courant peut le traverser. Des bulles d'oxygène apparaissent alors sur le fil relié au pôle positif de la source de courant (ce fil est nommé électrode positive, ou *anode*) et des bulles d'hydrogène apparaissent sur le fil relié au pôle négatif (électrode négative, ou *cathode*). Ce phénomène est appelé *électrolyse* : le liquide interposé entre les électrodes est nommé *électrolyte*. Pour exprimer que les électrodes se couvrent d'une couche gazeuse, on dit qu'elles se polarisent, ou qu'il y a *polarisation*.

En 1900, M. le com^e Ferrié signalait au Congrès international de physique que l'on peut réaliser un détecteur d'ondes électriques en plongeant, dans de l'eau étendue d'acide sulfurique une électrode positive formée d'une pointe de platine extrêmement fine et très courtée, et une électrode négative formée d'un fil relativement gros. Si l'on relie ces électrodes à une pile dont la différence de potentiel est très légèrement supérieure à la tension de décomposition de l'eau, il passe dans le liquide un faible courant dont l'effet est de produire une polarisation des électrodes : si, à ce moment, des oscillations électriques agissent sur la pointe positive, elles provoquent une modification importante de la polarisation, et cette modification se traduit par un accroissement du courant local qui traverse l'appareil. L'accroissement de courant peut, quand l'appareil est bien réglé, atteindre vingt fois la valeur du courant primitif.

On ne prêta pas une attention suffisante à la découverte

du com^t Ferrié jusqu'en 1903, époque à laquelle M. Schloemilch signala qu'il est possible, dans certaines conditions, de réaliser sur ce principe un détecteur d'ondes extrêmement sensible : depuis lors, l'emploi de cet appareil, nommé *détecteur électrolytique*, s'est beaucoup répandu.

On pourrait employer comme électrode positive une simple pointe en platine fixée à une vis réglable et effleurant à peine le niveau du liquide, ainsi que le montre la figure 73. Le récipient pourrait être métallique et servir lui-même d'électrode négative, ou bien cette électrode serait formée d'une lame ou d'un fil métallique.

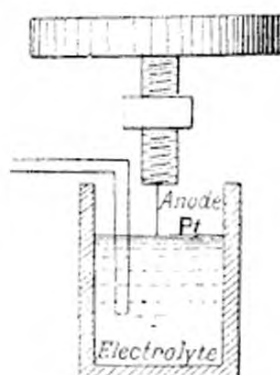


FIG. 73.

En pratique l'électrode positive est constituée par un petit tube de verre capillaire T (fig. 74) immergé dans le liquide et portant à son extrémité une pointe de platine *p* extrêmement fine et très courte. Pour obtenir une pointe très fine, on opère généralement de la façon suivante : on soude un fil fin de platine dans un tube capillaire en verre, puis on chauffe ce dernier et on l'étire vivement jusqu'à ce qu'il se rompe. Le fil de platine s'étire en même temps que le tube, et, après rupture de l'ensemble, une très petite pointe de platine dépasse la surface extrême du verre fondu.



FIG. 74.

Le fil de platine fin, dont le prolongement forme la pointe positive, est en contact, à l'intérieur du tube capillaire T, avec du mercure dans lequel passe un fil qui permet d'assurer la liaison électrique. L'électrode positive ainsi obtenue est placée dans le liquide avec

une électrode négative P, formée d'un fil ou d'une lame de platine.

Le montage du détecteur électrolytique dans un circuit récepteur de radiotélégraphie est représenté schématiquement par la figure 75. L'antenne réceptrice A est reliée à la pointe positive du détecteur, dont l'électrode négative est

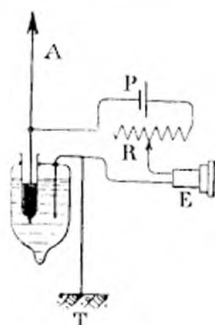


Fig. 75.

connectée à la terre T. En dérivation sur le détecteur est branché un circuit contenant un récepteur téléphonique E et un dispositif, nommé *potentiomètre*, qui permet de régler exactement la différence de potentiel agissante.

Le potentiomètre repose sur le principe suivant : une pile est fermée sur une résistance R dont une plus ou moins grande partie est reliée au circuit dérivé qui contient le téléphone ; la différence de potentiel produite par la pile P est absorbée par la résistance R, dans laquelle elle fait circuler un certain courant ; entre deux points quelconques de cette résistance R, il existe donc une certaine différence de potentiel, d'autant plus grande que les deux points sont plus éloignés l'un de l'autre. En déplaçant le point de contact du circuit dérivé sur la résistance R, on peut régler à volonté la différence de potentiel agissante, et obtenir ainsi le maximum de sensibilité du détecteur.

Le détecteur électrolytique ordinaire peut être employé sans différence de potentiel auxiliaire, c'est-à-dire sans pile ni potentiomètre, mais dans ce cas, sa sensibilité est beaucoup moindre que dans le cas précédent.

M. Jégou a établi un détecteur électrolytique spécial qui fonctionne sans différence de potentiel auxiliaire. La grosse électrode est formée de mercure contenant de l'étain pur

dissous. Elle occupe le fond du récipient en verre traversé par un fil de platine qui assure le contact. Au-dessus d'elle est versée l'eau acidulée, dans laquelle trempe la petite électrode. Celle-ci est, comme dans les autres détecteurs, une pointe très fine de platine.

Dans cet appareil, il se produit évidemment une action chimique lente qui crée la faible différence de potentiel nécessaire à l'obtention d'une grande sensibilité.

Le circuit du détecteur contient simplement le récepteur téléphonique et la bobine d'accouplement avec l'antenne.

Les détecteurs électrolytiques utilisés par la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie sont souvent établis pour deux sensibilités différentes : les uns possèdent une pointe de platine positive relativement grosse ; ils permettent d'obtenir dans le récepteur téléphonique des sons intenses, mais ils présentent une sensibilité réduite : les autres possèdent une pointe de platine positive très petite, et donnent des sons moins intenses dans le récepteur téléphonique, mais ils présentent une très grande sensibilité.

L'emploi du détecteur électrolytique s'est énormément répandu, et l'on peut dire que cet appareil est utilisé dans la majeure partie des postes radiotélégraphiques.

Différentes hypothèses ont été formulées pour expliquer le fonctionnement des détecteurs électrolytiques. Leurs propriétés ont été attribuées soit à des phénomènes électrolytiques (M. de Forest), soit à un dégagement de chaleur produit par le passage des ondes (M. Fessenden), soit à des phénomènes de polarisation des électrodes (MM. Reich, Dieckmann, Ives, Rothmund et Lessing, Macku).

Il semble que ces propriétés soient dues à plusieurs actions simultanées, action thermique, action chimique, action élec-

trostatique à travers la mince pellicule gazeuse qui recouvre l'électrode, et enfin action de dépolarisation d'après laquelle le détecteur fonctionne comme redresseur pour les courants alternatifs ⁽¹⁾.

Cette dernière action semble être la plus importante, ainsi que l'ont montré des études très complètes de M. Pierce. Quand un courant oscillant atteint la pointe polarisée positivement, il détermine une dépolarisation de celle-ci, et il en résulte un accroissement de l'intensité du courant local circulant dans le circuit du récepteur téléphonique. Étant donnée la faible valeur de l'énergie oscillante en jeu dans l'antenne réceptrice, on comprend facilement que la pointe doive être extrêmement petite pour que l'action exercée soit suffisamment importante.

Détecteurs à cristaux.

En 1905, M. Dunwoody, de la compagnie de Forest, a réalisé un détecteur d'ondes, dont la partie principale est un fragment de carborundum. Les meilleurs résultats sont obtenus quand on emploie un simple cristal placé entre deux électrodes de cuivre contre lesquelles s'appuient ses bords. Le circuit est complété par un récepteur téléphonique et un potentiomètre.

(1) De tels appareils, dans lesquels les électrodes sont dissymétriques, ne peuvent être traversés que dans un sens par le courant électrique, c'est-à-dire qu'ils présentent une résistance faible au courant d'un sens déterminé, et une résistance élevée au courant de sens opposé. Cette propriété est connue généralement sous le nom de *conductibilité unipolaire*. Si l'on introduit un tel élément dans un circuit à courant alternatif, il se comporte comme une soupape ou un clapet, en laissant passer les alternances du courant alternatif qui ont un sens déterminé, et en arrêtant les alternances de sens contraire. On peut réaliser ainsi un redresseur de courant alternatif.

Pour que la sensibilité atteigne le maximum, il faut mettre en contact avec les électrodes les bords minces du cristal. Les surfaces de contact sont alors tout à fait petites et, dans ces conditions, il suffit d'un courant extrêmement faible pour produire un échauffement notable des points de contact. Aussi l'inventeur a-t-il d'abord admis que ce détecteur fonctionne comme un détecteur thermique, par l'abaissement de la résistance de passage des contacts sous l'effet de la chaleur.

Mais M. Dunwoody a constaté aussi que l'appareil peut fonctionner sans différence de potentiel auxiliaire, et qu'il présente la propriété de la conductibilité unipolaire. Il y a donc un autre effet que l'effet thermique ci-dessus indiqué.

Après avoir étudié pendant un certain temps le détecteur Dunwoody, M. Pickard a pu réaliser un détecteur très sensible, qui ne constitue pas à proprement parler un détecteur à cristaux, mais qui s'y rattache un peu par son mode de fonctionnement.

Cet appareil, nommé *silicon*, repose sur l'emploi d'une pointe métallique appuyée sur une surface de silicium polie. Il fonctionne vraisemblablement à la façon des détecteurs thermoélectriques: la chaleur engendrée au point de contact par le passage du courant oscillant produit une force électromotrice thermoélectrique qui engendre un courant dans un circuit dérivé contenant un récepteur téléphonique. Il est à remarquer que ce détecteur est utilisé sans pile locale, et présente la même sensibilité que le détecteur électrolytique.

Peu après, M. Pickard réalisa un autre détecteur, nommé *périkon*, constitué par un contact de faible surface entre un cristal de pyrite de cuivre (chalcopryrite) et un cristal d'oxyde de zinc (zincite). On appuie l'une contre l'autre, avec une

faible pression, deux arêtes vives de ces cristaux, qui sont fixés dans de petits culots métalliques. La sensibilité du périkon a été reconnue, dans beaucoup de cas, supérieure à celle du détecteur électrolytique.

Il semble probable, d'après les travaux du capitaine Brenot, que le fonctionnement de ce genre de détecteurs doit être expliqué, non pas par une action thermoélectrique, mais par une action de conductibilité unipolaire de contact. Celle-ci serait due à un phénomène de polarisation, comme dans le détecteur électrolytique. Il ne faut pas confondre les phénomènes de conductibilité unipolaire *de contact* avec le phénomène de conductibilité unipolaire que présentent certains cristaux dans toute leur masse : ce dernier joue certainement un rôle dans les détecteurs dont il s'agit, mais ce rôle est secondaire et ne donnerait qu'une très médiocre sensibilité, s'il existait seul.

Plusieurs sortes de détecteurs à cristaux ont été imaginés à l'exemple du périkon : ils ont généralement donné de bons résultats ⁽¹⁾. Le meilleur semble être celui du capitaine Brenot, employé sans pile. Cet appareil repose sur l'emploi d'un ou plusieurs cristaux de carborundum naturel enchâssés dans un socle métallique au moyen d'amalgame d'étain. On amène en contact, contre une arête vive d'un de ces cristaux, une petite surface de platine portée par une tige articulée à piston, sur laquelle agit un ressort à boudin.

La sensibilité du détecteur Brenot, qui est supérieure à celle du détecteur électrolytique, est considérablement

(1) L'administration des Postes et Télégraphes utilise le détecteur Meunier, formé d'un cristal de pyrite de fer naturel sur lequel appuie une pointe métallique (chapitre xvi, figures 273 et 274).

La G. F. D. T. emploie un détecteur formé par un fragment d'oxyde de fer ou du protosulfure de plomb sur lequel appuie une pointe en graphite ou en métal.

abaissée si l'on casse l'arête naturelle du cristal pour lui substituer une aspérité aussi aiguë, mais ne provenant pas de la cristallisation. Le phénomène de conductibilité unipolaire de contact ne se produit sans doute plus alors, et le phénomène de conductibilité unipolaire de la masse du cristal intervient seul. Dans le premier cas, l'action d'une différence de potentiel locale diminue la sensibilité du détecteur, tandis que, dans le second cas, elle l'améliore.

Le détecteur Brenot présente certaines particularités curieuses de fonctionnement qui, le cas échéant, peuvent rendre d'importants services. La résistance de cet appareil semble varier entre de très larges limites suivant que le contact entre l'arête et la surface métallique est très léger ou un peu plus intime. A ces variations de résistance correspondent des variations de l'amortissement présenté par le circuit récepteur et, par suite, des variations de l'accord du poste récepteur avec les ondes agissantes. Il en résulte que l'on peut, par exemple, recevoir nettement les signaux d'un poste déterminé, si l'on réalise un contact très léger de la surface et du cristal, ou, au contraire, d'un poste tout différent, si l'on frotte un peu la surface de platine contre le cristal pour réaliser un contact plus intime.

Détecteurs magnétiques.

Plusieurs savants ont signalé, il y a déjà bon nombre d'années, que le courant oscillant provenant de la décharge d'un condensateur exerce une action sur des noyaux de fer préalablement aimantés.

En 1896, M. Rutherford utilisa cette propriété des oscillations pour établir un détecteur d'ondes : dans cet appareil,

les oscillations électriques traversaient une bobine enveloppant un noyau de fils de fer, et produisaient une diminution de l'aimantation de ce noyau. La diminution d'aimantation était mesurée au moyen d'un magnétomètre.

En 1902, M. Marconi utilisa le phénomène de variation d'aimantation produit par un courant oscillant, pour établir un détecteur d'ondes très sensible et susceptible d'un bon emploi dans la pratique de la Radiotélégraphie. Cet appareil repose sur le principe suivant :

Quand on soumet le fer à l'action d'un champ magnétique variable qui lui communique une aimantation variable, on constate que l'aimantation produite est toujours en retard sur le champ magnétique qui lui donne naissance⁽¹⁾ de même que la désaimantation est en retard sur la cessation de l'effet du champ magnétique. Ce phénomène, bien connu des électriciens en ce qu'il crée dans les machines électriques une source de pertes, est appelé *hystérésis magnétique du fer*⁽²⁾. Or l'action des oscillations électriques produit, sur le fer doux, un effet équivalent à la suppression de l'hystérésis, d'où résulte une variation brusque de l'aimantation d'un noyau soumis à un champ magnétique variable.

Le premier appareil établi sur ce principe par M. Marconi est représenté schématiquement par la figure 76. Un noyau de fer est placé dans une bobine de fil de cuivre dont les extrémités sont reliées d'une part à l'antenne et d'autre part à la terre. Il est soumis au champ magnétique périodiquement

(1) Par exemple, quand le champ magnétique variable atteint sa valeur maxima, l'aimantation n'atteint pas encore sa valeur maxima ; quand le champ magnétique variable s'annule, l'aimantation n'est pas encore nulle ; quand le champ magnétique, après avoir changé de sens, atteint sa valeur maxima négative, l'aimantation n'atteint pas encore sa valeur maxima en sens contraire..., etc.

(2) Les phénomènes d'hystérésis ont une importance variable suivant la qualité du fer. Pour la construction des machines ou appareils électriques, on emploie du fer présentant aussi peu d'hystérésis que possible.

variable produit par un aimant NS qui tourne, d'un mouvement uniforme, autour d'un axe vertical. La bobine primaire, que traversent les oscillations électriques engendrées dans l'antenne par l'action des ondes provenant du poste transmetteur, est entourée elle-même d'une bobine secondaire reliée à un récepteur téléphonique. Lorsque, sous l'action des oscillations, il se produit une brusque variation d'aimantation du noyau, une force électromotrice induite prend naissance dans la bobine secondaire et engendre un courant dans le circuit du récepteur téléphonique, qui fait alors entendre un son.

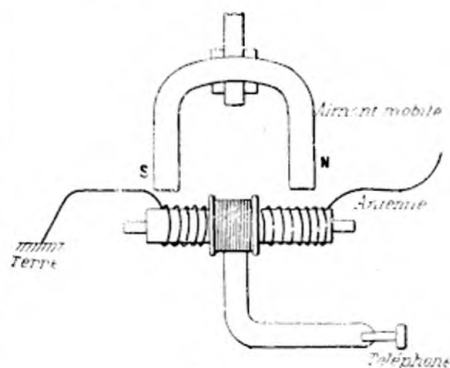


FIG. 76.

Au lieu de faire varier, par la rotation de l'aimant, le champ magnétique qui agit sur un noyau fixe, on peut employer un champ magnétique fixe, produit par un aimant immobile, et déplacer le noyau de fer. C'est ce qu'a fait aussi M. Marconi, en utilisant un dispositif dans lequel le noyau

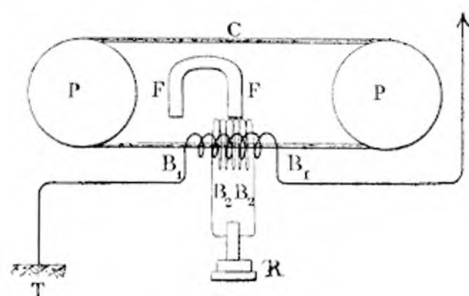


FIG. 77.

est constitué par un fil ou câble de fer sans fin passant sur deux poulies qui l'entraînent d'une façon continue.

La figure 77 donne une vue schématique de cet appareil. Le noyau est formé par le câble

C, constitué par des fils de fer fins isolés, et porté par deux

poulies à gorge PP, dont l'une tourne à une faible vitesse sous l'action d'un mécanisme d'horlogerie. Ce câble sans fin se déplace longitudinalement, en face des pôles de l'aimant FF', suivant l'axe d'un tube isolant qui porte une bobine primaire B_1B_1 embrochée entre l'antenne et la terre: sur cette bobine est disposée une bobine secondaire B_2B_2 , d'un grand nombre de tours de fil fin, reliée à un récepteur téléphonique R.

L'aimant excitateur FF est disposé de telle façon que l'un des pôles soit placé en face du milieu des bobines, et l'autre pôle en face de l'une ou l'autre de leurs extrémités. On peut aussi, pour augmenter la sensibilité, employer deux aimants ayant chacun un pôle (de même nom) en face du mi-

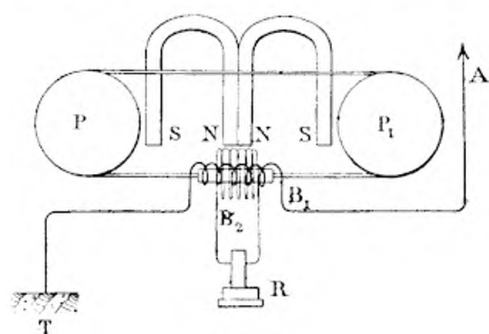


Fig. 78.

lieu des bobines; les seconds pôles correspondent aux deux extrémités de la bobine primaire B_1 (fig. 78).

Le fonctionnement de cet appareil peut être expliqué de la façon suivante :

En raison des phénomènes d'hystérésis, l'aimantation que prend le fer mobile en face du pôle F de l'aimant persiste plus longtemps qu'elle ne devrait, et chaque portion du câble successivement aimantée se déplace jusqu'à une certaine distance du pôle avant que la désaimantation soit complète. Si, à ce moment, des oscillations électriques traversent la bobine primaire B_1B_1 et agissent sur le câble qui forme le noyau de celle-ci, les phénomènes d'hystérésis ou de retard à la désaimantation sont modifiés, et il en résulte une brusque variation de l'aimantation du câble au point consi-

déré. Cette variation entraîne une variation du champ magnétique local : une force électromotrice est donc induite dans la bobine secondaire B_2 reliée au récepteur téléphonique ; celui-ci fait alors entendre un son.

Sous sa dernière forme, le détecteur magnétique est un appareil très sensible et relativement commode : son emploi est général dans les postes de la compagnie Marconi.

Le commandant Ferrié a perfectionné ce détecteur en faisant passer les deux brins du câble (au lieu d'un seul) entre les pôles du ou des aimants : il a constaté que la sensibilité était ainsi augmentée.

Il a employé aussi un détecteur magnétique formé d'un disque en fer tournant à plat entre les pôles d'un aimant : une première bobine, reliée à l'antenne et à la terre, et une seconde bobine, reliée à un récepteur téléphonique, embrassent le disque entre les deux pôles.

Le fonctionnement de l'appareil est identique à celui du précédent : quand le disque tourne, la désaimantation de chacun de ses points dure normalement un certain temps après le passage de ce point en face des pôles de l'aimant : dès que des oscillations électriques agissent dans la bobine primaire, la désaimantation se produit bien plus rapidement.

M. Tissot a fait d'intéressantes études sur le détecteur magnétique et a apporté à cet appareil plusieurs perfectionnements. Il a indiqué une modification du détecteur Marconi permettant d'employer comme récepteur un galvanomètre enregistreur au lieu d'un téléphone.

M. Wilson a réalisé un appareil dans lequel le champ magnétique agissant sur le noyau de fer est produit par un

solénoïde parcouru par un courant variable : ce courant est engendré par une batterie de piles ou d'accumulateurs et un commutateur-interrupteur spécial.

M. Fleming a imaginé également un détecteur magnétique dans lequel le noyau de fils est aimanté par l'action d'un courant intermittent. Cet appareil est établi de la façon suivante :

Un noyau de fils de fer doux est placé dans l'axe de six bobines de fil juxtaposées. Deux d'entre elles sont reliées à l'antenne et à la terre ; les quatre autres sont reliées à un commutateur tournant. Une bobine secondaire, d'environ 6000 tours de fil fin, recouvre toutes les bobines primaires.

Le commutateur tournant comprend un certain nombre de disques isolants, munis de secteurs métalliques sur lesquels appuient des frotteurs. Il effectue successivement différentes opérations : en premier lieu, il envoie dans les bobines magnétisantes le courant d'une batterie d'accumulateurs et, pendant ce temps, il court-circuite entre elles les extrémités de la bobine secondaire ; en second lieu, aussitôt après l'interruption du courant magnétisant, il rompt le court-circuit de la bobine secondaire et la relie à un galvanomètre sensible. Pendant la majeure partie d'un tour du commutateur, le faisceau de fils de fer reste donc aimanté et entouré d'une bobine secondaire reliée à un galvanomètre. Dans ces conditions, si des oscillations traversent les deux bobines primaires reliées à l'antenne et à la terre, l'aimantation du noyau subit une variation brusque et cette variation donne naissance, dans la bobine secondaire, à un courant induit qu'indique le galvanomètre. Si l'action des oscillations persiste, la rotation rapide du commutateur tournant donne des émissions très rapprochées de courant dans le circuit du galva-

nomètre, et, par suite de l'inertie de la partie mobile de cet appareil, la déviation reste constante.

Ce type de détecteur magnétique permet de mesurer l'intensité des oscillations agissantes, car le courant qui traverse le galvanomètre est proportionnel à la force démagnétisante des oscillations sur le fer. C'est là un avantage important.

Un autre détecteur magnétique a été inventé par MM. Walter et Ewing.

Ces expérimentateurs ont trouvé que l'acier dur peut présenter un accroissement d'hystérésis s'il est traversé par des oscillations électriques pendant qu'il est soumis à un champ magnétique tournant.

Dans leur appareil, un électro-aimant tourne assez rapidement autour d'une bobine en fil d'acier dur isolé : pendant sa rotation, il tend à faire tourner, en vertu du couple dû aux phénomènes d'hystérésis, la bobine en fil d'acier convenablement suspendue : l'effort ainsi produit est contre-balancé par la torsion de la suspension élastique.

Quand des oscillations électriques traversent le fil d'acier, l'hystérésis de celui-ci est accrue et l'effort d'entraînement de la bobine par le champ tournant augmente : la bobine tourne donc d'un certain angle. Une aiguille, se déplaçant devant un cadran gradué, permet de mesurer cet angle de rotation et indique ainsi l'intensité des oscillations électriques. On peut également fixer à la bobine un petit miroir réfléchissant un rayon lumineux dont on observe la déviation.

M. Walter a ensuite modifié ce détecteur et a établi un appareil donnant des courants redressés que l'on peut mesurer au moyen d'un galvanomètre.

La figure 79 indique la disposition adoptée. Deux bobines de fil d'acier BB_1 tournent, autour de leur axe, dans les champs magnétiques créés par les aimants fixes NS et N_1S_1 . Les extrémités du fil d'acier d'une seule des bobines B_1

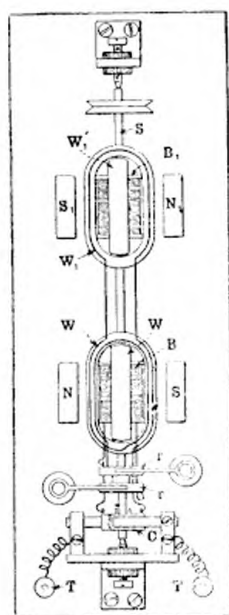


FIG. 79.

aboutissent à deux bagues métalliques que des frotteurs r permettent de mettre en relation avec l'antenne et la terre, ou avec un circuit oscillant accouplé à l'antenne. Les extrémités du fil d'acier de l'autre bobine B sont isolées.

Deux paires de cadres perpendiculaires l'un à l'autre, WW' et $W_1W'_1$, portent des enroulements en fil de cuivre aboutissant à un petit commutateur quadruple ou collecteur C : ces cadres tournent en même temps que les bobines BB_1 et avec elles. Les balais qui frottent sur le collecteur C sont reliés à un galvanomètre sensible.

Les bobines B et B_1 sont semblables, et les enroulements équivalents des cadres WW' et $W_1W'_1$ sont connectés entre eux de façon que les forces électromotrices engendrées normalement par la rotation dans les champs magnétiques NS et N_1S_1 soient égales et opposées. Dans ces conditions, il n'existe aucune différence de potentiel entre les balais qui frottent sur le collecteur, et le galvanomètre ne présente aucune déviation.

Mais si des oscillations viennent à traverser la bobine B_1 en fil d'acier, les conditions d'équilibre sont rompues entre les forces électromotrices induites dans les cadres WW' et $W_1W'_1$, et un certain courant, redressé par le collecteur C , traverse le galvanomètre, dont la déviation mesure l'intensité des oscillations agissantes.

Un détecteur magnétique, différent des précédents, a été imaginé par M. Rossi.

Si l'on tend un fil de fer très fin parallèlement à deux aimants semblables ayant leurs pôles de même nom en regard (fig. 80), les deux moitiés de ce fil prennent des aimantations longitudinales égales et opposées. Si, alors, on fait circuler dans le fil un certain courant, le champ magnétique circulaire transversal, créé par ce courant, réagit sur le champ magnétique longitudinal et tend à faire tourner le fil sur lui-même en le tordant.

Si le courant qui traverse le fil est alternatif, l'effort de torsion change de sens à chaque demi-période du courant et le fil effectue des *oscillations de torsion*. L'amplitude de ces oscillations peut atteindre une valeur appréciable quand le fil est suffisamment fin ; cette amplitude est considérablement augmentée si le courant a une fréquence égale à la fréquence propre des oscillations de torsion du fil : dans ce cas, il y a résonance.

Si, pendant que le fil effectue des oscillations de torsion comme cela vient d'être expliqué, des oscillations électriques agissent sur lui, il se produit une brusque variation des phénomènes d'aimantation, et l'amplitude des oscillations de torsion est modifiée.

Le détecteur de M. Rossi est représenté schématiquement par la figure 80. Un fil de fer f de deux dixièmes de millimètre de diamètre a une longueur telle que sa fréquence propre d'oscillation de torsion soit la même que celle du courant alternatif dont on dispose (42 ou 50 périodes par seconde, en général).

Il est maintenu tendu, parallèlement à un support isolant,

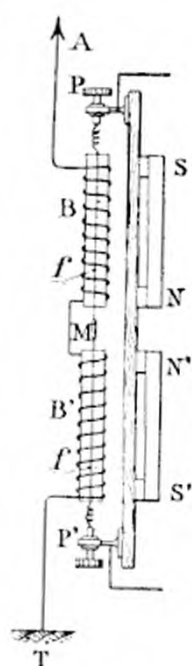


FIG. 80.

par deux bornes P et P' munies de petits ressorts. Ces bornes servent en même temps à amener au fil le courant alternatif qui doit le traverser. Au support sont fixés deux barreaux aimantés semblables, NS et N'S', parallèles au fil, ayant leurs pôles de même nom N et N' en regard l'un de l'autre.

Deux bobines semblables BB', enroulées en sens opposés sur deux tubes de verre, entourent le fil f et sont reliées d'une part à l'antenne et d'autre part à la terre. Elles peuvent également faire partie d'un circuit oscillant excité inductivement par l'antenne.

Enfin, un tout petit miroir M est fixé au fil f en son milieu, et réfléchit un rayon lumineux projeté sur lui.

Quand le fil est parcouru par un courant alternatif, de fréquence égale à la fréquence propre du système vibrant composé du fil f et du miroir, le rayon lumineux réfléchi par ce dernier trace sur un écran une bande lumineuse d'une certaine longueur. Si, l'appareil étant ainsi réglé, des oscillations électriques traversent les bobines B et B', la longueur de cette bande varie brusquement. On peut donc suivre les signaux émis par le poste transmetteur ; il est même possible d'en obtenir l'enregistrement photographique.

On peut modifier cet appareil en remplaçant les bobines B et B' par un tube métallique fendu, dans lequel passe le courant alternatif exciteur. Le fil f est intercalé entre l'antenne et la terre. Le tube de cuivre agit sur le fil par effet électrostatique (capacité). Il semble probable que l'on pourrait, sans abaisser beaucoup la sensibilité, supprimer les deux aimants NS et N'S'.

Détecteurs à vide.

On a proposé depuis longtemps d'employer comme détec-

teurs d'ondes des tubes vides d'air fonctionnant de différentes façons. M. Righi, M. Tuma et M. Zehnder ont utilisé à cet effet, pour répéter certaines expériences de Hertz, des tubes de Geissler ou des appareils équivalents, qui s'illuminaient sous l'action des ondes électriques. De tels détecteurs ont une faible sensibilité, et n'ont pu faire l'objet d'aucune application pratique.

En 1904 M. Fleming signala un phénomène très particulier de conductibilité unipolaire que présentent certains tubes à vide, et songea à utiliser ce phénomène pour l'établissement d'un détecteur d'ondes nommé *Valve*.

Si une ampoule vide d'air, semblable à une lampe (fig. 81), contient un cylindre métallique froid *C* à l'intérieur duquel est disposé un filament incandescent *f*, un courant électrique peut passer de la partie froide (cylindre) vers la partie chaude (filament), mais non en sens inverse, le tube se comportant comme une soupape.

Si les oscillations électriques engendrées dans l'antenne réceptrice traversent la bobine primaire d'un petit transformateur, dont la bobine secondaire fait partie d'un circuit contenant un appareil de mesure sensible et aboutissant au filament et au cylindre de la valve (fig. 81), ce circuit sera parcouru par des courants toujours de même sens, les alternances inverses du courant oscillant étant arrêtées par le tube. L'appareil de mesure indiquera donc la présence des oscillations électriques. Sur la figure 81, on a représenté une petite batterie dont le courant sert à porter à l'incandescence le filament intérieur.

Sous sa forme la plus récente, le détecteur Fleming com-

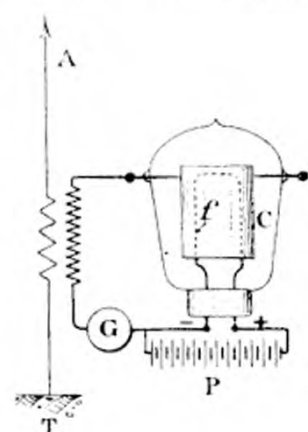


FIG. 81.

prend un filament incandescent en tungstène (au lieu de charbon), entouré d'un cylindre froid en cuivre. Le phénomène de conductibilité unipolaire est plus marqué avec le filament du tungstène, probablement parce que ce métal est meilleur conducteur que le charbon et parce qu'il peut être porté, sans se volatiliser, à une température plus élevée. Ce détecteur est employé dans les postes radiotélégraphiques Marconi de grande puissance destinés au service transatlantique : il donne de bons résultats.

En octobre 1906, M. L. de Forest a décrit un détecteur tout à fait semblable extérieurement au redresseur de M. Fleming, mais utilisé d'une façon un peu différente : ce détecteur a été nommé *Audion*.

L'audion est formé d'une ampoule vide d'air contenant un

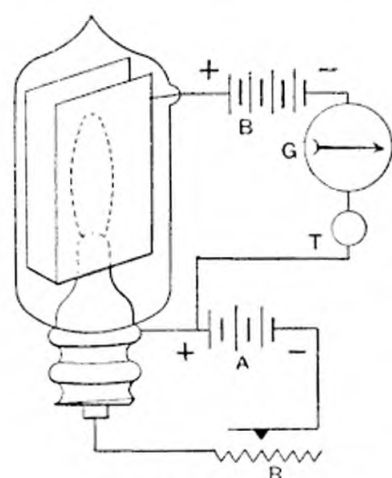


FIG. 82.

filament de charbon incandescent, analogue au filament d'une lampe électrique, et deux feuilles de platine relativement froides parallèles à ce filament. Comme l'indique la figure 82, le courant servant à échauffer le filament est fourni par quelques éléments d'accumulateurs A.

En outre, un circuit contenant une batterie B, un appareil de mesure G et un téléphone T est relié d'une part aux feuilles de platine (pôle positif de la batterie B), et d'autre part au filament incandescent. Dans ces conditions, un faible courant circule dans le circuit en passant des feuilles de platine au filament, et l'appareil de mesure G indique une certaine déviation.

Lorsque des oscillations électriques agissent sur l'audion, l'intensité du courant local produit par la batterie B augmente brusquement et le téléphone T fait entendre un son très net. Il suffit donc, pour employer ce détecteur dans un poste radiotélégraphique, de relier les feuilles de platine à l'antenne et le filament à la terre.

Il n'est même pas nécessaire de relier les feuilles et le filament à l'antenne et à la terre : on peut employer les montages qu'indiquent les figures 83 et 84. Dans le premier, l'ex-

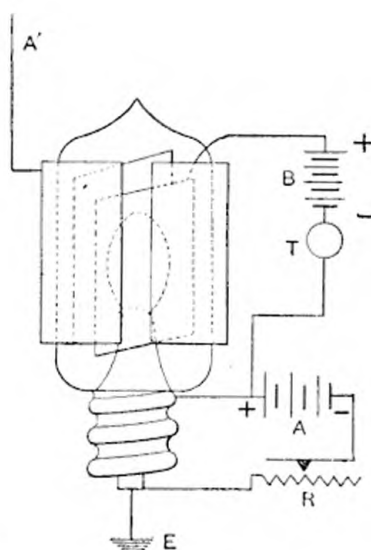


FIG. 83.

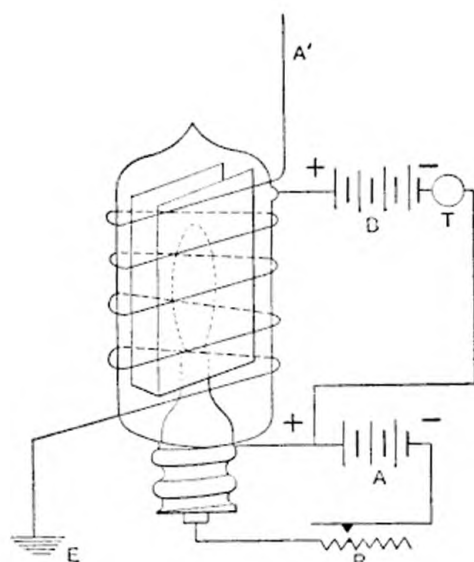


FIG. 84.

trémité de l'antenne est connectée à deux plaques métalliques placées sur la paroi extérieure du tube et formant un condensateur avec le filament : cette disposition a été trouvée très bonne en pratique ; l'audion peut même être placé entre les deux plaques d'un condensateur à air faisant partie du circuit oscillant. Dans le second montage (fig. 84), les oscillations électriques traversent une bobine de fil entourant le tube,

ou une bobine plate placée contre le tube et ayant son axe perpendiculaire au filament.

L'inventeur a observé que la distance qui sépare les feuilles de platine du filament doit avoir une valeur qui dépend de la fréquence des oscillations de l'antenne, si l'on veut obtenir le maximum de sensibilité.

Sous sa forme actuelle, l'audion comprend une plaque de platine ou de nickel et une spirale en même métal, disposées de part et d'autre du filament incandescent.

M. de Forest a employé aussi une autre forme d'audion, dans laquelle l'ampoule contient de la vapeur de mercure sous une très faible pression. Comme le montre la figure 85, le détecteur comprend deux électrodes, l'une constituée par un

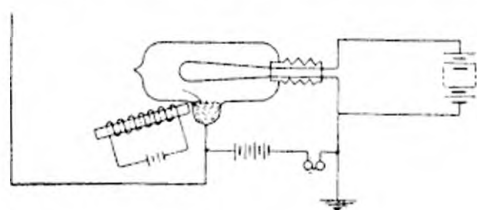


FIG. 85.

filament incandescent, et l'autre constituée par du mercure dont la vapeur remplit l'ampoule. Un champ magnétique, produit par un électro-aimant, agit

dans la région comprise entre la surface du mercure et le filament; par suite d'un phénomène particulier, la fréquence des oscillations pour laquelle le détecteur présente la plus grande sensibilité varie avec l'intensité du champ magnétique: on règle donc sa valeur pour obtenir le maximum d'effet.

La façon dont l'audion doit être placé dans le circuit oscillant, ainsi que certaines particularités du fonctionnement de cet appareil, montrent que c'est un détecteur influencé par la tension plutôt qu'un détecteur influencé par le courant.

En ce qui concerne la température du filament incandescent, elle doit être à peu près égale à celle du filament d'une

lampe électrique à incandescence. La durée d'utilisation d'un audion est donc à peu près la même que celle d'une lampe à incandescence munie d'un filament analogue.

On n'a pas encore donné d'explication nette du fonctionnement de l'audion. Il semble que l'action de cet appareil, comme celle du détecteur électrolytique, soit due en majeure partie à sa conductibilité unipolaire. De même, un tube à vide, muni d'une électrode négative recouverte d'oxydes métalliques incandescents, présente une conductibilité électrique unipolaire et peut servir de détecteur d'ondes dans des conditions semblables à l'audion.

Propriétés caractéristiques des différents types de détecteurs.

Au point de vue de leur mode de fonctionnement, on peut classer les détecteurs en deux catégories bien distinctes.

Les appareils de l'une des catégories sont influencés par la tension des oscillations.

Les appareils de l'autre catégorie sont influencés par l'intensité du courant oscillant.

Dans chacune des catégories, il faut faire encore une distinction. Certains détecteurs répondent seulement à la valeur maxima de la tension ou de l'intensité: on peut les appeler *détecteurs d'effet maximum*. Les autres répondent au contraire à la valeur efficace de la tension ou de l'intensité: on peut les appeler *détecteurs d'effet total*.

L'emploi des premiers sera, par exemple, avantageux pour répondre à l'action d'ondes fortement amorties, engendrées par des oscillations de grande amplitude initiale mais très rapidement éteintes, et produites par groupes espacés. L'em-

ploi des seconds sera indiqué pour répondre à l'action d'ondes entretenues, engendrées par des oscillations d'amplitude relativement faible, mais persistantes.

Dans les *détecteurs influencés par la tension* des oscillations, on peut citer :

Les différents cohérences, comme détecteurs d'effet maximum ;

Le détecteur électrolytique, les détecteurs à cristaux, les détecteurs à vide, comme détecteurs d'effet total.

Dans les *détecteurs influencés par l'intensité du courant* oscillant, on peut citer :

Le détecteur magnétique, comme détecteur d'effet maximum ;

Les détecteurs thermiques et thermo-électriques, comme détecteurs d'effet total.

Comme nous le verrons dans la suite, on adopte généralement, pour obtenir une syntonie convenable, un accouplement très faible entre l'antenne et le circuit récepteur : dans ces conditions, il y a intérêt à utiliser des détecteurs d'effet total qui permettent de tirer le meilleur parti possible des effets de résonance.

Actuellement, le cohérence est très rarement employé, et la plupart des postes sont munis de détecteurs électrolytiques, sauf ceux de la compagnie Marconi, qui emploient généralement le détecteur magnétique.

CHAPITRE X

MODES DE FONCTIONNEMENT ET D'UTILISATION DES ANTENNES

D'après ce qui a été dit au chapitre VIII, on voit que l'antenne joue, en Radiotélégraphie, un rôle absolument capital.

C'est l'antenne transmettrice qui permet d'obtenir un ébranlement de l'éther suffisamment puissant pour que des ondes électromagnétiques intenses prennent naissance et aillent, après une propagation de quelques centaines ou quelques milliers de kilomètres, impressionner une antenne réceptrice dont les vibrations agissent sur le détecteur d'ondes.

Il y a donc lieu d'étudier en détail les phénomènes en jeu dans les antennes, et les modes d'accouplement de celles-ci avec les appareils ou les circuits excitateurs ou récepteurs.

Phénomènes en jeu dans les antennes transmettrices.

Considérons l'antenne simple transmettrice sans capacité terminale, et examinons ce qui s'y passe quand cette antenne est excitée directement au moyen d'un éclateur embroché sur elle.

Le conducteur aérien A, l'étincelle qui jaillit entre les boules de l'éclateur E, et le fil de jonction à la terre T

(fig. 86) constituent un conducteur ininterrompu dans lequel se propagent des ondes électromagnétiques⁽¹⁾.

Nous avons étudié, au chapitre VII, la propagation d'une perturbation électromagnétique dans un conducteur et vu qu'elle est caractérisée par la formation d'ondes station-



FIG. 86.

naires présentant des nœuds d'oscillation et des ventres d'oscillation alternant entre eux : un nœud et un ventre sont séparés par une distance égale au quart de la longueur d'onde de la perturbation qui se propage dans le fil. Nous avons vu encore que l'onde de courant et l'onde de potentiel (ou onde de tension) ne sont pas en phase et que, aux points où apparaissent des nœuds d'oscillation de l'onde de courant (appelés brièvement nœuds de courant), il y a aussi des ventres d'oscillation de l'onde de tension (appelés brièvement ventres de tension) : inversement, aux points où apparaissent des ventres de courant, il y a aussi des nœuds de tension.

Dans une antenne simple, telle que celle que représente la figure 86, le point où le fil inférieur pénètre dans le sol est évidemment un nœud de tension, si la prise de terre est bonne, puisque le potentiel de la terre est nul par définition (chapitre I, page 3). En ce point, il existe donc un ventre de courant.

On voit que, *au pied d'une antenne reliée à la terre et convenablement excitée, il existe un nœud de tension et un ventre de courant.*

A l'extrémité supérieure de l'antenne, où, par hypothèse, il n'y a pas de capacité terminale supplémentaire — comme c'est le cas dans les antennes employées actuellement —, il existe un nœud de courant, puisque l'intensité est forcée-

(1) Comme on se le rappelle, l'éclateur E est relié au secondaire d'une bobine d'induction.

ment nulle, le conducteur étant interrompu en ce point et soigneusement isolé. Il y a donc un ventre de tension.

On voit que, à l'extrémité supérieure d'une antenne reliée à la terre et convenablement excitée, il existe un ventre de tension et un nœud de courant.

Puisque un ventre et un nœud successifs sont séparés par une distance égale au quart de la longueur d'onde des ondes qui se propagent, la distance du sommet au pied de l'antenne, ou, autrement dit, la longueur totale de l'antenne reliée à la terre est égale ou équivalente au quart de la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique engendrée. On exprime souvent ce fait en disant que l'antenne vibre en quart d'onde.

On peut figurer schématiquement, d'une façon commode, la répartition de la tension le long de l'antenne. Par exemple, représentons par un trait vertical AB (figure 87), une antenne reliée à la terre: cette antenne est supposée mise en vibration d'une façon quelconque. Si l'on élève le long de AB des perpendiculaires ayant chacune une longueur proportionnelle à la valeur de la tension au point considéré de l'antenne, et si l'on réunit ensemble par une courbe (trait interrompu, fig. 87) les extrémités de ces perpendiculaires, on obtient une représentation commode de la répartition de la tension le long de l'antenne. La figure montre l'existence du nœud de tension à la base de l'antenne et du ventre de tension au sommet.



FIG. 87.

On peut représenter de la même façon, si l'on veut, la répartition de l'intensité de courant le long de l'antenne: la courbe montrerait un ventre de courant au pied de l'antenne et un nœud de courant au sommet.

Pour vérifier expérimentalement la répartition de la tension, on peut déplacer le long de l'antenne un tube à vide dont l'éclat est d'autant plus brillant que la tension a une valeur plus élevée: l'une des électrodes de ce tube est approchée de l'antenne en un point variable; l'autre électrode est reliée à la terre. On pourrait également disposer au voisinage de l'antenne, en différents points, un certain nombre de tubes à vide, exactement semblables entre eux, dont les éclats différents simultanés montreraient la répartition de la tension.

Pour effectuer des mesures approchées de la tension en différents points, on pourrait, au lieu de tubes à vide dont on observe l'éclat lumineux, employer de petits éclateurs à intervalle d'air réglable⁽¹⁾, reliés d'une part à l'antenne et d'autre part à la terre: on observerait en chaque point la plus grande distance explosive pour laquelle des étincelles peuvent jaillir à travers l'éclateur, et on en déduirait la valeur de la tension.

Des mesures analogues de la répartition de l'intensité de courant pourraient être faites au moyen d'un appareil thermique embroché successivement en différents points de l'antenne.

On peut se rendre compte simplement que la tension va en croissant depuis le pied de l'antenne jusqu'à son extrémité libre par les étincelles que l'on peut en tirer et dont la longueur augmente depuis la base jusqu'au sommet. La loi théorique d'après laquelle l'antenne vibre en quart d'onde est suffisamment vérifiée en pratique: cependant, la longueur d'onde des ondes engendrées est toujours un peu supérieure au quadruple de la longueur de l'antenne, à

(1) L'une des boules de chaque éclateur est, par exemple, fixée à une vis micrométrique qui permet de connaître avec exactitude l'écartement des boules.

cause de certaines influences dont on ne peut tenir compte que dans une théorie rigoureuse et compliquée : la différence entre le résultat rigoureux et le résultat approché est d'ailleurs faible.

Au point de vue du fonctionnement de l'antenne, qui, prise isolément, constitue un demi-circuit oscillant ouvert⁽¹⁾, la terre agit comme contre-partie. On dit souvent que la terre forme le *contre-poids* de l'antenne, ou qu'elle agit comme l'*image de l'antenne*, c'est-à-dire comme une seconde antenne symétrique de la première par rapport à la surface du sol.

Au lieu de relier le pied de l'antenne à une prise de terre, on peut le faire aboutir à une capacité convenable, ou à un réseau de fils formant l'armature d'un condensateur dont l'autre armature est constituée par la terre.

Quelquefois, il est impossible de relier l'antenne à une prise de terre : c'est le cas, par exemple, lorsqu'étant en ballon, on veut transmettre ou recevoir des signaux. On peut alors doubler la longueur d'antenne, c'est-à-dire employer une antenne de longueur égale à une demi-longueur d'onde. Il se forme aux deux extrémités des nœuds de courant avec des ventres de tension et, au milieu de l'antenne, un ventre de courant avec un nœud de tension. La figure 88, sur laquelle l'antenne est supposée isolée à ses deux extrémités, représente ce cas. Il y a un ventre de tension en A et en B, et un nœud en C, au milieu de l'antenne.



FIG. 88.

⁽¹⁾ La répartition du champ électrique et celle du champ magnétique autour de l'antenne ne sont pas bien connues, à cause de la présence de la terre dont le rôle n'est pas nettement défini. On peut admettre néanmoins qu'elles sont à peu près semblables à celles que l'on observe autour d'une moitié du radiateur de Hertz.

Au lieu de faire vibrer une antenne en quart d'onde, on peut aussi la faire vibrer en trois quarts d'onde, comme cela sera expliqué plus loin. Il y a alors un nœud de courant avec un ventre de tension à l'extrémité supérieure; un ventre de courant avec un nœud de tension un quart de longueur d'onde plus bas; un nœud de courant avec un ventre de tension encore un quart de longueur d'onde plus bas; et enfin un ventre de courant avec un nœud de tension au pied de l'antenne (prise de terre). Ce cas est représenté par le schéma de la figure 89: il y a des ventres de tension en B et D, et des nœuds de tension en A et C.

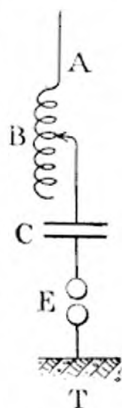


Modes d'emploi des antennes transmettrices.

I. *Antenne excitée directement.* — Le cas de l'antenne excitée directement est celui qui vient d'être étudié. Un éclateur E (figure 90), alimenté par une bobine d'induction ou par un transformateur convenable, est embroché sur l'antenne A qu'il met en vibration.

Une bobine de self-induction B, dont un nombre de tours variable est intercalé dans l'antenne, permet d'augmenter, en cas de besoin, la période propre d'oscillation de l'antenne et, par suite, la longueur d'onde des ondes engendrées.

Au contraire, un condensateur C, de capacité réglable, permet d'abaisser la période propre d'oscillation de l'antenne, et, par suite, de diminuer la longueur d'onde des ondes engendrées ⁽¹⁾.



⁽¹⁾ L'effet d'un condensateur placé en série avec l'antenne (c'est-à-dire embroché sur elle) est de diminuer la capacité.

L'une des électrodes de l'éclateur est reliée, par un fil aussi court que possible, à la prise de terre T.

II. Antenne excitée par un circuit oscillant fermé. — Avec l'excitation directe de l'antenne, que représente la figure 90, on ne peut pas mettre en jeu une quantité d'énergie importante. En effet, cette quantité d'énergie est proportionnelle à la capacité du système, laquelle se réduit ici à la capacité de l'antenne, toujours forcément très faible.

On a donc été conduit, pour augmenter la quantité d'énergie en jeu et les effets de résonance, à accoupler l'antenne transmettrice (qui représente un système oscillant ouvert), avec un circuit oscillant fermé contenant une capacité de valeur convenable.

Cet accouplement peut être direct, par induction, ou mixte, comme pour les circuits oscillants fermés étudiés au chapitre VI. En général, le circuit oscillant fermé et l'antenne accouplée avec lui doivent être accordés ensemble d'une façon très précise, pour que les conditions de résonance soient remplies et que le maximum d'effet soit obtenu.

1^{re} Accouplement direct. — Dans le cas de l'accouplement direct (fig. 91), rarement employé en pratique, le circuit fermé comprend une bobine d'accouplement B, et un condensateur C : l'antenne comprend la bobine B, le fil de jonction à la terre et le conducteur aérien. Il faut régler la capacité du condensateur C pour que la fréquence propre d'oscillation du circuit fermé soit égale à celle de l'antenne. Le circuit oscillant est mis en vibration par l'action de l'éclateur E excité par une bobine d'induction ou par un transformateur.

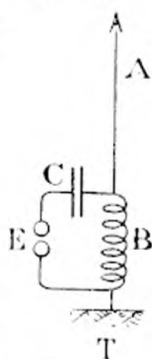


FIG. 91.

L'accouplement est plus ou moins serré suivant que la self-induction de la bobine L est plus ou moins grande.

2° *Accouplement par induction.* — Dans le cas de l'accouplement par induction (fig. 92), on peut réaliser un accouplement rigide ou un accouplement lâche, suivant que les tours de la bobine secondaire B_2 embrassent la majeure partie ou une faible portion du nombre total des lignes de force magnétiques engendrées par la bobine primaire B_1 .

La valeur du coefficient d'accouplement joue un rôle extrêmement important.

Dans le cas où le circuit oscillant et l'antenne n'ont pas la même fréquence propre, c'est-à-dire ne sont pas accordés ensemble, l'antenne présente, comme cela a été expliqué à propos des circuits oscillants accouplés, deux groupes d'oscillations de fréquence différentes : les unes, *oscillations forcées*, ont pour fréquence celle du circuit agissant; les autres, *oscillations libres*, ont pour fréquence la fréquence propre de l'antenne. Les premières sont prédominantes pour un accouplement serré; les secondes prédominent pour un accouplement lâche.

Ce cas est peu intéressant dans les applications pratiques, car, ainsi que cela a été expliqué, l'utilisation judicieuse des effets de résonance (accord entre l'antenne et le circuit oscillant) permet d'obtenir une amplification considérable des oscillations engendrées.

Dans le cas où le circuit oscillant et l'antenne ont la même fréquence propre, c'est-à-dire ont été accordés, on peut leur appliquer les résultats indiqués au chapitre VI pour deux

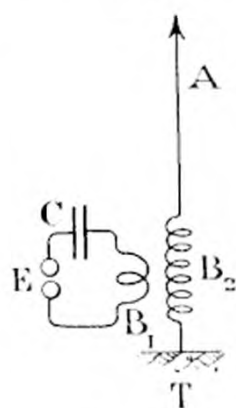


FIG. 92.

circuits oscillants accouplés. L'antenne et le circuit oscillant ayant la même fréquence propre avant leur accouplement, il se produit, dans le système accouplé, deux groupes d'oscillations de fréquences différentes. L'une des deux fréquences est plus petite et l'autre plus grande que la fréquence propre commune de l'antenne et du circuit.

Si l'on désigne par λ la longueur d'onde correspondant à la fréquence propre commune de l'antenne et du circuit oscillant exciteur, par λ_1 et λ_2 les longueurs d'onde correspondant aux fréquences des deux groupes d'oscillations qui prennent naissance dans le système formé par l'antenne et le circuit accouplés ensemble, les valeurs de λ_1 et λ_2 sont données par les formules :

$$\lambda_1 = \lambda \sqrt{1+k} ; \quad \lambda_2 = \lambda \sqrt{1-k}$$

k étant le coefficient d'accouplement, dont il a été question au chapitre II (1).

On voit immédiatement que, plus la valeur de k est faible, plus les deux fréquences se rapprochent l'une de l'autre. Pour $k=0$, les deux fréquences se confondraient, puisqu'on aurait

$$\lambda_1 = \lambda \quad \text{et} \quad \lambda_2 = \lambda.$$

Il n'y aurait plus qu'un seul groupe d'oscillations, dont la fréquence serait égale à la fréquence propre de l'antenne ou du circuit exciteur. Mais ce cas est irréalisable, puisque l'énergie transmise par le circuit exciteur serait nulle,

(1) Rappelons que la valeur du coefficient d'accouplement k est donnée par la formule

$$k = \frac{m}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

m étant le coefficient d'induction mutuelle du circuit exciteur et de l'antenne, L_1 le coefficient de self-induction de la bobine L_1 , L_2 le coefficient de self-induction de la bobine L_2 .

et l'antenne ne vibrerait pas. En effet, la quantité d'énergie transmise par le circuit à l'antenne est proportionnelle au coefficient d'accouplement : plus l'accouplement est rigide, plus cette quantité d'énergie est grande ; plus l'accouplement est lâche, plus elle est faible.

En pratique, on s'efforce de rapprocher autant que possible l'une de l'autre les fréquences des deux groupes d'oscillations, en employant un accouplement aussi faible que possible, mais néanmoins suffisant pour que l'énergie transmise à l'antenne par le circuit excitateur soit suffisante.

Cette question d'accouplement présentant une importance capitale, il n'est pas superflu d'insister longuement sur elle. Il faut avoir présents à l'esprit les résultats suivants :

Quand l'accouplement est très lâche, l'antenne oscille à peu près librement sans réagir sur le circuit fermé qui l'excite inductivement : les fréquences des deux groupes d'oscillations sont très voisines l'une de l'autre et se confondent presque, de sorte que l'on peut obtenir une résonance aiguë ; malheureusement, l'énergie transmise à l'antenne par le circuit fermé est faible.

Pour que le circuit oscillant cède beaucoup d'énergie à l'antenne, il faut que l'accouplement soit rigide. Mais, dans ce cas, il se produit une forte réaction du secondaire (antenne) sur le primaire (circuit fermé) : les fréquences des deux groupes d'oscillations qui prennent naissance dans le système sont très différentes, et l'action exercée sur l'antenne réceptrice est beaucoup moins nette ⁽¹⁾.

Avec l'accouplement rigide, les amplitudes initiales des oscillations de l'antenne sont grandes, mais l'amortissement

(1) On est obligé d'accorder cette antenne, ainsi que le système récepteur, sur une seule des deux fréquences d'oscillation du système transmetteur.

est rapide ; avec l'accouplement lâche, les amplitudes initiales des oscillations sont sensiblement plus faibles, mais l'amortissement est beaucoup moins rapide (1).

La quantité d'énergie que peut absorber une antenne dépend beaucoup de la valeur de l'amortissement et du coeffi-

(1) M. le Dr Franck a établi, pour illustrer les phénomènes en jeu dans le circuit oscillant et dans l'antenne, un modèle mécanique tout à fait intéressant.

Comme nous l'avons vu dans l'étude des circuits oscillants, la capacité joue, au point de vue électrique, le même rôle que l'élasticité, et la self-induction joue le même rôle que l'inertie.

Dans le modèle du Dr Franck, le circuit oscillant fermé est représenté par une lame de ressort verticale, pincée dans une mâchoire à son extrémité inférieure et portant, vers son extrémité supérieure, une masselotte de plomb. L'antenne est représentée par une planche mince élastique, trois ou quatre fois plus haute que la lame vibrante, placée verticalement à quelque distance de celle-ci et fixée à sa base sur le support commun. Un ressort, plus ou moins rigide ou lâche, fixé à quelque distance de la base, relie la lame vibrante à la planche ; il réalise entre ces deux systèmes oscillants un accouplement rigide ou lâche. En déplaçant convenablement la masselotte portée par la lame vibrante et fixée par une vis, on peut régler la fréquence propre d'oscillation de celle-ci et lui donner une valeur exactement égale à la fréquence d'oscillation de la planche.

Les deux systèmes oscillants étant ainsi accordés, on les relie l'un à l'autre par un mince ruban de caoutchouc (accouplement lâche), et l'on met en vibration la lame élastique en écartant de sa position la masselotte de plomb : on voit alors la planche se mettre à vibrer peu à peu et effectuer des oscillations de même période et d'amplitude peu considérable. Après avoir atteint un maximum, l'amplitude des oscillations des deux systèmes va en décroissant lentement. C'est le cas de la résonance simple, obtenue avec un accouplement lâche.

On remplace ensuite le ruban de caoutchouc par un ressort à boudin moyennement rigide, et l'on voit, en faisant vibrer la lame élastique, que la planche entre aussitôt en vibration. Les deux groupes d'oscillations qui se produisent, et qui, pour cet accouplement moyennement rigide, ne diffèrent pas considérablement l'un de l'autre, produisent des battements visibles ; l'amplitude des vibrations de chacun des deux systèmes oscillants devient nulle au bout d'un certain nombre d'oscillations, tandis que l'amplitude des vibrations de l'autre système est maxima, puis les rôles s'inversent : le phénomène s'amortit et s'éteint sensiblement plus vite que dans le cas précédent.

Enfin si l'on remplace le ressort par une liaison rigide (accouplement rigide), la planche présente, dès le début, des oscillations d'amplitude beaucoup plus grande, mais le phénomène s'amortit très rapidement. Le mouvement irrégulier de la planche et les battements qui se produisent montrent nettement l'existence de deux groupes d'oscillations de fréquences sensiblement différentes.

cient d'accouplement. Pour une antenne présentant un fort amortissement, il est généralement meilleur d'employer un accouplement relativement rigide ; pour une antenne présentant un faible amortissement, on a avantage à employer un accouplement très lâche.

Pour obtenir le maximum d'effet, il est nécessaire d'accorder entre eux les différents circuits constituant le système transmetteur.

Pour accorder l'antenne A avec le circuit exciteur, on y intercale (fig. 93) un certain nombre de tours d'une bobine de self-induction B', et, au besoin, un condensateur

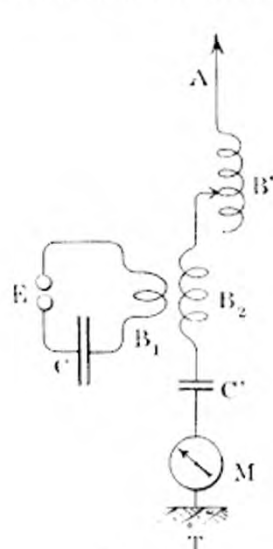


FIG. 93.

C' de capacité variable. On règle le nombre de tours actifs et aussi, au besoin, la capacité du condensateur C' de façon à amener l'antenne en résonance avec le circuit oscillant exciteur. Pour reconnaître le moment où la résonance est obtenue, on peut intercaler au pied de l'antenne (ventre d'intensité) un ampère-mètre thermique M : l'accord est réalisé au moment où l'aiguille de cet appareil indique un maximum.

Une fois que cet accord est obtenu, on peut régler la valeur de l'accouplement en éloignant plus ou moins l'une de l'autre les bobines B₁ et B₂ ou en modifiant le nombre des spires de la bobine B₂ intercalées dans l'antenne. On détruit ainsi plus ou moins l'accord primitivement réalisé, et il y a lieu de parachever le réglage en modifiant à nouveau le nombre de tours de la bobine B'. Après quelques tâtonnements successifs, on arrive à réaliser un accord convenable.

On pourrait aussi, en cas de nécessité, accorder le circuit oscillant exciteur sur l'antenne, en modifiant les valeurs de la self-induction et de la capacité de ce circuit.

3° *Accouplement mixte.* — Comme cela a été dit à propos des circuits oscillants, on peut réaliser un accouplement mixte, agissant comme un accouplement direct et comme un accouplement inductif.

La figure 94 montre ce mode d'accouplement, qui est le plus commode et le plus fréquemment employé en pratique. Une portion plus ou moins importante de la bobine B, intercalée dans l'antenne, fait aussi partie du circuit oscillant exciteur. La liaison entre le circuit et l'antenne est doublement réalisée, d'une part par la portion commune de la bobine B (accouplement direct), d'autre part par l'action inductive qu'exercent, sur la totalité de la bobine, les tours intercalés dans le circuit exciteur.

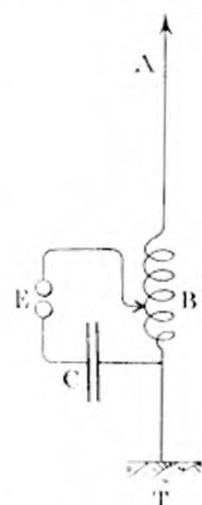


FIG. 94.

Il n'est pas possible, avec ce mode de liaison, de réaliser des accouplements très lâches entre le circuit exciteur et l'antenne, mais cela n'est pas un inconvénient, puisque, en Radiotélégraphie, il n'est pas possible de descendre au-dessous d'une certaine limite si l'on veut mettre en jeu une quantité d'énergie suffisante. Au contraire, ce mode de liaison permet de faire varier très commodément la valeur de l'accouplement en modifiant simplement le nombre de tours de la bobine L intercalés dans le circuit exciteur.

La figure 95 indique comment on effectue l'accord.

Au moyen de la bobine B', dont on modifie le nombre de tours agissant dans l'antenne et, au besoin, au moyen du

condensateur réglable C' , on amène l'antenne en résonance avec le circuit oscillant exciteur. On peut reconnaître, au

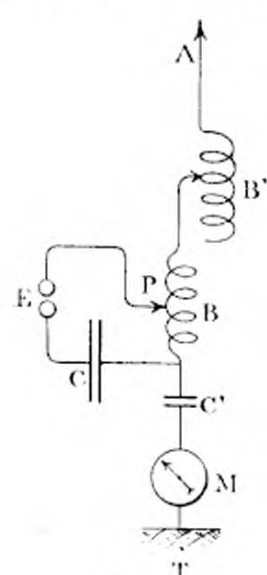


Fig. 95.

moyen de l'ampèremètre thermique M, le moment où l'accord est obtenu.

Ensuite on modifie à volonté la valeur de l'accouplement du circuit exciteur et de l'antenne, en déplaçant sur la bobine B le point de contact P du circuit oscillant. Enfin, on rétablit à nouveau l'accord de l'antenne en agissant sur la bobine B ou sur le condensateur C' , puis après quelques tâtonnements, on arrive à un accord convenable.

Tout ce qui a été dit, à propos de l'accouplement inductif, sur l'existence des deux groupes d'oscillations de fréquences différentes et sur les valeurs les plus avantageuses du coefficient d'accouplement s'applique au cas de l'accouplement mixte.

Remarque. — Avec les trois modes d'accouplement décrits ci-dessus (direct, inductif et mixte), il est possible, au lieu de faire vibrer l'antenne en quart d'onde, de la faire vibrer en trois quarts d'onde, comme l'indique la figure 89.

Il suffit pour cela de régler convenablement le circuit exciteur, de façon que sa fréquence propre soit trois fois plus grande que la fréquence propre de vibration de l'antenne, c'est-à-dire qu'elle corresponde à des ondes dont la longueur d'onde est le tiers de la longueur d'onde propre de l'antenne.

Par exemple, une antenne ayant une longueur d'onde propre de 900 mètres peut être excitée par des oscillations correspondant à une longueur d'onde de 300 mètres.

Ce cas n'est guère intéressant en pratique, où l'on

s'efforce d'utiliser des longueurs d'onde aussi grandes que possible, c'est-à-dire des fréquences aussi basses que possible. Néanmoins il peut se présenter assez fréquemment dans des postes côtiers puissants qui, pour communiquer avec des bateaux, ou pour se conformer à certains règlements, sont conduits à employer des longueurs d'onde de 300 ou de 600 mètres.

Phénomènes en jeu dans les antennes réceptrices.

Au poste récepteur, l'antenne, impressionnée par les ondes électromagnétiques émises par le transmetteur, entre en vibration à son tour. Elle présente un ventre de tension avec un nœud de courant à son extrémité supérieure, et un nœud de tension avec un ventre de courant à sa base. L'antenne vibre avec sa fréquence propre, et les oscillations électriques qui prennent naissance correspondent à une longueur d'onde égale à quatre fois la longueur de l'antenne.

On obtient le maximum d'effet entre l'antenne transmettrice et l'antenne réceptrice quand il y a résonance, c'est-à-dire quand les deux antennes ont la même fréquence propre d'oscillation. Avec des antennes simples formées d'un seul fil aérien, il faut, pour que les fréquences propres d'oscillation soient les mêmes, que les longueurs actives soient égales.

Si les longueurs des deux portions aériennes ne peuvent pas être égales, par suite des hauteurs différentes des mâts ou des supports dont on dispose ⁽¹⁾, on est conduit à ajouter, à l'antenne la plus courte, une certaine longueur de fil en-

(1) Au lieu de mâts, on peut employer des cerfs-volants, des ballons, etc.

roulé sous forme d'une bobine. Cette bobine peut porter un curseur mobile, permettant de modifier le nombre de tours de fil mis en circuit : on réalise ainsi une *bobine d'accord*.

On peut également, au lieu d'ajouter des tours de fil à l'antenne la plus courte, intercaler dans l'antenne la plus longue un condensateur de capacité convenable, dont la présence a pour effet de diminuer la capacité et d'abaisser, par suite, la fréquence des vibrations.

Il est important de remarquer qu'au lieu de vibrer en quart d'onde, l'antenne réceptrice peut également vibrer en trois quarts d'onde, comme l'indique la figure 89, si la longueur d'onde des ondes agissant sur elles correspond à une fréquence trois fois plus grande que sa fréquence propre.

Par exemple, une antenne dont la longueur d'onde propre est de 1 800 mètres, peut servir très convenablement pour la réception de signaux émis au moyen d'ondes de 600 mètres de longueur d'onde. Ce cas est particulièrement intéressant dans la pratique, puisque les postes puissants, travaillant avec de grandes longueurs d'onde, ont ainsi la possibilité de recevoir convenablement les signaux émis par les petits postes, tels que ceux des bateaux, travaillant avec une courte longueur d'onde (600 ou 300 mètres, longueurs d'onde réglementaires pour les petites stations).

Ceci dit, étudions en détail les phénomènes en jeu dans l'antenne réceptrice.

Pour cela, faisons fonctionner d'une façon continue un poste transmetteur, de façon à émettre une série d'ondes électromagnétiques, et examinons ce qui se passe dans une antenne réceptrice dont nous faisons varier graduellement la fréquence propre d'oscillation depuis une valeur inférieure

à la fréquence des ondes agissantes jusqu'à une valeur supérieure à cette fréquence.

Afin de pouvoir mesurer commodément l'intensité du courant oscillant engendré dans l'antenne réceptrice, *qui n'est supposée reliée à aucun appareil détecteur ni à aucun circuit oscillant*, intercalons à la base de celle-ci un ampèremètre thermique de grande sensibilité⁽¹⁾.

I. — Supposons d'abord que l'antenne transmettrice soit une antenne à **excitation directe** (fig. 86).

Nous constatons, en modifiant graduellement la fréquence propre de l'antenne réceptrice⁽²⁾, que l'intensité du courant oscillant va en croissant lentement d'abord, puis très rapidement, pour atteindre un maximum aigu après lequel sa valeur diminue, rapidement d'abord, puis plus lentement.

La courbe obtenue est analogue à celle que représente la figure 96.

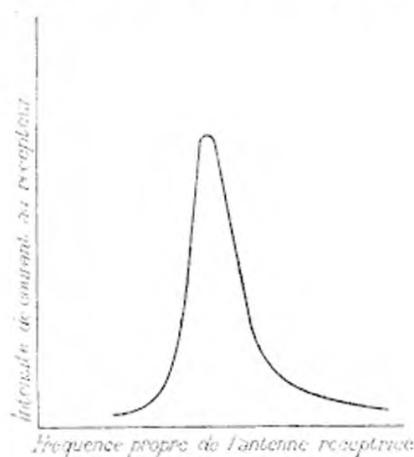


FIG. 96.

Le maximum d'intensité du courant oscillant correspond à la fréquence pour laquelle se produit la résonance.

(1) Par exemple, prenons un appareil analogue au *baretter* de Fessenden (page 147) et plaçons son fil chaud dans le réservoir d'un thermomètre à air : l'échauffement du fil est proportionnel au carré de l'intensité du courant oscillant qui le traverse, et cet échauffement détermine une dilatation de l'air du réservoir thermométrique ; en observant le déplacement de la colonne liquide du thermomètre, on peut déterminer les valeurs relatives du courant oscillant.

(2) Cette variation graduelle de la fréquence peut être obtenue soit par modification de la longueur de l'antenne, soit par modification du nombre de spires d'une bobine intercalée à sa base.

II. — Supposons maintenant que l'antenne transmettrice soit excitée par un circuit oscillant fermé accouplé avec elle (fig. 91, 92 et 94).

D'une façon générale, elle émet deux groupes d'oscillations de fréquences distinctes.

1° Si l'accouplement entre l'antenne transmettrice et son circuit exciteur est rigide, ces fréquences diffèrent sensiblement. En modifiant graduellement la fréquence propre d'oscillation de l'antenne réceptrice, on constatera donc, comme l'indique la figure 97, la production d'un premier maximum du

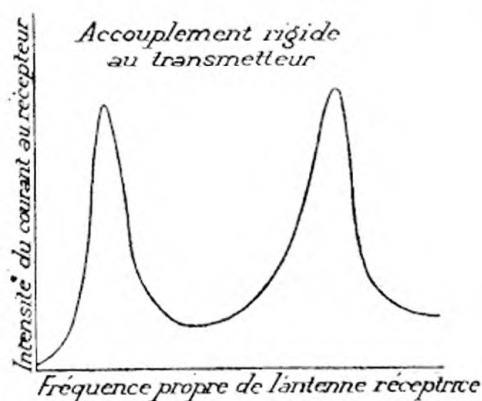


FIG. 97.

courant oscillant (correspondant à la résonance de l'antenne réceptrice sur la plus basse des deux fréquences du système transmetteur), puis d'un second maximum du courant oscillant (correspondant à la résonance de l'antenne réceptrice sur la plus

élevée des deux fréquences du système transmetteur).

Il y aura lieu d'accorder l'antenne réceptrice sur une seule de ces deux fréquences. En général, on réalise l'accord sur la fréquence la plus faible, c'est-à-dire sur l'onde de plus grande longueur d'onde, parce que c'est elle qui s'amortit le moins vite. Quelques praticiens préfèrent cependant réaliser l'accord sur l'onde la plus courte, parce qu'elle a la plus grande énergie initiale.

2° Si l'accouplement entre l'antenne transmettrice et son circuit exciteur est rendu de plus en plus lâche, les deux fréquences des oscillations qui prennent naissance dans le système se

rapprochent l'une de l'autre ; par suite, les deux maxima obtenus dans la courbe de résonance de l'antenne réceptrice se rapprochent l'un de l'autre.

Pour un accouplement suffisamment lâche, on obtient une courbe de résonance telle que celle de la figure 98 : à la limite, pour un accouplement extrêmement lâche, on obtiendrait un seul maximum aigu tel que celui de la courbe de la figure 96, mais, comme cela a été déjà dit, ce cas est irréalisable dans la pratique, puisque l'énergie cédée à l'antenne transmettrice par son circuit excitateur serait nulle.

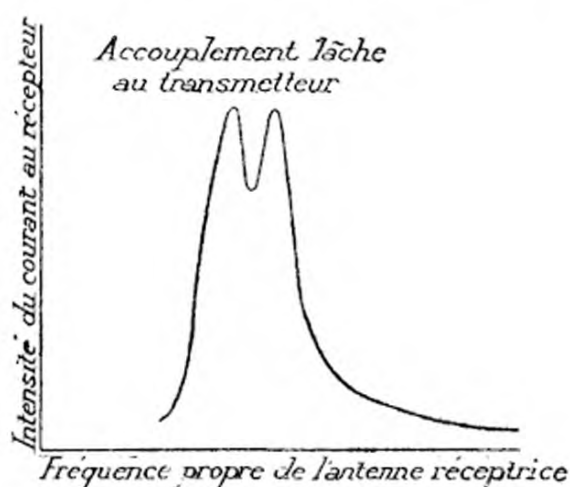


FIG. 98.

En pratique, les phénomènes sont beaucoup plus complexes qu'on ne pourrait le croire d'après l'exposé précédent, à cause du rôle très important joué par l'amortissement.

Si l'antenne transmettrice émet des ondes fortement amorties, comme celles que produit le transmetteur simple à action directe de M. Marconi ⁽¹⁾, on constate l'existence des *phénomènes de résonance multiple* suivants : plusieurs antennes réceptrices, présentant des périodes propres très différentes les unes des autres, paraissent répondre presque aussi bien aux ondes émises que l'antenne accordée sur ces ondes.

Cela tient à ce que, sous l'action des ondes très amorties,

(1) La présence de l'étincelle intercalée dans l'antenne est une cause de fort amortissement, par suite de sa résistance électrique, toujours relativement élevée.

l'antenne réceptrice *non accordée*, qui présente toujours un assez faible amortissement⁽¹⁾, est le siège de deux groupes d'oscillations de fréquences différentes : les unes sont des *oscillations forcées* ayant même fréquence que les ondes agissantes ; les autres sont des *oscillations libres* ayant pour fréquence la fréquence propre d'oscillation de l'antenne.

Si, d'après le montage indiqué plus loin, l'antenne réceptrice agit comme primaire sur un circuit secondaire en résonance avec elle, les oscillations forcées ont très peu d'action sur ce circuit (qui contient le détecteur) tandis que les oscillations libres, ayant pour fréquence la fréquence propre du circuit, ont une forte action sur lui. Le détecteur peut donc être impressionné presque aussi fortement que si l'antenne réceptrice était en résonance sur la fréquence du système transmetteur.

Comme nous le verrons dans la suite, on s'est efforcé de diminuer autant que possible l'amortissement dans les systèmes transmetteurs, et l'on est parvenu, à ce point de vue, à des résultats assez satisfaisants pour que les inconvénients dus au phénomène de résonance multiple ne soient pas trop sensibles.

Modes d'emploi des antennes réceptrices.

De même que les antennes transmettrices peuvent être excitées directement par l'éclateur, ou bien indirectement au moyen d'un circuit oscillant fermé, les antennes réceptrices peuvent agir directement sur le détecteur, ou bien indirectement au moyen d'un circuit oscillant fermé auquel elles sont accouplées.

I. — **Antenne à action directe.** — Comme le montre schématiquement la figure 99, le détecteur D est embroché sur l'an-

⁽¹⁾ L'amortissement est beaucoup plus faible que dans l'antenne transmettrice identique, parce qu'il n'y a pas d'étincelle intercalée.

tenne. C'est le dispositif employé par M. Marconi dans ses premières expériences. Le circuit qui contient un relais, ou un appareil enregistreur, ou un récepteur téléphonique, est branché en dérivation sur le détecteur : sur la figure 99, P désigne une pile ou un potentiomètre, et R le relais, le téléphone, ou tout autre appareil convenable.

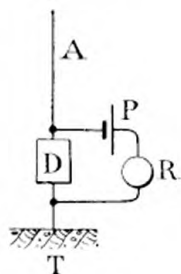


Fig. 99.

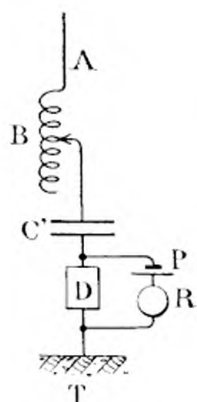


Fig. 100.

Pour accorder l'antenne réceptrice, on emploie une bobine B, dont on fait varier le nombre de tours intercalés dans l'antenne, et un condensateur C', dont on règle la capacité (fig. 100). On reconnaît que le meilleur accord possible est réalisé lorsque l'on obtient le maximum d'effet sur le détecteur.

Il est très rare que l'on emploie, dans la pratique, une antenne réceptrice à action directe, car ce système n'est pas commode, se prête mal à l'emploi de certains détecteurs, et rend impossible toute tentative faite en vue d'éviter l'action des signaux parasites ou perturbateurs.

II. — **Antenne agissant sur un circuit oscillant fermé.** — Avec ce mode de montage, les vibrations de l'antenne réceptrice agissent sur un circuit oscillant accouplé avec elle et y engendrent des oscillations qui impressionnent le détecteur. Bien entendu, le maximum d'effet est obtenu quand le circuit oscillant est en résonance avec l'antenne. De même que pour la transmission, ce circuit peut être accouplé de trois façons différentes avec l'antenne.

1° *Accouplement direct.* — La figure 101 indique ce montage,

qui n'est presque jamais employé en pratique. Sur l'antenne A est embrochée une bobine B, aux extrémités de laquelle est branché le circuit oscillant comprenant le condensateur C et le détecteur D, accompagné de son circuit dérivé qui contient une pile ou un potentiomètre P et un appareil récepteur R.

Avec ce dispositif, l'accouplement entre l'antenne et le circuit oscillant est plus ou moins rigide suivant que la bobine commune B contient plus ou moins de tours.

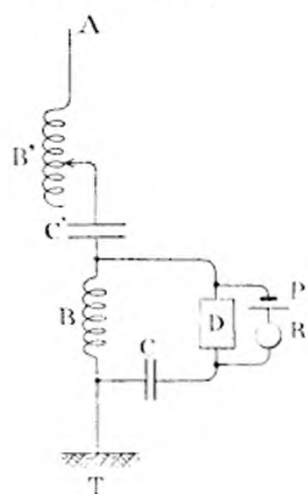


Fig. 101.

Pour accorder l'antenne sur les ondes agissantes, on règle le nombre de tours actifs de la bobine B' (fig. 101) et, au besoin, la capacité du condensateur C', puis on amène le circuit oscillant en résonance avec l'antenne en modifiant la valeur de la capacité du condensateur C. Les réglages sont effectués par tâtonnements successifs,

et l'accord est bon quand on observe le maximum d'effet sur le détecteur D.

2° Accouplement par induction. — La figure 102 indique ce montage qui est le plus fréquemment adopté en pratique à cause de son efficacité, de sa commodité, et de la facilité du réglage de l'accouplement entre l'antenne et le circuit oscillant. Sur l'antenne est embrochée une bobine primaire B₁, dont le secondaire B₂ fait partie du circuit oscillant contenant le condensateur C, le détecteur D, et une bobine de self-induction réglable L.

On peut faire varier commodément l'accouplement entre l'antenne et le circuit oscillant en déplaçant l'une par rapport à l'autre les deux bobines B₁ et B₂. La première est, par exemple, formée d'un petit nombre de tours de fil enroulés

sur un cadre disposé autour d'une carcasse sur laquelle est enroulée la bobine B_2 , formée d'un grand nombre de tours de fil. En déplaçant le cadre par rapport à la carcasse, par glissement ou par pivotement, on fait varier à volonté l'accouplement. On pourrait aussi modifier l'accouplement en modifiant le nombre de tours de la bobine B_1 , mais ce serait beaucoup moins commode.

Dans la pratique, on emploie généralement des accouplements aussi faibles que possible à la réception, pour éviter ou réduire la gêne due à la présence de signaux parasites, provenant d'autres transmissions ou de circonstances atmosphériques, et aussi pour pouvoir obtenir de bonnes réso-

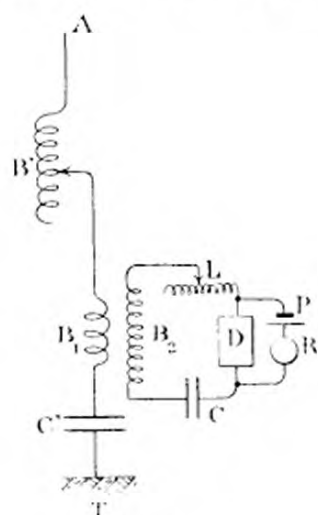


FIG. 102.

nances entre le circuit récepteur et l'antenne. En effet le système constitué par l'antenne et le circuit accouplé présente deux mouvements vibratoires dont les fréquences diffèrent d'autant plus que l'accouplement est plus rigide. Comme cela a été expliqué à propos des antennes transmettrices, on obtient des résonances d'autant plus nettes dans le circuit secondaire que l'accouplement est plus lâche, mais l'énergie transmise de l'antenne au circuit diminue avec l'accouplement, ce qui oblige à ne pas descendre au-dessous d'une certaine valeur.

Pour obtenir un accord convenable, on réalise d'abord la résonance de l'antenne sur la fréquence des ondes agissantes: pour cela, on règle le nombre de tours actifs de la bobine B_1 et, au besoin, la capacité du condensateur C' (fig. 102). Ensuite on accorde le circuit oscillant en modifiant la capacité du condensateur C et la portion active de la bobine de self-induction L .

Une fois ce réglage convenablement réalisé, on peut modi-

fier l'accouplement, suivant les circonstances, de façon à obtenir la meilleure communication possible, puis on parachève le réglage, si l'accord s'est trouvé en partie détruit par la modification de l'accouplement. Après un certain nombre de tâtonnements, on arrive à un réglage pour lequel l'action exercée sur le détecteur présente un maximum.

3° *Accouplement mixte.* — La figure 103 indique ce montage, un peu moins commode que le précédent en ce qu'il se prête moins facilement au réglage de l'accouplement et à la réalisation d'un accouplement très lâche.

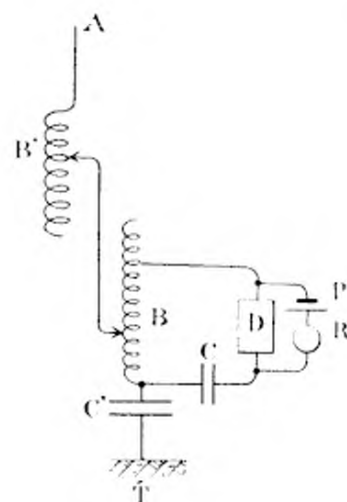


FIG. 103.

L'antenne comprend une portion variable d'une bobine B intercalée en totalité ou en partie dans le circuit oscillant. On accorde l'antenne sur la fréquence des ondes reçues au moyen de la bobine B' et du condensateur C', après quoi on amène le circuit oscillant en résonance avec elle en modifiant la capacité du condensateur C et la longueur de la bobine

B comprise dans le circuit : ensuite, on peut régler l'accouplement en modifiant la portion de bobine B intercalée dans l'antenne, puis on recommence le double réglage précédent, etc. Après un certain nombre de tâtonnements, on voit que le meilleur accord est réalisé quand l'action sur le détecteur présente un maximum. Si, à un moment donné, des signaux parasites viennent gêner la communication, on cherche à affaiblir l'accouplement autant qu'on peut le faire, tout en percevant encore les signaux qu'on veut recevoir.

Il n'est pas inutile de faire remarquer que, avec les dispo-

sitifs ordinairement employés, on n'a pas besoin d'accorder d'une façon méticuleuse la période propre de l'antenne réceptrice sur la période des ondes agissantes car, à cause du très fort amortissement de celles-ci, la résonance ne peut jamais être très aiguë : il y a une assez grande marge d'accord.

Au contraire, dans le système constitué par l'antenne réceptrice et le circuit accouplé avec elle, l'amortissement est très faible, et l'accord doit être obtenu d'une façon très exacte, si l'on veut tirer un bon parti des effets de résonance.

Remarques générales relatives à l'accouplement.

On ne saurait trop insister sur la question de l'accouplement des circuits primaire et secondaire dans le système transmetteur et dans le système récepteur.

1° Si l'on veut mettre en jeu beaucoup d'énergie, il faut, comme cela a été dit, employer un accouplement rigide entre le circuit oscillant et l'antenne transmettrice. Celle-ci donne alors deux ondes de fréquences nettement différentes.

Au récepteur, on peut réaliser différents accords :

ou bien on emploie un accouplement rigide entre l'antenne réceptrice et le circuit oscillant, et l'on cherche à réaliser l'accord de telle façon que les deux oscillations engendrées dans le système aient les mêmes fréquences que les deux oscillations du transmetteur, ce qui est à peu près impossible à obtenir en pratique ⁽¹⁾ ;

ou bien on emploie un accouplement lâche entre l'antenne réceptrice et son circuit oscillant. On peut alors accorder le

(1) Un dispositif complexe, imaginé par M. Fleming (voir chap. XIII), permettrait d'utiliser, au poste récepteur, l'énergie des deux ondes de fréquences différentes émises simultanément par le transmetteur.

système récepteur, dont les deux oscillations ont des fréquences très voisines, sur une seule des deux oscillations du transmetteur : c'est l'accord le plus souvent employé en pratique. On peut aussi accorder le système récepteur sur une fréquence intermédiaire, égale à la moyenne des fréquences des oscillations du transmetteur.

2° Si l'on veut pouvoir réaliser une résonance aiguë entre le transmetteur et le récepteur, on emploie, pour la transmission comme pour la réception, un accouplement aussi lâche que possible.

Dans ces conditions, il n'y a pas de réaction sensible du circuit primaire sur l'antenne (transmission) et de l'antenne sur le circuit secondaire (réception). Les deux groupes d'oscillations qui prennent naissance dans l'un et l'autre système ont des fréquences suffisamment voisines pour que l'on puisse obtenir des effets de résonance assez nets.

L'accord entre chaque antenne et son circuit oscillant doit être réalisé d'une façon très exacte. L'accord entre les antennes peut être moins précis, à cause de l'amortissement.

Différentes formes d'antennes.

Dans les débuts de la Radiotélégraphie, on s'est servi d'antennes simples formées d'un fil unique suspendu verticalement ou obliquement. Mais on a été conduit, pour augmenter la portée des communications, à employer des antennes multiples composées d'un grand nombre de fils embrassant le plus d'espace possible.

On conçoit qu'une antenne de grande surface puisse ébranler une plus grande masse d'éther qu'une antenne simple formée d'un fil unique. D'autre part, l'augmentation

du nombre des fils et de l'espace embrassé par l'antenne conduit à un accroissement de la capacité⁽¹⁾. Or il a été dit, au chapitre III, que la longueur d'onde λ de la perturbation créée est liée à la période T des oscillations (inverse de la fréquence) par la relation

$$\lambda = cT,$$

c étant la vitesse de propagation de la perturbation.

La période T est donnée par la formule

$$T = 2\pi\sqrt{cl}.$$

Par conséquent, en augmentant la capacité c ou la self-induction l de l'antenne, on augmente la période T et, avec elle, la longueur d'onde. Or les ondes de grande longueur d'onde franchissent de plus grandes distances que les ondes de courte longueur d'onde.

Dans la pratique, on évite d'accroître la self-induction, et on cherche surtout à augmenter la capacité, pour accroître l'énergie mise en jeu. En effet, celle-ci dépend de la charge prise par l'antenne, laquelle dépend de la capacité et de la tension de charge. Cette tension étant limitée, à cause des difficultés d'isolement de l'antenne et des circuits, à une valeur déjà relativement très élevée, la seule façon d'augmenter l'énergie en jeu consiste à augmenter la capacité de l'antenne et celle du circuit oscillant accordé sur elle.

Les formes d'antennes multiples employées dans la pratique dépendent beaucoup de l'espace disponible, de la hauteur, de la forme et du nombre des mâts, pylones ou tours

(1) La capacité d'une antenne multiple est d'autant plus grande que l'écartement des fils est plus grand au voisinage du ventre de courant et que leur distance à la terre est plus faible. L'antenne en parapluie serait donc celle qui présente la plus forte capacité, mais, au point de vue de la radiation, cette forme d'antenne est moins bonne que l'antenne en pyramide renversée.

servant de supports au système aérien, et enfin de la puissance du poste qu'on se propose d'établir et de la portée que doivent atteindre les communications.

Plus l'antenne est élevée et offre une grande surface, plus la portée des communications est considérable.

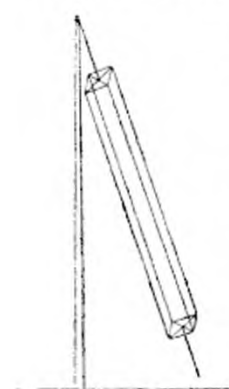


Fig. 104.

Quand on dispose d'un seul support, on peut adopter une antenne formée de quatre, cinq ou six fils tendus entre deux cadres (fig. 104), ou bien une antenne en forme de cône entier ou de portion de cône (fig. 105). Dans ce cas, un grand nombre de fils partent du sommet du support, et rayonnent obliquement. Les antennes de ce type peuvent être désignées sous le nom d'antennes en parapluie.

Quand on dispose de deux supports, on peut adopter une

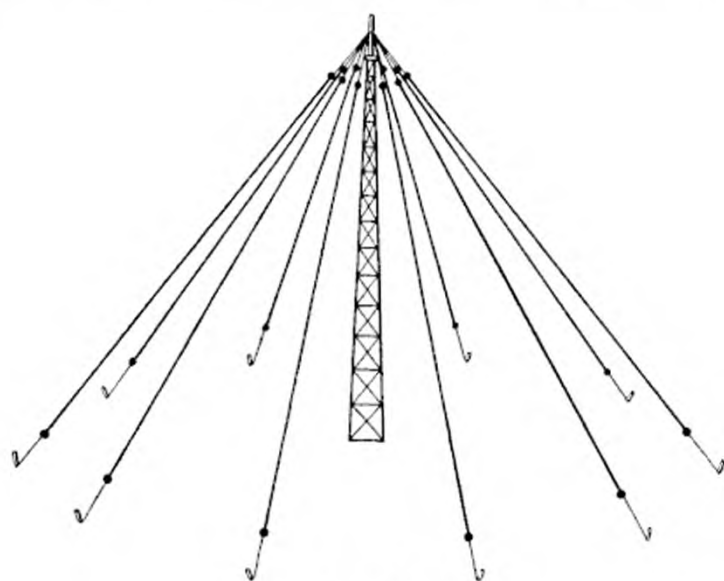


Fig. 105.

antenne en forme de harpe ou d'éventail (fig. 106) ou en forme de T (fig. 107). Cette dernière disposition est fréquemment utilisée sur les navires, les deux grands mâts servant de

soutiens à une antenne qui comprend trois, quatre ou cinq brins horizontaux et autant de brins verticaux réunis ensemble à leur partie inférieure.

Quand on dispose de trois ou quatre soutiens, on emploie

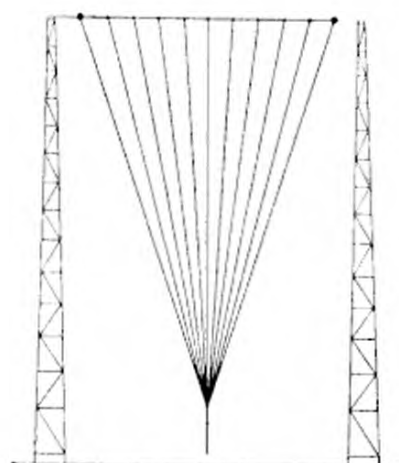


FIG. 106.

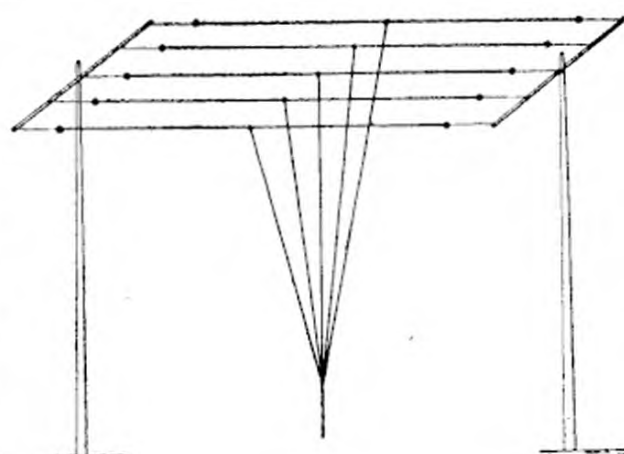


FIG. 107.

des antennes de grande surface en forme de pyramide renversée (fig. 108) ou de nappe horizontale (fig. 109). Ces an-

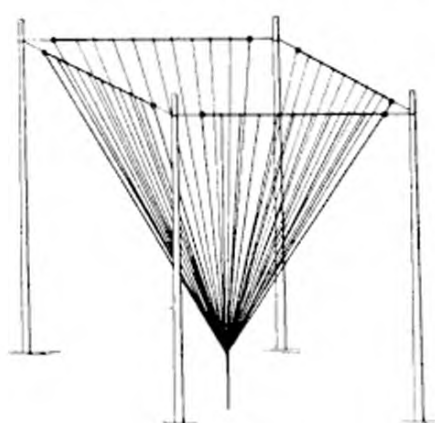


FIG. 108.

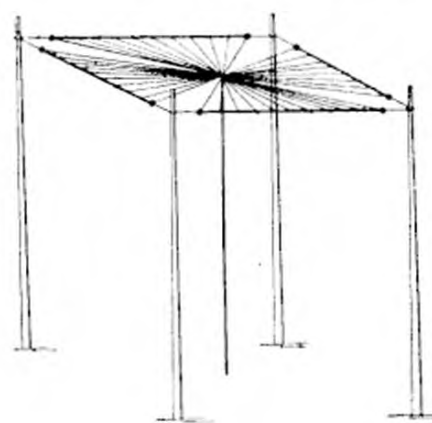


FIG. 109.

tennes permettent d'atteindre à une capacité très élevée et d'obtenir par suite, une grande longueur d'onde.

Il en est de même d'une antenne spéciale, que représente la figure 110, et dont le rôle sera étudié au chapitre XII à propos des ondes dirigées.

Quelle que soit la forme de l'antenne, les conducteurs aériens doivent être, à leur extrémité supérieure, parfaitement isolés du support auquel ils sont fixés. Pour cela, on emploie soit de longues tiges d'ébonite, soit plusieurs isolateurs en porcelaine prévus pour une très haute tension, soit des poulies en porcelaine successives reliées entre elles par des anneaux de caoutchouc, etc. De même, dans les antennes disposées en cône ou fraction de cône, les fils qui



FIG. 110.

agissent comme radiateurs doivent être parfaitement isolés des fils tendeurs qui les prolongent et qui les rattachent au sol.

Quant aux fils eux-mêmes dont sont constituées les antennes, ce sont généralement des fils de bronze présentant une bonne conductibilité électrique et une grande solidité mécanique pour résister aux efforts de traction. L'emploi de fils de fer ou d'acier est à rejeter généralement, en raison de la très grande résistance inductive que présentent ces conducteurs au passage des oscillations électriques. Souvent, les fils employés sont recouverts d'une gaine ou d'un guilage isolant, dont la présence a pour effet d'augmenter un peu la capacité.

Remarque sur le rôle de la terre.

Tout ce qui a été dit sur les phénomènes en jeu dans les

antennes transmettrices et réceptrices repose sur l'hypothèse que le pied de l'antenne est relié à une bonne prise de terre, c'est-à-dire à une plaque ou à un réseau de fils enfoui dans un sol *bon conducteur* (terrain humide).

La mise à la terre du pied de l'antenne a pour effet de fixer en ce point un ventre du courant : si la terre n'est pas très bonne conductrice, c'est-à-dire s'il n'y a pas d'humidité ou d'eau au voisinage de la prise de terre, le ventre de courant est déplacé vers le haut, et est d'autant plus élevé que la terre est moins bonne conductrice.

Si la prise de terre est remplacée par un réseau de fils de grande surface placé à quelque distance du sol, ou posé sur lui, ou enfoui à une faible profondeur, il peut se présenter trois cas :

ou bien le sol est bon conducteur ;

ou bien le sol est mauvais conducteur, mais il y a une nappe d'eau à une certaine profondeur ;

ou bien le sol et le sous-sol sont mauvais conducteurs.

Dans le premier et le second cas, le réseau de fils agit soit comme une prise de terre, soit comme l'armature d'un condensateur de grande capacité dont l'autre armature est formée par le sol ou par le sous-sol humide. Dans le troisième cas, le réseau de fils agit comme un conducteur isolé de grande surface présentant, par lui-même, une capacité élevée.

Dans les trois cas, les résultats sont à peu près les mêmes, et sont équivalents à ceux que l'on obtient avec une bonne prise de terre : le ventre de courant est très voisin du pied de l'antenne.

La constitution et la conductibilité du terrain jouent, en radiotélégraphie, un rôle très important et mal défini. Sur mer, où la conductibilité est très bonne, la portée des com-

munications est beaucoup plus grande qu'ailleurs. Entre deux postes radiotélégraphiques séparés par des terrains primaires ou éruptifs, les communications sont beaucoup moins bonnes qu'entre deux postes séparés par des terrains de formation récente ou des terrains d'alluvions.

CHAPITRE XI

MESURE DES LONGUEURS D'ONDE

D'après ce qui précède, on peut juger de l'importance considérable que présente la connaissance exacte des longueurs d'onde et des fréquences d'oscillation.

Or si l'on peut évaluer, avec une approximation suffisante, la longueur d'onde dans le cas d'une antenne filiforme à action directe, puisqu'elle est à peu près égale à quatre fois la longueur totale de celle-ci, il n'en est plus de même dans le cas d'antennes excitées par induction, à cause de la présence d'une bobine qui représente une longueur inconnue d'antenne rectiligne équivalente, et dans le cas d'antennes multiples embrassant une surface plus ou moins grande.

En fait, on peut admettre, pour des évaluations grossières, que le fil enroulé sous forme d'une bobine est à peu près équivalent à un fil rectiligne, de longueur double, mais c'est là une loi tout à fait approximative, et il est nécessaire, pour les réglages exacts, de pouvoir déterminer rigoureusement les longueurs d'onde.

Nous allons passer rapidement en revue les méthodes ou appareils employés à cet effet. Ces appareils sont nommés *ondemètres*.

Détermination approximative.

Dès le début de la radiotélégraphie, le C^t Ferrié a mesuré

la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique produite par une antenne simple, en reliant à la base de celle-ci un fil horizontal dont il modifiait progressivement la longueur. Ce fil prend part au mouvement vibratoire de l'antenne et est le siège d'oscillations électriques. On y intercale, au voisinage de la jonction avec l'antenne, un appareil de mesure (ampèremètre thermique) permettant d'évaluer l'intensité du courant oscillant.

Quand on augmente progressivement la longueur du fil, dont l'extrémité est bien isolée, on voit les indications de l'ampèremètre thermique augmenter jusqu'à une valeur maxima, au delà de laquelle elles vont en décroissant. Cette valeur maxima correspond à la résonance, et la longueur du fil horizontal est alors égale au quart de la longueur d'onde cherchée.

Cette méthode est simple et commode, mais les résultats qu'elle donne ne sont pas rigoureux, car la présence du fil horizontal relié à l'antenne amène une modification de la longueur d'onde primitive, et le voisinage du sol influe sur les phénomènes en jeu dans le fil oscillant. Pour les besoins de la pratique, elle convient suffisamment.

Bobine de Seibt.

Nous avons vu, en étudiant la propagation des ondes dans les fils conducteurs, qu'il s'y produit des nœuds et des ventres d'oscillation, séparés les uns des autres par une distance égale au quart de la longueur d'onde. Cette longueur d'onde dépend de la fréquence des oscillations électriques et de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique, ces trois grandeurs étant liées entre elles (page 55) par la relation :

$$\lambda = \frac{v}{f}.$$

Or, la vitesse v de propagation des ondes électromagnétiques dans un conducteur dépend de la capacité et de la self-induction de ce conducteur: si l'on appelle c et l cette capacité et cette self-induction par unité de longueur, la vitesse v est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de ces deux grandeurs.

Il en résulte que, si l'on réalise artificiellement un conducteur présentant une forte capacité et une forte self-induction par unité de longueur, la vitesse de propagation des ondes dans ce conducteur sera considérablement diminuée, et la longueur d'onde correspondant à une fréquence donnée sera beaucoup plus petite que dans un fil rectiligne ordinaire. On pourra donc, avec un tel conducteur, déterminer la position des nœuds et des ventres d'oscillation sans être conduit à des dimensions d'appareils exagérées: la distance entre un nœud et un ventre étant égale au quart de la longueur d'onde, on pourra en déduire cette grandeur, et, grâce à un étalonnage préalable, déterminer la valeur de la fréquence.

Cette méthode a été employée par M. Seibt. Un fil très fin, légèrement isolé, est enroulé, sous forme d'une hélice à tours juxtaposés, sur une tige de bois ou de verre: la bobine ainsi formée constitue le conducteur ⁽¹⁾ de forte self-induction et de forte capacité par unité de longueur. Cette bobine R est reliée à sa base à un circuit oscillant comprenant un condensateur C, un éclateur E et une bobine de self-induction réglable S. Le condensateur est relié au secondaire

(1) Il faut bien remarquer que ce n'est pas la longueur du fil constituant la bobine qui intervient, mais la longueur de la bobine elle-même, qui, pour les ondes électromagnétiques, se comporte comme un conducteur cylindrique creux de self-induction et de capacité déterminées.

d'une bobine de self-induction; l'une de ses armatures est connectée à la terre T (fig. 111).

En modifiant la valeur de la self-induction S, on peut produire, dans le circuit oscillant, des oscillations électriques de

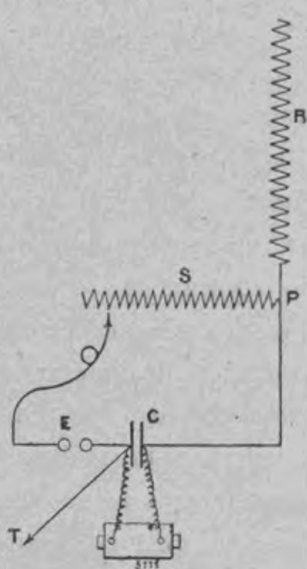


Fig. 111.

fréquence telle que la perturbation électromagnétique qui se propage dans la bobine R ait une longueur d'onde égale à quatre fois la longueur de la bobine. Il y a alors un ventre de tension au sommet de la bobine, où apparaissent de brillantes aigrettes lumineuses.

Inversement, si la fréquence des oscillations engendrées par le circuit est invariable, on peut, en modifiant la longueur active de la bobine, trou-

ver une valeur pour laquelle un ventre de tension se manifeste à son sommet: la longueur de la bobine est alors égale au quart de la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique qui s'y propage.

On peut placer, parallèlement à la bobine et à quelques centimètres de sa surface extérieure, un fil relié à la terre: au voisinage du ventre de tension, on voit jaillir entre la bobine et le fil une série d'étincelles d'autant plus lumineuses et plus serrées qu'elles sont plus proches du ventre de tension. On peut encore coller à intervalles réguliers sur la bobine, au moyen d'un peu de cire, des petits fils de cuivre



Fig. 112.

nu qui servent de points de départ à des aigrettes lumineuses, lorsqu'ils sont à proximité d'un ventre de tension.

La figure 112 montre la photographie des aigrettes ainsi obtenues, pour une longueur de bobine égale au quart de la longueur d'onde. Cette bobine avait 2 mètres de longueur environ : elle était formée d'un fil de cuivre de 0^{mm},3 isolé à la soie et enroulé sur une tige de bois de 37 millimètres de diamètre. De petits fils de cuivre nu étaient collés tous les deux centimètres sur l'isolant, pour indiquer la valeur de la tension électrique.

M. Seibt a employé dans la suite, pour la mesure des longueurs d'onde, un circuit fermé contenant un condensateur de capacité invariable et une self-induction réglable. Celle-ci est formée de deux bobines, disposées l'une dans l'autre. La bobine intérieure peut tourner autour d'un axe de façon à prendre, par rapport à la bobine fixe, différentes inclinaisons : en modifiant sa position, on modifie la self-induction de l'ensemble.

Ondemètre Slaby.

L'appareil de M. Slaby, appelé *bobine multiplicatrice* ou *multiplicateur*, est semblable à la bobine de Seibt.

Un tube isolant, en verre ou en ébonite, porte un nombre considérable de tours de fil très fin juxtaposés : pour exciter cette bobine, on place son extrémité libre à proximité de l'antenne, puis, avec une tige métallique tenue à la main, ou bien avec un fil relié à la terre et muni d'une pointe de contact, on modifie sa longueur active.

La production d'un ventre de tension au sommet de la bobine est mise en évidence au moyen d'un écran fluorescent au platino-cyanure de baryum, qui paraît lumineux quand il est soumis à une forte excitation électrique.

L'appareil est gradué par comparaison avec un ondemètre étalon.

Ondemètres Fleming.

Le même principe a été encore utilisé par M. Fleming pour la construction d'un ondemètre nommé par lui *kum-mètre* ou *cymomètre*.

Un noyau d'ébonite de 2 mètres de longueur et 4 centimètres de diamètre porte 5 000 tours de fil nu très fin juxtaposés et légèrement isolés les uns des autres. L'une des extrémités de cette bobine est reliée soit au circuit oscillant SCT₁, qui excite l'antenne, soit à l'antenne elle-même (fig. 113). Un contact glissant S_L, qui frotte sur les tours de

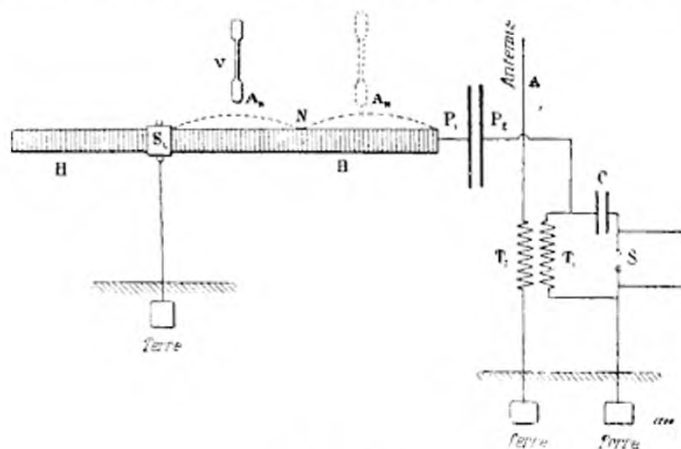


FIG. 113.

fil, est relié à la terre par un conducteur et permet de mettre en circuit une longueur plus ou moins grande de la bobine. Les nœuds et les ventres de tension qui se produisent le long de la bobine sont mis en évidence au moyen d'un tube à vide V, qui s'illumine quand il est au voisinage d'un ventre de tension et reste obscur au voisinage d'un nœud de tension.

Il est nécessaire de protéger l'hélice de fil de l'action in-

directe des oscillations de l'antenne ou des étincelles de l'éclateur: ce résultat est obtenu par l'interposition d'un écran métallique relié à la terre.

Les ondemètres à bobines présentent deux graves inconvénients: leur amortissement est trop grand pour qu'on puisse obtenir une résonance aiguë; d'autre part, leur capacité varie beaucoup dès qu'un objet quelconque est placé à proximité de la bobine.

Le second ondemètre de M. Fleming consiste essentiellement en deux tubes de laiton $T_1 T_2$ (fig. 114), séparés par un tube d'ébonite mince, et mobiles l'un dans l'autre comme ceux d'une lunette. L'ensemble de ces deux tubes constitue un condensateur dont on peut aisément modifier la capacité en enfonçant plus ou moins l'un dans l'autre les deux tubes de laiton.

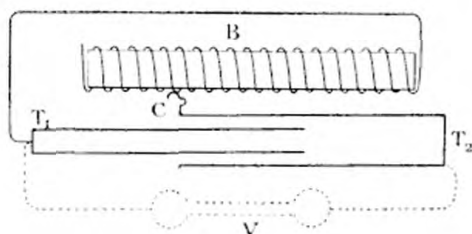


FIG. 114.

Parallèlement à ce double tube est placée une bobine B de fil de cuivre nu, enroulé sur un cylindre d'ébonite. Le tube de laiton extérieur T_2 porte un contact C qui frotte sur les tours de la bobine, et le tube de laiton intérieur T_1 est relié à une extrémité de celle-ci. Le nombre de tours de fil actifs de la bobine et, par suite, la self-induction agissante, varie donc en même temps que la capacité du condensateur tubulaire: l'ensemble forme un circuit oscillant de capacité et de self-induction réglables.

Pour employer cet ondemètre, on le soumet à l'action des oscillations électriques, et, en déplaçant le tube de laiton T_2 , on modifie en même temps le nombre de tours de la bobine

et la capacité du condensateur tubulaire jusqu'à ce que le circuit oscillant de l'appareil soit en résonance avec l'antenne ou le circuit étudié. On reconnaît que la résonance est réalisée au maximum d'éclat d'un tube à vide V , relié aux armatures du condensateur.

Ondemètre Dönitz.

Au lieu de modifier la longueur active d'une bobine excitée par l'antenne, on peut accoupler avec celle-ci un circuit résonant fermé, contenant une bobine de self-induction réglable ou un condensateur de capacité réglable. Si les valeurs de la self-induction et de la capacité sont exactement connues, grâce à un étalonnage préalable, il est facile de calculer la fréquence propre du circuit oscillant fermé, c'est-à-dire la fréquence des oscillations de l'antenne, lorsque le circuit oscillant est en résonance avec celle-ci. Cette méthode a été employée par Drude et par M. Dönitz: ce dernier a établi ainsi un ondemètre pratique et précis, fréquemment utilisé en Allemagne.

L'appareil de M. Dönitz (fig. 115) comprend un circuit oscillant fermé contenant une bobine de self-induction et un condensateur de capacité progressivement variable. Le nombre de tours de la bobine de self-induction peut être modifiée, par adjonction ou suppression d'une ou plusieurs couronnes de fil. Le condensateur est formé d'une série de plaques métalliques fixes f , en forme de secteurs de cercle, entre lesquelles peut venir se placer une série de plaques mobiles b , également en forme de secteurs de cercle, portées par un axe vertical a . Les bornes du condensateur sont en p_1 et p_2 . L'ensemble est plongé dans l'huile.

Suivant qu'on tourne plus ou moins un bouton moleté g

fixé à l'axe vertical, les plaques mobiles pénètrent plus ou moins entre les plaques fixes, et la capacité a une valeur plus ou moins élevée : cette valeur est indiquée par un index z , fixé au bouton, qui se déplace au-dessus d'une graduation tracée sur le couvercle de l'appareil.

Le circuit oscillant comprend aussi une bobine s de quelques tours de fil courbés en forme de cercle et servant à l'accouplement inductif de l'ondemètre avec l'antenne ; cette

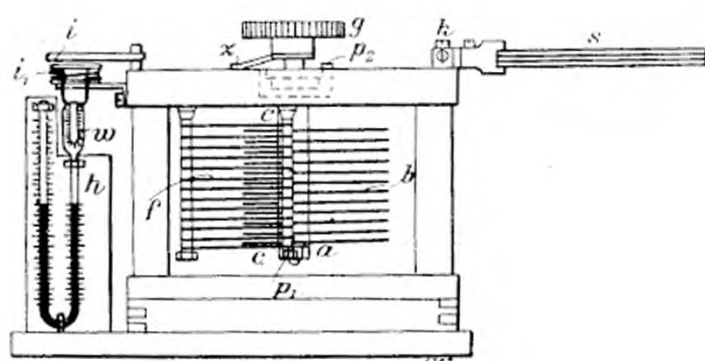


FIG. 115.

bobine est amovible et est reliée au circuit par les contacts k ; on peut, en la changeant, réaliser l'accouplement par un plus ou moins grand nombre de tours. Enfin, un tour de fil i induit dans la petite bobine i_1 un courant qui circule dans un fil fin w placé dans le réservoir d'un thermomètre à air h : l'échauffement de ce fil produit une dilatation de l'air, rendue visible par le déplacement d'une colonne liquide contenue dans un tube en U.

Pour employer l'ondemètre, on modifie progressivement la capacité du condensateur, en tournant le bouton moleté, jusqu'à ce que l'intensité du courant oscillant atteigne un maximum indiqué par le thermomètre à air. A ce moment, le circuit oscillant est en résonance avec l'antenne, et il suffit de déterminer sa fréquence propre d'oscillation

d'après les valeurs connues de la self-induction et de la capacité⁽¹⁾.

Tandis que les ondemètres à hélice de fil précédemment décrits permettent de déterminer la longueur d'onde seulement quand la résonance est réalisée, et ne donnent aucune indication quand les conditions de résonance ne sont pas remplies, l'ondemètre de M. Dönitz, ou tout appareil similaire, permet de tracer la courbe de résonance en deçà et au delà de la résonance exacte, ce qui est souvent utile. La connaissance de cette courbe permet de déterminer l'amortissement des ondes par une méthode due à M. Bjerkness.

L'ondemètre Dönitz a été légèrement modifié pour son emploi pendant la réception. La figure 116 représente schématiquement le circuit oscillant de l'appareil, avec le condensateur C à capacité variable,

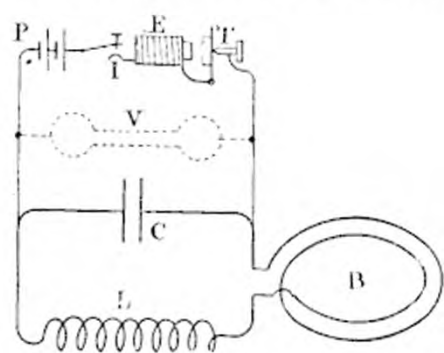


FIG. 116.

la bobine de self-induction L que l'on peut modifier, et la bobine d'accouplement B que l'on approche du circuit à étudier ou de l'antenne. Le thermomètre à air chaud est remplacé par un tube à vide V branché sur le condensateur C.

Un circuit dérivé contient un interrupteur I, une pile P, et un électro-aimant à trembleur semblable à celui d'une sonnerie ordinaire.

(1) Plusieurs autres modèles d'ondemètres, qu'il serait fastidieux de passer en revue, sont analogues à l'appareil Dönitz. Tels sont, par exemple, l'ondemètre de la C^{ie} Gén^{le} Radiotélégraphique et celui de la C^{ie} Marconi qui comprennent chacun une bobine de self-induction invariable et un condensateur réglable. Dans ce dernier, il n'y a pas d'appareil de mesure : un circuit dérivé, branché sur le condensateur, contient un téléphone et un détecteur simple et robuste, formé d'un cristal de carborundum maintenu entre deux pincettes métalliques.

Quand on ferme l'interrupteur I, le trembleur engendre dans le circuit dérivé un courant interrompu dont les intermittences produisent des charges et décharges successives du condensateur C, et le circuit oscillant de l'ondemètre entre en vibration⁽¹⁾.

L'appareil est employé de la façon suivante : quand le poste transmet, on ouvre l'interrupteur I et on approche la bobine d'accouplement B de l'antenne ou du circuit excitateur. On règle le condensateur C et la bobine de self-induction L de façon à obtenir la résonance, qu'indique le maximum d'éclat du tube à vide V. On détermine ainsi la longueur d'onde.

Quand le poste reçoit et que les circuits récepteurs sont bien accordés sur la longueur d'onde agissante, on ferme l'interrupteur I de l'ondemètre et on approche la bobine d'accouplement B du circuit récepteur. Les oscillations engendrées dans le circuit oscillant de l'ondemètre agissent sur le circuit récepteur, et l'on règle la capacité du condensateur C et la self-induction de la bobine L jusqu'à ce que cette action atteigne un maximum : on s'en aperçoit par le maximum d'effet que présente le détecteur qui sert à la réception. A ce moment, le circuit de l'ondemètre est en résonance avec le circuit récepteur ; et la longueur d'onde cherchée est facile à déterminer.

Ondemètres Ferrié.

Le commandant Ferrié a réalisé différents modèles d'ondemètres pratiques.

Le premier de ces appareils comprenait un condensateur

(1) Plusieurs dispositifs de ce genre sont employés avec les différents ondemètres. Quelquefois on se sert d'un petit éclateur pour mettre en vibration le circuit oscillant de l'appareil.

C à lames, de capacité variable, et une bobine L munie d'un curseur D permettant de modifier la self-induction du circuit

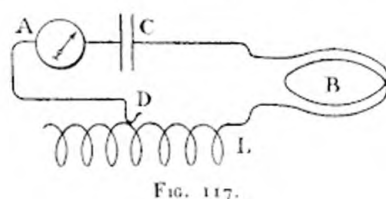


FIG. 117.

(fig. 117). Un ampèremètre thermique A permettait de mesurer l'intensité du courant dans le circuit oscillant et de déterminer ainsi le moment où le circuit de

l'ondemètre était en résonance dans le circuit principal.

Dans la suite, le C^t Ferrié a ingénieusement réalisé une bobine de self-induction progressivement réglable, établie de la façon suivante (fig. 118). Dans un tube de cuivre T, ployé sur lui-même en forme d'anneau, et fendu le long de son pourtour extérieur, on enroule une vingtaine de tours de fil isolé, dont les deux extrémités sortent en FF'. Au lieu d'un tube de cuivre fendu, on peut employer du cuivre profilé en forme de gouttière, ou d'U, etc. A l'extrémité du tube est soudée en P une lame de cuivre K, aboutissant au centre de l'anneau. En ce point, cette lame porte un axe autour duquel peut tourner une autre lame en cuivre M, formant ressort et appuyant contre la surface extérieure du tube. La lame M est munie d'un bouton B au moyen duquel on peut la faire tourner autour du centre et déplacer ainsi son point de contact P' avec le tube de cuivre.

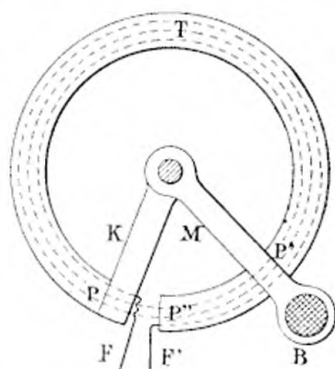


FIG. 118.

On se rend compte immédiatement que, au point de vue électrique, l'appareil représenté par la figure 118 est un véritable transformateur ayant comme primaire la bobine

intérieure et comme secondaire l'anneau extérieur. Par conséquent, quand la bobine est parcourue par des oscillations électriques, une force électromotrice est induite dans l'anneau tubulaire.

Dans l'étude du fonctionnement des transformateurs, il a été expliqué (chap. II, page 36) que, quand le secondaire est à circuit ouvert, le primaire agit comme une bobine de self-induction, tandis que, quand le circuit du secondaire est fermé, la self-induction du primaire tombe à une valeur extrêmement faible, correspondant seulement aux fuites magnétiques. Or, dans l'appareil de la figure 118, la manette M, la lame K, et la portion PTP' du tube, forment un circuit secondaire fermé, embrassant une portion de la bobine primaire qui peut varier depuis zéro jusqu'à la totalité de la bobine, suivant qu'on déplace la manette M depuis la position P, point de contact entre K et le tube, jusqu'à la position extrême P'' située à l'autre extrémité du tube.

On voit d'après cela que, quand la manette est en P, position initiale extrême, la self-induction de la bobine présente sa valeur maxima; quand la manette est en P'', position finale extrême, la self-induction de la bobine atteint sa valeur minima; pour toute position intermédiaire de la manette, la self-induction de la bobine a une valeur intermédiaire que l'on peut modifier d'une façon continue en déplaçant la manette.

La bobine de self-induction décrite est employée, avec un condensateur réglable progressivement ou par sections, dans un circuit analogue à celui de la figure 117, comprenant un appareil thermique A. On réalise ainsi un ondemètre commode.

En employant une méthode de réglage analogue de la self-induction, le C^t Ferrié a perfectionné son ondemètre de la façon suivante :

La bobine de self-induction est formée par une spirale plate L (figure 119) comprenant deux ou trois couches de fil.

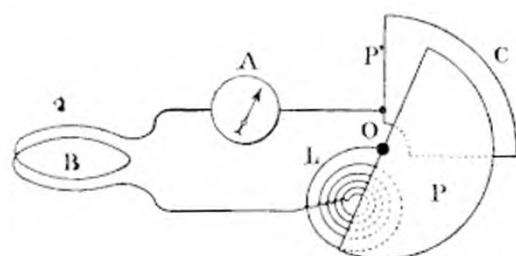


FIG. 119.

Parallèlement à cette spirale se déplace un plateau métallique P, en forme de demi-cercle, qui peut pivoter autour d'un axe central O. La masse métallique de ce plateau qui, dans sa rotation autour

de l'axe O, peut recouvrir une portion plus ou moins grande de la spirale L, agit comme un secondaire fermé et sa présence diminue plus ou moins la self-induction de celle-ci.

D'autre part, le même plateau constitue l'une des armatures d'un condensateur C, dont l'autre armature P' est fixe. Lorsqu'il pivote autour de l'axe O, la capacité de ce condensateur C varie d'une façon continue. L'appareil est disposé de telle façon que, quand on fait tourner le plateau autour de l'axe O pour augmenter la quantité dont il recouvre la spirale L, c'est-à-dire pour diminuer la self-induction de celle-ci, la quantité dont il recouvre l'armature P' diminue et, avec elle, la capacité du condensateur C.

L'appareil permet de faire varier, simultanément et progressivement, la capacité et la self-induction du circuit. Il présente l'inconvénient que des courants de Foucault prennent naissance dans la portion du plateau qui recouvre la bobine. L'amortissement qui résulte des pertes dues aux courants de Foucault empêche la résonance d'être aiguë.

Enfin, il y a lieu de signaler un dernier type d'ondemètre, du C^t Ferrié, basé sur un principe nouveau. Cet appareil permet de lire à chaque instant, sur un cadran gradué devant lequel se déplacent deux aiguilles, la fréquence des oscilla-

tions électriques, ou, ce qui revient au même, la longueur d'onde des ondes engendrées ou agissantes.

La figure 120 indique le principe de l'appareil. Une boucle B de un ou deux tours est approchée du circuit oscillant ou de l'antenne: elle est reliée, par deux fils plus ou moins longs, aux deux bornes P et P' de l'ondemètre. A la borne P sont fixées les extrémités d'une résistance R et d'une bobine de self-induction L aboutissant l'une au point P₁ et l'autre au point P₂. A la borne P' sont fixées les extrémités de deux fils fins d'ampèremètres thermiques f_1 et f_2 aboutissant aux deux mêmes points P₁ et P₂. Aux milieux des deux fils fins sont noués des fils

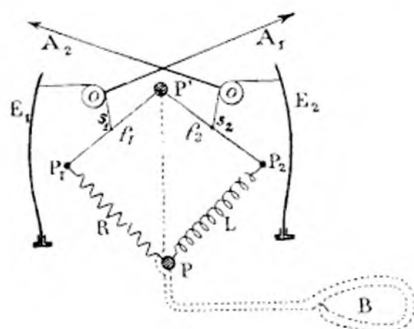


FIG. 120.

de soie s_1, s_2 , qui, après être passés sur deux petites poulies, subissent une traction constante produite par les lames élastiques E_1 et E_2 . Dès que le passage d'un courant chauffe l'un ou l'autre des fils f_1, f_2 , celui-ci se dilate et s'allonge; la poulie correspondante tourne et, avec elle, l'aiguille A_1 ou A_2 .

Entre les bornes P et P', il y a donc deux branches de circuit distinctes, l'une PP_1P' comprenant la résistance R et le fil fin f_1 , l'autre PP_2P' comprenant la bobine L et le fil fin f_2 . Par construction, la résistance R est complètement dépourvue de self-induction.

Soit l le coefficient de self-induction de la bobine L. La self-induction du fil f_2 étant absolument négligeable, la branche totale PP_2P' a pour coefficient de self-induction l : nous désignerons par r_2 sa résistance ohmique totale. Quant à la branche PP_1P' , son coefficient de self-induction

est nul par construction : nous appellerons r_1 sa résistance totale.

La boucle B étant soumise à l'action d'un circuit voisin, il se manifeste, entre les bornes P et P', une certaine différence de potentiel u qui tend à faire passer dans chacune des branches un certain courant d'intensité i_1 ou i_2 . Ainsi que cela a été expliqué au chapitre II, page 34, l'impédance opposée par la branche PP₂P' au passage du courant oscillant i_2 a pour valeur $\sqrt{r_2^2 + \omega^2 l^2}$. Les intensités i_1 et i_2 ont les valeurs suivantes :

$$i_1 = \frac{u}{r_1} ; \quad i_2 = \frac{u}{\sqrt{r_2^2 + \omega^2 l^2}}.$$

Si l'on divise l'une par l'autre ces deux expressions, le rapport des intensités a pour valeur

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{\sqrt{r_2^2 + \omega^2 l^2}}{r_1}.$$

Les résistances et la self-induction r_1 , r_2 , l , étant invariables, on voit que la grandeur du rapport des intensités de courant dans les deux branches dépend uniquement des valeurs de ω , c'est-à-dire de la fréquence des oscillations ⁽¹⁾.

Dans l'appareil imaginé par le C^t Ferrié, la grandeur de ce rapport est rendue immédiatement visible grâce à la disposition des deux fils fins agissant chacun sur une aiguille A₁ ou A₂ dont la déviation dépend de l'intensité I₁ ou I₂. Les deux aiguilles A₁A₂ se déplacent devant le même cadran et, pour chaque valeur de la fréquence, elles se croisent en un point déterminé. C'est ce point de croisement qui indique, sur une

⁽¹⁾ Comme cela a été dit au chapitre II, page 34, le symbole ω représente $2\pi f$, f étant la fréquence.

graduation appropriée, la fréquence des oscillations et, avec elle, la longueur d'onde cherchée.

Ondemètre Péri.

Dans cet appareil, la capacité et la self-induction du circuit oscillant sont simultanément et progressivement variables, comme dans l'un des ondemètres Ferrié.

Le condensateur, analogue comme construction à celui de l'ondemètre Dönitz, comprend une série de plaques fixes et une série de plaques mobiles, en forme de demi-cercles : les plaques mobiles sont supportées par un axe vertical. Au-dessus des plaques sont disposées deux bobines plates, en forme de demi-disques, dont l'une est fixe et l'autre mobile ; celle-ci est supportée également par l'axe vertical.

Quand on imprime à l'axe, au moyen d'un bouton moleté, un mouvement de rotation dans un sens donné, la surface dont les bobines se recouvrent diminue tandis que la surface dont les plaques se recouvrent augmente : la self-induction croît donc en même temps que la capacité. Inversement, si l'on fait tourner l'axe dans l'autre sens, la self-induction diminue ainsi que la capacité. Quand les deux demi-bobines se recouvrent complètement, les plaques du condensateur ne se recouvrent plus du tout ; la self-induction a sa valeur minima, et la capacité aussi.

L'indicateur de résonance consiste en un ampèremètre thermique, de faible résistance, ou bien en un tube à gaz raréfié.

Remarques sur l'emploi des ondemètres.

Tous les appareils décrits dans ce chapitre peuvent rendre,

en Radiotélégraphie, de très grands services en permettant de mesurer la longueur d'onde des mouvements vibratoires engendrés. Mais, si la plupart d'entre eux sont d'un emploi rapide et commode, il ne faut pas perdre de vue que leurs indications ne sont pas rigoureusement exactes, les appareils étant étalonnés par comparaison avec d'autres. Pour les besoins de la pratique, ces indications sont très suffisamment approchées, mais, pour des mesures théoriques, on est obligé d'avoir recours à des méthodes plus précises.

La base de ces méthodes est d'employer des circuits et des condensateurs de formes telles que l'on puisse déterminer exactement, par des calculs ou par des mesures de haute précision, les valeurs de la self-induction et de la capacité. Connaissant ces valeurs pour le cas de la résonance, on détermine la période par la formule

$$T = 2\pi\sqrt{cl},$$

et l'on en déduit la longueur d'onde

$$\lambda = vT.$$

CHAPITRE XII

SYNTONIE. — ONDES DIRIGÉES

Avec les premiers dispositifs employés en Radiotélégraphie, l'accord entre un poste transmetteur et un poste récepteur était réalisé d'une façon tout à fait imparfaite, ou même ne l'était pas du tout. Les ondes émises agissaient sur n'importe quel poste récepteur, de même qu'une antenne réceptrice se trouvait influencée par n'importe quel poste transmetteur. Il en résultait un trouble considérable dans les communications, sans qu'il fût possible d'éliminer les influences perturbatrices qui entraient en jeu et d'assurer l'échange de signaux entre deux postes déterminés.

Les recherches de tous les inventeurs se portèrent donc vers la réalisation d'un système permettant de choisir le poste avec lequel on désire communiquer, sans être gêné par les communications des postes voisins ou par les perturbations diverses.

On crut d'abord pouvoir atteindre ce but avec des *systèmes syntonisés*, c'est-à-dire dans lesquels il existe un accord très exact des antennes et des circuits. Mais bien que l'on ait obtenu dans cette voie des résultats fort importants, qui ont permis à la Radiotélégraphie d'atteindre un grand développement, on dut reconnaître que l'accord seul des antennes et des circuits ne suffirait pas pour donner une solution du problème.

On proposa alors différents dispositifs ingénieux permettant d'éliminer les oscillations nuisibles, mais l'emploi de ces dispositifs, généralement compliqués, s'est peu répandu. Dans la suite, nous les appellerons *systèmes à élimination*.

Après, on s'est décidé à chercher la solution du problème dans une autre voie, et certains inventeurs ont essayé, avec succès parfois, de concentrer, dans une direction donnée, les ondes produites par l'émetteur, ou de recevoir seulement les ondes provenant d'une direction donnée. Ces dispositifs ont été appelés *systèmes à ondes dirigées*.

Systèmes syntonisés.

On dit que deux postes sont *syntonés* ou *en syntonie* quand leurs circuits et leurs antennes sont accordés sur la même longueur d'onde. *Syntoniser* un poste, c'est l'accorder sur une longueur d'onde déterminée.

L'utilisation des effets de résonance, permet, comme cela a été vu au chapitre X, page 191, d'augmenter considérablement l'amplitude des oscillations électriques dans les antennes et les circuits, et, par suite, l'intensité des signaux émis ou reçus, c'est-à-dire la portée des communications. En outre, quand une résonance aiguë peut être obtenue, les postes récepteurs sont beaucoup moins influencés par les signaux parasites et par les signaux étrangers. On a donc été conduit à imaginer de nombreux dispositifs permettant d'utiliser le plus complètement possible les effets de résonance : ces dispositifs font partie inhérente des différents systèmes qui seront décrits brièvement au chapitre XIII.

Un premier perfectionnement, important au point de vue de la syntonie, a été réalisé par M. Marconi dans l'adoption du montage de la figure 59, où le détecteur d'ondes est

placé dans un circuit oscillant accouplé inductivement avec l'antenne.

Un autre perfectionnement extrêmement important, introduit par M. Braun, a consisté dans l'excitation indirecte (par induction) de l'antenne transmettrice.

Tous les dispositifs employés actuellement en Radiotélégraphie sont des systèmes syntonisés. En se reportant à ce qui a été dit au chapitre IX sur l'accouplement des antennes et des circuits oscillants ainsi que sur les différents réglages, il est facile de comprendre comment la syntonie est obtenue.

Mais si la réalisation d'une bonne syntonie offre d'importants avantages, elle ne peut pas empêcher un poste récepteur d'être gêné, et quelquefois même paralysé, par l'action des ondes émanant de transmetteurs plus rapprochés ou plus puissants.

En effet, par exemple, supposons que l'amplitude des oscillations engendrées dans le circuit récepteur par l'action d'un transmetteur déterminé soit cent fois plus grande quand les conditions de résonance sont remplies que quand elles ne le sont pas. La quantité d'énergie reçue variant avec le carré de la distance, on voit nettement que les communications peuvent être assurées à une distance dix fois plus grande quand le récepteur et le transmetteur sont en résonance que dans le cas contraire ⁽¹⁾. Par conséquent, les

(1) Puisque l'énergie reçue varie comme le carré de la distance, elle est cent fois plus faible pour une distance décuple. L'amplitude des oscillations dans le circuit récepteur étant cent fois plus grande dans le cas de la résonance que dans le cas contraire, pour une même quantité d'énergie en jeu, le résultat sera le même que si la distance n'était pas décuplée et si le récepteur n'était pas en résonance.

Les règlements édictés par la Convention Radiotélégraphique Internationale (1906) présentent un certain nombre de dispositions destinées à réduire autant que possible les ennuis provenant de la combinaison des signaux émanant de divers postes. Ces règlements ont fixé à 300 et 600 mètres la longueur d'onde des ondes élec-

effets produits sur un poste récepteur A sont exactement les mêmes si les ondes proviennent d'un transmetteur B avec lequel le poste récepteur est accordé, ou si elles proviennent d'un transmetteur C, avec lequel le poste récepteur n'est pas accordé, mais dont la distance est dix fois plus faible (toutes autres conditions étant égales d'ailleurs, c'est-à-dire, entre autres, la quantité d'énergie mise en jeu aux transmetteurs B et C).

Il résulte évidemment de ce qui précède que, si un poste récepteur donné peut, lorsqu'il est bien accordé, recevoir les signaux provenant d'un poste transmetteur situé à 1 000 kilomètres par exemple, il sera influencé de la même manière par les signaux provenant de tous les postes transmetteurs de même puissance compris dans un rayon de 100 kilomètres et sur lesquels il n'est pas accordé. De même, un autre poste transmetteur situé aussi à 1 000 kilomètres, mais cent fois plus puissant que le transmetteur avec lequel est accordé le poste récepteur, produira sur celui-ci le même effet, bien que l'accord ne soit pas réalisé.

Pour que l'utilisation des phénomènes de résonance conduise à une véritable syntonie, il faudrait que l'on puisse réaliser des résonances extrêmement aiguës, c'est-à-dire telles que, pour le moindre désaccord, les appareils récepteurs ne soient pas influencés. Pour reproduire l'exemple précédent, il faudrait que l'amplitude des oscillations engendrées dans le circuit récepteur par l'action d'un transmetteur déterminé soit, non pas cent fois, mais un nombre énorme

tromagnétiques employées pour la correspondance radiotélégraphique publique. Les postes côtiers ouverts au service public sont tenus de n'employer que l'une de ces longueurs d'onde. Les postes de bateaux, ouverts au service public, sont tenus d'employer une longueur d'onde de 300 mètres.

de fois plus grande quand les conditions de résonance sont remplies que quand elles ne le sont pas.

Or, dans les systèmes usuellement employés, les ondes produites présentent un amortissement considérable et ne permettent pas d'obtenir une résonance très aiguë. La courbe de résonance (voir figure 96) est d'autant plus aplatie et élargie que les ondes présentent un plus fort amortissement : il est donc impossible de réaliser un accord absolument net et exclusif, que la moindre différence de longueur d'onde suffirait à détruire, et il y a toute une gamme d'accords approximatifs, pour lesquels un ou plusieurs postes récepteurs peuvent être actionnés par les ondes émises.

D'autre part, comme cela a été expliqué au chapitre x (page 193) les ondes fortement amorties donnent lieu à des phénomènes de résonance multiple tels qu'une antenne réceptrice non accordée peut devenir le siège d'oscillations propres suffisamment intenses pour que le détecteur, situé dans le circuit secondaire, soit fortement actionné. Dans ces conditions, il n'y a pas de syntonie possible.

Pour obtenir des accords plus aigus, on s'est efforcé de réduire autant que possible l'amortissement dans les systèmes émetteurs d'ondes, en réduisant au minimum la résistance des circuits oscillants et des connexions, les pertes dans les condensateurs, etc. On est arrivé, dans cette voie, à des résultats remarquables, mais, malgré tout, les systèmes émetteurs à étincelles produisent et produiront toujours des ondes fortement amorties.

On a alors été conduit à imaginer des dispositifs permettant l'émission d'ondes entretenues, c'est-à-dire engendrées d'une façon ininterrompue et présentant une amplitude constante. Tels sont les dispositifs basés sur l'emploi de l'arc chantant, décrits au chapitre v (Thomson, Blondel,

Poulsen), qui produisent des *oscillations entretenues*. On a même été plus loin dans cette voie, et, comme nous le verrons dans l'étude des dispositifs nouvellement employés, on a cherché à engendrer directement, au moyen d'un alternateur, les courants de très grande fréquence nécessaires à la production d'ondes électromagnétiques utilisables en radiotélégraphie.

Il est facile de comprendre l'avantage de tels dispositifs qui, s'ils se prêtent mal à l'obtention des portées considérables réalisées avec les systèmes à étincelles, permettent par contre d'obtenir des résonances beaucoup plus pures et plus aiguës.

Dans tous les systèmes à étincelles, le condensateur emmagasine de l'énergie pendant un temps considérable relativement à la période des oscillations produites, et cette énergie est libérée en un temps très court par le jaillissement de l'étincelle qui équivaut à un déclenchement brusque. Les oscillations qui prennent naissance à ce moment sont en très petit nombre : leur amplitude, très grande au début, décroît avec une extrême rapidité : les variations continuelles de la résistance de l'étincelle déterminent des variations correspondantes de l'amortissement : finalement, la perturbation créée par ce déclenchement brusque est extrêmement violente, mais très courte et de nature complexe.

Dans les systèmes à oscillations entretenues au contraire, ou mieux, avec un alternateur à haute fréquence, la perturbation est engendrée d'une façon continue avec une parfaite régularité. Si l'amplitude des oscillations est infiniment moins grande que dans le cas précédent⁽¹⁾ (puisque l'énergie dépensée n'est pas accumulée pendant quelque temps pour

(1) En supposant, bien entendu, que la quantité totale d'énergie dépensée soit la même dans les deux cas (système à étincelles ou système à oscillations entretenues).

être ensuite libérée brusquement, mais qu'elle est, au contraire, dissipée au fur et à mesure), la persistance de ces oscillations permet d'obtenir des effets de résonance beaucoup plus puissants qui compensent en partie la diminution d'amplitude, surtout si l'on emploie des détecteurs d'ondes appropriés : au point de vue de la syntonie, on peut atteindre à de bien meilleurs résultats.

Du côté de la réception, les efforts ont eu aussi pour but l'obtention d'une résonance aiguë. D'une part, on s'est préoccupé de diminuer autant que possible l'amortissement. D'autre part, on s'est efforcé de trouver des détecteurs convenables.

Le cohéreur est, au seul point de vue de la syntonie, un détestable détecteur. Il répond admirablement aux ondes très amorties : l'amplitude initiale de la perturbation violente engendrée par celle-ci agit brusquement sur lui et il se cohère ; sa résistance, primitivement très élevée, tombe à une valeur très faible qui persiste jusqu'à ce qu'un choc vienne le rappeler à l'ordre ; une fois décohéré, il présente une capacité très variable. Dans ces conditions, on ne peut absolument pas obtenir un accord aigu avec un circuit contenant un cohéreur, et certains auteurs ont pu dire, avec quelque vraisemblance, que l'invention du cohéreur a été néfaste à la radiotélégraphie en retardant l'étude d'un dispositif rationnel.

Au point de vue de la syntonie, et surtout avec des oscillations persistantes ou avec des oscillations entretenues, les détecteurs d'effet total (chapitre ix, page 173) présentent d'importants avantages sur les détecteurs d'effet maximum en permettant d'utiliser plus complètement les effets de la résonance. Avec un détecteur d'effet maximum, il importe peu que les oscillations soient persistantes, puisque l'amplitude

maxima de ces oscillations intervient seule pour déterminer le fonctionnement de l'appareil qui ne tient pas compte de la quantité d'énergie reçue. Avec un détecteur d'effet total, au contraire, tel que le détecteur thermique Fessenden ou un thermo-élément, la persistance des oscillations joue un rôle beaucoup plus important que leur amplitude, l'appareil étant influencé par la quantité intégrale d'énergie reçue.

Systèmes à élimination.

Pour sélectionner le plus possible les signaux et ne laisser agir sur le détecteur que les oscillations d'une fréquence déterminée, on s'est efforcé de tirer tout le parti possible des phénomènes de résonance et, pour cela, on a proposé d'utiliser plusieurs circuits oscillants successifs accouplés inductivement entre eux et accordés les uns sur les autres.

Dans cet ordre d'idées, M. Hettinger a imaginé le montage qu'indique la figure 121. La base de l'antenne 1 est reliée à deux bobines de self-induction L_1, L_1' toujours identiques. Les extrémités 2 de ces bobines sont connectées ensemble et reliées à la terre E.

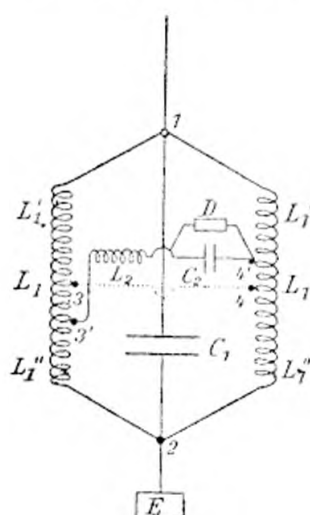


FIG. 121.

L'ensemble formé par l'antenne et les deux bobines vibre en quart d'onde. Un condensateur C_1 est placé entre les points 1 et 2, en dérivation sur les deux bobines L_1 . Sa capacité a une valeur telle que les deux circuits qu'il forme avec les bobines L_1 soient en résonance. Enfin, entre un

tour de l'une des bobines et un tour quelconque de la seconde

bobine, on branche un circuit contenant une bobine de self-induction L_2 et un condensateur C_2 de capacité telle que la condition de résonance soit encore remplie. Le détecteur D est relié au condensateur C_2 (si c'est un appareil impressionné par la tension), ou bien il est intercalé dans le circuit en un point convenable (si c'est un appareil impressionné par le courant).

Ce dispositif permet d'obtenir une résonance très aiguë.

Si l'on fait en sorte que l'amplitude des oscillations qui agissent sur le détecteur, lorsque le maximum de résonance est obtenu, soit juste suffisante pour impressionner cet appareil, il est évident que toute oscillation d'amplitude moindre restera sans effet. Donc les oscillations engendrées dans l'antenne par toute onde dont la fréquence diffère de celle pour laquelle a été réalisé l'accord, auront une amplitude trop faible pour impressionner le détecteur, et ne troubleront pas la réception.

Il est facile, avec la disposition adoptée, de réaliser le réglage convenable pour que l'amplitude des oscillations qui agissent sur le détecteur ait la valeur minima juste suffisante pour impressionner l'appareil. En effet, les deux bobines L_1 étant semblables et semblablement placées, deux points situés à la même hauteur sur ces bobines sont au même potentiel. Par conséquent si le pont formé par C_2L_2 et le détecteur est relié à ces deux points (3 et 4 par exemple, figure 121), il n'existe entre ses extrémités aucune différence de potentiel, et aucun courant n'y circule. Si l'on déplace l'un des contacts vers le bas, et l'autre contact vers le haut, en 3' et 4' par exemple, il existe, entre les extrémités du circuit qui forme un pont entre les deux bobines, une différence de potentiel d'autant plus grande que les points 3' et 4' sont plus éloignés des points 3 et 4. Il n'est donc pas difficile de trouver la position

pour laquelle l'amplitude des oscillations agissant sur le détecteur a la valeur minima nécessaire pour que la sélection soit obtenue.

Parmi les systèmes à élimination, on peut citer encore le principe d'un montage employé par la Compagnie Fessenden (fig. 122).

La base de l'antenne A est reliée à deux branches contenant chacune un condensateur C, C' et le primaire d'un transformateur B₁, B'₁ : ces deux branches se rejoignent et sont reliées à la terre T. Les deux primaires B₁, B'₁ sont identiques. Les deux condensateurs ont des capacités légèrement différentes : l'un d'eux a une capacité telle que le circuit formé par l'antenne, sa branche et la prise de terre soit accordé exactement sur la fréquence employée ; la capacité de l'autre condensateur diffère de 5 % par exemple de celle du précédent. Les deux secondaires B₂, B'₂ sont identiques et sont connectés en opposition dans un circuit contenant un condensateur C₂ et le détecteur d'ondes D.

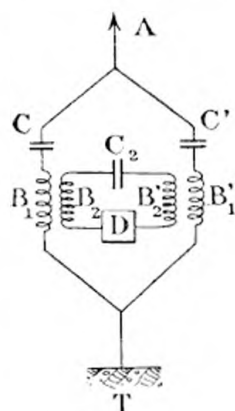


FIG. 122.

Quand les ondes qui agissent sur l'antenne proviennent du transmetteur avec lequel on doit communiquer, c'est-à-dire quand la fréquence de ces ondes est la même que celle du circuit formé par l'antenne et l'une des branches, il y a résonance, et la majeure partie du courant oscillant engendré passe par cette branche ; le secondaire du transformateur correspondant produit alors une force électromotrice dans le circuit du détecteur, qui se trouve impressionné. Au contraire, si la fréquence des ondes reçues ne concorde pas avec celle de l'un des circuits formés par l'antenne et l'une

des deux branches, le courant oscillant se répartit à peu près également entre les deux branches; les secondaires des deux transformateurs produisent des forces électromotrices égales et opposées, et le détecteur n'est pas impressionné. On peut régler la capacité de la seconde branche de façon à se débarrasser des signaux perturbateurs.

Systèmes à ondes dirigées.

Tandis que l'on s'efforçait de perfectionner les dispositifs émetteurs et récepteurs pour obtenir une bonne syntonie et éviter les perturbations dues aux signaux parasites ou étrangers, différents expérimentateurs cherchaient à réaliser un système permettant d'émettre des ondes dans une direction unique, ou de recevoir uniquement les ondes provenant d'une direction déterminée.

Dispositifs à miroirs paraboliques.

Dès ses premières expériences, Hertz a donné une solution de ce problème en plaçant le système émetteur et le système détecteur aux foyers de deux miroirs paraboliques formés par des surfaces métalliques (chapitre VII, page 111).

Ce dispositif expérimental ne pouvait pas se prêter à des applications pratiques en radiotélégraphie, à cause des dimensions énormes qu'il eût fallu donner aux miroirs, mais il a néanmoins fait l'objet de quelques essais, de la part de M. Marconi, qui, au lieu de surfaces métalliques, employait, pour la constitution de ses miroirs paraboliques, des séries de fils parallèles.

Après lui, M. S. G. Brown a employé également des sur-

faces paraboliques formées de fils verticaux de sept mètres de hauteur et a pu assurer ainsi des communications à une vingtaine de kilomètres. Il a eu l'idée ingénieuse de relier, à l'un des pôles de l'éclateur, les fils formant le miroir parabolique, de façon à les faire participer à la radiation de l'énergie et à augmenter la puissance du transmetteur.

M. F. Braun a fait des recherches dans la même voie, mais, au lieu de placer un émetteur d'ondes au foyer de la surface parabolique, constituée par des fils verticaux, il s'est servi de ces fils eux-mêmes comme radiateurs, en les excitant au moyen d'oscillations de phases différentes. Il a pu réduire le nombre de fils à cinq, et même à trois, et a obtenu des résultats intéressants avec ce dispositif, qui n'a d'ailleurs fait l'objet d'aucune application pratique.

Dispositifs à deux antennes ou à cadres.

M. Turpain a attiré l'attention, en 1898, sur les propriétés des ondes interférentes engendrées au moyen de deux fils excités par des oscillations de phases différentes. Les champs interférents avaient, d'ailleurs, déjà fait l'objet d'une étude complète de M. Blondlot. D'autre part, M. S. G. Brown a préconisé l'emploi de deux antennes situées à une distance d'une demi-longueur d'onde l'une de l'autre et mises en vibration par une excitation convenable.

Dispositif Blondel. — M. Blondel a imaginé et décrit un système permettant d'obtenir rigoureusement des ondes dirigées. Ce système repose essentiellement sur l'emploi d'un aérien formé de deux antennes verticales distantes d'une demi-longueur d'onde et excitées par des oscillations de phases opposées. Les ondes émises se neutralisent exactement dans une direction perpendiculaire au plan des antennes, tandis

que leurs actions sont concordantes et s'ajoutent l'une à l'autre dans le plan des antennes. Le système présente donc un maximum de radiation dans la direction de l'aérien, une radiation nulle dans la direction perpendiculaire, et, en un point quelconque, une radiation plus ou moins forte suivant que ce point est plus ou moins éloigné du plan de l'aérien. Un tel dispositif est souvent appelé *aérien dirigeable*.

M. Blondel a simplifié ce système pour la réception en employant un simple cadre rectangulaire ou circulaire contenant un condensateur et une bobine qui agit par induction sur le circuit du détecteur. On a reconnu qu'avec un tel cadre il est assez facile de déterminer la direction d'un poste émetteur (un bateau, par exemple), l'action produite sur le détecteur étant maxima quand le plan du cadre récepteur est dirigé vers ce poste et minima dans la position perpendiculaire.

Pour éviter le déplacement du cadre, M. Blondel et le commandant Ferrié ont, dans la suite, utilisé deux cadres⁽¹⁾ faisant entre eux un angle quelconque et agissant simultanément sur le circuit du détecteur. L'action différentielle des deux cadres sur cet appareil varie suivant la position qu'occupe le poste émetteur par rapport à leurs plans et, grâce à un dispositif approprié, on peut en déduire la direction du poste émetteur.

Dispositif Artom. — M. Artom, au moyen de deux antennes convenablement excitées, est parvenu à produire des ondes dirigées et a obtenu d'intéressants résultats expérimentaux.

Le transmetteur comprend en principe deux antennes placées en croix perpendiculairement l'une à l'autre : chacune de ces antennes est le siège d'oscillations de même fré-

(¹) L'emploi de deux cadres a été indiqué pour la première fois par MM. Bellini et Tosi, dont le système est décrit plus loin.

quence, mais dont les phases diffèrent d'un quart de période. Les ondes produites se propagent suivant une direction perpendiculaire au plan des deux antennes croisées.

Pour engendrer des oscillations différant en phase d'un quart de période, l'inventeur emploie deux circuits oscillants combinés ensemble et reliés à un éclateur à trois électrodes : l'un des circuits contient un condensateur et l'autre une bobine de self-induction ; tous deux agissent inductivement sur les antennes.

Les différents dispositifs dont il vient d'être question présentent tous l'inconvénient capital de ne pouvoir être utilisés que dans une direction unique bien déterminée : ils ne peuvent donc être adoptés que dans des postes destinés à communiquer exclusivement ensemble, ce qui est fort rare.

Pour pouvoir communiquer à volonté dans une direction choisie, il faudrait disposer d'un certain nombre d'antennes et les grouper ensemble de différentes façons suivant les différentes orientations à donner aux signaux : cela est à peu près irréalisable en pratique. En outre, la présence d'antennes inactives constituerait une source de troubles, ces antennes entrant en vibration et influençant les antennes actives.

Antennes horizontales.

M. Garcia a signalé en 1902 que, si un fil horizontal est relié par l'une de ses extrémités à un éclateur dont l'autre électrode est connectée à la terre (fig. 123), l'intensité de la radiation est maxima dans le plan vertical du fil horizontal, du côté de l'extrémité reliée à l'éclateur, et minima dans les directions perpendiculaires à ce plan ou dans la direction de l'extrémité libre du fil.

Dispositif Marconi. — La disposition précédente a été utilisée plus tard par M. Marconi, qui a étudié le fonctionnement d'une telle antenne utilisée soit pour la transmission, soit pour la réception.

Dans une première série d'expériences, il a employé une *antenne transmettrice horizontale* de 60 mètres de longueur placée à 1^m,50 du sol, dont l'extrémité libre B (fig. 123) pouvait être orientée successivement dans toutes les directions.

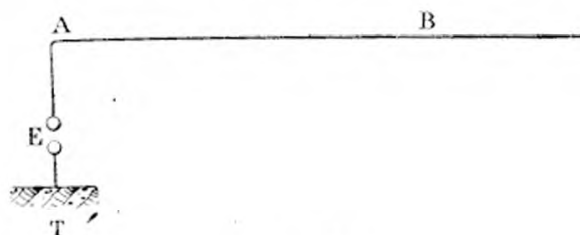


FIG. 123.

L'autre extrémité A aboutissait à un éclateur E relié à la terre T. On maintenait la quantité d'énergie dépensée dans cette antenne aussi constante que possible, et, au moyen d'une *antenne réceptrice verticale* ordinaire, reliée à un appareil de mesure ⁽¹⁾, on déterminait la quantité d'énergie reçue dans différentes directions autour de l'antenne transmettrice.

Si, autour d'un point central représentant la projection verticale de l'extrémité A de l'antenne, on trace un certain nombre de rayons sur lesquels on porte, à partir du centre, des longueurs proportionnelles à la quantité d'énergie me-

(1) L'appareil de mesure était un *thermo-galvanomètre* de Duddell. Cet appareil comprend un puissant aimant entre les branches duquel est suspendue une boucle de fil dont les extrémités aboutissent à un élément thermo-électrique. Au-dessous de cet élément, est placé un circuit de chauffage parcouru par les oscillations électriques. La chaleur engendrée dans ce circuit par le passage du courant oscillant agit sur l'élément thermo-électrique, lequel produit dans la boucle un courant d'intensité proportionnelle à la quantité de chaleur engendrée. Sous l'effet de ce courant, réagissant sur le champ magnétique de l'aimant, la boucle tourne d'un certain angle qui permet de mesurer la quantité d'énergie reçue par l'antenne.

surée sur l'antenne réceptrice, et si l'on relie entre eux tous les points ainsi déterminés, on obtient une courbe analogue à celle de la figure 124, qui montre la *répartition de l'énergie transmise dans l'espace environnant l'antenne*.

Dans une deuxième série d'expériences, M. Marconi a em-

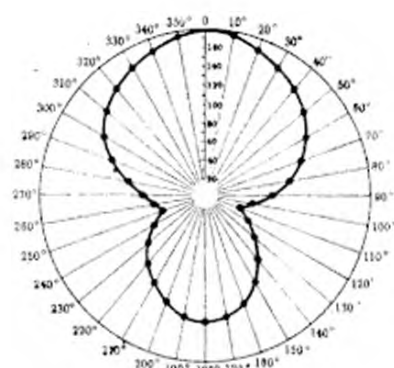


FIG. 124.

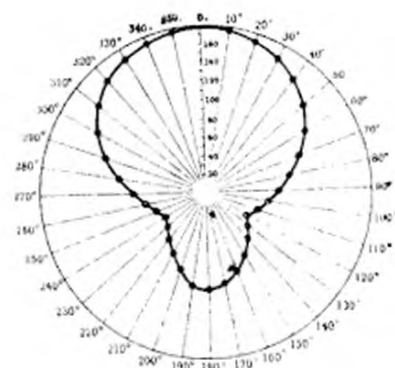


FIG. 125.

ployé une *antenne transmettrice horizontale* et une *antenne réceptrice horizontale*, ayant chacune 30 mètres de longueur et placées à 1^m,50 de la terre. En laissant l'antenne trans-

mettrice immobile et en orientant l'antenne réceptrice suivant toutes les directions, il a obtenu, pour la quantité d'énergie reçue, la courbe qu'indique la figure 125.

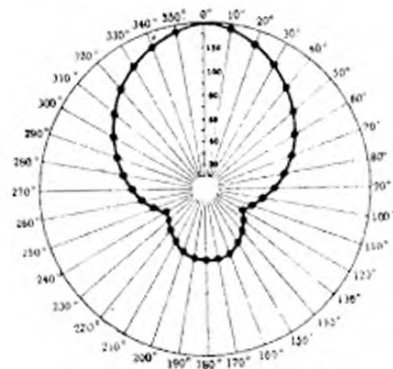


FIG. 126.

hauteur et une *antenne réceptrice horizontale* de 30 mètres de longueur, placée à 1^m,50 du sol et orientée successivement dans toutes directions. La courbe indiquant la variation de la quantité d'énergie reçue est donnée par la figure 126.

Enfin, dans une troisième série d'expériences, M. Marconi a employé une *antenne transmettrice verticale* fixe de 44 mètres de

En examinant les différents diagrammes des figures 124, 125 et 126, on se rend compte qu'il existe nettement une direction pour laquelle les ondes émises ou reçues présentent un maximum d'intensité: cette direction est opposée à la direction de l'extrémité libre de l'antenne. Pour que les effets soient bien marqués, il est nécessaire que la longueur des fils horizontaux soit grande par rapport à leur distance du sol.

Comme nous le verrons plus loin, les antennes horizontales ont été employées par M. Marconi dans deux puissants postes transatlantiques qui doivent communiquer exclusivement entre eux.

Dispositif Bellini-Tosi.

Ce dispositif est, à l'heure actuelle, le plus remarquable comme principe et comme résultats: il permet, avec deux

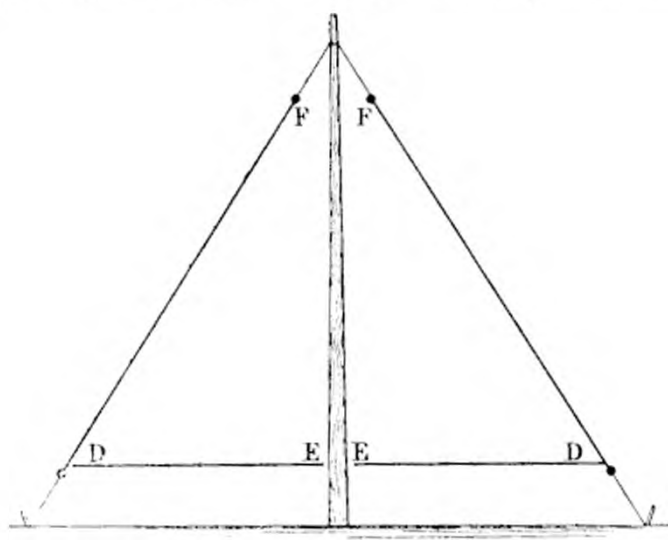


FIG. 127.

couples d'antennes fixes, de communiquer dans n'importe quelle direction choisie arbitrairement.

Le système aérien est formé de deux cadres fermés égaux ou de deux couples d'antennes. Les plans de ces deux cadres ou couples sont perpendiculaires l'un à l'autre, et leurs deux

portions sont symétriques par rapport à la ligne d'intersection des deux plans.

La figure 127 représente schématiquement un aérien formé d'un couple d'antennes EEDDF' supportées par un seul pylone; la figure 128 montre l'ensemble des deux aériens

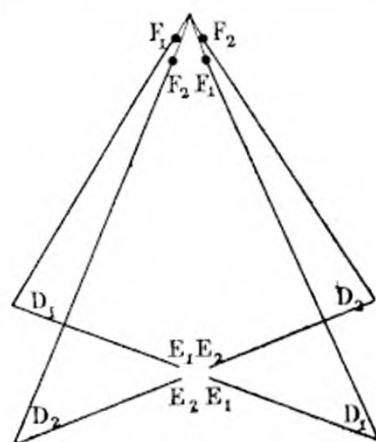


FIG. 128.

supportés également par un pylone commun. Les extrémités supérieures F des antennes sont soigneusement isolées: les extrémités inférieures E aboutissent à des bobines reliées inductivement aux circuits récepteur ou transmetteur, comme cela va être expliqué. La portée des communications est beaucoup plus grande si l'on emploie deux

aériens en forme de cadres rectangulaires, supportés par quatre pylones, au lieu d'aériens de forme triangulaire supportés par un seul pylone: c'est cette disposition qui est toujours utilisée en pratique, mais la forme triangulaire a été adoptée sur les figures pour simplifier les schémas.

Transmission. — Si l'on met en vibration un seul des aériens (cadre ou couple d'antennes), la radiation présente une valeur maxima dans le plan de cet aérien, comme cela a été expliqué: elle est nulle dans les directions perpendiculaires.

Si l'on excite simultanément les deux aériens, les ondes produites par chacun d'eux interfèrent entre elles: elles se renforcent en certains points et se détruisent en d'autres. Il en résulte que l'émission résultante présente un maximum dans un plan situé entre les plans des deux cadres ou couples: si les excitations des deux aériens sont égales, ce plan est à égale distance des cadres ou couples; si elles sont inégales,

il occupe, dans l'angle des plans des deux aériens, une position qui dépend de la différence des excitations.

Par exemple, si l'on représente par la droite $D_1E_1E_1D_1$ (fig. 129) la projection verticale de l'aérien $F_1D_1E_1E_1D_1F_1$ de la figure 128, et par la droite $D_2E_2E_2D_2$ la projection verticale de l'aérien $F_2D_2E_2E_2D_2F_2$, les ondes résultantes présentent un maximum dans la direction OR et un maximum dans la direction OR' . Dans les directions perpendiculaires, l'émission est nulle.

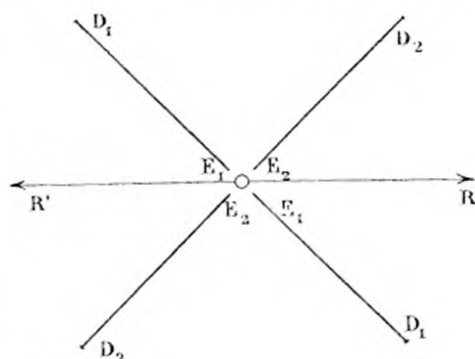


FIG. 129.

Si les excitations des deux aériens sont égales, les directions OR et OR' sont à égale distance des plans des aériens: si les excitations sont inégales, les directions OR et OR' se rapprochent de $D_1E_1E_1D_1$ ou de $D_2E_2E_2D_2$ suivant que l'excitation de l'un ou l'autre des aériens est la plus forte: quand l'excitation de l'aérien $D_2E_2E_2D_2$ est nulle, les directions OR et OR' coïncident avec $D_1E_1E_1D_1$; inversement, quand l'excitation de $D_1E_1E_1D_1$ est nulle, elles coïncident avec $D_2E_2E_2D_2$.

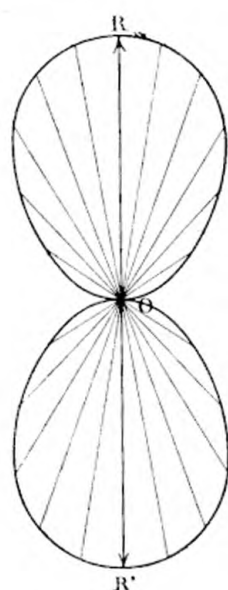


FIG. 130.

Si l'on trace, comme cela a été expliqué à propos des antennes coudées, la courbe représentative de la répartition de l'énergie autour du système émetteur, on trouve une courbe double analogue à celle que montre la figure 130.

On comprend aisément que, pour modifier les directions OR et OR', c'est-à-dire pour braquer vers un point déterminé la direction du maximum de radiation, il suffira de modifier convenablement les excitations des deux aériens, de façon à créer entre elles la différence nécessaire.

Les inventeurs ont résolu ce problème d'une façon simple et ingénieuse au moyen d'un dispositif appelé *Radiogoniomètre*.

Ce dispositif comprend deux bobines fixes, égales, perpendiculaires l'une à l'autre, reliées chacune à l'un des aériens au milieu de sa portion horizontale inférieure (fig. 131). A

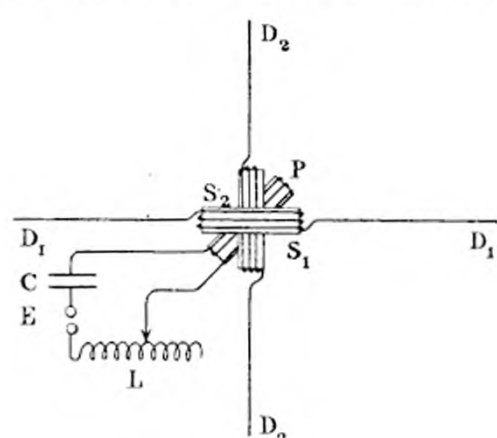


FIG. 131.

l'intérieur de ces deux bobines S_1S_2 est disposée une troisième bobine P, beaucoup plus petite, qui peut pivoter autour du diamètre commun des bobines S_1S_2 . Sur la figure 131, cette bobine a été représentée, pour plus de commodité, de même grandeur que les bobines S_1

et S_2 , mais, dans la réalité, ces dernières sont larges et de grand diamètre, tandis que la bobine P est petite, de façon à pouvoir se mouvoir tout entière dans la portion commune des deux précédentes. La bobine P, reliée à un circuit oscillant CEL, agit comme primaire sur les deux bobines secondaires S_1S_2 , intercalées dans les deux aériens.

Quand la bobine P est parcourue par des courants oscillants, les deux aériens sont excités et entrent en vibration. L'émission résultante conserve une intensité constante et que sa direction coïncide toujours avec le plan d'enroulement de la bobine mobile, cette direction tournant avec lui.

Le système des deux aériens excités au moyen du radio-goniomètre équivaut donc à un seul aérien dirigeable à cadre ou à couple d'antennes orienté suivant la bobine mobile. La rotation de cette bobine équivaut à la rotation de l'aérien dirigeable et il suffit de viser avec la bobine mobile le point vers lequel on désire obtenir le maximum de radiation.

Réception. — Pour la réception, le dispositif adopté est identique au précédent. Deux bobines égales, perpendiculaires entre elles, sont reliées chacune à l'un des aériens (cadre ou couple d'antennes) : dans les parties superposées de ces deux bobines, agissant comme primaires, se déplace une petite bobine qui agit comme secondaire : celle-ci est reliée à un circuit oscillant CLG contenant le détecteur G (fig. 132).

Quand les ondes provenant d'un transmetteur impressionnent les deux aériens, ceux-ci sont mis en vibration et chaque bobine primaire est parcourue par un courant oscillant. Les champs magnétiques en-

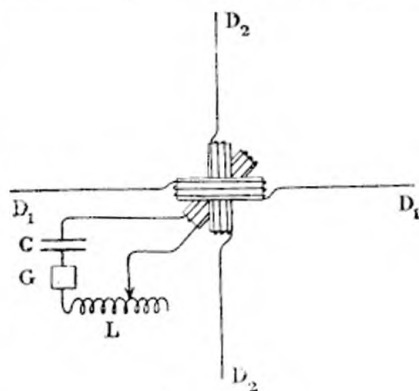


FIG. 132.

gendrés par ces deux courants agissent simultanément sur la bobine secondaire, et les oscillations induites dans cette bobine présentent une intensité d'autant plus grande que sa direction se rapproche plus de la direction du poste émetteur. Le détecteur indique donc un maximum d'effet quand la bobine mobile est orientée vers le poste émetteur, et un effet nul quand la bobine est perpendiculaire à cette dernière position. On peut ainsi reconnaître très nettement la direction d'un poste qui transmet.

Ce dispositif pourrait rendre de très grands services aux bateaux en leur permettant de se repérer par rapport aux postes radiotélégraphiques fixes du littoral, mais le placement des deux couples d'antennes à bord présente de très grandes difficultés.

On remarquera que, pour la transmission comme pour la réception, le système Bellini-Tosi n'emploie pas de prise de terre. Ceci est avantageux dans toutes les contrées où le sol sec ou rocheux ne permet pas l'établissement d'une bonne prise de terre.

Des considérations théoriques et des expériences pratiques ont montré que, pour une dépense d'énergie donnée, la portée est plus grande avec des couples d'aériens du système Bellini-

Tosi qu'avec une seule antenne verticale ordinaire.

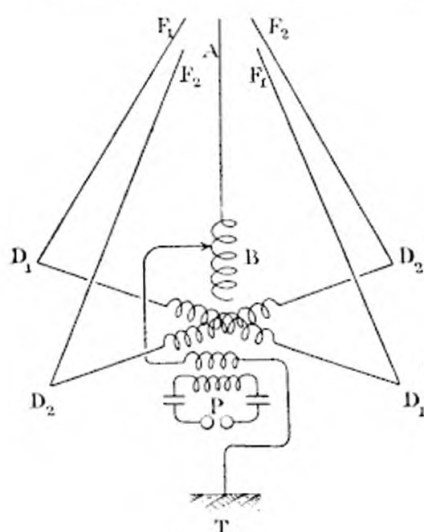


FIG. 133.

Les inventeurs ont complété leur dispositif de la façon suivante :

Le système aérien qui vient d'être décrit rayonne également en avant et en arrière, comme le montre le diagramme de la figure 130. Pour qu'il rayonne seulement en avant et pas en arrière, MM. Bellini et Tosi

ont adjoint à leurs deux aériens rectangulaires une antenne verticale A, placée à l'intersection de leurs plans (fig. 133): cette antenne est mise en vibration par une excitation convenable.

Le fonctionnement de ce dispositif est le suivant. Les deux aériens $F_1D_1D_1F_1$ et $F_2D_2D_2F_2$ produisent une radiation dont la

répartition dans l'espace est indiquée par la double courbe en trait interrompu (fig. 134) : l'antenne A produit une radiation, uniforme dans toutes les directions, que représente le cercle figuré en pointillé. La radiation résultante est la combinaison des deux précédentes : en avant du système aérien, celles-ci s'ajoutent ; en arrière elles se retranchent. Il en résulte que, si l'excitation de l'antenne simple A est convenablement choisie, les deux radiations composantes s'annulent l'une l'autre en arrière du système aérien, et la répartition de la radiation résultante correspond à la courbe en trait plein de la figure 134.

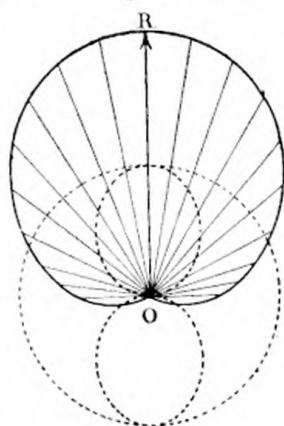


FIG. 134.

Pour la réception, le dispositif est le même. Le circuit oscillant, auquel sont accouplées inductivement les diverses portions du système aérien, contient un détecteur au lieu d'un éclateur.

Dans l'un et l'autre cas, on peut faire varier, comme précédemment, la direction de transmission ou de réception en changeant l'orientation de la bobine mobile du radiogoniomètre.

CHAPITRE XIII

DISPOSITIFS SUCCESSIVEMENT EMPLOYÉS EN RADIOTÉLÉGRAPHIE

Comme cela a été dit au chapitre ix, c'est à M. Marconi que revient l'honneur d'avoir établi les premières communications radiotélégraphiques à des distances relativement importantes. Mais, en 1898, plusieurs ingénieurs s'attachaient à l'étude du même problème et leurs travaux aboutissaient à des perfectionnements intéressants qui ont donné naissance aux dispositifs actuels.

Nous allons passer rapidement en revue les principaux résultats obtenus par ces expérimentateurs, en nous limitant à ceux qui ont fait l'objet d'applications pratiques.

Dispositifs Slaby et Arco.

M. Slaby semble avoir signalé le premier que, dans les montages employés pour la réception, avec un cohéreur intercalé entre la terre et l'antenne, cet appareil se trouvait à un nœud de tension. Les résultats obtenus malgré cette disposition essentiellement défectueuse étaient dus, d'après lui, au fait que l'antenne réceptrice n'avait pas exactement la même longueur que l'antenne transmettrice et que, dans ces conditions, des variations de potentiel étaient provoquées à sa

base par des ondes parasites issues du transmetteur. M. Slaby a indiqué qu'il faut placer le cohéreur à un ventre de tension, et, pour cela, il a employé le dispositif suivant :

L'antenne réceptrice CD étant connectée en C à une bonne prise de terre (fig. 135), de façon à présenter en ce point un nœud de tension, on lui adjoint un fil horizontal CE de longueur égale à CD. Lorsque l'antenne verticale CD vibre sous l'action des ondes électromagnétiques, le fil CE entre aussi en vibration, et, comme l'antenne, il présente à son extrémité libre un ventre de tension (la répartition de la tension le long de l'antenne ou du fil est figurée en pointillé). Il suffit donc de placer le cohéreur en ce point pour obtenir le maximum d'effet.

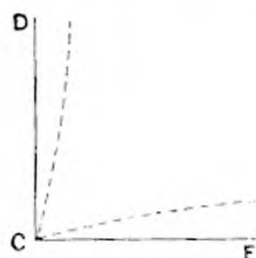


FIG. 135.

Si l'antenne réceptrice verticale CD (fig. 136) est plus courte que l'antenne transmettrice, c'est-à-dire plus petite

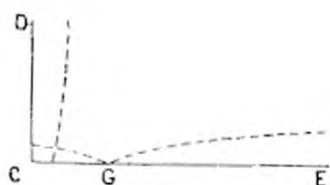


FIG. 136.

que le quart de la longueur d'onde de la perturbation électromagnétique, il se produit un ventre de tension en E sur le fil horizontal, à condition que la longueur totale DCE soit égale à une demi-longueur d'onde et que la liaison à la

terre soit faite en G et non en C. Néanmoins, si la liaison à la terre est faite au point C, le ventre de tension qui existe en E n'est que peu affaibli.

Enfin, si le fil horizontal est relié à l'antenne en un point situé à une certaine distance de la prise de terre, c'est-à-dire en un point où la tension a déjà une certaine valeur, la longueur de ce fil devra être un peu inférieure au quart de la longueur d'onde pour que son extrémité E présente un ven-

tre de tension, comme on s'en rend compte par l'examen de la figure 137. Le fil CE n'est pas forcément rectiligne : il peut être remplacé par une bobine équivalente.

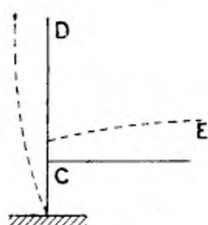


FIG. 137.

Le montage de M. Slaby permet d'utiliser comme antenne un conducteur déjà existant, relié à la terre et convenablement isolé des corps environnants, tel qu'un paratonnerre ou une tige métallique verticale. Ce dispositif offre, en outre, l'avantage que les oscillations engendrées dans l'antenne par des perturbations atmosphériques ou des charges statiques s'écoulent à la terre directement sans influencer le cohéreur : en effet, ces oscillations ont une fréquence relativement faible et provoquent des vibrations de faible amplitude sur le fil horizontal, qui n'est pas accordé pour leur fréquence.

Si l'on ne dispose pas d'une bonne prise de terre, on peut, comme le montre la figure 138, prolonger encore le conducteur CE par un conducteur (enroulé sous forme d'une bobine) dont la longueur équivaut au quart de la longueur d'onde. On obtient ainsi en J, à l'extrémité de ce conducteur, un nœud de tension, et il suffit d'intercaler le cohéreur entre les points E et J.



FIG. 138.

Se basant sur les considérations qui précèdent, M. Slaby établissait en 1900 ses postes transmetteur et récepteur de la façon suivante :

Au poste transmetteur, un fil vertical A aboutissait à une bonne prise de terre : une bobine de réglage B, permettant de modifier à volonté la longueur d'onde, pouvait être inter-

calée à sa base (fig. 139). Cette antenne était reliée à un circuit comprenant un éclateur E (alimenté par une bobine de Ruhmkorff), un condensateur C, une bobine de self-induction L et une prise de terre T. La capacité du condensateur ou la self-induction de la bobine pouvaient être modifiées à volonté.

Au poste récepteur (fig. 140), un conducteur vertical analogue à l'antenne transmettrice était relié à un circuit con-

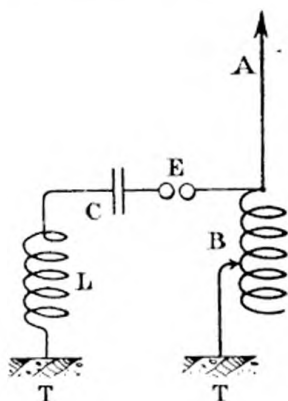


Fig. 139.

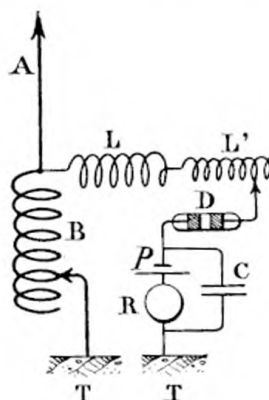


Fig. 140.

tenant une bobine invariable L, une bobine d'accord L', le cohéreur D, une pile p, un relais R et une prise de terre T : un condensateur C, branché en dérivation sur la pile et le relais, offrait un passage aux oscillations électriques.

En reliant à un même aérien deux circuits oscillants prévus pour des longueurs d'onde sensiblement différentes, MM. Slaby et Arco ont pu, grâce à un accord convenable, recevoir simultanément les signaux de deux postes transmetteurs distincts travaillant avec des longueurs d'onde différentes.

En examinant les figures 139 et 140, on voit que ce montage est exactement équivalent à celui de la figure 91,

dans lequel un circuit oscillant fermé est directement accouplé avec l'antenne. En effet, le circuit oscillant est complété par le sol compris entre les deux prises de terre, qui joue le même rôle qu'un conducteur métallique.

Dispositifs Braun.

M. Braun a eu le mérite de signaler, dès 1898, que, pour diminuer autant que possible l'absorption subie par les ondes électromagnétiques entre le poste transmetteur et le poste récepteur, il fallait augmenter la longueur d'onde, c'est-à-dire diminuer la fréquence.

Pour cela, il a été conduit à augmenter la capacité en jeu dans le système oscillant, et, ne pouvant réaliser cette augmentation avec le montage à excitation directe (antenne simple de M. Marconi), *il a imaginé d'accoupler inductivement l'antenne avec un circuit oscillant fermé* (montage schématique de la figure 92).

Ce dispositif permet de mettre une beaucoup plus grande quantité d'énergie en jeu, puisque, pour une tension déterminée, celle-ci croît avec la capacité du système oscillant : en outre, les oscillations engendrées sont beaucoup moins amorties qu'avec le montage à excitation directe, ce qui est nécessaire pour réaliser une syntonie relative; enfin on arrive à une meilleure utilisation de l'énergie primaire dépensée, si l'on accorde l'antenne et le circuit primaire de façon à obtenir une résonance bien nette ⁽¹⁾.

L'accouplement de l'antenne avec un circuit oscillant

⁽¹⁾ Pour la réception, le montage par induction offre l'avantage que les signaux parasites vont directement à la terre sans agir sur le circuit récepteur.

excitateur représente l'un des plus grands progrès réalisés en radiotélégraphie : ce mode d'excitation, qui permet d'obtenir des ondes beaucoup moins amorties, a été adopté dans tous les dispositifs employés par la suite.

Le montage des postes transmetteurs du système Braun employés en 1899 est indiqué par la figure 141. Le circuit oscillant fermé (dont l'éclateur E est relié au secondaire d'une bobine d'induction) contient des condensateurs CC' de capacité convenable et la bobine primaire B_1 agissant inductivement sur la bobine B_2 embrochée entre l'antenne et la terre.

M. Braun a indiqué aussi des dispositions basées sur l'emploi de l'accouplement direct du circuit oscillant avec l'antenne. La figure

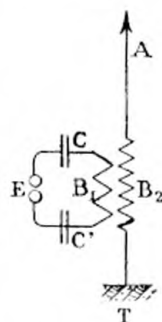


FIG. 141.

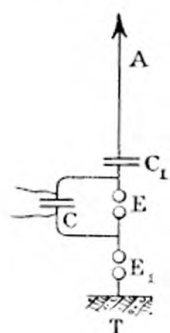


FIG. 142.

142 représente une de ces dispositions, dans laquelle un éclateur supplémentaire E_1 est intercalé sur le fil de jonction à la terre.

Pour augmenter aussi la capacité de l'antenne, M. Braun a indiqué l'emploi des antennes multiples universellement adoptées maintenant dans les postes puissants.

Dans la suite, l'auteur a employé l'un des trois modes d'accouplement suivants entre le circuit fermé et l'antenne : accouplement par induction, accouplement direct, ou combinaison des deux. D'après lui, ces dispositifs sont équivalents et ne se distinguent que par les facilités plus ou moins grandes qu'ils présentent pour le choix du degré d'accouplement.

Pour accroître la tension de charge sans modifier la fré-

quence, l'inventeur a imaginé une série de montages à éclateurs multiples dont la figure 143 donne une idée. Chacun des différents éclateurs EE_1E_2 est relié au secondaire d'une

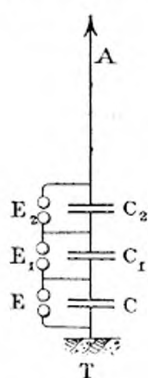


FIG. 143.

bobine de Ruhmkorff unique ; pour la charge, les condensateurs CC_1C_2 sont groupés en parallèle ; pour la décharge, ils se trouvent groupés en série, et la tension est ainsi accrue proportionnellement au nombre de condensateurs employés.

En 1902, M. Braun a établi, pour l'armée allemande, des postes portables de radiotélégraphie dont les

montages sont représentés par les figures 144 et 145.

Au transmetteur, une bobine d'induction alimente le circuit ec_1pc_2 , accouplé inductivement avec l'antenne ab ; au

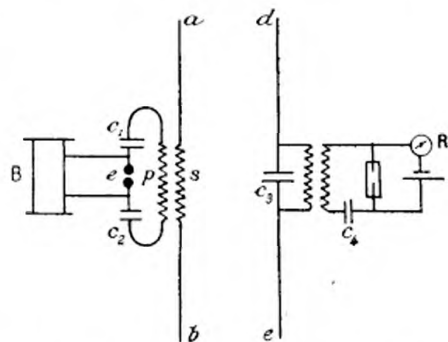


FIG. 144.

poste récepteur, l'antenne dc_3e est accouplée inductivement avec un circuit oscillant contenant un condensateur et le cohéreur ; la pile et le relais sont branchés en dérivation sur ce dernier.

FIG. 145.

Pour éviter l'emploi d'une prise de terre, M. Braun a eu recours à une disposition symétrique, le fil sb , de longueur égale au quart de la longueur d'onde, équilibrant le fil aérien sa de même longueur, de façon qu'il se produise des ventres d'oscillation en a et b , et un nœud d'oscillation en s . En pratique, le fil inférieur était remplacé par une plaque métalli-

que présentant une capacité équivalente. La même disposition était adoptée au poste récepteur.

Depuis 1904, les sociétés exploitant les brevets Slaby-Arco et les brevets Braun ont fusionné pour constituer la « Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie ». Les dispositifs adoptés par cette société ont été nommés « Système Telefunken », et seront étudiés plus loin.

Dispositifs Lodge et Muirhead.

Ces inventeurs se sont efforcés de réaliser un radiateur susceptible de produire une série d'oscillations persistantes. Dans leurs premiers brevets (1897) ils ont décrit un transmetteur et un récepteur composés chacun de deux cônes métalliques creux placés verticalement et opposés l'un à l'autre par les sommets. Les deux moitiés symétriques de l'ensemble ainsi formé étaient soigneusement isolées du sol : au poste transmetteur, chacune d'elles était connectée à l'une des boules de l'éclateur ; au poste récepteur, chacune d'elles était reliée au circuit du cohéreur, qui contenait, comme récepteur-enregistreur, un siphon-recorder ⁽¹⁾.

Ensuite, MM. Lodge et Muirhead ont employé, au circuit transmetteur et au circuit récepteur, un accouplement direct de l'antenne avec un circuit oscillant fermé, contenant un condensateur et une bobine de self-induction.

Le montage du poste transmetteur est indiqué par la

(1) Le *siphon recorder* est un galvanomètre de grande sensibilité, muni d'un siphon encreur qui enregistre les déplacements du cadre mobile. Cet appareil est employé pour la réception sur les câbles télégraphiques sous-marins.

figure 146 : l'antenne A est coupée par un condensateur C_1 , puis aboutit à l'une des armatures d'un condensateur C_2 de grande capacité, dont l'autre armature est connectée à la terre. Le circuit oscillant fermé LEC_1 , comprenant l'éclateur E (alimenté par une bobine), la bobine de self-induction L et le condensateur C_1 , est directement accouplé avec l'antenne et le réglage est fait de façon qu'il y ait résonance : ce montage est équivalent à celui que représente schématiquement la figure 91.

Au poste récepteur (fig. 147), l'antenne est coupée par un condensateur C_1 , puis aboutit, comme précédemment, à un

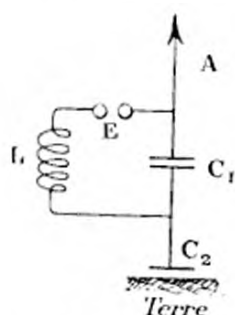


FIG. 146.

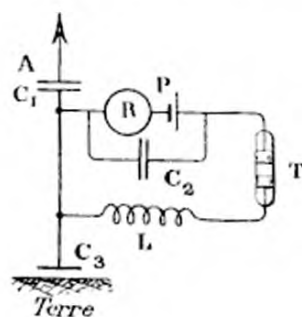


FIG. 147.

condensateur de terre C_3 . Le circuit oscillant fermé, relié à l'antenne, comprend le condensateur C_2 , le cohéreur T⁽¹⁾ et la bobine de self-induction L. Le relais R et la pile P sont montés en dérivation sur le condensateur C_2 .

Ce qu'il y a lieu de remarquer dans les montages employés par MM. Lodge et Muirhead, c'est que les antennes ne sont pas reliées directement à des prises de terre, mais aboutis-

(1) On a représenté le cohéreur sous forme d'un tube dans cette figure schématique, mais, comme on l'a vu au chapitre IX, MM. Lodge et Muirhead ont employé un cohéreur formé d'une surface de mercure, recouverte d'une mince couche d'huile et contre laquelle frotte légèrement un disque en fer. Ce détecteur est autodécroquant.

sent à des capacités reliées à la terre. En pratique, ces capacités sont formées de filets métalliques de grande surface posés sur le sol : le contact entre ces filets et la terre présentant une résistance électrique élevée, l'ensemble se comporte comme un condensateur dont une armature est constituée par la terre et l'autre par le filet métallique.

Des expériences, faites avec un filet isolé de la terre, ont montré que, dans ces conditions où l'on a bien réellement à faire à un condensateur, les résultats obtenus sont meilleurs que quand le filet est en contact avec le sol, et sont meilleurs aussi qu'avec une prise de terre médiocre. L'emploi de filets métalliques à la base des antennes est donc tout indiqué pour les postes où, par suite de la nature du terrain (rocheux ou très sec), il n'est pas possible d'établir une bonne prise de terre : de même, pour les postes transportables, tels que ceux employés dans les applications militaires, ce dispositif est recommandable.

Quelquefois, MM. Lodge et Muirhead munissent la partie supérieure de l'antenne d'une capacité superficielle semblable à la capacité inférieure et formée d'un réseau ou d'un filet métallique. Cette disposition permet d'obtenir des communications satisfaisantes avec une faible hauteur d'antenne.

En 1903, MM. Lodge et Muirhead ont établi, pour l'armée anglaise, des postes transportables permettant de communiquer à 30 kilomètres environ. La forme donnée à la partie supérieure de l'antenne est représentée par la figure 148 : la hauteur totale était de 15 mètres. La capacité inférieure remplaçant la prise de terre était constituée par un filet de fils de cuivre et par de petites plaques métalliques posées sur la terre.

Le montage des circuits du poste transmetteur et du poste récepteur est représenté par les figures 149 et 150. Pour la

transmission, l'antenne A est reliée à l'une des boules d'un éclateur E alimenté par une bobine de Ruhmkorff; l'autre

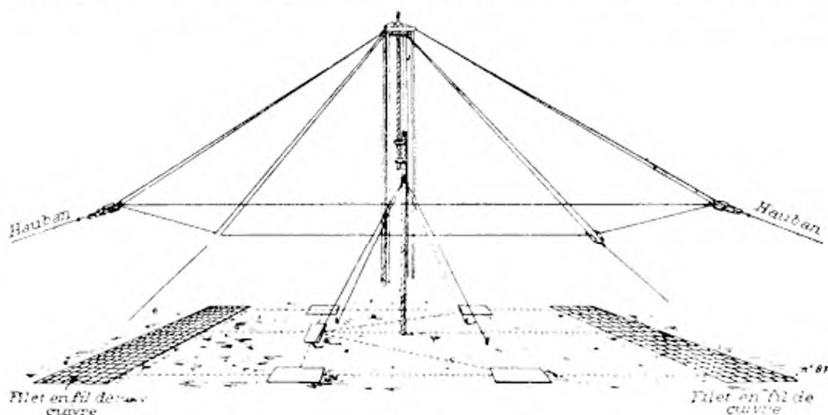


FIG. 148.

boule est connectée à la capacité de terre par l'intermédiaire d'un condensateur C et d'une bobine B. Pour la réception, elle est reliée à la bobine d'accouplement B_1 agissant induc-

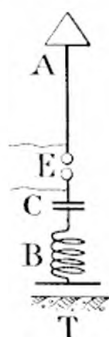


FIG. 149.

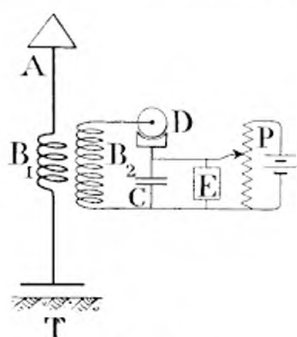


FIG. 150.

tivement sur la bobine B_2 du circuit oscillant qui contient le cohéreur D à disque tournant et un condensateur C; sur ce dernier est branché le récepteur télégraphique E (siphon-recorder) et un potentiomètre P.

Les dispositifs adoptés dernièrement par MM. Lodge et Muirhead sont représentés par les figures 151 et 152.

Pour la transmission, un alternateur alimente le primaire d'un transformateur T dont le secondaire est relié à un éclateur E embroché sur l'antenne. Le circuit primaire contient les bobines de self-induction réglables L et L' permettant d'obtenir la résonance primaire.

L'éclateur employé est un appareil à étincelles multiples, composé d'une série d'électrodes rapprochées, entre les-

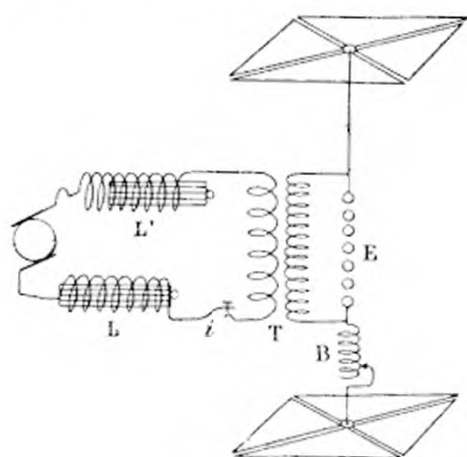


FIG. 151.

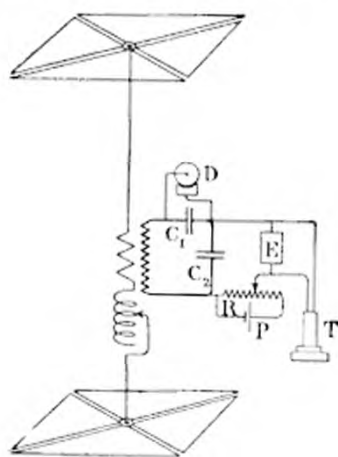


FIG. 152.

quelles jaillissent des étincelles courtes. D'après les travaux de M. Wien, l'amortissement doit être plus grand avec une série d'étincelles courtes qu'avec une seule étincelle longue correspondant au même potentiel explosif.

L'antenne est formée d'une portion horizontale de grande surface et d'un fil vertical. Une bobine d'accord B permet d'effectuer les réglages. Au lieu de prise de terre, on emploie une nappe horizontale semblable à celle de l'antenne et équilibrant celle-ci.

Pour la réception, l'antenne agit par induction sur un circuit oscillant contenant les condensateurs C_1 et C_2 . Sur le condensateur C_1 est branché le cohéreur D à roue d'acier frottant sur une surface de mercure. Le circuit est complété par un appareil enregistreur E et le téléphone T, reliés à un

potentiomètre RP. L'appareil enregistreur E consiste en un galvanomètre de grande sensibilité à aimants fixes et cadre mobile. Le cadre porte une plume très légère qui effleure une bande de papier. Chaque fois qu'un courant traverse le galvanomètre, la plume inscrit sur la bande un crochet long ou court suivant que le signal reçu représente un trait ou un point de l'alphabet Morse.

Dispositifs Marconi.

Les premiers dispositifs Marconi ont déjà été décrits au chapitre VIII.

Dans les postes établis en vue de communications à des distances relativement faibles, la compagnie Marconi a em-

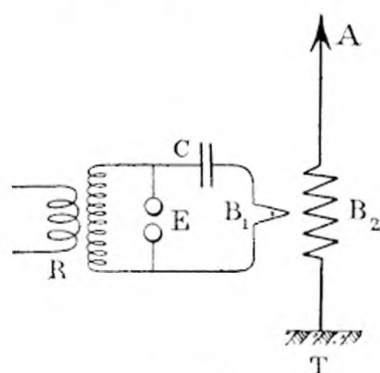


FIG. 153.

ployé, pour la transmission, le montage de la figure 153: une bobine de Ruhmkorff R alimente l'éclateur E qui fait partie d'un circuit oscillant formé du condensateur C et d'une bobine primaire B_1 (cette bobine comprenant un très petit nombre de tours de fil, souvent même un seul). L'antenne est formée de plusieurs conducteurs; sa base est reliée à la terre, et la bobine secondaire B_2 est embrochée sur elle.

Les premiers dispositifs Marconi ont déjà été décrits au chapitre VIII. Dans les postes établis en vue de communications à des distances relativement faibles, la compagnie Marconi a employé, pour la transmission, le montage de la figure 153: une bobine de Ruhmkorff R alimente l'éclateur E qui fait partie d'un circuit oscillant formé du condensateur C et d'une bobine primaire B_1 (cette bobine comprenant un

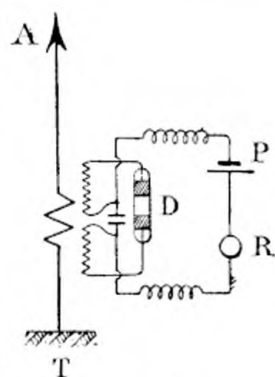


FIG. 154.

Pour la réception, la compagnie Marconi a employé le montage de la figure 154, semblable à ceux

antérieurement décrits. Dans la suite, le cohéreur a été généralement remplacé par le détecteur magnétique, qui présente une grande sensibilité et une bonne régularité de fonctionnement.

Afin d'éviter la gêne due à l'action des perturbations atmosphériques ou aux signaux parasites; M. Marconi a parfois

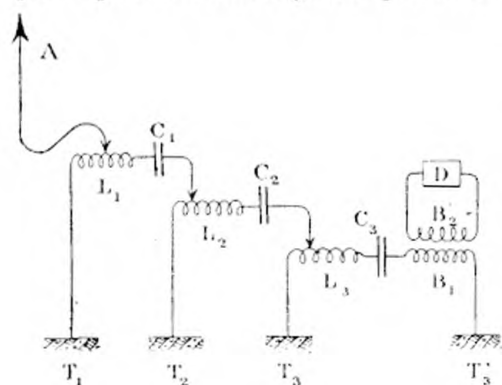


FIG. 155.

employé le montage qu'indique la figure 155. L'antenne A aboutit à un circuit partiel comprenant une prise de terre T_1 , une bobine de self-induction L_1 et un condensateur C_1 ; ce circuit aboutit lui-même à un deuxième

circuit partiel comprenant une prise de terre T_2 , une bobine de self-induction L_2 et un condensateur C_2 , etc., plusieurs circuits successifs semblables étant ainsi montés en cascade. Le dernier contient la bobine B_1 , qui agit par induction sur la bobine B_2 intercalée dans le circuit du détecteur D, et il se referme par la prise de terre T'_3 .

Avec ce dispositif, si l'antenne est influencée par une perturbation irrégulière ou par des signaux parasites dont la période diffère de la période sur laquelle le système a été accordé, les oscillations forcées engendrées dans l'antenne ne peuvent agir successivement sur toute la chaîne des circuits accouplés pour mettre le dernier en vibration, et le détecteur n'est pas influencé.

Plus tard, M. Marconi a adopté, pour la réception, le

montage indiqué par la figure 156. L'antenne A aboutit à une bobine d'accord B, un condensateur C, une bobine réglable B_1 , et la prise de terre T. Un petit éclateur E et une bobine de self-induction L, placés en dérivation sur les circuits de réception et re-

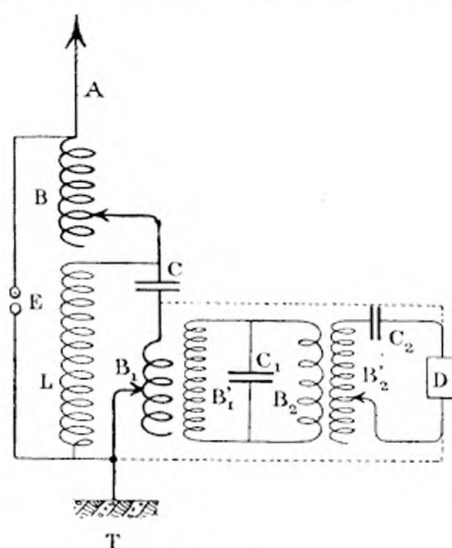


FIG. 156.

liés à la terre, agissent comme parafoudres et les protègent contre des décharges ou des actions trop puissantes.

La bobine B_1 , intercalée dans l'antenne, agit par induction sur la bobine B'_1 qui fait partie d'un circuit intermédiaire $B'_1C_1B'_2$, lequel met à son tour en vibration le circuit B'_2C_2D contenant le détecteur. Le coefficient

d'accouplement entre les bobines $B_1B'_1$ et B'_2B_2 , peut être modifié à volonté.

Un commutateur permet de relier directement le détecteur aux extrémités de la portion active de la bobine B_1 , comme l'indiquent les connexions tracées en pointillé sur le schéma de la figure 156.

Pour voir si l'antenne est influencée par quelque signal, on connecte le détecteur directement sur la bobine B_1 et l'on effectue des réglages rapides avec la bobine d'accord B et le condensateur réglable C. Si l'on veut alors conserver la communication avec le poste qui transmet et recueillir tous ses signaux en souffrant le moins possible de la présence de signaux parasites ou étrangers, on rompt la connexion directe du détecteur et l'on accorde successivement les

circuits de façon à obtenir la résonance, puis l'on diminue autant que possible l'accouplement dans les deux transformateurs⁽¹⁾.

Dans les postes destinés aux communications éloignées, la compagnie Marconi utilise exclusivement, pour la réception, le détecteur magnétique ou la valve de M. Fleming.

Le détecteur magnétique peut être employé avec les différents montages usuels (action directe, accouplement direct, accouplement par induction).

En général, l'antenne agit par induction sur un circuit oscillant contenant une bobine réglable, un condensateur réglable, et la bobine primaire à travers laquelle passe le câble d'acier (figure 78, page 162).

Le récepteur téléphonique est branché sur la bobine secondaire du détecteur.

Pour la transmission dans les postes puissants, la compagnie Marconi utilise les dispositifs Fleming avec alter-nateur.

Dispositifs Fleming.

M. Fleming, collaborateur de M. Marconi, a contribué pour une large part aux études faites en vue de l'établissement de postes de grande puissance.

(1) Le rôle du circuit oscillant intermédiaire, de même que celui des circuits successifs formant la chaîne du dispositif précédent, est de purifier autant que possible les oscillations qui agissent finalement sur le circuit des détecteurs, de façon à éliminer toute oscillation de fréquence étrangère et à ne laisser subsister que les oscillations d'une nature bien déterminée. Ce résultat n'est obtenu évidemment qu'au prix d'une perte d'énergie assez notable. On ne peut donc utiliser des montages de ce genre que quand les transmissions sont suffisamment puissantes, par rapport à la distance franchie, pour qu'on ne soit pas limité par la faiblesse des signaux reçus. En définitive, on ne se met à l'abri des perturbations dues aux signaux parasites ou étrangers qu'en désensibilisant le poste récepteur.

Le dispositif transmetteur qu'il a réalisé vers 1902 est représenté par la figure 157. Un circuit oscillant fermé est alimenté par un transformateur industriel à haute tension SS' dont le

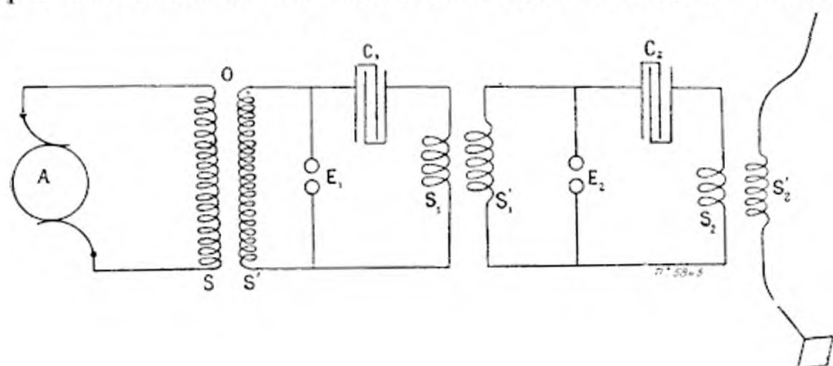


Fig. 157.

primaire est relié à un alternateur A : ce dispositif permet de mettre en jeu une quantité d'énergie infiniment plus considérable qu'avec une ou plusieurs bobines de Ruhmkorff.

Le circuit oscillant comprend un éclateur E_1 , un condensateur C_1 et une bobine S_1 qui agit par induction sur la bobine S'_1 d'un second circuit oscillant fermé : celui-ci contient un éclateur E_2 , une capacité C_2 , et la bobine primaire S_2 d'un transformateur dont le secondaire S'_2 est em-

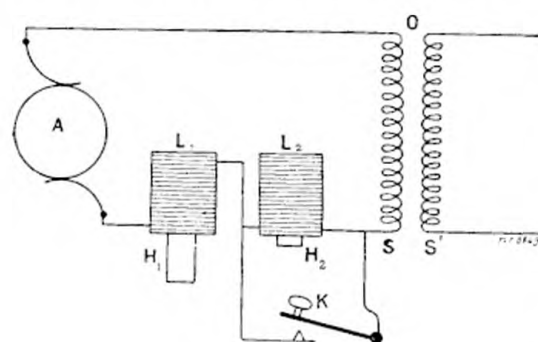


Fig. 158.

broché entre l'antenne et la terre.

En outre, le circuit primaire, c'est-à-dire le circuit qui comprend l'induit de l'alternateur et la bobine primaire S du transformateur, contient

deux bobines L_1L_2 dont on peut modifier la self-induction en y enfonçant plus ou moins les noyaux de fer H_1H_2 (fig. 158).

La self-induction de ces bobines a pour effet d'empêcher la formation, entre les boules de l'éclateur E_1 , d'un arc alimenté par le courant alternatif du générateur A⁽¹⁾: en réalité elle joue un rôle très important, en permettant d'obtenir la résonance du circuit primaire, comme cela sera expliqué plus loin.

Comme l'indique la figure 158, l'une des deux bobines de self-induction du dispositif Fleming est court-circuitée par un interrupteur que l'on manœuvre pour l'émission des signaux. Lorsque l'interrupteur est ouvert, la self-induction de cette bobine est suffisamment élevée pour réduire à une faible valeur l'intensité du courant qui alimente le primaire du transformateur; quand, au contraire, il est fermé, le courant

(1) Lorsqu'une étincelle jaillit en E_1 par suite de la décharge du condensateur C_1 , d'après le mécanisme étudié en détail au chapitre v, page 66, le secondaire S' du transformateur se trouve fermé sur le circuit conducteur constitué par l'éclateur et l'étincelle et présentant une très faible résistance. Si le générateur A était relié directement au primaire du transformateur S, l'intensité du courant qui circule dans le circuit secondaire $S'E_1$ atteindrait une grande intensité par suite de la faible résistance de ce circuit: toute la puissance que peut débiter la machine A serait absorbée pour le maintien de l'arc amorcé entre les boules de l'éclateur E_1 , et cet arc ne s'éteindrait plus. Par suite, la recharge du condensateur C_1 ne pourrait plus s'effectuer, et le dispositif n'engendrerait plus d'oscillations électriques. Si, au contraire, on intercale des bobines de self-induction entre le générateur A et le primaire du transformateur, l'action de ces bobines s'oppose, comme nous l'avons vu, à toute augmentation brusque du courant, et il ne peut pas s'établir en E_1 un arc suffisamment tenace pour empêcher le mécanisme d'échange d'énergie qui donne lieu, dans le circuit oscillant, à la production d'oscillations électriques.

Au lieu d'intercaler des bobines de self-induction, on peut employer un transformateur SS' présentant de fortes fuites (chapitre II, page 37), qui agit comme une self-induction: un tel appareil est muni d'un circuit magnétique ouvert (c'est-à-dire un simple noyau de fils de fer, comme dans une bobine de Ruhmkorff) ou d'un circuit magnétique fermé. On pourrait aussi remplacer les bobines de self-induction par des résistances de valeur élevée, mais cela offrirait des inconvénients au point de vue des pertes d'énergie.

Si l'on n'emploie pas des bobines de self-induction ou des résistances de valeur élevée, il est très difficile d'éviter la formation d'un arc et d'obtenir des étincelles franchement oscillantes, à moins qu'on ne souffle l'arc en envoyant, entre les boules de l'éclateur, un violent jet d'air ou de gaz comprimé.

passer par cette connexion directe, et il atteint l'intensité convenable pour que les oscillations engendrées donnent lieu à des ondes suffisamment puissantes.

Le circuit oscillant $S'C_1S_1$ est accordé sur la fréquence du courant produit par l'alternateur A. Le circuit oscillant $E_1C_1S_1$ est en résonance avec le circuit $S'_1C_2S_2$, et le circuit $E_2C_2S_2$ est en résonance avec l'antenne qu'il excite par l'intermédiaire du transformateur $S_2S'_2$. Le condensateur C_1 , dont la

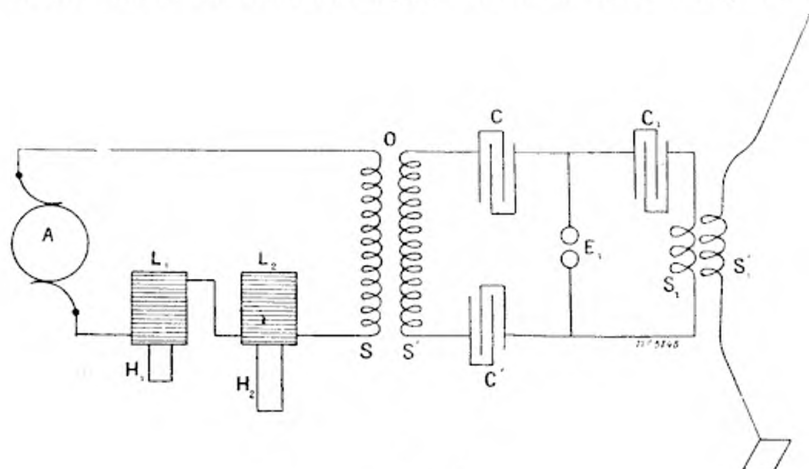


FIG. 159.

capacité est grande, accumule l'énergie fournie par l'alternateur et se décharge avec une fréquence relativement faible, par exemple 10 à 15 fois par seconde, à travers l'éclateur E_1 , donnant ainsi naissance à des oscillations dans le circuit $E_1C_1S_1$. La bobine S_1 agissant par induction sur la bobine S'_1 , ces oscillations déterminent à leur tour la charge du condensateur C_2 , lequel se décharge dans le circuit oscillant $E_2C_2S_2$ dont la bobine S_2 met l'antenne en vibration par induction.

Le dispositif précédent a été modifié comme l'indique le schéma de la figure 159. L'alternateur charge, par l'intermédiaire du transformateur O, les condensateurs $CC'C_1$ jusqu'au

moment où l'étincelle jaillit en E_1 : à ce moment, le circuit oscillant $E_1C_1S_1$ entre en vibration et agit inductivement sur l'antenne. Le circuit $S'CC_1S_1C'$ est accordé sur la fréquence de l'alternateur : le circuit oscillant $C_1E_1S_1$ est en résonance avec l'antenne.

Pour éviter l'emploi d'un interrupteur servant à émettre les signaux, M. Fleming a pensé aussi à laisser jaillir continuellement les étincelles et à diriger entre les boules de l'éclateur E_1 , lorsque l'on veut donner naissance à un train d'ondes, un jet d'air comprimé fourni par une soufflerie : tant que ce jet d'air n'agit pas, les étincelles ne sont pas oscillantes ; lorsqu'il agit, l'arc, violemment soufflé, ne peut se maintenir, et des oscillations sont engendrées.

Le dispositif qui permet de faire agir le jet d'air comprimé consiste en un tube pivotant autour d'un axe et maintenu par un ressort : quand on fait basculer le tube, son orifice est dirigé vers l'intervalle de l'éclateur ; dans la position normale, sa direction est différente.

Résonance primaire. — On peut démontrer théoriquement et vérifier expérimentalement que, dans un montage analogue à ceux des figures 157 ou 159, où un alternateur charge un condensateur par l'intermédiaire d'un transformateur, tout se passe comme si le condensateur était placé dans le circuit primaire lui-même et avait une capacité k^2 fois plus grande, k étant la valeur du rapport de transformation. Ainsi, si le transformateur a pour rapport de transformation 40, un condensateur branché sur le secondaire agit, par rapport au primaire, comme si sa capacité était 160 fois plus grande⁽¹⁾.

(1) Cela tient à ce que l'énergie accumulée dans le condensateur est proportionnelle au carré de la tension

$$E = cv^2.$$

Or le carré de la tension secondaire est k^2 fois plus grand que le carré de la tension primaire.

Si la self-induction du circuit primaire est suffisante pour que la fréquence propre d'oscillation de ce circuit soit égale à la fréquence du courant produit par l'alternateur⁽¹⁾, le circuit primaire entre en résonance : la différence de potentiel entre les extrémités de la bobine primaire du transformateur va alors en croissant jusqu'à une valeur qui peut facilement représenter 10 fois la valeur initiale. On exprime généralement ce fait en disant qu'il se produit une *surtension* de dix fois la tension normale.

La surtension produite dans ces conditions conserve la même valeur tant que la résonance persiste et qu'aucune cause ne vient troubler les phénomènes. La figure 160 re-

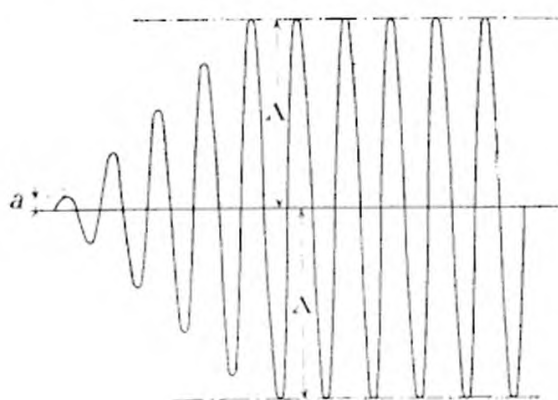


FIG. 160.

présente, par exemple, la courbe de la tension primaire du transformateur. La tension initiale a est celle de l'alternateur; dès que la résonance se produit, elle va en croissant rapidement et atteint une valeur li-

mite A au bout d'un temps relativement court, égal par exemple à cinq fois la période (c'est-à-dire un dixième de

(¹) Les courants alternatifs produits par un alternateur normal ayant une fréquence très basse (environ 50 par seconde, en général) c'est-à-dire une période très longue (1/50 seconde) il faut que les valeurs de la capacité et de la self-induction du circuit soient très élevées pour qu'il y ait résonance. En effet on voit, d'après la formule de la période

$$T = 2\pi \sqrt{cl}$$

que, pour que la valeur de T soit grande, la valeur du produit (cl) doit être grande. La valeur de la capacité apparente c dans le circuit primaire est grande, puisqu'elle est égale à la valeur de la capacité réelle du condensateur multipliée par le carré du

seconde, si l'alternateur produit du courant à 50 périodes par seconde).

Par exemple, la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur A (fig. 158) sera de 200 volts, et la différence de potentiel aux bornes du primaire S du transformateur sera de 2 000 volts pour une surtension de dix.

Il est évident que la tension secondaire du transformateur suit l'exemple de la tension primaire, à laquelle elle est proportionnelle. Pour un rapport de transformation de 40, la différence de potentiel au secondaire sera de 80 000 volts dans le cas de la résonance primaire, alors qu'elle serait de 8 000 volts sans résonance. On voit l'intérêt que présente la résonance primaire, puisqu'elle permet de charger le condensateur à une très haute tension sans avoir un transformateur présentant un rapport de transformation anormalement élevé. Bien entendu, l'isolement des bobines du transformateur devra être prévu pour résister aux tensions de résonance.

Dans ce qui précède, nous avons considéré le cas où le transformateur charge un condensateur, en l'absence de tout circuit accouplé, ce qui revient à supposer les boules de l'éclateur suffisamment écartées pour que l'étincelle ne puisse pas jaillir sous la tension de résonance. Mais si l'on rapproche ces boules de façon que la distance explosive soit inférieure à la valeur de la tension limite A (fig. 160) multipliée par le rapport de transformation, des étincelles jailliront entre elles chaque fois que la tension atteindra une valeur suffisante A' .

rapport de transformation. Quant à la valeur de la self-induction L , on peut la rendre grande, soit en employant un alternateur ou un transformateur à très fortes fuites magnétiques, soit en intercalant, comme l'a fait M. Fleming, une bobine de forte self-induction dans le circuit. Cette dernière méthode est de beaucoup la plus pratique et se prête à un réglage très facile, puisqu'il suffit de déplacer un noyau de fer jusqu'à ce que la résonance soit obtenue.

Étudions ce qui se passe dans le primaire (fig. 161). Par l'effet de la résonance, la tension va en croissant pendant un certain nombre de périodes, quatre par exemple, jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur A' pour laquelle une étincelle jaillit à l'éclateur. A ce moment, les tensions secondaire et

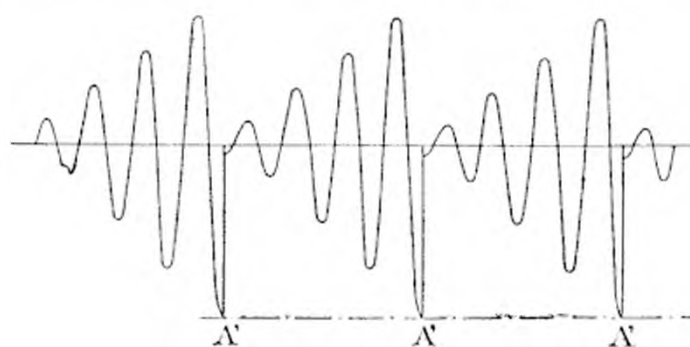


FIG. 161.

primaire tombent brusquement à une valeur à peu près nulle. Ensuite, elles recommencent à croître pendant quatre périodes jusqu'à la valeur A' de la tension primaire pour laquelle une étincelle jaillit à nouveau.

Dans l'exemple choisi, une étincelle (ou une décharge) éclate toutes les quatre périodes, c'est-à-dire qu'il y a une douzaine d'étincelles par seconde (si le courant de l'alternateur a pour fréquence 50). En écartant ou en rapprochant les boules de l'éclateur, on diminue ou l'on augmente le nombre d'étincelles produites par seconde, puisqu'il faut plus ou moins de temps pour que la tension ait atteint la valeur nécessaire au déclenchement de l'étincelle⁽¹⁾.

(1) Les phénomènes de résonance primaire, obtenus au moyen d'une bobine de self-induction réglable, ont été utilisés dès 1896 par le Dr d'Arsonval. En 1900, il a fait à ce sujet des expériences frappantes avec un éclateur dont les deux électrodes étaient fixées à l'extrémité d'un bras tournant autour d'un axe comme une aile de moulin (ce dispositif permettait d'obtenir un soufflage énergique des étincelles). Par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, on voyait un certain nombre d'étincelles réparties sur une circonférence, et ce nombre pouvait être raréfié à volonté par le réglage de la self-induction et de la distance explosive.

En général, on cherche à avoir des étincelles peu fréquentes, de façon à obtenir la plus forte tension de charge possible du condensateur, et à réduire l'échauffement des électrodes de l'éclateur. De là le nom de *système à étincelles raréfiées* sous lequel on désigne souvent ce dispositif. La tension explosive étant bien supérieure à celle que produit normalement le transformateur, et la raréfaction des étincelles évitant l'échauffement des électrodes et de l'air interposé, il ne peut pas se former d'arc permanent, et les décharges sont franchement oscillantes.

Il est à peine besoin de faire remarquer que, plus la résonance primaire est nette, plus la surtension obtenue est importante. Les postes radiotélégraphiques normaux fonctionnent avec des surtensions comprises entre 5 et 8 environ et effectuent les réglages pour avoir de 10 à 20 étincelles par seconde.

A propos de résonance primaire, il n'est pas superflu de signaler que des surtensions analogues peuvent être obtenues avec des bobines d'induction convenablement construites et munies d'interrupteurs appropriés : la fréquence du courant primaire est celle des ruptures produites par l'interrupteur.

Les dispositifs imaginés par M. Fleming pour la réception (fig. 162) reposent sur l'emploi du détecteur à vide (valve) décrit au chapitre IX, page 169.

L'antenne A aboutit à la bobine B_1 qui agit par induction sur la bobine B_2 , laquelle forme, avec le condensateur C, un circuit oscillant. Un second circuit oscillant, accouplé sur le condensateur C, contient le détecteur à vide D, un condensateur C', et une bobine agissant par induction sur le circuit du récepteur téléphonique E. Une pile auxiliaire P fournit

le courant nécessaire pour maintenir incandescent le filament du détecteur.

Ce montage a été modifié par M. Fleming pour l'emploi du détecteur à filament de tungstène entouré d'un cylindre de cuivre. Le récepteur téléphonique est introduit dans le circuit oscillant, ainsi qu'une portion de la résistance R connectée à la pile et formant potentiomètre (fig. 163). La même

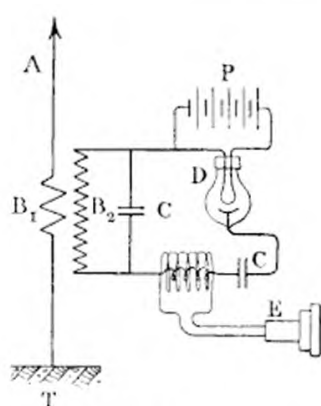


FIG. 162.

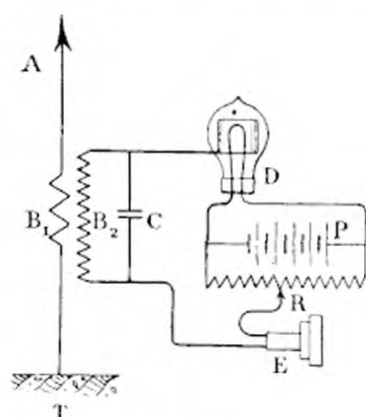


FIG. 163.

pile fournit le courant nécessaire pour porter à l'incandescence le filament du détecteur.

M. Fleming a indiqué aussi un dispositif qui permet d'utiliser la totalité de l'énergie des ondes agissantes.

Comme cela a été expliqué (page 183), une antenne transmettrice accouplée à un circuit oscillant émet deux ondes de fréquences différentes ayant des longueurs d'onde :

$$\lambda_1 = \lambda \sqrt{1+k}; \quad \lambda_2 = \lambda \sqrt{1-k}.$$

Il est à peu près impossible d'accorder l'antenne réceptrice de façon que les fréquences de ses deux groupes d'oscillations propres correspondent exactement aux fréquences des deux ondes agissantes. C'est pourquoi l'on accorde

l'antenne réceptrice sur une seule des deux ondes, et l'énergie transmise par la seconde reste inutilisée.

Dans le nouveau dispositif Fleming, il est possible d'utiliser l'énergie des deux ondes, ayant pour longueurs d'onde λ_1 et λ_2 . Ce dispositif est représenté par la figure 164. L'antenne aboutit à deux circuits récepteurs distincts ; l'un $C_1B_1L_1T$, l'autre $C_2B_2L_2T$. Chacun de ces circuits est accordé sur l'une des longueurs d'onde λ_1 ou λ_2 . Les bobines primaires B_1 et B_2 agissent, comme d'habitude, sur les bobines secondaires B'_1 et B'_2 intercalées dans les circuits des détecteurs D_1 et D_2 .

Chaque détecteur D_1 ou D_2 est relié à un téléphone E à double enroulement (¹), qui est impressionné à la fois par les deux trains d'ondes émis par l'antenne transmettrice, et utilise l'énergie totale en jeu.

Ce dispositif est avantageux à un autre point de vue : il permet d'adopter, au transmetteur, un accouplement beaucoup plus rigide, puisqu'il n'y a plus d'inconvénient à ce que les fréquences des deux ondes émises diffèrent sensiblement. De ce côté, on réalise donc encore un gain, car l'énergie transmise à l'antenne est d'autant plus grande que l'accouplement est plus rigide.

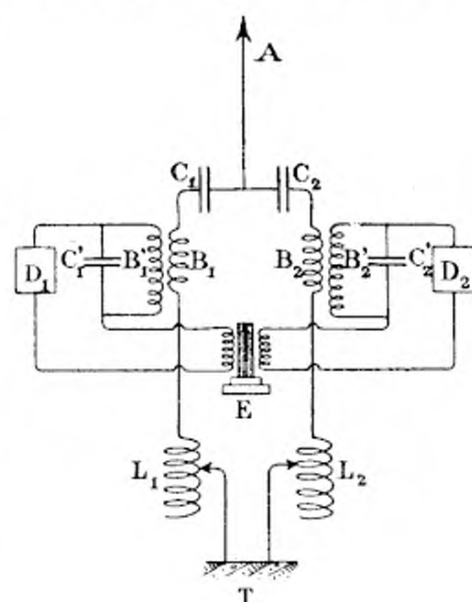


FIG. 164.

(¹) Le noyau magnétique du téléphone porte deux bobines qui agissent simultanément sur lui. La force avec laquelle il attire la membrane vibrante dépend de l'action combinée des deux bobines.

Dispositifs J. Stone Stone.

M. J. S. Stone a été l'un des premiers à adopter l'accouplement par induction de l'antenne transmettrice ou réceptrice avec un circuit oscillant fermé. Il semble aussi que, l'un des premiers, il ait vu le parti que l'on peut tirer des effets de résonance et indiqué la nécessité d'accorder les circuits de façon à en profiter. Il s'est surtout efforcé de réaliser une syntonie convenable, et d'établir des appareils permettant de produire et d'utiliser des ondes d'une fréquence unique bien déterminée.

Le système transmetteur qu'il a réalisé dans ce but est représenté par la figure 165 : le secondaire d'une bobine

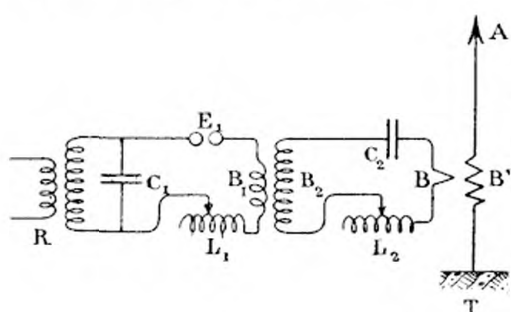


FIG. 165.

de Ruhmkorff R est relié au condensateur C_1 , qui fait partie du circuit oscillant $C_1E_1B_1L_1$. Quand l'étincelle jaillit en E_1 , ce circuit, mis en vibration, excite par induction le circuit $B_2L_2BC_2$, qui ne contient pas d'éclateur et

n'agit que pour accentuer les phénomènes de résonance. Enfin, ce dernier est accouplé inductivement en BB' avec l'antenne A qui contient à sa base une bobine d'accord. Les deux circuits oscillants $B_1E_1C_1L_1$ et $B_2C_2BL_2$ sont accordés ensemble.

Le rôle du circuit oscillant intermédiaire n'est pas très nettement expliqué. D'après M. Stone, il permet de « purifier » les ondes engendrées par l'antenne en « filtrant » les oscillations complexes produites par le premier circuit excitateur $C_1E_1B_1L_1$.

et en ne transmettant, par l'effet des phénomènes de résonance, que les oscillations d'une fréquence déterminée. En outre, sa présence amoindrit l'amortissement des ondes, mais elle entraîne incontestablement une perte d'énergie.

Afin d'obtenir des ondes d'une fréquence unique, M. Stone emploie un accouplement très lâche entre l'antenne et le circuit oscillant accordés ensemble, ou bien il n'accorde pas l'antenne avec le circuit oscillant, et lui fait effectuer des oscillations forcées, en adoptant un accouplement rigide. En outre, il a indiqué que si, avec un accouplement rigide, l'antenne est accordée sur la fréquence propre d'oscillation des circuits excitateurs, on peut atténuer la réaction qu'elle exerce sur eux ⁽¹⁾, en introduisant une bobine de self-induction convenable dans le circuit qui contient l'éclateur.

Le système récepteur de M. Stone est établi pour répondre aux ondes d'une fréquence unique bien déterminée et n'être pas influencé par les ondes de fréquence différente.

Il comprend un certain nombre de circuits résonants accordés sur la fréquence

convenable, et disposés comme l'indique la figure 166. L'antenne A aboutit à la bobine d'accouplement B qui agit par induction sur la bobine B': celle-ci fait partie du circuit oscillant B'C₁B₁L₁ ⁽²⁾ accouplé inductivement, en B₁B₂, avec le circuit B₂C₂C₃L₂. Enfin le détecteur D est relié aux armatures du condensateur C₃ intercalé dans ce circuit.

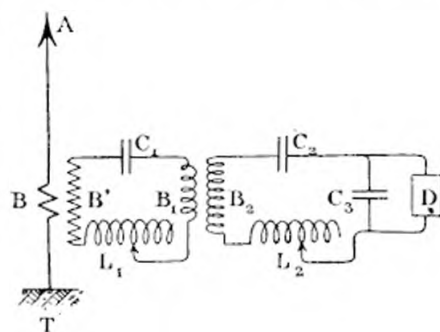


FIG. 166.

⁽¹⁾ Et qui donne lieu à plusieurs groupes d'oscillations de fréquences différentes.

⁽²⁾ L'emploi d'un ou plusieurs circuits oscillants intermédiaires à la réception per-

M. Stone ayant reconnu que l'emploi d'un cohéreur ne peut pas donner de résultats satisfaisants au point de vue de la syntonie, a été conduit à se servir d'un détecteur thermique ou thermoélectrique.

Dispositifs Fessenden.

M. Fessenden a d'abord proposé d'employer une antenne transmettrice multiple de grande surface, couvrant plusieurs maisons et présentant une capacité élevée. Cette antenne était excitée directement par un éclateur embroché sur elle : un conducteur de self-induction réglable était disposé sur le fil de terre, et pouvait être mis en court-circuit par un interrupteur. Pour émettre des signaux, on agissait sur cet interrupteur, en laissant la bobine de Ruhmkorff fonctionner d'une façon continue : suivant sa position, le conducteur de forte self-induction se trouvait intercalé sur le fil de terre ou mis en court-circuit, et les ondes produites avaient ou n'avaient pas la fréquence convenable pour impressionner les appareils du poste récepteur.

Le système récepteur comprenait une antenne multiple, un condensateur, un détecteur thermique (baretter) relié à un récepteur téléphonique, et un conducteur de forte self-induction réglage connecté à un fil de terre. Comme il arrivait souvent que le détecteur de service fût détérioré par le passage d'un courant oscillant d'intensité trop élevée, on plaçait sous un plateau circulaire un certain nombre de baretters aboutissant à une série de contacts : il suffisait, lorsqu'un de ces appareils était brûlé, de faire tourner légè-

met d'obtenir des accords très nets sur une seule fréquence d'oscillation, mais ils présentent l'inconvénient d'absorber de l'énergie.

rement le plateau autour d'un axe central pour qu'un autre fût mis en service à la place du premier.

Ainsi que cela a été dit au chapitre ix, M. Fessenden a établi dans la suite une sorte de détecteur à colonne liquide, offrant l'avantage de ne pas pouvoir être détérioré par une intensité de courant exagérée: sous sa dernière forme, cet appareil appartient à la catégorie des détecteurs électrolytiques.

La National Signalling C^o, qui exploite les dispositifs Fessenden, a employé ensuite, pour la transmission, le dispositif que représente la figure 167.

L'antenne multiple A aboutit à une bobine d'accord B, un éclateur E et la terre T. Elle est accouplée directement au circuit oscillant, qui comprend une portion de la bobine B, l'éclateur E et le condensateur C: celui-ci est chargé par le secondaire S d'un transformateur dont le primaire est alimenté par un alternateur. Comme on le voit, l'accouplement entre l'antenne et le circuit oscillant est un accouplement très rigide.

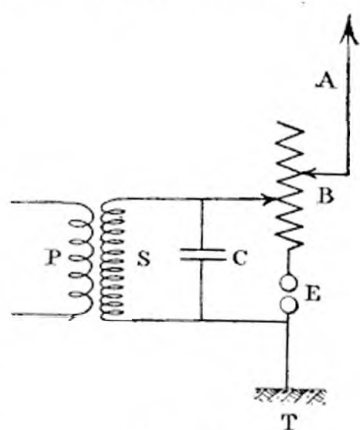


FIG. 167.

Un interrupteur, intercalé dans le circuit primaire, permet d'émettre les signaux: il est souvent commandé par un appareil spécial, muni d'un clavier de machine à écrire, qui provoque automatiquement l'émission des signaux Morse correspondant aux lettres du clavier qui ont été abaissées.

Dans la suite, l'interrupteur n'a plus eu pour fonction d'ouvrir et de fermer le circuit primaire, mais d'ouvrir et de

fermer un tour de fil agissant, par rapport à la bobine B, comme le secondaire d'un transformateur. Suivant que ce tour de fil est fermé sur lui-même (position normale) ou ouvert (position correspondant à l'émission d'un signal), la self-induction de la bobine B a une valeur plus ou moins grande et la fréquence des oscillations produites dans l'antenne varie. Le transmetteur émet donc continuellement des ondes, mais ce n'est que quand ces ondes ont une fréquence donnée (interrupteur ouvert) que le récepteur doit être impressionné.

Plusieurs perfectionnements ont été apportés au dispositif transmetteur décrit ci-dessus; notamment l'éclateur E a été enfermé dans un récipient contenant un gaz comprimé et l'accouplement entre le circuit oscillant et l'antenne a été modifié. Mais les efforts de M. Fessenden se sont surtout portés vers la réalisation d'un système permettant d'obtenir des ondes entretenues, soit par la méthode de E. Thomson,

soit par l'emploi d'un alternateur à haute fréquence. Ces dispositifs seront étudiés dans le prochain chapitre.

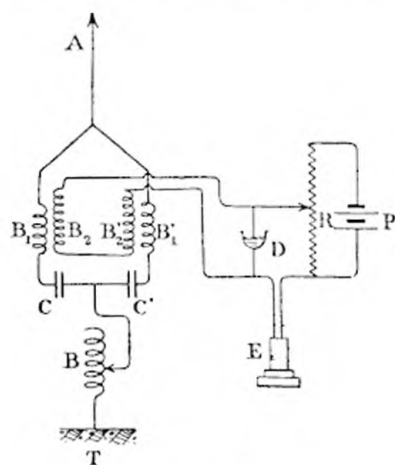


FIG. 168.

Pour la réception, la National Signalling Co a employé le montage qu'indique schématiquement la figure 168. L'antenne A aboutit au circuit combiné décrit page 234 (figure 122), qui comprend deux transformateurs

semblables B_1B_2 et $B'_1B'_2$ dont les secondaires $B_2B'_2$ sont connectés en opposition dans un circuit contenant le détecteur électrolytique D. Sur ce détecteur est branché un récepteur téléphonique E accompagné d'un potentiomètre PR.

Les résultats obtenus avec un dispositif de ce genre, plus ou moins modifié, mais basé toujours sur le même principe, sont tels que tout signal étranger dont la fréquence diffère un peu de la fréquence employée reste sans effet sur le récepteur.

La modification de fréquence produite au transmetteur par la manœuvre de l'interrupteur, est de 0,25 pour 100 environ. Avec un réglage convenable du poste récepteur, on arrive à ce que le détecteur ne soit impressionné que par les ondes émises lorsque l'interrupteur est ouvert. Les postes étrangers, qui reçoivent les ondes provenant du poste transmetteur, ne peuvent démêler les signaux au milieu de ces trains d'ondes dont les fréquences diffèrent très peu.

Dispositifs de Forest.

M. de Forest s'est consacré, en 1900, à l'étude des détecteurs d'ondes et a établi l'anticohéreur décrit au chapitre IX.

Au poste transmetteur, il a employé l'accouplement direct d'un circuit oscillant fermé et de l'antenne. Ce montage est représenté par la figure 169 : un alternateur alimente le primaire P d'un transformateur dont le secondaire S est relié au système oscillant formé par l'éclateur E et le condensateur C. L'antenne aboutit à l'un des pôles de l'éclateur, dont l'autre pôle est connecté à la terre T. Les électrodes de l'éclateur, entre lesquelles jaillissent les étincelles, sont constituées par deux disques ou plateaux métalliques parallèles.

Plus tard, M. de Forest a remplacé l'accouplement direct de l'antenne et du circuit oscillant par un accouplement inductif.

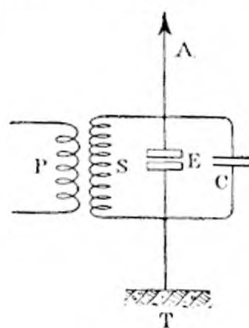


FIG. 169.

Le montage adopté au poste récepteur est représenté par la figure 170 : l'antenne A agit par induction sur un circuit B_1PDE contenant l'anticochéreur (décrit au chap. ix), l'écouteur téléphonique E et la pile P. Au lieu d'un téléphone, on a employé aussi parfois un relais et un récepteur Morse.

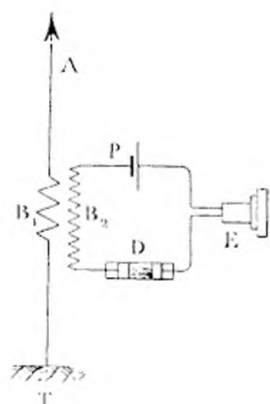


FIG. 170.

Les dispositifs utilisés par la compagnie de Forest ont été modifiés dans la suite. La figure 171 indique schématiquement le montage employé pour la transmission.

Un alternateur G est relié, par l'intermédiaire d'une bobine de self-induction réglable B, au primaire P d'un transformateur : l'interrupteur i , intercalé dans le circuit, sert pour l'émission des signaux.

Les deux bornes de l'alternateur sont connectées à la terre à travers deux condensateurs de protection de capacité convenable :

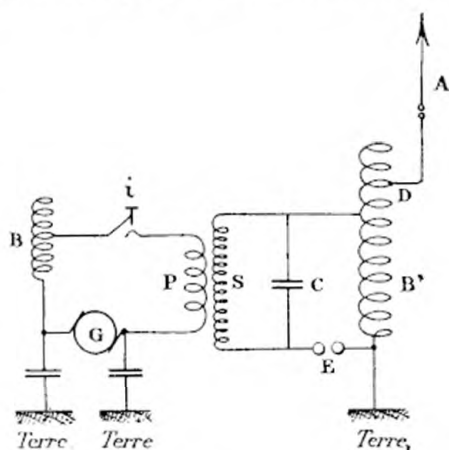


FIG. 171.

Les deux bornes de l'alternateur sont connectées à la terre à travers deux condensateurs de protection de capacité convenable : au cas où des oscillations à haute tension se produiraient par réaction dans le circuit primaire, elles trouveraient, par ces deux condensateurs, un chemin vers la terre, et n'endommageraient pas l'alternateur.

Le secondaire S du transformateur charge un conden-

sateur C relié à un circuit oscillant qui comprend l'éclateur E et une portion plus ou moins importante d'une bobine d'accouplement B'. L'antenne multiple est reliée, par l'intermédiaire d'un petit éclateur, à un point variable D de cette bobine B', dont l'extrémité inférieure est connectée à la terre.

Pour la réception, l'antenne A (figure 172) comprend une faible portion de la bobine d'accouplement B dont une partie plus importante est intercalée dans le circuit oscillant BCD contenant le détecteur électrolytique D. Sur celui-ci est branché le récepteur téléphonique T avec le potentiomètre P.

Quelquefois le détecteur électrolytique et le téléphone ont été remplacés

par un cohéreur agissant sur un relais qui commande un enregistreur Morse. Ce cohéreur, imaginé par M. Maskelyne, est formé d'un petit cylindre d'acier légèrement oxydé, dont les extrémités coniques reposent sur deux électrodes cylindriques en acier parfaitement polies.

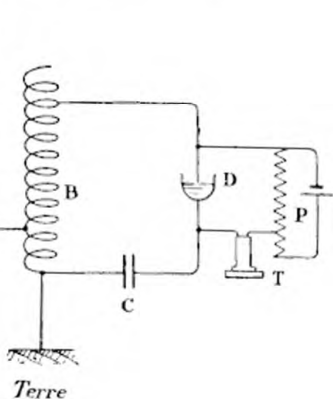


FIG. 172.

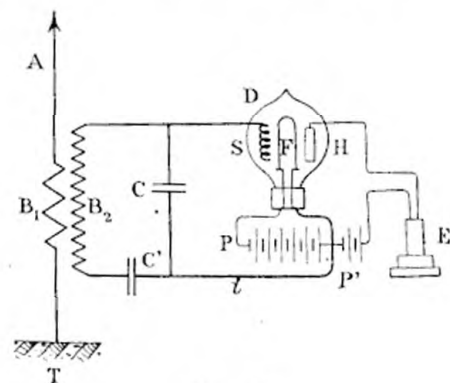


FIG. 173.

Enfin la compagnie de Forest fait fréquemment usage, comme détecteur, de l'*audion*, décrit au chapitre IX, page 170. Le dispositif employé

dans ce cas est représenté par la figure 173. L'antenne A agit par induction sur le circuit oscillant B_2CC' , auquel est accouplé le circuit CSFI comprenant la spirale et le filament du détecteur. Le récepteur téléphonique, avec quelques éléments de pile P' , est branché entre la plaque H du détecteur et le filament. Le filament de l'audion est maintenu incandescent par le courant de la pile auxiliaire P.

Dispositifs Telefunken.

Les dispositifs Telefunken, exploités par la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie (G. f. D. T), résultent de la combinaison des dispositifs de MM. Slaby, Arco et Braun.

L'antenne est composée d'un grand nombre de conducteurs aériens embrassant le plus d'espace possible. La prise de terre est fréquemment remplacée par un réseau de fils isolés du sol et formant avec celui-ci un condensateur de capacité élevée. Les expériences faites par la G. f. D. T. ont montré que l'emploi d'une telle capacité, agissant comme contre-poids de l'antenne, doit souvent être préféré à l'emploi d'une prise de terre, car les résultats obtenus sont plus uniformes et sont indépendants de l'état d'humidité du sol.

La disposition des circuits servant à la transmission est représentée schématiquement par la figure 174. Un alternateur G alimente un circuit contenant une bobine de self-induction réglable L_1 , un interrupteur i , et le primaire P d'un transformateur industriel. Le secondaire S de cet appareil charge un condensateur C, qui fait partie d'un circuit oscillant contenant un éclateur E et une bobine de self-induction réglable L_2 .

Sur la bobine L_1 est branchée une autre bobine réglable L_2 à laquelle est connecté le fil de jonction allant à l'antenne

A : l'accouplement est très lâche. L'antenne est interrompue par un condensateur et un petit éclateur au delà duquel est dérivé un conducteur allant à un parafoudre ⁽¹⁾.

Dans les postes de grande puissance, tels que celui qui avait été établi à Nauens, le montage des circuits employés pour la transmission est celui

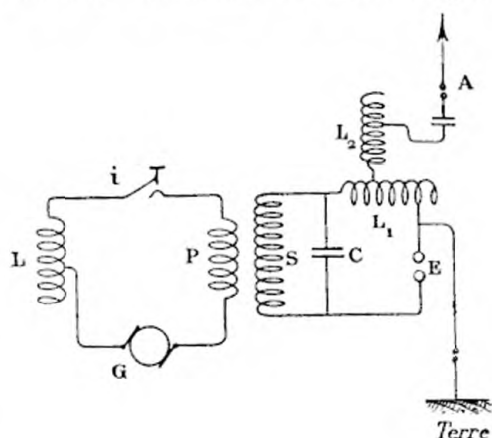


FIG. 174.

de la figure 175. Un alternateur G alimente un circuit conte-

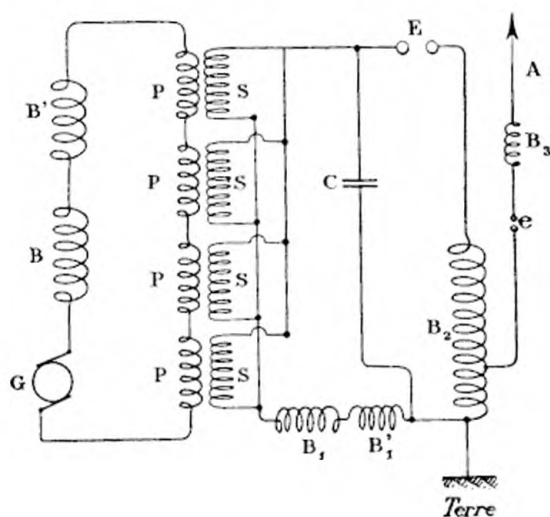


FIG. 175.

nant deux bobines de self-induction BB' et les primaires P

(¹) Cet appareil fonctionne lorsque l'antenne présente une forte charge statique, et protège ainsi les circuits récepteurs qui lui sont reliés.

de quatre transformateurs. Les secondaires S de ces appareils sont reliés en parallèle et chargent, par l'intermédiaire des bobines B_1 et B'_1 , un condensateur C de très grande capacité, qui, en se déchargeant dans l'éclateur E , met en vibration le circuit CB_2E .

Le circuit qui comprend les secondaires S , les bobines B_1 et B'_1 et le condensateur C est accordé sur la fréquence du courant de l'alternateur G ; le circuit oscillant CEB_2 est en résonance avec l'antenne, branchée en un point variable de la bobine B_2 . L'accouplement employé est très lâche et a, en général, une valeur voisine de 0,04 (4 pour 100).

L'antenne contient un petit éclateur e et une bobine d'accord B_3 : un conducteur, non représenté sur le schéma de la

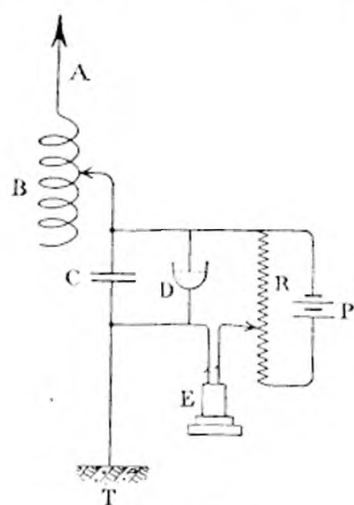


FIG. 176.

figure 175, est branché au-dessus de l'éclateur e et relie l'antenne à un parafoudre connecté à la terre.

La disposition des appareils servant à la réception est représentée schématiquement par la figure 176. B est une bobine d'accord à laquelle aboutit l'antenne, C un condensateur sur lequel est accouplé le circuit récepteur, D le détecteur électrolytique, E un récepteur téléphonique, R une résistance reliée à la batterie P et formant potentiomètre.

Dans les installations récentes, on emploie la disposition qu'indique la figure 177. L'antenne comprend la bobine d'accord B' , la bobine d'accouplement B_1 et le condensateur réglable C' : la bobine d'accouplement B_1 porte deux prises de

contact mobiles a_1b_1 auxquelles peut être relié, par le jeu d'un commutateur, le circuit du détecteur D.

La bobine secondaire d'accouplement B_2 forme, avec le condensateur réglable C_2 , un circuit oscillant : une prise de contact e_2 permet de modifier la portion active de la bobine B_2 intercalée dans ce circuit, qui doit être en résonance avec l'antenne. Entre deux autres prises de contact mobiles a_2 et b_2 de la bobine B_2 est branché un circuit contenant le détecteur D, et le condensateur C. Un téléphone E (ou un galvanomètre de grande sensibilité), accompagné du potentiomètre P, est relié au condensateur C.

Pour la réception, on connecte d'abord le circuit du détecteur entre les contacts a_1b_1 (accouplement rigide) et l'on règle la position de ces deux contacts pour percevoir nettement les signaux : ensuite, si l'on veut suivre une transmission sans être gêné, on branche le détecteur entre les points a_2b_2 et on affaiblit autant que possible l'accouplement, tout en réglant la position des contacts a_2b_2 pour obtenir le maximum d'effet.

Les petits postes radiotélégraphiques sont munis d'un détecteur électrolytique avec un récepteur téléphonique, ou quelquefois d'un cohéreur avec un enregistreur Morse. Dans les postes importants, on emploie souvent ces deux détecteurs à la fois : avec l'aide du détecteur électrolytique et du téléphone, on effectue les réglages nécessaires pour que le poste soit parfaitement accordé sur la fréquence

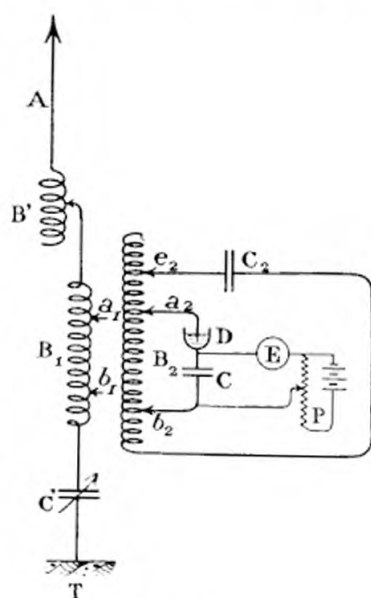


FIG. 177.

des ondes transmises; ensuite, on peut recevoir les signaux au moyen du cohéreur et de l'enregistreur Morse. Un seul appareil automatique peut même effectuer le remplacement du détecteur sensible par le détecteur normal lorsque l'intensité du courant oscillant engendré dans le système récepteur atteint une certaine valeur.

La figure 178 représente la disposition des circuits employés pour la réception dans un poste important : l'antenne

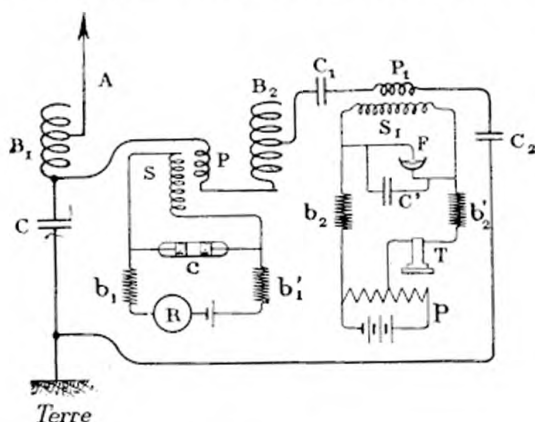


FIG. 178.

aboutit à une bobine d'accord B_1 , puis à un condensateur C relié à la terre ou à la capacité équivalente. Le circuit oscillant principal $CPB_2C_1P_1C_2$ est accouplé directement à l'antenne : il est muni d'une bobine d'accord B_2 , et agit inductivement, en PS et P_1S_1 , sur deux circuits oscillants qui comprennent l'un un cohéreur c , l'autre un détecteur électrolytique F . Le cohéreur est relié, comme d'habitude, à un circuit contenant les bobines de réactance $b_1b'_1$, un relais R et un élément de *ile*. Quant au détecteur électrolytique F , branché, ainsi que le condensateur C' , entre les extrémités du secondaire S_1 , il est relié à un circuit contenant deux bobines de réactance $b_2b'_2$, un récepteur téléphonique T , et un potentiomètre p .

Pour pouvoir modifier facilement l'accouplement des circuits, on emploie une bobine centrale fixe primaire et une bobine extérieure mobile secondaire, tenue par une charnière autour de laquelle elle peut pivoter d'un angle plus ou moins grand. Quand des signaux perturbateurs ou parasites viennent impressionner les appareils récepteurs, on affaiblit l'accouplement autant qu'il est nécessaire pour s'en débarrasser.

L'emploi permanent d'un ondemètre Dönitz dans les postes du système Telefunken permet de mesurer rapidement la longueur d'onde des ondes émises ou agissantes.

Dispositifs de la Guerre.

Appelé, dès les premières expériences de M. Marconi, à s'occuper du nouveau mode de communication par ondes hertziennes, le C^t Ferrié a fait, avec la collaboration d'officiers du Génie, des études très complètes qui ont abouti à la création d'un matériel de premier ordre dont ont été dotées plusieurs de nos places fortes.

Pour la transmission, on utilise l'accouplement mixte. A part dans les postes de très faible puissance, qui emploient, pour l'excitation du circuit oscillant, une bobine de Ruhmkorff, les appareils de transmission comprennent généralement un alternateur et un transformateur sans fuites magnétiques. L'alternateur G (fig. 179) est relié au primaire P du transformateur par l'intermédiaire d'une bobine de self-induction réglable L⁽¹⁾ à noyau de fer mobile, et d'une résistance R que permet de court-circuiter un interrupteur *i* servant à émettre les signaux.

(¹) Cette bobine de self-induction permet d'obtenir la résonance du circuit primaire, comme cela a été expliqué page 267.

Le secondaire S du transformateur charge le condensateur C, qui se décharge dans le circuit oscillant CE contenant l'éclateur E et une portion de la bobine d'accouplement B.

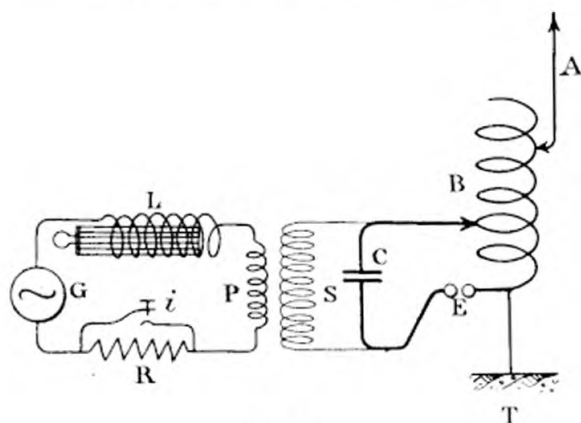


FIG. 179.

L'antenne A est reliée à un point de cette bobine; l'éclateur est connecté à la terre. On peut varier le degré d'accouplement en modifiant la longueur de la portion de la bobine B intercalée dans le circuit oscillant.

Pour la réception, quelques petits postes utilisent en-

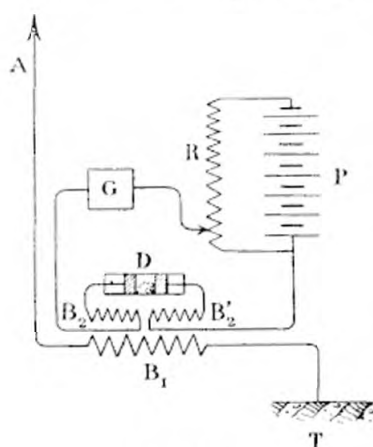


FIG. 180.

core le cohéreur. Le schéma du dispositif adopté est indiqué par la figure 180. L'antenne A aboutit à une bobine B_1 accouplée inductivement avec deux bobines $B_2B'_2$ reliées au cohéreur D. Le potentiomètre PR permet, par déplacement du point de contact sur la résistance R, de faire varier la différence de potentiel agissant sur le cohéreur et d'obtenir ainsi le maximum

de sensibilité. Le circuit contient un relais G, dont la

partie mobile ferme le circuit de la pile totale P sur un enregistreur Morse non figuré. Enfin l'installation est complétée par un tapeur destiné à décoherer le tube: le courant nécessaire pour ce tapeur est emprunté aussi à la même pile P.

Dans presque tous les postes actuels, on emploie le détecteur électrolytique. L'antenne A (fig. 181) passe par une bobine réglable B et, au besoin, par un condensateur réglable, puis elle aboutit à la bobine B₁ accouplée inductivement avec la bobine B₂. Celle-ci fait partie d'un circuit contenant le détecteur et un condensateur réglable C. Un autre condensateur réglable C' est relié au détecteur. Les deux récepteurs téléphoniques EE sont branchés sur le condensateur C et sont accompagnés du potentiomètre RP.

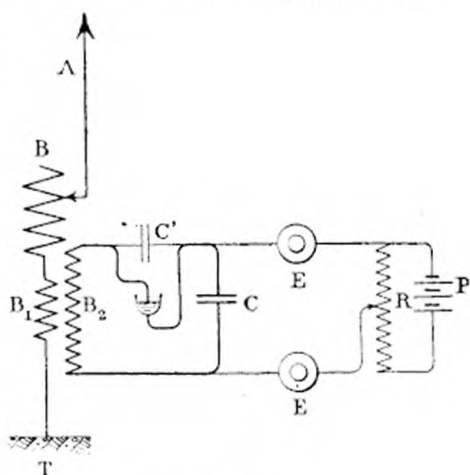


FIG. 181.

Dans le cas de transmissions très intenses, on peut supprimer le potentiomètre et relier ensemble, par un simple fil, les deux récepteurs téléphoniques EE.

Dispositifs de la Marine.

Les premières installations radiotélégraphiques de notre flotte ont été perfectionnées par quelques officiers de marine et surtout par le C^t Tissot. Depuis un certain temps les

efforts ont été groupés par la création d'une *Commission centrale de Télégraphie sans fil de la Marine*, dont font partie MM. Ferrié et Tissot. Cette commission a effectué des expériences au cours desquelles elle a déterminé les meilleurs dispositifs à employer, puis elle a adopté un modèle uniforme de poste radiotélégraphique, établi pour différentes puissances.

Les dispositifs généraux employés pour la transmission sont analogues à ceux qu'a adoptés le C^t Ferrié, à quelques différences de détail près.

Un alternateur G (fig. 182) alimente, par l'intermédiaire d'une bobine de self-induction réglable L, le primaire P d'un

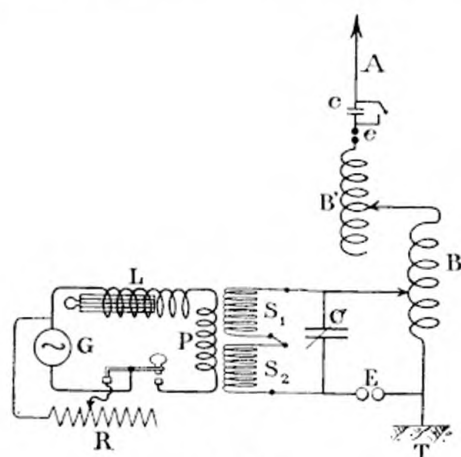


FIG. 182.

transformateur à fuites magnétiques⁽¹⁾. Un manipulateur à deux plots permet d'établir ou de couper le courant primaire et remplace, dans ce dernier cas, le circuit primaire par une résistance équivalente R de façon que le débit de l'alternateur n'ait pas à subir d'à-coups⁽²⁾.

Le primaire du transformateur comprend deux bobines qui peuvent être reliées en parallèle ou en série suivant que la tension dont on dispose est de 120 ou de 240 volts.

Le secondaire S₁S₂ est divisé en deux sections compre-

(1) Cet appareil est à noyau droit dans les postes de faible et de moyenne puissance, et à circuit magnétique fermé dans les postes de grande puissance.

(2) Dans les postes de faible puissance, on supprime souvent ce circuit équivalent.

nant chacune deux bobines : ces deux sections peuvent être connectées en parallèle ou en série. Les tensions de résonance correspondantes sont de 40 000 ou 80 000 volts. Le condensateur réglable C se décharge à travers l'éclateur E et quelques tours de la bobine d'accouplement B , dont l'extrémité supérieure est reliée à la bobine B' servant au réglage de l'antenne. Celle-ci contient un petit éclateur e et, au besoin, un condensateur c qu'un interrupteur permet de court-circuiter. En réglant convenablement les valeurs de la capacité du circuit oscillant, et en intercalant dans l'antenne soit le condensateur c , soit la bobine de self-induction B' , on peut transmettre avec des longueurs d'onde de 300, 450, 600 et 750 mètres.

Pour la réception, on emploie tantôt le détecteur électrolytique, tantôt le détecteur magnétique, tantôt le cohéreur. L'enregistrement des signaux présenterait une grande importance, car il permet de conserver la trace des ordres reçus, mais, en pratique, on se sert presque exclusivement du détecteur électrolytique.

Le dispositif adopté est indiqué par la figure 183. L'antenne A aboutit à la bobine de self-induction réglable L . De là, le circuit peut être fermé à volonté sur l'une des bornes 1, 2 ou 3. La borne 1 correspond à la bobine d'accouplement B_1 dont la bobine secondaire B_2 est reliée au cohéreur ;

la borne 2 correspond à la bobine d'accouplement B'_1 dont la bobine secondaire B'_2 est reliée au détecteur électrolytique ;

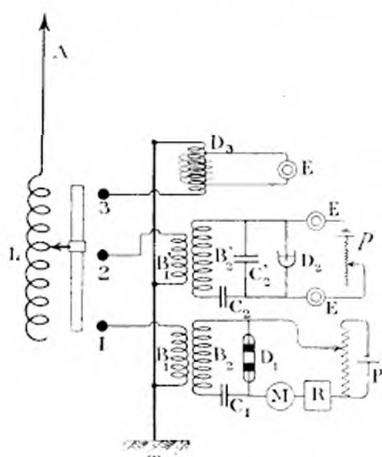


FIG. 183.

la borne 3 correspond à la bobine primaire du détecteur magnétique. Les extrémités des trois bobines primaires sont connectées à la ligne de terre. Le circuit dérivé du cohéreur comprend un milliampèremètre M, un relais R et un potentiomètre P : le relais commande les circuits d'un enregistreur Morse et d'un tapeur. Le circuit dérivé du détecteur électrolytique comprend deux téléphones EE, une pile p et une résistance. Enfin le circuit secondaire du détecteur magnétique contient un téléphone E.

Dispositifs divers.

Dispositifs Rochefort. — M. Rochefort a apporté plusieurs perfectionnements intéressants dans les appareils ou les montages employés en Radiotélégraphie.

Pour la transmission, il a réalisé des bobines d'induction spéciales de grande puissance ⁽¹⁾.

Pour la réception, il a employé un cohéreur à trois électrodes, disposé comme l'indique la figure 184. L'antenne A aboutit à la portion centrale P d'une bobine qui comprend deux autres portions S_1, S_2 . Les extrémités de celles-ci sont connectées aux électrodes extrêmes

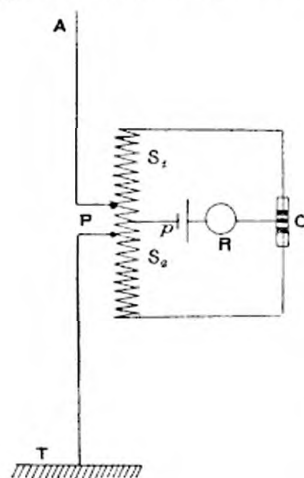


FIG. 184.

du cohéreur C. Une jonction médiane relie le milieu de la bobine P à l'électrode centrale du cohéreur : cette jonction contient un élément de pile p et le relais R. L'accouplement

(1) Ces bobines sont décrites au chapitre xv.

entre l'antenne et le circuit fermé oscillant est mixte, et le cohéreur est placé nettement à un ventre de tension.

Dispositifs Ducretet. — M. Ducretet a entrepris, dès 1898, la construction des appareils Popoff et a perfectionné ceux-ci à plusieurs points de vue.

Pour la transmission, il a d'abord employé le système à action directe, puis l'accouplement mixte. Il est l'un des premiers à avoir utilisé une bobine de self-induction réglable pour accorder l'antenne.

Pour la réception, il a utilisé le dispositif Popoff avec cohéreur décrit au chapitre VIII, page 126, puis le détecteur électrolytique, avec accouplement par induction. Il a établi aussi un détecteur à cristaux dont la disposition permet un réglage facile et précis.

Dispositifs Brenot. — Le Cap^e Brenot a collaboré activement avec le C^t Ferrié et l'a aidé à réaliser les dispositifs employés par la Guerre.

Pour la réception, il a imaginé un détecteur à cristaux très sensible, décrit au chapitre IX, page 158, qu'il emploie avec le montage indiqué par la figure 185. L'antenne A est accouplée inductivement avec le circuit B₂CD contenant un condensateur C et le détecteur D. Le récepteur téléphonique E est branché sur le condensateur C. On remarquera que le détecteur à cristaux fonctionne sans pile auxiliaire.

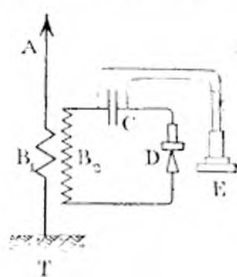


FIG. 185.

Dispositifs de la Compagnie générale radiotélégraphique. — La C. G. R. emploie, pour la transmission, des montages analogues à ceux de la Guerre et de

la Marine, dont elle construit le matériel⁽¹⁾. Elle a apporté, dans la construction des différents appareils, des perfectionnements importants qui seront passés en revue au chapitre xv.

Pour la réception, la C. G. R. emploie un dispositif dit « à réception intégrale » avec quatre détecteurs à conductibilité

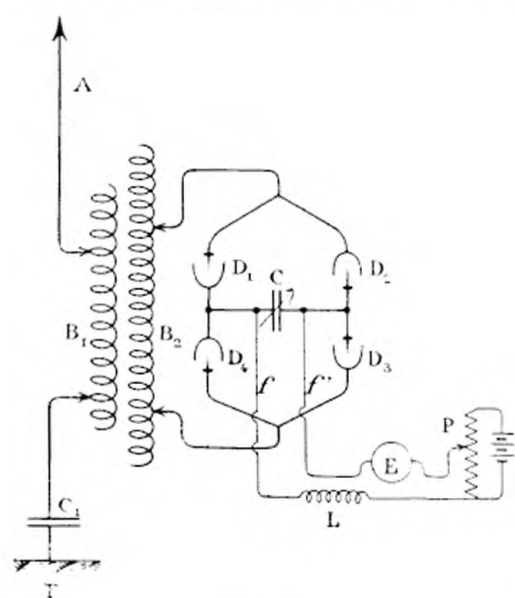


FIG. 186.

unipolaire (détecteurs électrolytiques ou à vide). Le schéma des connexions est indiqué par la figure 186. L'antenne A comprend une portion variable de la bobine B_1 et un condensateur réglable C_1 . La bobine secondaire B_2 , dont la longueur active est modifiée au moyen de deux prises de contact mobiles, aboutit à un

groupe de quatre détecteurs $D_1 D_2 D_3 D_4$, disposés comme l'indique la figure. Une jonction médiane contient le condensateur réglable C sur lequel est branché le récepteur (téléphone) E accompagné du potentiomètre P et de la bobine de self-induction réglable L .

Le fonctionnement de ce dispositif est le suivant. Quand un courant oscillant est induit dans la bobine B_2 , les portions positives de ce courant passent, par exemple, par le détec-

(1) La Compagnie Générale Radiotélégraphique (C. G. R.) a été formée par l'association de MM. Carpentier, Gailfe et Rochefort.

teur D_1 , le fil f , le téléphone E, le fil f' et le détecteur D_3 ; les portions négatives passent par le détecteur D_4 , le fil f , téléphone E, le fil f' et le détecteur D_2 . Les courants circulant dans le circuit $fLEf'$ sont toujours de même sens et l'énergie totale des oscillations est utilisée pour actionner le récepteur E: dans les montages usuels des détecteurs à conductibilité unipolaire, au contraire, une moitié seulement de l'énergie (une alternance sur deux) est utilisée. L'avantage de ce dispositif sur les dispositifs à détecteur unique est très marqué pour les communications à grande distance.

Travaux divers. — Pour terminer ce chapitre, il y a lieu de rappeler que les progrès de la Radiotélégraphie ont été dus, non seulement aux habiles expérimentateurs dont les dispositifs ont été décrits ci-dessus, mais encore aux travaux théoriques et expérimentaux de MM. Bethenod, Bjerkness, Blondel, Drude, Oberbeck, Pierce, Poincaré, Seibt, Tissot, Wien, Zenneck.

M. Blondel a appliqué son grand talent d'investigation à tous les problèmes que soulève l'étude des différentes parties constitutives des systèmes radiotélégraphiques. Après avoir imaginé des appareils transmetteurs ou récepteurs, des dispositifs de syntonisation, des aériens pour ondes dirigées, etc., il a fait une étude très complète sur les phénomènes en jeu dans les circuits oscillants et dans les transformateurs à résonance.

Le C^t Tissot a mis au point plusieurs méthodes de mesure basées sur l'emploi d'un détecteur thermoélectrique très précis. Il a fait des études importantes sur la mesure des longueurs d'onde, sur la détermination de l'amortissement, sur le maximum de rendement d'une antenne, et sur le fonctionnement du détecteur magnétique, du détecteur à vide et du détecteur à cristaux.

CHAPITRE XIV

DISPOSITIFS NOUVELLEMENT EMPLOYÉS EN RADIODÉLÉGRAPHIE

Comme cela a été expliqué au chapitre XII, il est impossible d'obtenir une véritable syntonie avec les ondes amorties que produisent les émetteurs à étincelles raréfiées. On a donc cherché à réaliser des émetteurs capables d'engendrer des ondes moins amorties.

Les différents dispositifs imaginés dans ce but peuvent être classés en deux catégories distinctes :

Ceux de la *Première Catégorie* permettent d'obtenir des *Ondes Entretienues*. Les oscillations électromagnétiques y sont engendrées d'une façon ininterrompue et présentent une fréquence à peu près constante.

Ceux de la *Seconde Catégorie* permettent d'obtenir des *Trains d'Ondes émis à intervalles très rapprochés*. Les oscillations électromagnétiques y sont engendrées par des décharges très fréquentes (de 200 à 2000 par seconde). Le son musical des étincelles aussi rapprochées a fait donner aux dispositifs de cette catégorie le nom d'*émetteurs à étincelles musicales*.

DISPOSITIFS A ONDES ENTRETENUES

Dans les dispositifs à ondes entretenues, les oscillations électromagnétiques régulières peuvent être engendrées :

- soit par un appareil à arc (principe de l'arc chantant).
- soit par un alternateur à très haute fréquence (75000 à 100000 par seconde).
- soit par différentes combinaisons de circuits oscillants et d'éclateurs, spéciaux ou non.

Dispositifs à arc.

On rassemble sous le nom de *dispositifs à arc* un certain nombre de systèmes, analogues en apparence, mais dont les modes de fonctionnement diffèrent souvent d'une façon notable. Bien que les courants oscillants engendrés dans ces divers systèmes ne soient guère comparables entre eux, ni comme nature, ni comme forme, ils présentent la propriété commune d'être produits sans interruption.

On peut formuler de la façon suivante les différences qui existent entre les dispositifs à étincelles et les dispositifs à arc :

Dans les premiers, l'étincelle jaillit de temps en temps entre les électrodes de l'éclateur, quand la tension atteint une valeur suffisante pour cela : une fois la décharge oscillante terminée, aucune étincelle n'apparaît plus tant que la tension n'est pas remontée à la valeur nécessaire.

Dans les seconds, au contraire, l'arc persiste tout le temps entre les électrodes (sauf dans certains dispositifs où il s'éteint à chaque période, mais pour se rallumer *instantanément* après). La tension de fonctionnement est inférieure à celle qui correspond à l'intervalle entre les électrodes, et l'arc est incapable de jaillir seul ; il faut un allumage ou un amorçage préalable⁽¹⁾. Le courant oscillant est superposé, dans l'arc, au courant d'alimentation de celui-ci.

(1) Pour l'allumage, on amène en général les charbons (ou les électrodes) en contact et on les écarte progressivement, comme dans une lampe à arc.

Dans les premiers, l'énergie convertie en oscillations électromagnétiques est empruntée au circuit oscillant lui-même : c'est la quantité d'électricité contenue dans le condensateur chargé qui entre en jeu pendant les phénomènes de la décharge oscillante, après quoi le condensateur est rechargé par la source d'énergie extérieure.

Dans les seconds, l'énergie convertie en oscillations est soustraite constamment à la source d'énergie extérieure.

Le principe des méthodes dans lesquelles des oscillations entretenues sont engendrées par un arc relié à un circuit oscillant a été indiqué au chapitre v, page 78.

Nous allons passer en revue ceux des dispositifs à arc qui ont donné lieu à des applications pratiques ou qui ont permis d'obtenir des résultats intéressants.

Dispositif Poulsen.

La disposition définitive adoptée par M. Poulsen est représentée par la figure 187.

L'arc jaillit entre une électrode positive E en cuivre, formée d'un cylindre creux à fond épais dans lequel circule un courant d'eau froide, et une électrode négative E' formée d'un cylindre de charbon massif. Ce dernier tourne autour de son axe d'un mouvement lent et uniforme afin que l'arc ne jaillisse pas toujours au même

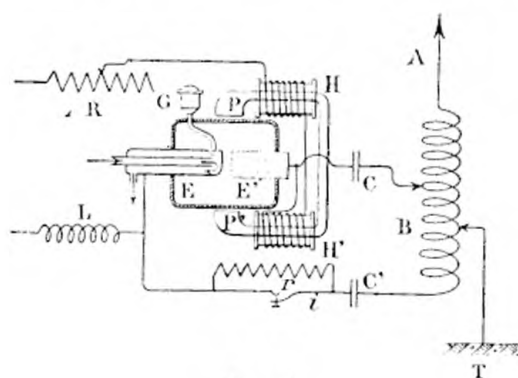


FIG. 187.

point et que sa longueur ne varie pas par suite de l'usure du charbon. Le mouvement de rotation est produit par un mécanisme d'horlogerie ou par un petit moteur électrique.

Les deux électrodes sont disposées à l'intérieur d'un récipient étanche en fonte muni, sur sa surface extérieure, d'ailettes de refroidissement.

Sur l'électrode de cuivre E est ménagée une dépression dans laquelle vient tomber, goutte à goutte, l'alcool contenu dans le godet G. La volatilisation de cet alcool crée dans le récipient l'atmosphère de gaz hydrocarburés nécessaire pour le fonctionnement de l'appareil. Ces gaz hydrocarburés jouent un triple rôle : d'une part, leur bonne conductibilité calorifique assure un refroidissement convenable de l'arc ; d'autre part, l'absence d'oxygène dans l'atmosphère environnante réduit à une très faible valeur l'usure des charbons qui ne peuvent plus brûler et dont la seule diminution provient d'un effet de calcination et d'un phénomène de désintégration cathodique ; en troisième lieu, la décomposition des hydrocarbures donne lieu à un dépôt de charbon qui atténue l'usure des électrodes. On peut ajouter aussi que la présence d'une atmosphère dépourvue d'oxygène augmente la valeur de la différence de potentiel nécessaire au maintien de l'arc.

Enfin, un puissant champ magnétique est produit transversalement à l'arc par les pôles P et P' d'un électro-aimant en fer à cheval dont les bobines II et II' sont parcourues par le courant même de l'arc.

Le circuit d'alimentation, relié à une source de courant continu à 440 volts, contient une résistance de réglage R et une bobine de self-induction L.

En dérivation sur l'arc est branché le circuit oscillant qui comprend une portion de la bobine d'accouplement B, un condensateur C et une résistance r que court-circuite l'interrupteur i servant à l'émission des signaux. Quand la ré-

sistance r est en circuit, l'amortissement est trop fort pour que les ondes soient efficaces ; quand, au contraire, l'interrupteur i est fermé, la résistance r se trouve court-circuitée.

Avec les oscillations entretenues, on peut employer à volonté un accouplement rigide ou lâche entre l'antenne et le circuit oscillant. Un bon moyen consiste aussi à embrocher l'arc directement sur l'antenne. L'accouplement rigide doit être généralement préféré en ce qu'il permet de transmettre plus d'énergie à l'antenne et d'obtenir des accords plus nets. Si l'accouplement a une valeur moyenne, la fréquence est mal définie et variable ; l'arc prend indifféremment l'une ou l'autre des deux fréquences qui peuvent exister dans le système accouplé.

Il faut remarquer que, dans les systèmes à arc, on ne peut pas intercaler directement un interrupteur dans le circuit principal pour l'émission des signaux, comme on le fait simplement dans les systèmes à étincelles. En effet, la tension d'alimentation est insuffisante pour que l'arc jaillisse de lui-même ; si donc on rompt le circuit en ouvrant l'interrupteur, l'arc s'éteindrait et ne se rallumerait pas quand on fermerait l'interrupteur pour émettre un signal.

Différentes dispositions peuvent être adoptées pour l'émission des signaux. Celle que représente la figure 187 est l'une des plus simples, mais elle présente l'inconvénient que les constantes du circuit oscillant accouplé à l'arc varient à chaque signal. La disposition la plus fréquemment employée dans les postes du système Poulsen est représentée par la figure 188. Le manipulateur i porte deux plots de contact P et P_2 et son levier est relié électriquement à une borne centrale P_1 . L'antenne aboutit au plot P ; le plot P_2 est relié à un circuit compensateur $R_2L_2C_2$. Quand le levier est abaissé, l'antenne se trouve connectée à la bobine B_2 , reliée

d'autre part à la terre T; quand le levier est relevé, l'antenne se trouve déconnectée, et la bobine B_2 est fermée, par le plot de contact P_2 , sur le circuit oscillant $R_2L_2C_2$ qui équivaut à l'antenne. Aucune variation de courant ne se produit donc dans le circuit oscillant B_1CC' accouplé à l'arc.

Un autre dispositif, imaginé dans la suite par M. Poulsen, permet d'émettre commodément les signaux. Le circuit oscillant accouplé à l'arc contient, à la place de la résistance r (fig. 187), une bobine fixe formée de peu de tours de fil, à

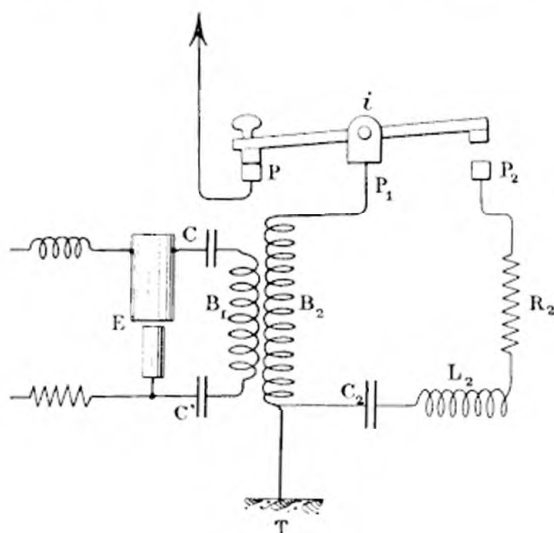


FIG. 188.

l'intérieur de laquelle tournent continuellement, sous l'action d'un moteur électrique, deux bobines mobiles perpendiculaires l'une à l'autre. Les extrémités des fils constituant les enroulements de ces deux bobines aboutissent à des bagues métalliques sur lesquelles frottent des balais. Les deux bobines peuvent être court-circuitées sur elles-mêmes, soit séparément, soit simultanément.

La bobine fixe, parcourue par le courant oscillant qu'engendre l'arc chantant, produit un flux magnétique oscillant.

Ce flux est embrassé par l'une ou l'autre des bobines mobiles chaque fois que le plan de celle-ci coïncide avec le plan de la bobine fixe. A ce moment, la bobine mobile considérée agit, par rapport à la bobine fixe, comme le secondaire d'un transformateur : quand au contraire son plan est perpendiculaire à celui de la bobine fixe, elle est sans action, mais, à ce moment, l'autre bobine mobile, perpendiculaire à la première, se trouve dans le plan de la bobine fixe et agit à son tour comme secondaire, par rapport à elle. Chacune des deux bobines mobiles constitue donc alternativement le secondaire d'un transformateur dont la bobine fixe est le primaire.

Si les circuits des deux bobines mobiles sont ouverts, celles-ci n'exercent aucune réaction sur la bobine fixe et, d'après ce qui a été expliqué au chapitre II, p. 36, tout se passe comme si elles n'existaient pas. Les oscillations du circuit mettent l'antenne en vibration sans interruption, ce qui correspond à l'émission d'un signal représentant un long trait de l'alphabet Morse.

Si l'une des bobines mobiles est court-circuitée sur elle-même, elle agit à intervalles réguliers pour absorber de l'énergie (transformateur avec secondaire en court-circuit) : le mouvement vibratoire de l'antenne est donc périodiquement amoindri ou modifié, ce qui correspond à l'émission d'une série de signaux représentant des points de l'alphabet Morse.

Si enfin les bobines mobiles sont court-circuitées toutes deux simultanément, elles absorbent de l'énergie d'une façon continue, puisque, dans leur rotation, elles se remplacent mutuellement : aucun signal n'est donc émis.

Le manipulateur est établi pour court-circuiter pendant un instant soit une seule bobine mobile (un point de l'alphabet Morse), soit les deux bobines mobiles (un blanc de l'al-

phabet Morse), soit aucune des bobines mobiles (un trait de l'alphabet Morse).

Pour la réception, M. Poulsen adopte un accouplement très lâche de façon à utiliser aussi complètement que possible les effets de résonance.

Le montage employé est indiqué schématiquement par la figure 189. L'antenne A aboutit à un circuit oscillant C_1B_1 relié à la terre. La bobine B_1 excite par induction le circuit oscillant B_2C_2 . Sur le condensateur C_2 est branché, par l'intermédiaire d'un interrupteur-vibrateur V, un autre condensateur c accompagné du récepteur téléphonique E.

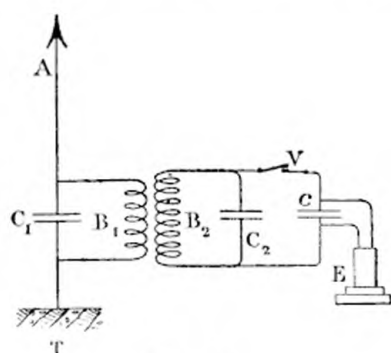


FIG. 189.

Une remarque préliminaire est nécessaire pour comprendre le fonctionnement de ce dispositif et le rôle de l'interrupteur-vibrateur V. Avec les détecteurs actuellement employés, la réception est généralement faite au son, au moyen d'un téléphone dans lequel on perçoit le bruit⁽¹⁾ des groupes de décharges de l'émetteur à étincelles. Mais si le poste transmetteur produit des ondes entretenues (dont la fréquence est beaucoup trop élevée pour correspondre à un son que notre oreille puisse percevoir), on n'entend plus dans le téléphone qu'un petit claquement au moment où le détecteur commence à être impressionné, et c'est tout. Il est donc impossible de distinguer un trait d'un point. Dans ces conditions, il est indis-

(1) Ce bruit est bref ou prolongé, suivant que le poste émet un point ou un trait de l'alphabet Morse.

pensable d'avoir recours, soit au poste transmetteur, soit au poste récepteur, à un dispositif auxiliaire permettant d'interrompre périodiquement (avec une fréquence correspondant à un son perceptible à notre oreille) l'émission ou la réception des ondes.

L'interrupteur-vibrateur V a pour fonction d'ouvrir et de fermer un certain nombre de fois par seconde (500 par exemple) le circuit du téléphone E. Lorsque l'antenne et le circuit C_2B_2 oscillent sous l'effet d'ondes entretenues, les contacts intermittents du vibreur V permettent au condensateur C_2 d'agir à intervalles réguliers sur le circuit du téléphone, et la membrane de ce dernier fait entendre un son correspondant à la fréquence des contacts du vibreur (son musical).

L'emploi du vibreur V, nommé *tikker* par M. Poulsen, offre en outre l'avantage important de permettre l'utilisation complète des effets de résonance. Le détecteur (ou le téléphone) n'étant pas en permanence dans le circuit oscillant, on évite l'amortissement dû à sa résistance élevée : le circuit récepteur oscille librement et, grâce aux phénomènes de résonance, les oscillations vont en s'amplifiant. La tension entre les plaques du condensateur C_2 croît graduellement jusqu'au moment où le *tikker* relie à ce dernier, pour un instant, le circuit du détecteur ; à ce moment l'action produite sur cet appareil est d'autant plus forte que l'amplification due à la résonance était plus marquée.

L'interrupteur-vibrateur V peut être constitué par un trembleur actionné par un électro-aimant, ou par une roue munie de contacts ou de dents sur lesquels frottent des ressorts, ou par tout autre dispositif. M. Poulsen emploie généralement deux fils d'or croisés mis en vibration par un diapason entretenu électriquement.

Dans le montage représenté par la figure 187, il n'y a pas

de détecteur proprement dit, le récepteur téléphonique étant directement impressionné par les impulsions périodiques qu'il reçoit. On peut également employer avec le tikker un détecteur électrolytique, ou mieux un détecteur thermique ou thermo-électrique permettant d'utiliser l'effet intégral des oscillations.

Dans la suite, M. Poulsen s'est servi d'un appareil récepteur de grande sensibilité permettant l'enregistrement des signaux.

Cet appareil comprend un galvanomètre et un détecteur thermo-électrique. Le galvanomètre est formé d'un puissant électro-aimant entre les pôles duquel est disposé un fil parcouru par le courant qu'engendre l'élément thermo-électrique. La distance entre le fil et les pôles étant extrêmement réduite, un très faible courant suffit pour que les attractions ou répulsions électromagnétiques déplacent le fil qui, dans son mouvement, démasque une fente pratiquée dans la paroi.

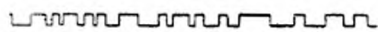


Fig. 190.

Un rayon lumineux, traversant la fente, vient alors tomber sur une bande de papier photographique qui se déroule d'un mouvement continu. Les empreintes tracées par le rayon lumineux sont plus ou moins longues suivant que le signe transmis représente un trait ou un point. La figure 190 en donne une idée.

Beaucoup d'espérances ont été fondées sur le système Poulsen lors de son apparition. La possibilité de produire des oscillations électromagnétiques entretenues, l'utilisation maxima des effets de résonance du poste récepteur grâce à l'adoption d'un accouplement très lâche et du vibreur, semblaient devoir permettre l'obtention d'accords extrêmement nets et d'une syntonie très aiguë. A ce sujet, M. Poulsen

indiquait que l'accord pouvait être réalisé à 1 pour 100 près et que l'influence des signaux étrangers ou des parasites était complètement éliminée.

Malheureusement, ces espérances ont été en partie déçues. Si le système Poulsen offre d'importants avantages, il n'en est pas moins incontestable que les oscillations engendrées ne présentent pas une fréquence suffisamment constante pour que la réalisation d'accords très aigus soit possible. L'arc exige des réglages incessants, si l'on veut maintenir son régime constant. L'appareil engendre, non pas des oscillations régulières, mais des groupes discontinus d'oscillations de fréquences variables superposées les unes

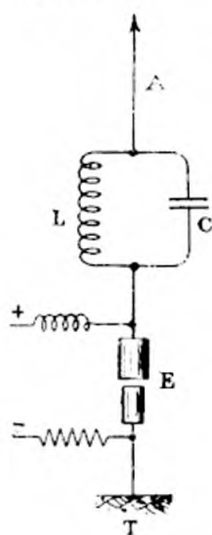


FIG. 191.

aux autres. D'autre part, on ne peut pas, sans troubler les phénomènes, soutirer au circuit oscillant une quantité d'énergie qui soit une fraction importante de l'énergie totale dépensée dans l'arc⁽¹⁾.

M. Poulsen a donné un peu plus de stabilité aux oscillations produites en intercalant dans l'antenne, comme l'indique la figure 191, une bobine de forte self-induction *L* accouplée avec un condensateur *C*. Ce circuit oscillant auxiliaire joue le même rôle qu'un volant et régularise la production des oscillations. D'autre part, sa présence augmente la quantité d'énergie convertie en oscillations électromagnétiques, sans que la proportion d'énergie rayonnée par l'antenne (c'est-à-dire réellement soutirée au circuit oscillant) soit augmentée ; ces conditions sont plus favorables au maintien d'un régime stable.

(1) L'énergie convertie en oscillations électromagnétiques utilisables environ 10 pour 100 de l'énergie totale absorbée par l'arc.

Avec le montage de la figure 191, l'arc peut être avantageusement embroché sur l'antenne : ce dispositif est simple et commode. On peut alors faire varier dans de larges limites la longueur d'onde en modifiant la self-induction de la bobine L et la capacité du condensateur C. L'excitation indirecte de l'antenne par un circuit oscillant fermé est également applicable.

Dispositif Telefunken.

Au lieu d'un seul arc long, étalé par l'action d'un champ magnétique, la G. f. D. T. a employé plusieurs arcs courts en série (6, 12 ou 24 pour 220, 440 ou 880 volts).

Chaque électrode positive est formée d'un long cylindre de laiton rempli d'eau et muni à sa partie inférieure d'une calotte concave en cuivre ; l'électrode négative est un court crayon de charbon terminé par un arrondi sphérique. L'arc est très court : il jaillit dans la concavité ménagée à l'extrémité inférieure du cylindre de laiton (fig. 192) et brûle au sein des gaz dégagés par la combustion, le re-



FIG. 192.

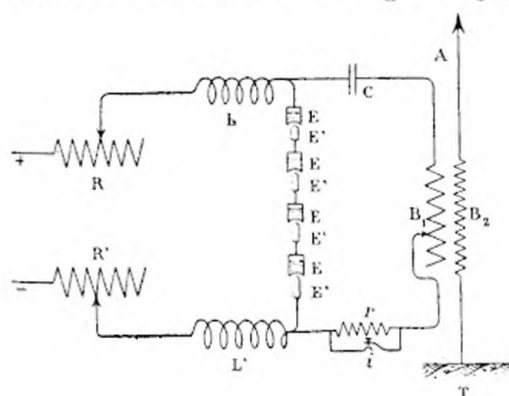


FIG. 193.

renouvellement de l'air s'effectuant difficilement par suite de la disposition adoptée. Il n'y a pas de soufflage magnétique.

Le montage employé au poste transmetteur est représenté par la figure 193. Le courant continu d'alimentation traverse deux résistances réglables R et R' et deux bobines de self-induction L et L', puis les arcs EE' en série. En dérivation sur le groupe d'arcs est

branché le circuit oscillant comprenant un condensateur C et une bobine d'accouplement B_1 . Un interrupteur i , qui court-

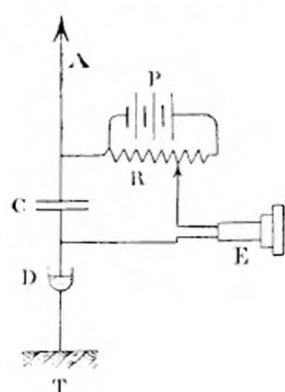


Fig. 194.

circuite une résistance r , permet d'émettre les signaux. L'antenne est accouplée inductivement par la bobine B_2 avec la bobine B_1 du circuit oscillant.

Pour la réception, le montage adopté est celui que représente schématiquement la figure 194. Le détecteur électrolytique est directement intercalé dans l'antenne, qui contient en outre un condensateur C aux bornes duquel est branché le récepteur téléphonique E avec son potentiomètre PR. On voit que l'accouplement est essentiellement rigide. Un vibreur approprié (tikker) est interposé sur le circuit du téléphone.

La G. f. D. T. n'a pas réalisé d'applications pratiques de ce dispositif, qu'elle a abandonné pour adopter le système à étincelles musicales décrit plus loin.

Dispositif Tissot.

Le lieutenant de vaisseau Tissot a étudié les conditions de fonctionnement du dispositif Poulsen et en a tiré d'intéressantes conclusions. Il a trouvé qu'un tel arc donne naissance à des groupes discontinus d'oscillations irrégulières quand le circuit oscillant présente une self-induction trop faible par rapport à sa capacité, mais qu'on peut en obtenir des oscillations régulières, de fréquence constante, quand la self-induction du circuit oscillant dérivé a une valeur élevée par rapport à sa capacité.

Si le poste ne peut pas travailler avec de très grandes longueurs d'onde (ce qui est le cas général, faute d'antennes d'un

développement suffisant), on est forcé de n'employer qu'une faible capacité dans le circuit oscillant⁽¹⁾. Dans ces conditions, la quantité d'énergie que l'antenne peut soutirer à ce circuit sans troubler les phénomènes est forcément très faible.

Pour pouvoir extraire du circuit oscillant une quantité d'énergie plus importante, sans désamorcer l'arc, le C^t Tissot a ajouté au dispositif habituel un circuit oscillant auxiliaire, accordé sur le premier, mais

ayant une grande capacité et une petite self-induction. Ce circuit joue un peu le rôle d'un volant ou d'un réservoir stabilisateur, et permet à l'antenne de rayonner plus d'énergie

sans que sa réaction sur le circuit oscillant principal trouble trop les phénomènes: en outre, il agit comme un circuit intermédiaire de Stone⁽²⁾, et sa présence doit diminuer l'amortissement.

Le montage indiqué par M. Tissot est représenté schématiquement par la figure 195. L'arc E met en vibration un circuit C_1B_1 , accordé sur l'antenne et présentant une faible capacité et une forte self-induction. A ce circuit est accouplé inductivement un second circuit C_2B_2 , dont la période propre

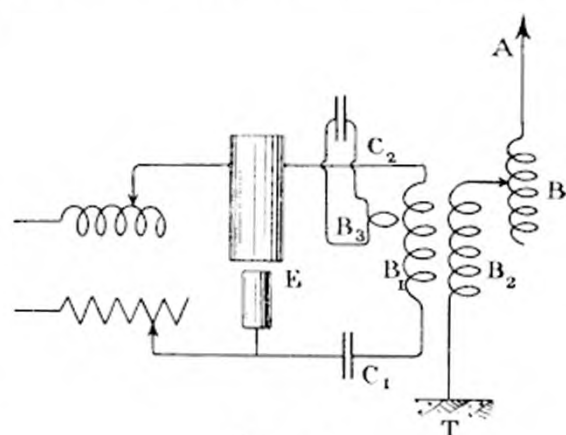


FIG. 195.

(1) Puisque la période des oscillations est limitée et qu'elle a pour valeur

$$T = 2\pi\sqrt{cl},$$

la valeur du produit cl est également limitée. Cette valeur est bien déterminée, pour une valeur donnée de T , et il faut que la capacité c soit petite si la self-induction l doit être grande par rapport à elle.

(2) Voir chapitre XIII, page 274.

d'oscillation est la même ($c_2 l_2 = c_1 l_1$), mais dont la capacité présente la plus grande valeur possible. Enfin ces deux circuits, ou un seul d'entre eux, agissent inductivement, par un accouplement lâche, sur l'antenne d'émission A. Un dispositif quelconque approprié permet d'effectuer les signaux.

Dispositifs Fessenden.

M. Fessenden a utilisé plusieurs dispositifs à arc qu'il a abandonnés dans la suite pour employer un alternateur à très haute fréquence.

L'arc jaillissait à l'intérieur d'un récipient contenant du

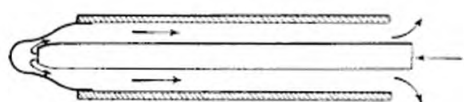


FIG. 196.

gaz comprimé à une pression de 6 kilogrammes: ce gaz était généralement de l'air, mais parfois aussi de l'hydrogène. Les deux

électrodes étaient refroidies par une circulation d'eau intérieure.

Chacune d'elles était formée, comme l'indique la figure 196, d'un tube métallique terminé par une calotte très mince en argent. Cette calotte, d'environ 0^{mm},4 d'épaisseur, était maintenue toujours froide par une circulation d'eau intérieure.

L'arc E était alimenté par une génératrice à courant continu à 4500

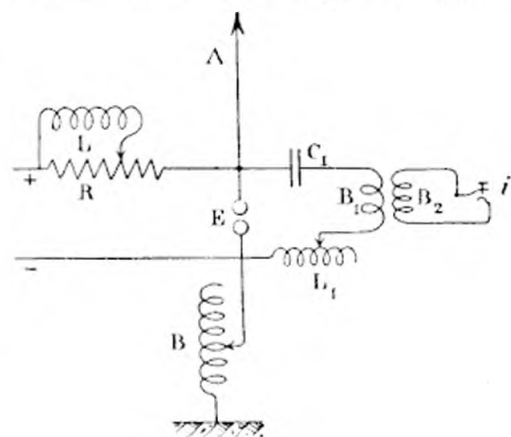


FIG. 197.

volts (fig. 197) à laquelle il était relié par la résistance et la bobine de self-induction réglables combinées RL. L'antenne

aboutissait directement à l'une des électrodes; l'autre était connectée à la terre par l'intermédiaire d'une bobine d'accord B. Sur l'arc était branché le circuit oscillant C, B, L_1 .

Pour l'émission des signaux, on absorbait de l'énergie du circuit oscillant dans un circuit accouplé inductivement avec lui: par exemple la bobine B_1 agissait sur une boucle de fil mobile ou bien était accouplée, par la bobine B_2 , avec un circuit fixe contenant l'interrupteur i .

Dispositif Collins.

Dans ce dispositif, les électrodes sont formées par les tranches de deux disques en charbon tournant en sens inverses avec une grande vitesse de rotation. Un puissant soufflage magnétique agit transversalement sur l'arc, qu'alimente une source de courant continu à 2500 volts. La description de ce système sera donnée à propos des dispositifs employés en radiotéléphonie.

Dispositif Ruhmer.

M. Ruhmer a établi plusieurs appareils dans lesquels l'arc est complètement éteint et rallumé à chaque oscillation.

L'un de ces dispositifs est représenté par la figure 198. Les électrodes sont formées par deux fils FF' de section prismatique, généralement en aluminium, enroulés chacun sur un tambour et passant à faible distance l'un de l'autre sur des guides GG' refroidis par une circulation d'eau intérieure. Les fils se déroulent d'une façon continue et les parties entre lesquelles jaillit l'arc se renouvellent constamment.

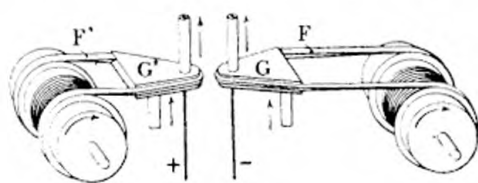


FIG. 198.

Grâce à la disposition adoptée, les électrodes sont toujours froides, et la longueur de l'arc reste invariable. Le déplacement des électrodes facilite grandement la rupture de l'arc : on peut, en outre, placer entre elles une cloison percée d'un trou par lequel il passe ; on augmente ainsi son refroidissement et son instabilité. On peut également faire agir sur lui un soufflage magnétique énergique.

La source de courant continu produit une différence de potentiel de 1000 ou 2000 volts. Le circuit oscillant est branché en dérivation sur l'arc, comme dans les systèmes précédents.

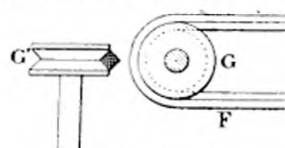


FIG. 199.

Pour fixer encore plus nettement la position de l'arc, M. Ruhmer a disposé les deux fils perpendiculairement l'un à l'autre, comme l'indique la figure 199 : les deux poulies-guides GG' sont creuses et sont refroidies par une circulation d'eau.

Dispositif Peuckert.

L'appareil établi par M. Peuckert peut être rattaché aux systèmes à arc, bien qu'il en diffère assez notablement.

Les électrodes sont constituées par deux disques parallèles en cuivre rouge ou en cuivre argenté placés à une très faible distance l'un de l'autre (environ un dixième de millimètre). L'un des disques est fixe et l'autre tourne autour de son axe à la vitesse de 800 tours par minute. Les deux disques sont séparés par une mince couche d'huile qui se renouvelle constamment, l'huile étant amenée au centre du disque tournant.

L'appareil est constitué de la façon suivante : un bâti inférieur, servant de carcasse à un petit moteur électrique à arbre vertical, supporte un disque fixe horizontal, soigneusement isolé de lui. L'arbre du moteur porte le disque mo-

bile dont une vis de rappel permet de modifier l'écartement par rapport au précédent: une bague métallique, sur laquelle frotte un balai, assure le contact électrique entre le disque mobile et le circuit extérieur. Un godet graisseur, placé à l'extrémité supérieure de l'arbre, contient de l'huile qui coule, par un trou central, jusqu'à la surface de séparation des deux disques entre lesquels elle forme une mince couche.

L'appareil à deux disques convient pour une tension de 600 à 800 volts. Il absorbe environ 4 à 5 ampères et peut être alimenté par du courant continu ou par du courant alternatif: le premier doit être préféré. Si l'on veut augmenter la quantité d'énergie en jeu, il suffit d'employer plusieurs couples de disques successifs, et d'accroître proportionnellement la tension.

La figure 200 représente le montage adopté. L'appareil E à disque tournant est relié à la source de courant par l'intermédiaire d'une bobine de self induction L et d'une résistance R . Un circuit oscillant B_1C_1 est branché en dérivation sur l'arc, et la bobine B_1 agit inductivement sur l'antenne A .

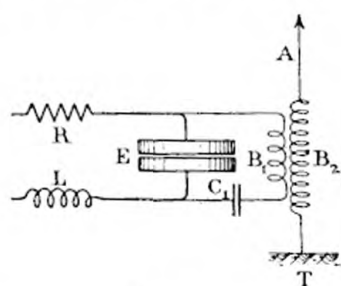


Fig. 200.

Dispositif de Lepel.

Dans le système imaginé par M. de Lepel, l'arc jaillit entre deux plateaux métalliques séparés l'un de l'autre par une ou deux épaisseurs de papier fin, excepté au centre où les feuilles de papier sont percées d'un large trou. Le papier brûle lentement sur le pourtour du trou, et doit être remplacé seulement au bout de deux ou trois heures de service continu. Les plateaux sont généralement creux et sont maintenus froids par une circulation d'eau: il est très important

que leur refroidissement soit parfaitement assuré. L'arc est alimenté par du courant continu ou alternatif à 400 ou 500 volts: une résistance limite l'intensité à une valeur de quelques ampères.

La disposition adoptée pour la transmission est représentée par la figure 201. L'arc E , sur lequel est branché le circuit B_1C_1 , est intercalé directement dans l'antenne. En outre, la bobine B_1 du circuit oscillant agit inductivement sur la bobine B_2 : l'accouplement est donc très rigide. Une bobine B' et un condensateur C' permettent d'effectuer les réglages nécessaires. Bien entendu, le circuit oscillant B_1C_1 est accordé avec l'antenne. Le circuit d'alimentation contient une résistance réglable R et un interrupteur i servant pour l'émission des signaux.

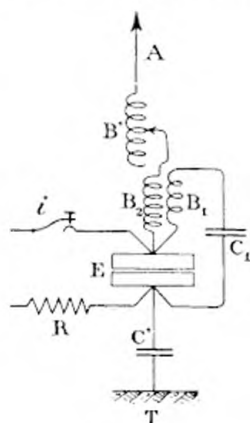


FIG. 201.

La disposition adoptée pour la réception est représentée par la figure 202. L'antenne aboutit à un circuit oscillant

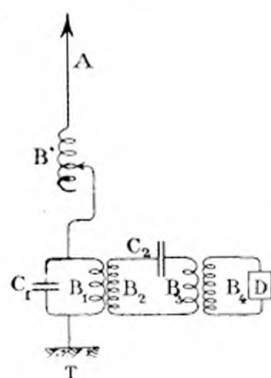


FIG. 202.

B_1C_1 , qui agit inductivement sur un circuit intermédiaire $B_2C_2B_3$. La bobine B_3 est accouplée avec la bobine B_1 , intercalée dans le circuit du détecteur D . Celui-ci est du type thermo-électrique. Le circuit intermédiaire $B_2C_2B_3$, le circuit oscillant B_1C_1 et l'antenne A sont accordés sur la même fréquence. Le circuit du détecteur n'est pas accordé, et effectue des oscillations forcées.

En raison de la continuité des ondes engendrées, on intercale, dans le circuit du détecteur, un

vibrateur convenable, ou bien, d'après une récente disposition, on produit, au transmetteur, une variation périodique du courant oscillant. La fréquence de cette variation correspond à un son musical.

Dispositifs basés sur l'emploi d'un alternateur à haute fréquence.

Il est évident que si l'on parvenait à établir des machines électriques d'une puissance suffisante, produisant directement le courant alternatif de très grande fréquence⁽¹⁾ nécessaire pour mettre l'antenne en vibration, on réaliserait un progrès considérable en radiotélégraphie et surtout en radiotéléphonie.

Une telle source d'oscillations régulières serait d'un emploi simple et commode pour l'excitation directe ou indirecte de l'antenne. Le manipulateur, servant à l'émission des signaux, pourrait être intercalé dans le circuit d'excitation de l'alternateur, ou sur l'antenne, ou dans un circuit approprié accouplé avec elle.

Malheureusement, comme cela a été dit au chapitre v, la construction d'une telle machine présente des difficultés presque insurmontables.

Dispositif Fessenden.

M. Fessenden est parvenu après beaucoup d'efforts, avec le concours de constructeurs américains (General Elec-

(1) Les antennes les plus hautes et les plus volumineuses correspondent à des longueurs d'onde de 2 000 à 3 000 mètres, c'est-à-dire à des fréquences de 150 000 à 100 000 par seconde. Dans les postes transatlantiques à antennes horizontales de la Cie Marconi, la longueur d'onde atteint presque 5 000 mètres et correspond à une fréquence de 61 000 environ par seconde : c'est la plus grande longueur d'onde employée pratiquement en radiotélégraphie.

tric C°), à établir un alternateur à haute fréquence de puissance utilisable (2 kilowatts).

Dans un premier modèle, qui ne semble pas avoir donné de résultats satisfaisants, la partie mobile de l'alternateur était directement accouplée avec une petite turbine à vapeur du système de Laval, tournant à une vitesse énorme : la roue à aubes de cette turbine avait moins de dix centimètres de diamètre.

Dans le type de machine actuellement employé par M. Fessenden, l'inducteur et l'induit sont tous deux fixes : une roue dentée en acier vient fermer le circuit magnétique de l'inducteur et provoque ainsi, dans sa rotation, les variations de flux nécessaires pour la production d'une force électromotrice induite.

La disposition adoptée est indiquée en demi-coupe par la figure 203. Une carcasse creuse en fer C contient une bobine inductrice annulaire B. Sur les bords intérieurs des

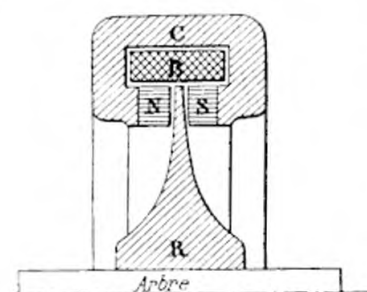


FIG. 203.

joues de cette carcasse sont fixés, comme le montre la figure, des paquets de tôles formant deux anneaux circulaires placés l'un en face de l'autre. Ces anneaux portent chacun 600 rainures radiales très rapprochées, dans lesquelles est logé un fil de cuivre de 33 centièmes de millimètre,

soigneusement isolé à la soie vernie : le fil est plié en zigzag pour passer successivement dans toutes les rainures.

La bobine inductrice produit dans la carcasse un flux magnétique qui vient se refermer par l'espace compris entre les anneaux de tôles NS, et qui traverse ainsi l'enroulement induit constitué par le fil en zigzag. Entre les deux anneaux se déplace une roue R portant 300 projections polaires, ou

dents. Quand cette roue polaire tourne, le flux magnétique embrassé par une boucle quelconque de l'induit présente des pulsations périodiques, puisqu'il trouve tantôt un passage de faible réluctance à travers le fer d'une dent polaire, tantôt un passage de réluctance élevée à travers l'air d'une encoche de la roue polaire. Une force électromotrice est donc induite dans chaque boucle de l'enroulement induit, et sa fréquence est égale au nombre de projections ou dents de la roue R, multiplié par la vitesse de rotation de celle-ci par seconde.

La roue polaire a un diamètre de 30 centimètres et tourne à une vitesse de rotation de 20 000 tours par minute, correspondant à une vitesse périphérique de 300 mètres par seconde⁽¹⁾. Pour qu'elle puisse résister aux efforts énormes dus à la force centrifuge, on l'a construite en acier spécial au chrome-nickel et on lui a donné une forme présentant le maximum de résistance.

La partie mobile de l'alternateur est entraînée par un moteur électrique, avec interposition d'engrenages donnant un rapport de multiplication de 10/1. La fréquence du courant alternatif est de 100 000 périodes par seconde, pour la vitesse de rotation de 20 000 tours par minute. La machine peut débiter, sur un circuit contenant un condensateur, un courant de 30 ampères sous une différence de potentiel de 70 volts : sa puissance est donc un peu supérieure à 2 kilowatts. Les constructeurs espèrent pouvoir établir un alternateur analogue de puissance relativement grande (une trentaine de kilowatts), produisant du courant de fréquence 50 000.

Pour que la fréquence soit constante, il faut que la vitesse

(1) Une vitesse de 300 mètres par seconde correspond à 18 kilomètres par minute ou plus de 1 000 kilomètres à l'heure.

de rotation reste invariable. Ce résultat est obtenu par le jeu d'un dispositif électromagnétique commandant le régulateur du moteur électrique qui entraîne l'alternateur.

Un circuit oscillant, accouplé inductivement avec l'antenne, est accordé sur la fréquence que l'on désire maintenir constante, ou, plus exactement, sur une fréquence un peu plus élevée. Ce circuit, représenté à droite de la figure 204, comprend un condensateur C_3 , une bobine de self-induction réglable L_3 , et un relais H spécial à deux contacts.

Si la vitesse de rotation augmente, l'amplitude des oscillations du circuit auxiliaire varie sous l'effet de la résonance; la partie mobile du relais se déplace, et elle ferme un circuit de réglage du moteur. Si, au contraire, la vitesse de rotation diminue, la partie mobile du relais se déplace de l'autre côté, et elle ferme un second circuit de réglage du moteur. Quand la vitesse est normale, la partie mobile du relais reste à sa position moyenne, et les deux circuits de réglage sont ouverts.

On peut modifier à volonté la valeur de la fréquence que l'on désire maintenir constante: il suffit, pour cela, de faire varier la longueur active de la bobine L_3 en modifiant le point de contact d'un curseur qui se déplace devant une échelle graduée. La mise en circuit ou hors circuit d'un tour de la bobine L_3 correspond à une variation de fréquence de 0,25 pour 100.

Le montage employé par M. Fessenden pour les transmissions et les réceptions radiotélégraphiques est représenté d'une façon complète par la figure 204.

L'alternateur à haute fréquence G est relié à un circuit contenant quatre bobines d'accouplement semblables B_1 . Ces bobines agissent inductivement sur un circuit secondaire contenant quatre bobines B_2 embrochées entre l'antenne et la terre. Entre deux groupes de bobines B_2 , le circuit secon-

daire contient, en outre, un « contre-poids d'antenne » comprenant un condensateur réglable C , une bobine de self-induction réglable L et une résistance réglable R : ce contre-poids est destiné à équilibrer l'antenne. Le détecteur électrolytique D servant à la réception est branché entre les jonctions des deux paires de bobines B_2 .

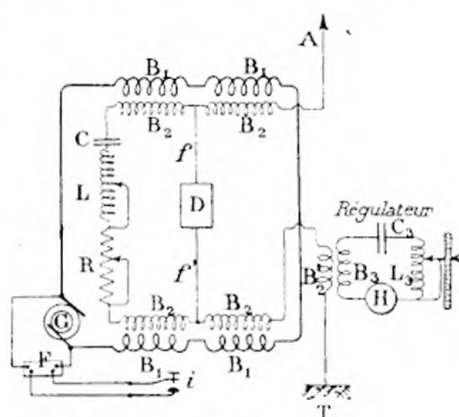


FIG. 204.

La disposition générale indiquée par la figure 204 permet d'effectuer simultanément une transmission et une réception sans modifier aucune connexion et avec une seule antenne.

Lorsque le contre-poids d'antenne est réglé de façon à équilibrer exactement celle-ci, les deux circuits situés de part et d'autre de la jonction médiane f/f' qui contient le détecteur sont parfaitement symétriques (d'une part l'antenne, la prise de terre, et deux bobines B_2 ; d'autre part le contre-poids d'antenne et deux bobines B_2). Quand l'alternateur fonctionne, aucun courant ne circule dans cette jonction f/f' et le détecteur n'est pas impressionné: le poste peut donc effectuer des transmissions sans aucun inconvénient.

Quand on emploie, au lieu d'un détecteur électrolytique, le détecteur *hétérodyne* dont il sera question plus loin, il est nécessaire que le courant de l'alternateur ait une faible action sur ce détecteur, et, pour cela, on règle le contre-poids de façon que l'équilibre avec l'antenne soit un peu dépassé.

Pour l'émission des signaux, M. Fessenden emploie un

interrupteur i qui ferme le circuit d'un appareil F ayant pour rôle de modifier légèrement la fréquence du courant alternatif. Quand l'interrupteur est abaissé, la fréquence a sa valeur normale et le détecteur du poste récepteur est impressionné. Quand l'interrupteur est relevé, la fréquence est modifiée d'environ 0,05 pour 100, et cette variation suffit pour que le détecteur du poste récepteur ne soit plus impressionné.

Les ondes étant émises d'une façon continue et les variations de fréquence employées pour l'émission des signaux étant très faibles, les postes voisins ne sont pas gênés par les transmissions faites avec ce système et ne peuvent pas troubler les communications.

Pour la réception, M. Fessenden abandonne souvent le détecteur électrolytique et emploie directement un récepteur téléphonique spécial très sensible. Le principe de cet appareil, appelé par lui *récepteur hétérodyne*, est le suivant :

Un téléphone est muni d'un noyau fixe formé de fils de fer très fins qu'entoure une bobine excitée par une source de courant alternatif à haute fréquence (dans le dispositif de la fig. 204, la bobine est excitée indirectement par l'alternateur G). Une petite bobine, avec ou sans noyau magnétique, est collée contre un diaphragme mince en mica et est excitée par les oscillations engendrées dans l'antenne sous l'effet des ondes reçues.

Quand une seule des deux bobines est parcourue par un courant alternatif de très haute fréquence, 80 000 par seconde par exemple, la membrane du téléphone entre en vibration, mais elle ne fait entendre aucun son, puisque des vibrations aussi rapides ne sont pas perceptibles à notre oreille. Mais si l'une des bobines est parcourue par un courant de fréquence 80 000, et l'autre bobine par un courant de fréquence 80 500,

les vibrations résultantes de la membrane présentent 500 battements par seconde, qui correspondent à un son musical. En service normal, on emploie donc, aux postes transmetteur et récepteur, deux fréquences légèrement différentes de façon à obtenir des battements dans le récepteur, et le détecteur ainsi réalisé présente une très grande sensibilité.

Afin de sélectionner complètement les signaux, M. Fessenden a fait établir des membranes de téléphone dont la fréquence propre de vibration correspond à la fréquence normale des battements ⁽¹⁾. La membrane du téléphone récepteur étant en résonance mécanique avec les impulsions qui agissent sur elles, on obtient le maximum d'effet, tandis que ce récepteur reste muet sous l'effet des impulsions dues à des signaux étrangers et n'ayant pas sa fréquence propre de vibration.

Dispositifs utilisant différentes combinaisons de circuits oscillants et d'éclateurs.

On a imaginé divers dispositifs, employant un ou plusieurs éclateurs fixes ou tournants, associés avec des circuits oscillants capables de réagir les uns sur les autres. Nous allons passer en revue les plus intéressants d'entre eux.

Dispositifs Marconi.

Dans un premier dispositif, M. Marconi a employé une sorte d'interrupteur tournant, alimenté par du courant continu à haute tension ou bien, faute de celui-ci, par du cou-

(1) Les récepteurs téléphoniques établis pour une seule fréquence de vibration bien déterminée ont été appelés *monotéléphones* par M. Mercadier. C'est lui qui, le premier, a réalisé de tels appareils dont il a proposé l'emploi pour sélectionner des courants de fréquences différentes superposés les uns aux autres (voir page 382).

rant alternatif. Cet appareil avait pour fonction de produire des charges et décharges d'un condensateur avec une fréquence égale à la fréquence propre du circuit oscillant contenant le condensateur.

Les figures 205 et 206 montrent la constitution de l'appareil et le montage employé.

Une roue dentée R (fig. 205) est formée de deux plateaux métalliques PP' rigidement assemblés, mais isolés électriquement l'un de l'autre. Ces plateaux portent à leur périphérie des dents DD' qui alternent entre elles, les dents de l'un correspondant aux encoches de l'autre. Deux arbres AA', situés dans le prolongement l'un de l'autre, permettent de faire tourner la roue dentée R.

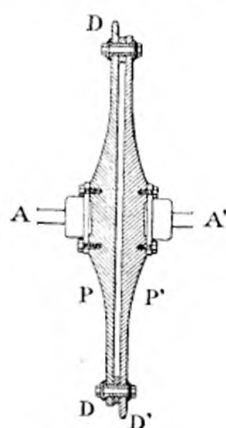


FIG. 205.

En face des dents de la roue R (fig. 206) se déplacent les dents d'une seconde roue R' formée d'un disque métallique

unique muni à sa périphérie d'autant de dents que l'un des plateaux P ou P'. Les roues R et R' tournent en sens inverses autour de deux axes parallèles avec la même vitesse de rotation. Deux balais B₁B₂ frottent chacun sur l'un des disques de la roue R; un balai B' frotte sur la roue R': ces balais assurent la liaison électrique des roues dentées avec les circuits oscillants.

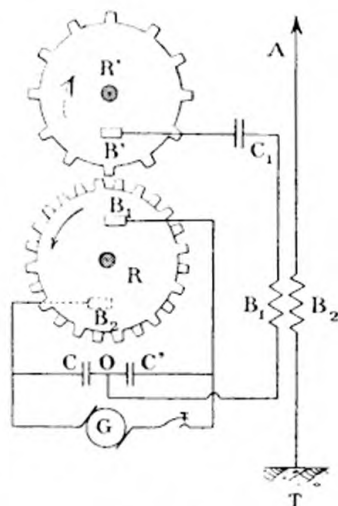


FIG. 206.

Les connexions sont établies comme l'indique la figure

206. Une génératrice à haute tension G est reliée aux deux balais B_1B_2 et aux deux condensateurs C et C' . Entre ceux-ci est branché un circuit oscillant qui contient la bobine d'accouplement B_1 et le condensateur C_1 , et qui aboutit au balai B' frottant sur la roue R' .

Le fonctionnement est le suivant. Chaque fois qu'une dent D' de la roue R' passe en face d'un groupe de deux dents opposées D_1D_2 de la roue R (fig. 207), une étincelle jaillit soit entre D' et D_1 , soit entre D' et D_2 . Supposons qu'elle jaillisse entre D' et D_1 . Le condensateur C_1 se charge et le potentiel de son armature gauche devient égal au potentiel (+) du balai gauche de la génératrice G . Il existe alors entre les dents D' et D_2 une différence de potentiel égale à celle de la génératrice G , et une étincelle jaillit entre elles, établissant une jonction électrique par laquelle l'armature gauche du condensateur C_1 se trouve portée au potentiel

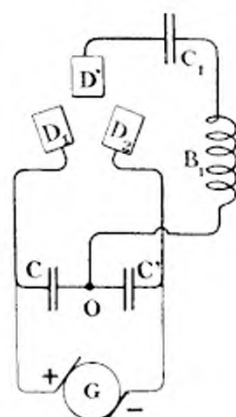


Fig. 207.

(—) du balai droit de la génératrice G . Le passage successif de l'étincelle entre D' et D_1 , puis entre D' et D_2 a donc pour effet de charger d'abord dans un sens, puis en sens inverse, le condensateur C_1 . Le circuit oscillant C_1B_1 est ainsi mis en vibration : l'amplitude des oscillations atteint une valeur élevée si la fréquence des impulsions produites par l'appareil concorde avec la fréquence propre d'oscillation du circuit (résonance).

Le dispositif décrit présente un certain nombre d'inconvénients. Pour que la fréquence des décharges soit très élevée, on est obligé d'établir les roues R et R' avec des dents très rapprochées, et, dans ces conditions, l'arc peut jaillir à la fois sur plusieurs dents ou subsister entre elles, malgré le

soufflage dû à la grande vitesse de rotation et malgré un jet d'air comprimé auxiliaire qui a parfois été employé. C'est pourquoi M. Marconi l'a modifié de la façon suivante :

Un disque métallique lisse D' (fig. 208) tourne entre deux disques lisses D_1D_2 dont les plans sont perpendiculaires au

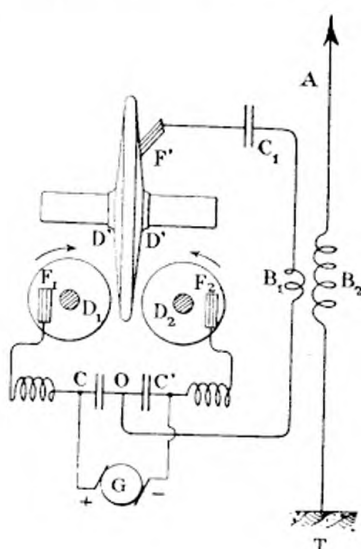


FIG. 208.

sien : ces deux disques sont eux-mêmes animés d'une vitesse de rotation élevée. Des frotteurs F_1F_2F' assurent les liaisons électriques nécessaires entre les disques et les circuits. Le montage des condensateurs et du circuit oscillant est le même que dans le dispositif précédent, et le fonctionnement est identique. Le disque central a une vitesse périphérique de plus de 100 mètres par seconde. La distance explosive a la même valeur entre les disques D_1D' et D_2D' :

elle est très petite. La grande vitesse de rotation des trois disques produit un soufflage très énergique des étincelles, qui sont rompues presque instantanément après leur établissement.

Un manipulateur, intercalé sur le circuit d'alimentation, permet l'émission des signaux.

Dispositif Vreeland.

Ce dispositif est basé sur l'emploi d'un éclateur à trois électrodes, placées dans un récipient vide d'air. L'une d'elles E (fig. 209) est en mercure ; les deux autres E_1E_2 sont en fer, en nickel, ou en platine.

Les deux électrodes supérieures sont reliées à un conden-

sateur C. L'électrode inférieure est connectée à l'un des pôles d'une génératrice à courant continu G dont l'autre pôle est relié aux armatures du condensateur C, par l'intermédiaire des bobines L_1L_2 . Celles-ci exercent sur l'arc un soufflage magnétique puissant.

Le fonctionnement de cet appareil est le suivant : quand l'arc

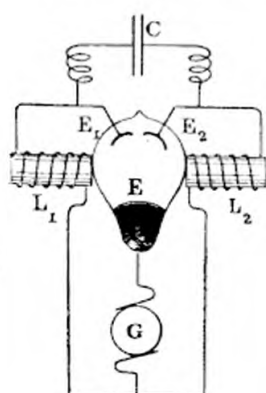


FIG. 209.

a jailli (par un amorçage auxiliaire convenable, tel qu'une décharge préliminaire) entre les électrodes E et E_1 par exemple, l'action de la bobine L_1 le souffle et le rejette sur l'électrode E_2 . Quand il jaillit entre E et E_2 , l'action de la bobine L_2 le souffle et le rejette sur l'électrode E_1 , et ainsi de suite.

Le condensateur C est soumis à une différence de potentiel alternative qui varie avec une très grande rapidité, et le circuit dans lequel il est intercalé entre en vibration. On peut régler l'appareil pour que la fréquence des interruptions de courant soit égale à la fréquence propre du circuit du condensateur.

Dispositifs Galetti.

M. Galetti a réalisé plusieurs dispositifs basés sur le fait qu'une décharge intense peut traverser un éclateur sous l'effet d'une différence de potentiel relativement faible si elle a été préalablement amorcée par le passage d'une étincelle.

Dans un premier dispositif (fig. 210), un certain nombre de circuits oscillants voisins sont reliés à une génératrice à courant continu à haute tension. Chaque circuit comprend un condensateur C_1 , une bobine de self-induction B_1 , et un éclateur $E_1E'_1$. Chaque éclateur est muni d'une électrode auxiliaire reliée au circuit oscillant voisin.

Quand l'un des circuits $B_3E_3C_3$, par exemple, est mis en vibration, l'électrode E_3'' qui lui est reliée amorce une étincelle dans l'éclateur E_2E_2' du circuit voisin ; une décharge traverse alors cet éclateur et le circuit oscillant B_2C_2 est mis en vibration. A son tour, l'électrode E_2'' détermine l'amorçage de la décharge dans l'éclateur E_1E_1' : le circuit B_1C_1 entre en vibration ; et ainsi de suite. Si le premier éclateur est associé avec le dernier circuit oscillant, les phénomènes se reproduisent

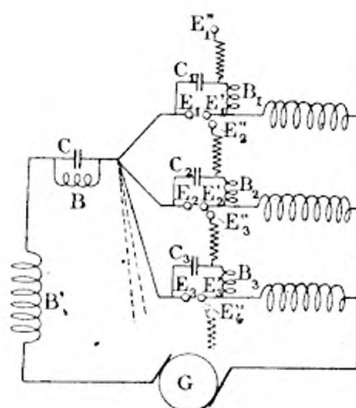


FIG. 210.

indéfiniment et automatiquement.

Le circuit principal qui contient le condensateur C , associé avec la bobine de self-induction B , est le siège d'oscillations entretenues parfaitement régulières, résultant du passage de la décharge successivement par tous les circuits partiels. Ce circuit peut être accouplé d'une façon quelconque avec l'antenne d'émission.

Dans un deuxième dispositif (fig. 211), quatre condensateurs identiques $C_1C_2C_3C_4$ sont chargés par un générateur G à courant continu. Deux d'entre eux, C_1 et C_3 sont reliés chacun à un éclateur E_1 et E_3 . Les fréquences propres des petits circuits oscillants C_1E_1 et C_3E_3 , ainsi que la fréquence propre du circuit oscillant général $C_1L_1C_2C_3L_2C_4$, sont les mêmes ; tous ces circuits sont en résonance.

Si par exemple une décharge jaillit en E_1 , il se produit des oscillations dans le petit circuit formé par le condensateur C_1 et l'éclateur E_1 : le circuit oscillant général $C_1L_1C_2C_3L_2C_4$, accordé sur la même fréquence, entre aussi en vibration.

Comme il présente un faible amortissement, les oscillations engendrées y persistent après le passage de la décharge en E_1 , et sont suffisamment puissantes pour que la tension oscillante existant entre les armatures du condensateur C_3 détermine le passage d'une étincelle dans l'éclateur E_3 . Il se produit alors en E_3 une décharge qui

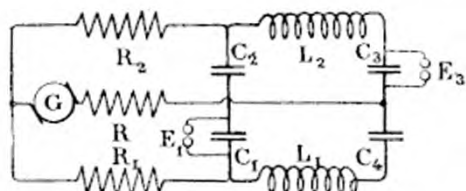


FIG. 211.

met en vibration le petit circuit C_3E_3 , et aussi le circuit principal $C_3L_2C_2C_1L_1C_4$. A nouveau, l'éclateur E_1 est traversé par une étincelle, et ainsi de suite : à la fin de chaque décharge en E_1 ou E_3 , il y a une tension oscillante maxima engendrée entre les boules de l'éclateur opposé.

Des expériences, faites avec ce dispositif, ont donné des résultats satisfaisants. La différence de potentiel produite par le générateur G à courant continu était d'abord de 25 000 volts, puis de 40 000 volts⁽¹⁾. L'intensité d'alimentation pouvait atteindre 5 ampères.

DISPOSITIFS A ÉTINCELLES MUSICALES

Les dispositifs usuels à étincelles raréfiées présentent deux inconvénients principaux :

- les ondes sont fortement amorties et complexes;
- les signaux perçus au poste récepteur sont entendus dans le téléphone sous forme de crachements que rien ne distingue de ceux produits par les signaux étrangers ou parasites.

⁽¹⁾ Ces expériences ont été faites à l'usine de Saint-Maurice (courant continu à 25 000 volts) et à l'usine de Moutiers (courant continu à 40 000 volts.)

Les nouveaux dispositifs à étincelles fréquentes présentent les avantages suivants :

les ondes sont moins amorties et plus pures ;

les signaux perçus au poste récepteur ont une note propre caractéristique qui les distingue des signaux étrangers ou parasites.

Il est évident que, pour une même dépense totale d'énergie au poste transmetteur, chaque décharge est beaucoup moins puissante avec les nouveaux dispositifs qu'avec les précédents⁽¹⁾, puisque l'énergie disponible se répartit sur un bien plus grand nombre de décharges. La portée doit donc être moins longue.

Néanmoins, la meilleure utilisation des effets de résonance compense en partie cette diminution. En outre, le récepteur téléphonique présente un maximum de sensibilité pour un nombre de vibrations de sa membrane compris entre 500 et 1 000 par seconde environ : il en est de même de l'oreille humaine. Pour ces deux raisons, la portée des dispositifs à étincelles fréquentes n'est pas trop inférieure à celle des dispositifs à étincelles raréfiées, pour une même dépense d'énergie.

Il est à peine besoin de faire remarquer que les dispositifs à étincelles fréquentes ne présentent plus que des avantages par rapport aux autres si la puissance primaire disponible n'est pas limitée. Par exemple, il arrive que la puissance mise en jeu dans un poste transmetteur à étincelles raréfiées soit limitée non pas par une question de dépense,

(1) On peut remarquer en passant que, pour une même valeur de l'énergie primaire totale dépensée, les condensateurs employés avec les nouveaux dispositifs devront avoir une capacité beaucoup plus faible (à tension de charge égale) que ceux employés avec les dispositifs à étincelles raréfiées. En effet la quantité d'énergie qu'ils doivent accumuler est celle qui correspond à chaque décharge, et celle-ci est beaucoup moins grande dans le premier cas que dans le second.

mais par le fait que la batterie de condensateurs et l'antenne ne peuvent pas absorber une quantité d'énergie supérieure à un certain maximum. Dans ces conditions, il est évident qu'un dispositif utilisant par seconde 600 décharges aussi puissantes que celles d'un dispositif à 20 étincelles par seconde, permettra d'obtenir des effets beaucoup plus intenses, mais la dépense d'énergie sera trente fois plus considérable.

Les dispositifs à étincelles fréquentes tiennent une place intermédiaire entre les dispositifs à oscillations amorties et les dispositifs à oscillations entretenues.

Ils peuvent être classés en deux catégories distinctes :

dans ceux de la *première catégorie*, la fréquence des décharges est déterminée par des *procédés mécaniques*.

dans ceux de la *seconde catégorie*, la fréquence des décharges est déterminée par des *procédés électriques*.

Dispositifs basés sur des procédés mécaniques.

Ces dispositifs reposent sur l'emploi d'un éclateur tournant dans lequel une pièce rotative, munie d'un certain nombre de saillies, tourne entre deux pièces fixes. Chaque fois que les saillies de la pièce mobile passent en regard des pièces fixes, une étincelle jaillit entre elles, si la tension d'alimentation est suffisamment élevée, et une décharge se produit. La vitesse de rotation de la pièce mobile et le nombre de saillies déterminent la fréquence des décharges et, par suite, la hauteur du son des étincelles musicales.

Les éclateurs tournants offrent, en outre, l'avantage que les étincelles sont promptement soufflées par le courant d'air et rompues par l'allongement de la distance explosive ; il y a donc moins de tendance à la formation d'arc, et les décharges sont plus nettes et plus efficaces.

Il n'est peut-être pas superflu de rappeler que les éclateurs tournants ont été employés par le D^r d'Arsonval avant 1900, pour la production des courants de haute fréquence et de forte intensité destinés aux usages médicaux.

Dispositif Marconi.

Un disque métallique D', d'environ 60 centimètres de diamètre (fig. 212), tourne à la vitesse de 3000 tours par minute et porte, sur chacune de ses faces, un certain nombre de saillies *s* en cuivre qui se correspon-

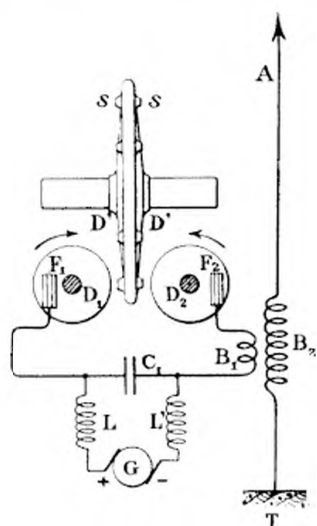


FIG. 212.

dent deux à deux. Il se déplace entre deux autres disques D₁ et D₂, perpendiculaires à son plan, qui tournent aussi avec une grande vitesse. L'intervalle existant entre les disques D₁D₂ et les saillies *s*, au moment du passage de celles-ci, est très petit. Deux balais frotteurs F₁F₂ assurent la liaison électrique entre les disques D₁D₂ et le circuit oscillant B₁C₁ accouplé à l'antenne.

Les deux armatures du condensateur C₁ sont reliées, par l'intermédiaire des bobines LL', à la génératrice G qui produit du courant continu à haute tension, ou, faute de celui-ci, du courant alternatif. La self-induction des deux bobines LL' est réglée pour que la fréquence propre d'oscillation du circuit LGL/C₁ soit une fraction exacte de la fréquence des passages des saillies *ss* en face des disques D₁D₂, c'est-à-dire de la fréquence des décharges.

Chaque fois qu'une paire de saillies *ss* vient en regard des disques D₁D₂, le condensateur C₁, chargé par la génératrice G, se décharge à travers l'éclateur tournant et met en vibra-

tion le circuit oscillant C_1B_1 . La rapide rotation du disque D' , ainsi que le fort amortissement dû à la radiation de l'antenne, permettent une extinction rapide des étincelles et évitent la détérioration des disques D_1D_2 et des saillies.

Plus l'antenne peut rayonner d'énergie, et plus on élève la tension d'alimentation produite par la génératrice G . La tension de fonctionnement ne dépend pas de l'intervalle explosif existant entre les saillies ss et les disques ; elle doit avoir une valeur supérieure à celle qui correspond à cet intervalle. La fréquence des décharges détermine la hauteur du son perçu dans le téléphone au poste récepteur : plus ce son est élevé, plus est nette la distinction des signaux.

Dans la suite, M. Marconi a trouvé plus avantageux de disposer le circuit oscillant de la même manière que dans le montage de la figure 208. La figure 213 indique cette disposition, employée avec succès

dans les postes radiotélégraphiques de grande puissance qui doivent assurer les communications transatlantiques entre Clifden et Glace Bay. Le fonctionnement en est le même que celui précédemment décrit.

Au poste récepteur, M. Marconi emploie comme détecteur, pour les grandes distances, la valve Fleming.

Dispositif Balsillie.

La Radiotelegraph and-telephone C^o se sert de l'éclateur tournant que représente la figure 214. La partie mobile porte

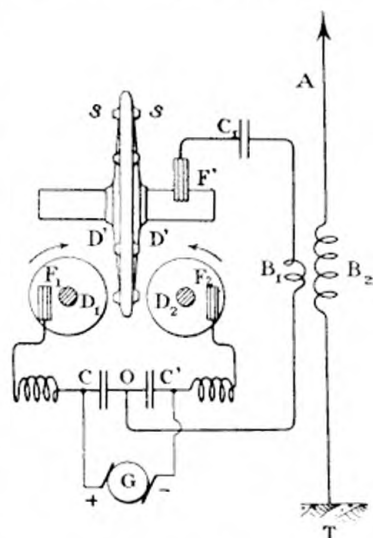


FIG. 213.

8 peignes comprenant chacun 30 dents. Elle se déplace entre deux peignes fixes qui comprennent également 30 dents. La disposition spéciale de ces peignes, arqués en forme d'aubes, permet d'obtenir un courant d'air extrêmement énergique qui agit entre les séries de pointes et souffle violemment les étincelles.

L'éclateur tournant est alimenté par du courant alternatif: il peut donner, suivant sa vitesse de rotation, 300 à 1500

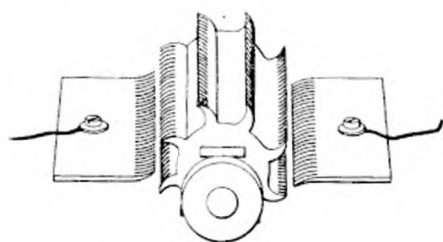


FIG. 214.

décharges par seconde. A chaque décharge, le courant oscillant passe par 30 étincelles en parallèle; la détérioration des électrodes est donc très minime.

Au poste récepteur, M. Balsillie emploie un détecteur magnétique très sensible. Cet appareil peut être, à volonté, embroché sur l'antenne ou intercalé dans un circuit oscillant accouplé avec elle. Il comprend plusieurs petits noyaux de fer doux, qu'un mécanisme fait tourner d'une façon continue dans un champ magnétique fixe produit par des aimants. Ces noyaux portent chacun un enroulement primaire traversé par les oscillations électriques: sur tous ces enroulements primaires est disposé un enroulement secondaire relié à un téléphone.

Dispositifs divers.

Le commandant Ferrié s'est servi avec succès, pour de faibles puissances, d'une simple roue dentée en cuivre, tournant entre deux électrodes fixes.

Pour les puissances relativement fortes, il a employé un modèle d'éclateur que représente la figure 215. Un cylindre métallique est traversé par un certain nombre de tiges en

cuivre décalées chacune d'un certain angle par rapport à la précédente. Ce cylindre tourne entre deux pièces métalliques EE' de grande surface. Chaque fois qu'une tige vient à proximité d'elles, une étincelle jaillit : grâce à la disposition

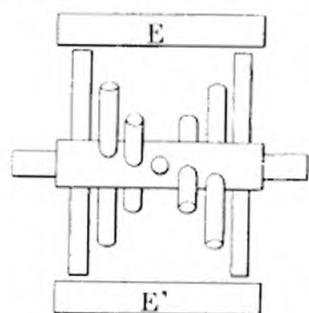


Fig. 215.

adoptée, les points de jaillissement sur les pièces EE' varient pour chaque tige, ce qui assure un bon refroidissement.

M. Petit a obtenu aussi de bons résultats avec une simple roue, portant à sa périphérie des pointes de cuivre facilement remplaçables. Au-dessus et au-dessous des deux pièces fixes, il a disposé des paquets de feuilles de mica, pour empêcher les étincelles de jaillir prématurément ou de persister après le passage des pointes.

M. Koch (Badische Anilin-und Sodafabrik) emploie deux électrodes fixes et un jét d'air comprimé tournant qui vient, à intervalles réguliers, souffler violemment l'étincelle.

Avec tous ces dispositifs, on n'obtient pas un son nettement musical, mais un son sifflant et irrégulier, accompagné de nombreux crachements : cela tient au jaillissement irrégulier des étincelles qui éclatent trop tôt ou trop tard. Néanmoins, la distinction des signaux émis et des signaux parasites est plus facile qu'avec les dispositifs à étincelles raréfiées.

Dispositifs basés sur des procédés électriques.

Dans ces dispositifs, un alternateur à fréquence relativement élevée (500 à 2000) produit le courant nécessaire à

l'alimentation du circuit oscillant. L'éclateur est établi et réglé pour que la distance explosive reste bien constante et pour que les étincelles soient rompues très rapidement après leur formation.

Dispositif Telefunken.

Dans les émetteurs dérivés du dispositif de Braun, le circuit oscillant exciteur présente, malgré la résistance de l'étincelle, un amortissement plus faible que celui de l'antenne avec laquelle il est accouplé : cela tient à la radiation d'énergie. Dans ces conditions, il se produit dans le système accouplé, comme cela a été expliqué, deux groupes d'oscillations de fréquences différentes (').

Mais si le circuit primaire exciteur présente un amortissement beaucoup plus fort que celui de l'antenne, on peut, pour une valeur convenable de l'accouplement, obtenir un seul groupe d'oscillations, ayant la fréquence et l'amortissement de l'antenne.

Ce mode d'excitation par impulsions du circuit oscillant secondaire (ici l'antenne), indiqué par M. Wien, a été mentionné à propos des circuits accouplés (p. 99) : il offre pour la radiotélégraphie l'avantage que l'antenne rayonne des ondes pures. Pour que le primaire (circuit exciteur) présente un amortissement plus fort que le secondaire (antenne) il faut que l'on emploie un éclateur spécial dans lequel les étincelles sont étouffées très rapidement.

La G. f. D. T. a d'abord employé comme éclateurs, dans ce

(') Si l'accouplement est un peu rigide, les fréquences et les amortissements des deux groupes d'oscillations diffèrent notablement.

Si l'accouplement est très lâche, les fréquences de ces deux groupes sont très voisines et se confondent presque. En pratique, on peut considérer qu'il y a un seul groupe d'oscillations, présentant à peu près la fréquence et l'amortissement du *circuit primaire*.

Avec le mode d'excitation par impulsions, dont il va être question, les oscillations ont la fréquence et l'amortissement de l'antenne.

but, des ampoules complètement vides d'air, contenant deux électrodes en mercure EE' (fig. 216). Dans ces appareils⁽¹⁾, chaque étincelle est rompue presque instantanément après sa formation, ce qui limite à une valeur extrêmement faible la durée de la décharge. Malheureusement, il est presque impossible de maintenir le degré de vide constant dans les tubes à mercure, et la moindre trace d'air suffit pour modifier beaucoup les résultats.

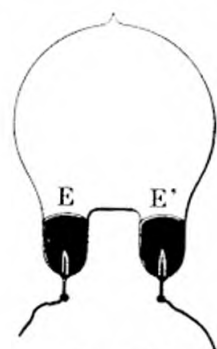


FIG. 216.

Dans la suite, la G. f. D. T. a adopté un éclateur subdivisé à étincelles très courtes. Cet appareil consiste en une série d'éclateurs de Lepel (page 313) superposés. Chacun d'eux comprend deux disques D (fig. 217) en cuivre pur ou argenté⁽²⁾ maintenus à très faible distance l'un de l'autre (environ un quart de millimètre) par une rondelle en mica m , percée d'un large trou en son centre. Chaque disque est prolongé, sur toute sa périphérie, par une ailette mince a

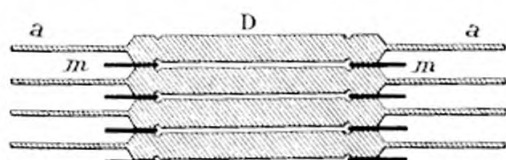


FIG. 217.

dont la grande surface de contact avec l'air assure un bon refroidissement. Les disques sont légèrement creusés dans leur partie

centrale pour empêcher l'étincelle de jaillir juste au centre et de s'y immobiliser. L'action du champ magnétique produit par l'étincelle elle-même a pour effet de la

⁽¹⁾ L'emploi des tubes à mercure en radiotélégraphie a été indiqué par l'auteur en 1902, puis par M. Cooper Hewitt, et ensuite par MM. Simon et Reich.

⁽²⁾ La nature du métal joue un rôle important dans ce type d'éclateurs. Il n'y a qu'avec le cuivre ou l'argent qu'on obtient un bon étouffement des étincelles.

chasser vers les bords, où elle se souffle très rapidement.

Le nombre d'éclateurs partiels mis en série doit être proportionné à la puissance du poste, car l'extinction rapide des étincelles ne se produit que si l'énergie dissipée dans chaque éclateur partiel est relativement faible. Dans les postes de moyenne puissance, il y a, en général, dix éclateurs partiels disposés à peu près comme l'indique la figure 217, qui montre une coupe de quatre d'entre eux.

Le montage des circuits pour la transmission est indiqué par la figure 218.

L'éclateur subdivisé E est alimenté par un alternateur donnant 250 à 1 000 périodes par seconde : la tension est élevée par un transformateur dont le secondaire produit bien 40 000 à 70 000 volts suivant la puissance du poste. Le réglage est fait pour qu'il y ait une décharge à chaque alternance, soit 500 à 2 000 décharges par seconde.

Le circuit oscillant comprend l'éclateur E, le condensateur C, la bobine L et la bobine d'accouplement B (dont la self-induction est progressivement réglable). L'antenne contient la bobine B⁽¹⁾ et une autre bobine réglable B', qui permet de faire varier la longueur d'onde.

Les bobines B et B' sont d'une construction spéciale, qui permet de faire varier progressive-

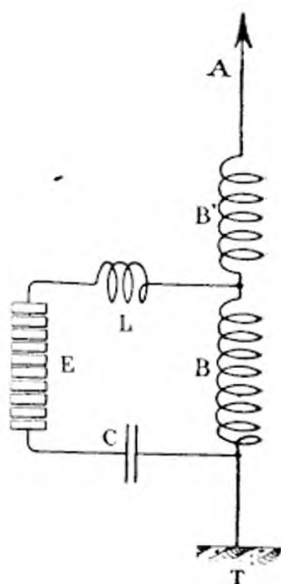


FIG. 218.

(1) Le circuit oscillant et l'antenne sont accouplés directement ensemble. Comme cela a été expliqué au chapitre x, page 181, le coefficient d'accouplement dépend de la valeur de la self-induction de la bobine commune B.

ment la self-induction: ces bobines sont nommées *variomètres*. Un variomètre comprend deux disques portant chacun une paire de bobines plates en forme de demi-disques $b_1b'_1$ et $b_2b'_2$ (fig. 219): ces deux disques sont disposés parallèlement l'un à l'autre, et l'un d'eux peut effectuer une rotation complète autour de son centre. Si la position du disque mobile est telle que les flux magnétiques produits par les quatre bobines soient concordants, la self-induction de

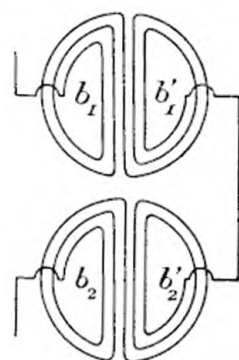


Fig. 219.

l'ensemble est maxima; si, au contraire, les flux sont opposés, elle est minima: pour toute position intermédiaire, elle a une valeur intermédiaire. Une simple rotation du disque mobile suffit donc pour modifier la self-induction.

Le variomètre B permet de régler exactement la valeur de l'accouplement entre le circuit excitateur et l'antenne. Ce réglage doit être fait avec beaucoup de précision dans le système à excitation par impulsions. En effet, il faut que l'accouplement soit assez rigide pour que l'antenne soutire rapidement l'énergie en jeu dans le circuit oscillant et décharge ainsi l'éclateur; mais il faut aussi qu'il ne soit pas trop rigide pour que les vibrations de l'antenne n'empêchent pas, par leur réaction sur le circuit oscillant, l'extinction des étincelles dans l'éclateur. En pratique, la valeur du coefficient d'accouplement est comprise environ entre 0,15 et 0,20 (15 à 20 %).

Le variomètre B' permet de faire varier progressivement la longueur d'onde de l'antenne quand cela est nécessaire.

Pour la réception, le dispositif Telefunken comporte l'emploi d'un détecteur à cristaux. Cet appareil comprend une fine pointe de graphite appuyant avec une pression très

légère sur un morceau de galène (sulfure de plomb naturel).

La disposition adoptée est représentée par la figure 220. L'antenne A aboutit à une bobine d'accouplement B_1 et à un condensateur variable C_1 . Le circuit oscillant comprend la bobine d'accouplement B_2 , le détecteur D qui fonctionne sans différence de potentiel auxiliaire, et le condensateur C_2 sur lequel est branché le récepteur téléphonique E. Le circuit du

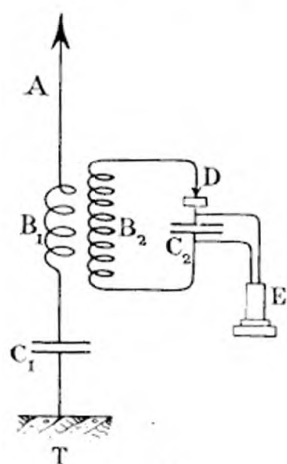


FIG. 220.

détecteur n'est pas accordé sur la fréquence d'oscillation de l'antenne : il effectue des vibrations forcées et l'antenne seule est syntonisée sur les ondes agissantes.

Au lieu d'employer un récepteur téléphonique E branché sur le condensateur C_2 , on intercale parfois dans le circuit oscillant un relais spécial de grande sensibilité dont le cadre mobile a une fréquence propre d'oscillation égale au rythme des impulsions du transmetteur⁽¹⁾. Ce

relais peut fermer le circuit d'un enregistreur ou de tout autre appareil récepteur, tel qu'un téléphone haut-parleur.

Les dispositifs de réception sont complétés par un appareil d'appel établi de telle façon que, si le poste transmetteur émet un signal prolongé pendant au moins 10 secondes, le circuit d'une sonnerie d'appel se trouve fermé jusqu'à ce que quelqu'un soit venu.

Les résultats obtenus avec le système à étincelles musicales sont très satisfaisants. On peut distinguer nettement la note

(1) Nous employons le mot *rythme* du transmetteur pour éviter la confusion qui pourrait naître de l'emploi du mot *fréquence des décharges*. On devra comprendre par *rythme* du transmetteur le nombre de décharges par seconde : c'est ce nombre qui détermine la note musicale des signaux reçus.

propre d'un poste quelconque, et il n'est pas impossible de recevoir simultanément, à deux, les messages provenant de deux postes différents qui transmettent avec des notes musicales différant d'un octave ou plus. En outre, quelle que soit la violence des perturbations atmosphériques, on peut percevoir toujours les signaux du poste transmetteur sans être gêné par les signaux parasites.

Dispositifs divers.

Quelques essais ont été faits, de différents côtés, avec des dispositifs établis pour produire des étincelles musicales par des procédés purement électriques.

M. Balsilie emploie un alternateur à fréquence relativement élevée et un éclateur unique : il utilise les effets de résonance primaire en réglant les constantes des circuits et la distance explosive pour qu'il se produise une étincelle toutes les trois ou quatre alternances.

A la Télégraphie militaire, des expériences intéressantes ont été faites avec un alternateur à 1 000 périodes construit d'après les indications de M. Bethenod. En employant un éclateur unique, on a constaté que la constance du son musical n'est obtenue que si la distance explosive reste tout à fait invariable : les meilleurs résultats ont été atteints avec un éclateur ayant pour électrodes une pointe et une plaque ; le jaillissement des étincelles est ainsi très régulier. La nature du métal dont sont constituées les électrodes joue un rôle important.

Des résultats analogues ont été obtenus par M. Gaiffe (C. G. R.). Le courant d'alimentation était fourni par un alternateur à 500 périodes. On réglait la self-induction du circuit primaire et la distance explosive pour avoir, par l'effet de la résonance primaire, 250 étincelles par seconde (au lieu de 1 000, nombre d'alternances). L'écla-

teur était formé de deux pointes, ou d'un plateau et d'une pointe : ce dernier dispositif donnait un peu plus de régularité. Un jet d'air comprimé produisait un soufflage très énergique de l'arc. On a constaté que l'emploi de ce soufflage ne pouvait être évité que si l'on augmentait fortement la valeur de la self-induction par rapport à celle de la capacité, ce qui limite la quantité d'énergie en jeu.

CHAPITRE XV

INDICATIONS SOMMAIRES SUR LES APPAREILS EMPLOYÉS DANS LES POSTES RADIOTÉLÉGRAPHIQUES

Nous allons passer rapidement en revue les appareils employés dans les postes radiotélégraphiques, et donner sur chacun d'eux quelques indications pratiques. Nous examinerons d'abord les appareils utilisés pour la transmission, puis ceux utilisés pour la réception.

APPAREILS EMPLOYÉS POUR LA TRANSMISSION

Les principaux appareils utilisés pour la transmission sont les suivants : bobines d'induction ; interrupteurs ; alternateurs ; transformateurs et bobines de self-induction primaires ; manipulateurs ; condensateurs ; éclateurs ; bobines d'accouplement et d'antenne ; appareils de mesure ; antennes et prises de terre.

Bobines d'induction.

Les bobines d'induction sont employées dans les postes de faible puissance. Elles sont généralement alimentées par des accumulateurs : un interrupteur spécial transforme en

courant interrompu le courant continu fourni par les accumulateurs.

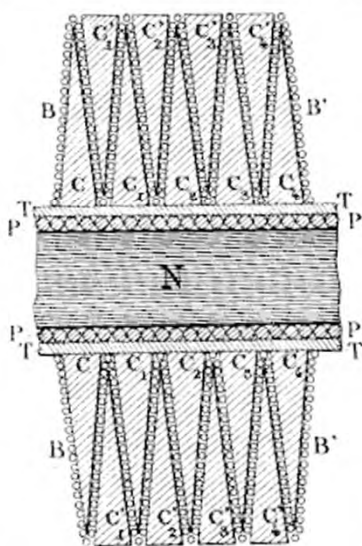
Le primaire, enroulé sur un noyau en fils de fer doux dont il est soigneusement isolé, comprend un certain nombre de tours de fil de cuivre rond ou rectangulaire de forte section. Le secondaire, séparé du primaire par un tube isolant épais, est formé d'un grand nombre de tours de fil relativement fin : son isolement doit être prévu pour résister à des tensions très élevées.

Les efforts des constructeurs ont surtout porté sur l'amélioration de l'isolement du secondaire, qui ne doit pas présenter, entre deux tours de fil voisins, une différence de potentiel capable d'amener la rupture de l'isolant. Si l'enroulement secondaire était formé de couches successives occupant la longueur totale de la bobine, il existerait à chaque extrémité, entre deux tours superposés, une différence de potentiel élevée⁽¹⁾. Pour éviter cet inconvénient, on subdivise l'enroulement secondaire, en le formant d'une série de bobines plates ou galettes juxtaposées, séparées les unes des autres par des cloisons isolantes : un tel enroulement est dit *cloisonné*.

Une disposition particulière d'enroulement cloisonné est employée dans les appareils Klingelfuss, construits par la maison Carpentier. Le secondaire est constitué par une série de bobines plates formées chacune d'une seule couche de fil ; les cloisons séparatives ont une épaisseur d'autant plus grande que la différence de potentiel entre deux tours voisins est plus grande. On arrive ainsi à la disposition qu'indique en coupe longitudinale la figure 221, sur laquelle B

(1) En effet, entre ces deux tours superposés seraient compris tous les tours de fil des deux couches, et chaque couche contient un très grand nombre de tours dans les bobines de grande longueur.

ou B' désigne une bobine plate disposée suivant une surface conique, $C_1 C_2 C_3 C_4, C'_1 C'_2 C'_3 C'_4$ des cloisons séparatives isolantes de forme biconique, T un tube épais en ébonite, P l'enroulement primaire, N le noyau de fils de fer doux. L'épaisseur des cloisons séparatives croissant alternativement vers le centre ou vers la périphérie comme la différence de potentiel entre les tours de fil de deux bobines voisines, la disposition adoptée permet d'obtenir le maximum d'isolement pour le minimum d'encombrement.



Au lieu d'employer un noyau droit, M. Klingelfuss construit aussi ses bobines avec un noyau double lamellé N en forme d'U fermé par une culasse C , comme ceux des transformateurs industriels. Chaque noyau N porte un enroulement primaire P et un enroulement secondaire S , ainsi que l'indique schématiquement la figure 222. On a constaté que, pour une même puissance primaire dépensée, les résultats obtenus

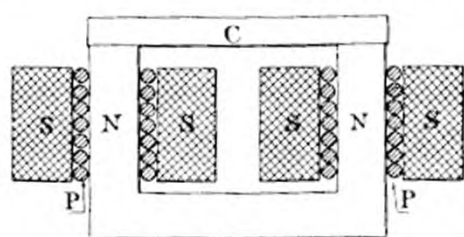


FIG. 222.

sont beaucoup plus puissants avec cet appareil qu'avec une bobine à noyau droit. La culasse C peut être fendue transversalement sur une plus ou moins grande largeur: l'appareil

constitue ainsi un transformateur à fuites.

Dans la plupart des bobines d'induction, on imprègne tout l'enroulement secondaire d'un isolant solide à base de paraffine ou de résine, ou bien on le plonge dans un liquide

isolant. On peut aussi, comme l'a fait M. Rochefort, le placer dans un isolant pâteux (dissolution spéciale de paraffine dans du pétrole) qui présente des avantages sur les isolants solides ou liquides.

Les bobines d'induction de M. Rochefort sont établies d'une façon particulière. Un noyau droit vertical (fig. 223) est recouvert sur toute sa longueur par l'enroulement primaire

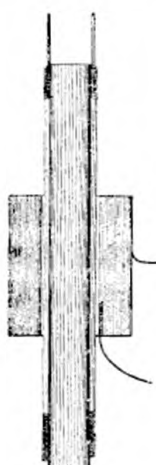


FIG. 223.

formé de deux couches de tours de fil, tandis que le secondaire est une courte bobine disposée dans la partie centrale de l'enroulement primaire. Cette bobine comprend un nombre assez restreint de tours d'un fil relativement gros ; les tours forment une série de couches superposées séparées par des feuilles de papier fort : grâce à la faible longueur de la bobine et aux remarquables qualités de l'isolant employé, le cloisonnement est inutile. Tout l'ensemble est plongé dans un isolant pâteux qui pénètre partout.

Les particularités de fonctionnement des bobines d'induction sont encore mal connues, malgré un important travail de M. Armagnat sur ce sujet. Il est très difficile de prédéterminer les constantes d'une bobine appelée à charger des condensateurs de forte capacité. Pour les expériences de laboratoire, on s'efforce simplement de placer sur la bobine le plus grand nombre possible de tours de fil très fin ; pour la radiotélégraphie au contraire, il semble que les résultats soient beaucoup meilleurs si l'on réduit le nombre de tours pour augmenter le diamètre du fil de l'enroulement secondaire.

Interrupteurs.

L'interrupteur, considéré d'abord comme l'organe acces-

soire d'une bobine d'induction, en est devenu l'organe le plus important. Le trembleur à marteau, employé sur les petites bobines, est tout à fait insuffisant dès que l'intensité du courant primaire atteint une certaine valeur, parce que les ruptures ne sont plus assez brusques, et que les étincelles persistantes détériorent les contacts, malgré l'adjonction d'un condensateur branché sur l'interrupteur.

Un important perfectionnement a été apporté aux trembleurs à marteau par M. Carpentier. Son *rupteur atonique* comprend une palette oscillante en fer doux P (fig. 224) munie d'une masselotte M qu'attire le noyau de fils de fer N. Cette palette est rappelée en arrière par un ressort R et bute contre un plot B. Une lame élastique légère L porte le contact mobile C qui appuie contre le contact fixe C', réglable au moyen d'une vis V. Quand la palette P est attirée par le noyau N, elle acquiert une certaine vitesse avant d'atteindre l'extrémité de la lame L : au moment où elle frappe celle-ci, il se produit un déplacement rapide du contact C et, par suite, une rupture brusque du courant entre les contacts CC'. Dès que le courant est rompu, la palette et la lame reviennent à la position première, et le circuit primaire est à nouveau fermé en CC'. On règle la fréquence des interruptions du courant primaire en modifiant la tension du ressort R au moyen d'une vis de rappel.

Dès que l'intensité du courant primaire atteint une certaine valeur, on ne peut plus utiliser un interrupteur à trembleur, même perfectionné. On emploie alors un interrupteur à mercure, genre Foucault, avec pointe animée

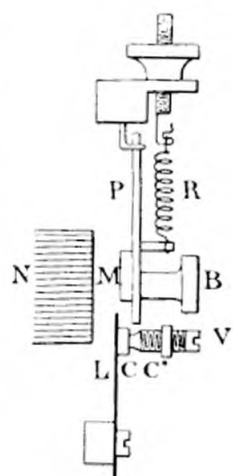


FIG. 224.

d'un mouvement alternatif⁽¹⁾, ou mieux un interrupteur rotatif.

L'interrupteur Klingelfuss consiste en un commutateur tournant à axe vertical entraîné par un moteur électrique : ce commutateur comprend deux lames métalliques maintenues sur un cylindre creux isolant. Un balai métallique frotte sur le cylindre et vient en contact, tantôt avec l'une des lames, tantôt avec la portion isolante. Du mercure, contenu dans la partie inférieure de la carcasse de l'appareil, est aspiré par une petite hélice disposée au-dessous du commutateur et est chassé vers l'intérieur du cylindre creux d'où il s'échappe par des fentes ménagées entre chaque lame et la portion isolante voisine. Ce mercure joue un double rôle : d'une part il amalgame constamment les lames et le balai et assure ainsi un excellent contact électrique ; d'autre part, au moment où une lame quitte le balai, il jaillit brusquement par la fente à l'endroit où se fait la rupture du courant et empêche toute détérioration des surfaces en brisant l'étincelle. L'appareil est plongé dans un liquide isolant, tel que

l'huile de paraffine ou le pétrole, contenu dans la carcasse.

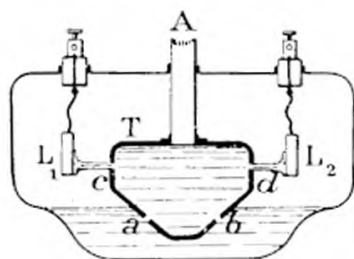


FIG. 225.

L'interrupteur à turbine Gaiffe, employé par la C. G. R., se compose d'un récipient métallique T (fig. 222) fixé à un axe vertical A et terminé par un cône renversé que traversent quatre trous

obliques équidistants (*ab*) débouchant dans du mercure. Sous l'effet de la rotation, le mercure est aspiré par les

(1) Le principe de l'interrupteur de Foucault à mouvement alternatif a été indiqué au chapitre II, page 42. De nombreux perfectionnements ont été apportés à cet appareil, mais les interrupteurs tournants à mercure permettent de couper des intensités de courant bien supérieures, et sont plus employés en radiotélégraphie.

trous obliques et s'élève dans le récipient T d'où il jaillit par quatre trous équidistants (*cd*) sous forme de quatre jets rotatifs. Ceux-ci rencontrent, à intervalles réguliers, deux lames métalliques de même largeur diamétralement opposées, et ferment ainsi le circuit primaire de la bobine. La rupture du courant s'effectue sur deux jets à la fois. Le tout est disposé dans une cuve étanche dans laquelle passe un courant de gaz d'éclairage ou bien de vapeurs d'alcool ou d'éther, dont la présence a pour effet d'empêcher la détérioration du mercure lors des ruptures.

L'interrupteur de l'*Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*, fréquemment employé en Allemagne, est analogue au précédent : une turbine pompe du mercure qui, sous forme d'un jet rotatif unique, est projeté successivement entre un certain nombre de lames équidistantes fixées à un anneau métallique.

Dans l'interrupteur de M. Max Lévy, le jet de mercure est fixe et vient rencontrer successivement une série de lames portées par un anneau tournant : une petite pompe envoie le mercure dans l'ajutage fixe.

Alternateurs.

Dans les postes radiotélégraphiques de moyenne et de grande puissance, on se sert de courant alternatif dont on élève la tension au moyen de transformateurs. Si ces postes ne sont pas à proximité de réseaux de distribution, ils sont obligés de produire eux-mêmes le courant nécessaire au moyen d'alternateurs entraînés par des moteurs mécaniques (électriques, à vapeur, à gaz, ou à pétrole, suivant les cas et les puissances). Ces alternateurs doivent être robustes (pour supporter les à-coups) et bien isolés (pour le cas où des oscillations parviendraient accidentellement jusqu'à eux).

Les alternateurs généralement employés ont un induit fixe et un inducteur tournant. Le premier comprend une carcasse supportant un anneau formé de paquet de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches où sont logées les bobines induites. A l'intérieur de l'induit se déplace un inducteur tournant formé d'un volant muni d'un certain nombre de projections polaires : chacune d'elles porte une bobine inductrice; les bobines successives sont connectées en série, et les extrémités du circuit inducteur ainsi formé aboutissent à deux bagues métalliques clavetées sous l'arbre et isolées de lui. Le courant d'excitation est amené, par deux frotteurs, à ces bagues de contact.

Si l'on veut pouvoir utiliser convenablement les effets de résonance primaire, il faut que la fréquence du courant débité par l'alternateur soit aussi constante que possible, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation soit maintenue à peu près invariable. On peut avantageusement disposer sur le circuit primaire un fréquencemètre, indiquant à chaque instant la fréquence du courant engendré.

Afin d'éviter que des oscillations ne parviennent à l'alter-

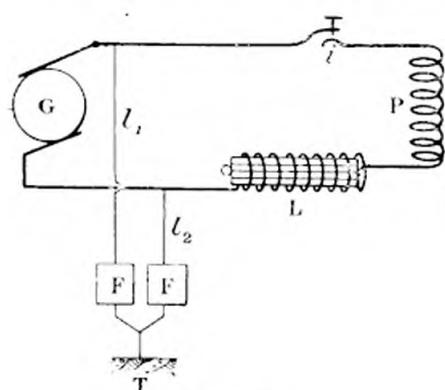


Fig. 226.

nateur ou au réseau d'alimentation, on branche, sur chacun des conducteurs du circuit primaire, une ligne de fuite l_1 ou l_2 (fig. 226) aboutissant à la terre et contenant en F soit un condensateur, soit une résistance. Celle-ci doit avoir une self-induction nulle afin de permettre le libre pas-

sage des oscillations vers la terre, et une résistance ohmique suffisante pour que, en temps normal, le courant dérivé dans

la ligne de fuite ait une très faible intensité. En pratique, on utilise avec succès, comme résistance de protection, un groupe de lampes à incandescence tubulaires à filament droit⁽¹⁾.

Avec les dispositifs à étincelles musicales, on emploie des alternateurs spéciaux produisant une fréquence relativement élevée. La construction de ces alternateurs est à peu près semblable à celle de ceux à basse fréquence, à quelques détails près. On a proposé, afin d'augmenter la fréquence, d'utiliser pour leur excitation du courant alternatif au lieu de courant continu : ce procédé ne semble pas avoir reçu d'applications pratiques.

Un alternateur spécial a été imaginé par M. Villard pour produire, comme avec une bobine d'induction, des pointes de courant très aiguës séparés par des intervalles assez longs.

Il comprend (fig. 227) un inducteur mobile formé de quatre pôles N_1S_1 N_2S_2 voisins deux à deux, et un induit fixe formé

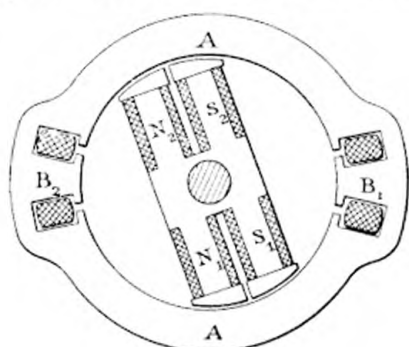


FIG. 227.

de deux bobines B_1B_2 diamétralement opposées. Chacune de ces bobines contient un assez grand nombre de tours de fil et est logée dans deux encoches mi-fermées découpées sur un anneau de fer doux A (en tôles juxtaposées). Quand l'inducteur tournant passe en

face des bobines B_1B_2 , il s'y produit une brusque variation de flux qui donne naissance à une force électromotrice

(1) Les lampes ordinaires à filaments en boucle présentent une self-induction très faible, mais non nulle : il vaut donc mieux employer un groupe de quatre ou cinq lampes à filament droit.

de forme très aiguë; pendant tout le reste d'un demi-tour, aucune force électromotrice n'est engendrée dans la machine.

Transformateurs.

La puissance limitée des bobines d'induction a conduit à utiliser, pour l'excitation des circuits oscillants, des transformateurs alimentés par du courant alternatif. Ces appareils, utilisés dès 1896 par M. d'Arsonval, sont devenus d'un emploi universel dans les postes radiotélégraphiques.

Le principe sur lequel repose le fonctionnement des transformateurs a été expliqué au chapitre II, page 35. La disposition schématisée indiquée par la figure 18 conduit à une très forte dispersion magnétique. Le transformateur présente beaucoup de fuites parce que le flux engendré par l'un des enroulements ne traverse pas en totalité l'autre enroulement: un grand nombre de lignes de force va directement d'une bobine à l'autre, en passant par l'intervalle compris entre les deux noyaux. Aussi a-t-on complètement abandonné cette disposition dans les transformateurs industriels où la dispersion doit

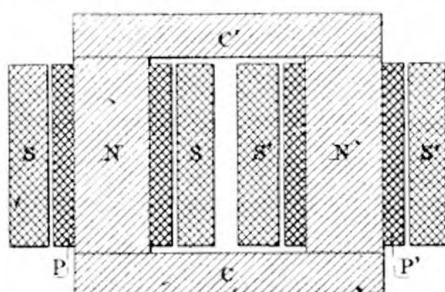


FIG. 228.

être aussi faible que possible. Tous ces appareils portent, sur chacun des noyaux, une bobine primaire P ou P' et une bobine secondaire S ou S' placées l'une dans l'autre, comme l'indique la figure

228. Bien entendu, les bobines primaires doivent être soigneusement isolées des noyaux, et les bobines secondaires doivent être séparées des bobines primaires par une forte

épaisseur d'isolant, capable de résister aux tensions les plus élevées.

Les premiers transformateurs employés en radiotélégraphie ont conduit à quelques mécomptes. Les effets de résonance primaire et les résultats qu'on en peut obtenir étaient mal connus : des ruptures fréquentes des isolants, dues à ces effets, en faisaient généralement rejeter l'emploi. Une étude de M. Seibt sur les bobines à résonance, suivie d'une étude très approfondie de M. Blondel sur les transformateurs à résonance, ont mis en lumière les phénomènes dont il s'agit. Plus tard, M. Bethenod a montré que les appareils industriels sans fuites magnétiques conviennent parfaitement comme transformateurs à résonance s'ils sont établis en vue de cette application, et il a donné une étude théorique détaillée de ces appareils.

Actuellement, on emploie indifféremment des transformateurs à fuites magnétiques ou des transformateurs sans fuites dans le circuit primaire desquels on intercale une ou plusieurs bobines de self-induction réglables. Les appareils

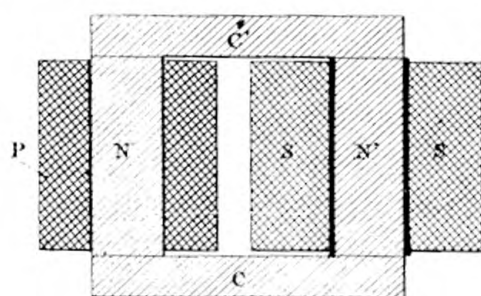


FIG. 229.

à fuites magnétiques peuvent être établis avec noyaux droits ou avec noyaux en U. Dans le premier cas, le secondaire est bobiné au-dessus du primaire comme dans une bobine d'induction.

Dans le second cas, le circuit magnétique comprend deux noyaux NN' réunis à leurs extrémités par deux culasses CC' : le primaire P est bobiné sur l'un des noyaux et le secondaire S sur l'autre (fig. 229) ; ces enroulements sont convenablement isolés par rapport au fer du transfor-

mateur par des manchons ou carcasses en ébonite ou en micanite.

La C. G. R. utilise dans ses installations des transformateurs à fuites magnétiques du système Gaiffe. Les appareils de faible puissance sont établis avec noyaux droits et ceux de grande puissance avec doubles noyaux en U⁽¹⁾. Dans les uns ou les autres, le primaire comprend deux bobines qui peuvent être groupées en parallèle ou en série, suivant la valeur de la tension d'alimentation, et le secondaire est formé de quatre bobines distinctes. Celles-ci sont toujours groupées deux à deux en série : les deux groupes peuvent être connectés en série ou en parallèle suivant la valeur de la capacité à charger et la tension secondaire à obtenir. Dans les transformateurs à noyau droit, les quatre bobines secondaires S sont enfilées sur la partie médiane du noyau N, dont les deux bobines primaires P occupent les extrémités (fig. 230). Dans les transformateurs à double noyau, la disposition est celle qu'indique la figure 229, les quatre bobines secondaires étant enfilées sur le noyau N'.

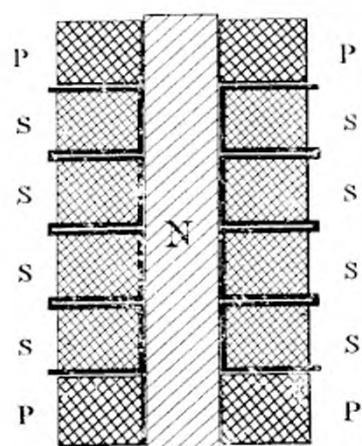


Fig. 230.

Les transformateurs à fuites présentent l'avantage que les brusques variations du courant secondaire produites par l'éclatement des étincelles ne réagissent pas sur la bobine primaire et sur le circuit qui l'alimente⁽²⁾. Le secondaire peut être mis accidentellement en court-

(1) Les premiers transformateurs à fuites magnétiques à double noyau de M. Gaiffe ont été établis en 1903 sur les indications de M. d'Arsonval.

(2) La présence de fuites magnétiques équivaut à l'existence d'une self-induction : plus les fuites sont importantes, plus la self-induction apparente est grande.

circuit sans que l'intensité primaire atteigne une valeur anormale, comme cela se produit dans un transformateur sans fuites. Mais les conditions de résonance primaire doivent être déterminées une fois pour toutes et ne peuvent pas être modifiées : la fréquence primaire doit donc être invariable.

Les transformateurs sans fuites peuvent être d'un des types quelconques employés dans l'industrie, mais il est nécessaire que la section de fer y soit très largement calculée, ainsi que l'enroulement secondaire, et que l'isolement de ce dernier soit prévu pour une tension bien supérieure à la tension normale, déduite de la valeur du rapport de transformation. Le réglage de la résonance primaire au moyen de bobines de self-induction est très commode et le rendement est meilleur que celui des transformateurs à fuites.

Quant aux bobines de self-induction placées dans le circuit primaire, elles sont généralement formées d'une carcasse isolante creuse portant une ou deux couches de tours de fil rectangulaire. L'isolement doit être très soigné, car les bobines sont soumises à des surtensions importantes. Dans la carcasse creuse est placé un noyau rectangulaire mobile en tôles minces de fer doux assemblées et maintenues par quelques rivets.

Manipulateurs.

Le manipulateur sert à produire les émissions de courant, longues ou brèves, destinées à figurer les traits ou les points des signaux conventionnels représentant les lettres et les chiffres dans l'alphabet Morse (figure 231). Dans les postes de faible puissance, le manipulateur consiste en un simple interrupteur analogue à celui qu'on emploie en télégraphie ordinaire (clé Morse). Mais, dès qu'il s'est agi de couper

des courants intenses circulant dans des circuits de forte

A ---	N ---
B ----	O ----
C ----	P ----
D ----	Q ----
E -	R ----
F ----	S ----
G ----	T -
H ----	U ----
I --	V ----
J ----	W ----
K ----	X ----
L ----	Y ----
M ---	Z ----
1 ----	6 ----
2 ----	7 ----
3 ----	8 ----
4 ----	9 ----
5 ----	10 ----

FIG. 231.

self-induction, on s'est heurté à des difficultés provenant de la détérioration rapide des contacts.

Fréquemment, on se contente de disposer le contact fixe du manipulateur dans un récipient contenant du pétrole ou un liquide isolant⁽¹⁾ (figure 232): en employant des contacts de grande surface, on peut ainsi couper un courant d'une quarantaine d'ampères. Sur la figure 232, L désigne le levier oscillant, R un ressort réglable qui le rappelle en arrière et le force

à s'appuyer sur le plot P, B une vis de butée réglable, C et C' les pièces de contact, facilement amovibles pour permettre leur remplacement rapide en cas de détérioration, V un récipient métallique contenant le liquide isolant et muni d'une queue de prise de courant.

Quand le circuit primaire est alimenté par du courant alternatif, la Compagnie Marconi et la Gesellschaft

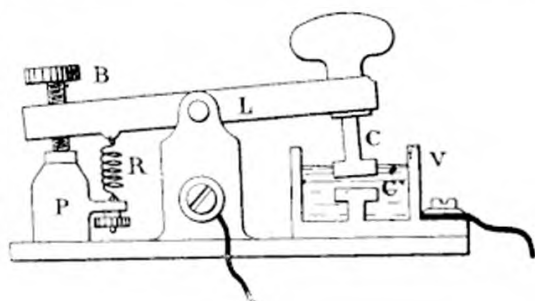


FIG. 232.

⁽¹⁾ L'administration des Postes et Télégraphes et la Guerre emploient souvent des manipulateurs où les ruptures ont lieu dans l'eau distillée.

für Drahtlose Telegraphie emploient un manipulateur dans lequel, automatiquement, la séparation des contacts ne peut s'effectuer qu'au moment où l'intensité du courant est nulle (à chaque demi-période) : il n'y a donc jamais d'étincelle destructrice. L'appareil (figure 233) comprend un levier *L* et, au-dessous, une lame élastique *l* qui porte le contact mobile *C* et une masselotte en fer doux *M*. Sous la masselotte *M* est disposé le noyau d'un électro-aimant *E* traversé par le courant principal. Si l'on abaisse le levier *L*, il entraîne avec lui la lame *l*; le contact mobile *C* vient s'appuyer sur le contact fixe *C'*, et le courant cir-

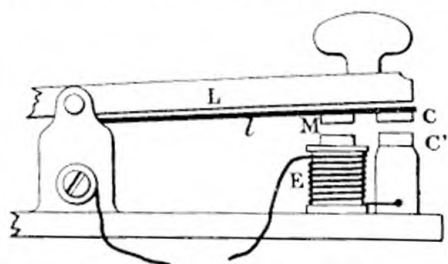


FIG. 233.

cule dans l'électro-aimant. Le noyau de celui-ci attire alors la masselotte *M* et l'applique contre lui. Si on laisse remonter le levier *L*, la lame élastique *l* est maintenue en place par l'attraction de l'électro-aimant *E* jusqu'au moment où le courant alternatif s'annule pour changer de sens : à ce moment, son élasticité la ramène à la position initiale.

Dans les postes du système Lodge et Muirhead, et aussi dans quelques postes de la Compagnie Marconi, on emploie, pour augmenter la rapidité des transmissions, un manipulateur automatique. Des bandes de papier épais sont perforées à l'avance sur une machine spéciale munie d'un clavier de machine à écrire : les perforations longues ou courtes représentent des traits ou des points de l'alphabet Morse. Ensuite, ces bandes sont placées dans un appareil où elles passent entre deux contacts ; à l'endroit des perforations, le circuit se trouve fermé entre les contacts ; aux autres endroits, il est ouvert. Avec un tel système, on peut, paraît-il, réaliser des vitesses de transmission de plus de cent mots

par minute, tandis qu'on ne transmet guère qu'une vingtaine de mots par minute à la main.

Le commandant Ferrié a établi un manipulateur spécial qui offre l'avantage de pouvoir être commandé à distance au moyen d'un faible courant circulant dans un circuit auxiliaire. Une petite turbine rotative T (figure 234) envoie du mercure sous pression dans un ajutage A qui peut basculer autour d'un axe horizontal. Normalement, sous l'action du ressort R, cet ajutage est braqué obliquement vers le bas,

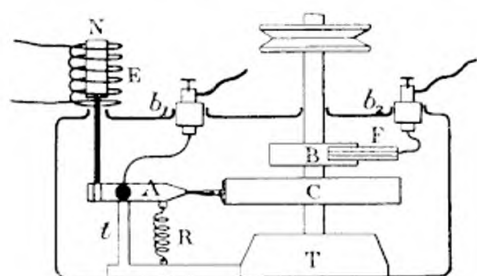


FIG. 234.

et le jet de mercure va frapper la partie fixe de la turbine T. Mais si l'on envoie un faible courant dans le solénoïde E disposé au-dessus de l'appareil, celui-ci attire un noyau N qui, par l'intermédiaire d'une tige, fait

basculer l'ajutage A et le redresse : le jet de mercure vient alors frapper la couronne C en cuivre, calée sur l'axe de la partie mobile de la turbine, et animée d'un mouvement de rotation rapide. Cette couronne est reliée électriquement, par l'intermédiaire de la bague B, au frotteur F, connecté lui-même à la borne b_2 . De même l'ajutage A est relié à la borne b_1 . Le circuit électrique est donc fermé par le jet de mercure. Pour l'émission des signaux, il suffit de manœuvrer un petit manipulateur qui commande le circuit du solénoïde E.

Dans la plupart des installations radiotélégraphiques, on évite de couper l'intensité totale du courant primaire et on branche le manipulateur entre les extrémités d'une résistance ou d'une bobine de self-induction qu'il court-circuite. Cet appareil doit rompre un courant dérivé bien moins

important que le courant primaire total. Dans d'autres dispositifs, le manipulateur, à sa position d'ouverture, substitue au circuit principal un autre circuit ou un groupe de résistances⁽¹⁾. On emploie alors un appareil analogue à celui de la figure 232 dans lequel le plot P et la butée de repos B sont remplacés par deux contacts plongés dans du pétrole comme les contacts C et C'.

Condensateurs.

Les condensateurs employés en radiotélégraphie doivent posséder une capacité élevée⁽²⁾ et une grande rigidité diélectrique⁽³⁾ sous un faible volume : ils doivent en outre présenter le moins possible de pertes par échauffement et par effluves.

Plus est mince l'intervalle qui sépare les armatures d'un condensateur, et plus est grande la valeur de la capacité, mais plus est faible la différence de potentiel sous laquelle se produit la rupture du diélectrique⁽⁴⁾. Si cet inter-

(1) Voir le dispositif Poulsen, par exemple, page 301.

(2) La capacité d'un condensateur dépend de la *constante diélectrique* du corps employé. La constante diélectrique de l'air étant prise pour unité, la constante diélectrique d'un corps (verre, ébonite, etc.) exprime le rapport de la capacité d'un condensateur établi avec ce corps à celle d'un condensateur à lame d'air identiquement semblable comme forme et dimensions.

(3) La *rigidité diélectrique* d'un corps est déterminée par la différence de potentiel nécessaire pour amener le percement d'une plaque de ce corps de un centimètre d'épaisseur.

(4) L'épaisseur minima du diélectrique doit être proportionnée à la tension de fonctionnement du condensateur. La longueur de fuite que l'étincelle a à parcourir pour jaillir des bords d'une armature aux bords de l'armature opposée doit également être proportionnée à cette tension. Il en résulte que, pour une capacité donnée, le volume d'un condensateur augmente très rapidement avec la valeur de la tension de fonctionnement. Pour caractériser un condensateur, on doit donc nécessairement indiquer, outre sa capacité, la tension de fonctionnement pour laquelle il est prévu.

L'unité pratique de capacité est appelée *microfarad*. Une batterie de condensa-

valle est rempli par de l'air, le condensateur offre l'avantage de ne pas présenter de pertes intérieures par échauffement, mais la rigidité diélectrique de l'air est inférieure à 40 000 volts par centimètre d'épaisseur et sa constante diélectrique est relativement faible. Au contraire, la rigidité diélectrique du verre (de qualité spéciale) est cinq fois plus grande (200 000 volts par centimètre d'épaisseur, pour des feuilles d'épaisseur usuelle) et la constante diélectrique est sept fois plus grande.

L'énergie accumulée dans un condensateur est égale au produit de sa capacité c par la tension de charge v :

$$E = cv^2.$$

Si l'accroissement de la rigidité électrique permet de quintupler la tension de charge v , l'énergie accumulée devient 25 fois plus grande : d'autre part, si la constante diélectrique est 7 fois plus grande, la capacité augmente dans la même proportion. Toutes choses étant égales d'ailleurs, un condensateur à lame de verre pourra donc emmagasiner $25 \times 7 = 175$ fois plus d'énergie qu'un condensateur semblable à lame d'air.

Les condensateurs employés dans les circuits de transmission des postes radiotélégraphiques sont généralement établis avec du verre. Le verre qui donne le moins de pertes par échauffement est le *flint* anglais⁽¹⁾. Il est très difficile d'obtenir des feuilles de flint bien homogènes d'assez grandes dimensions : c'est pourquoi l'on fait généralement usage de condensateurs tubulaires longs et étroits dérivés

teurs de un microfarad pour une tension normale de 100 000 volts présenterait un volume énorme, et une telle capacité n'a encore été utilisée dans aucun poste radiotélégraphique.

(1) La valeur de l'amortissement trouvée avec un condensateur établi avec du verre ordinaire est le double de celle trouvée avec le même condensateur établi en flint.

de la bouteille de Leyde. Chaque tube, fermé à une extrémité, est revêtu intérieurement et extérieurement d'une armature métallique déposée sur le verre par un procédé chimique ou électrochimique. La capacité étant très faible, on est conduit à employer un grand nombre de tubes dans les postes puissants. Par exemple, dans l'ancienne installation du poste allemand de Nauen, il y avait trois batteries de 120 tubes de 1^m,50⁽¹⁾. Dans l'installation complète du poste de la tour Eiffel, il y aura 896 tubes répartis en sept batteries de 128 tubes⁽²⁾.

M. Moscicki a apporté d'importants perfectionnements aux condensateurs tubulaires. Ses tubes (figure 235) sont en verre très mince, mais présentent une forte surépaisseur du côté du goulot, où se produisent toujours les ruptures du diélectrique⁽³⁾: ils sont argentés intérieurement et extérieurement et la couche d'argent est recouverte d'un dépôt de cuivre qui la consolide. L'armature intérieure est en contact avec une fourche élastique en cuivre portée par une tige qui traverse un isolateur en porcelaine à haute tension formant bouchon; l'armature extérieure est en contact avec un tube de cuivre qui la protège et assure la liaison électrique. La capacité d'un tube de 6 centimètres de diamètre et de 1^m,05 de longueur totale est de 0,003 microfarad environ. La tension admissible est de 60000 volts.



FIG. 235.

Au lieu de tubes de verre, on emploie aussi des plaques

⁽¹⁾ La capacité de l'ensemble était de 0,44 microfarad pour 70 000 volts environ.

⁽²⁾ La capacité de l'ensemble sera de 0,7 microfarad pour 110 000 volts.

⁽³⁾ M. Moscicki a constaté qu'une plaque de verre d'un demi-millimètre d'épaisseur peut supporter 67 000 volts sans se rompre dans sa région centrale, tandis qu'une différence de potentiel de 11 000 volts suffit pour provoquer la rupture au voisinage des bords des armatures.

de verre revêtues sur chacune de leurs faces d'armatures métalliques, comme l'indique la figure 236. Plusieurs plaques sont disposées parallèlement dans une cuve remplie

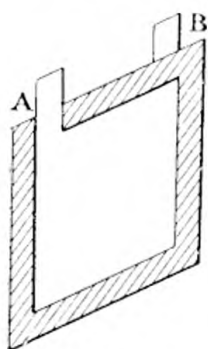


FIG. 236.

d'un liquide isolant, tel que l'huile de paraffine ou le pétrole : leur nombre varie suivant la capacité à obtenir. Les queues A et B des armatures permettent d'établir entre elles les connexions nécessaires. Dans ces condensateurs, on évite difficilement la formation d'effluves qui vont d'une armature à l'autre en passant par-dessus les bords de la plaque : ces effluves détruisent peu à peu le verre, et il se produit au bout d'un certain temps une rupture du diélectrique.

Les meilleurs condensateurs à plaques semblent être les condensateurs Gaiffe, employés par la C. G. R. Entre chaque armature d'aluminium A et la feuille de verre V (fig. 237) est disposée une plaque métallique un peu plus petite : la tranche de l'armature A ne touche donc pas le verre, mais en est séparée par une rigole de largeur égale à l'épaisseur de la plaque auxiliaire. Le liquide isolant dans lequel sont immergées les plaques vient circuler activement dans cette rigole et c'est lui qui supporte les fortes surtensions existant aux bords des armatures. La tension admissible est de 40 000 volts.

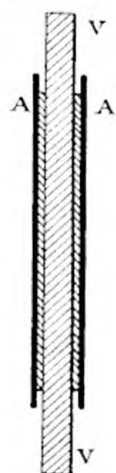


FIG. 237.

M. Fessenden et M. Marconi ont utilisé des condensateurs à air comprimé. La rigidité diélectrique des gaz croissant avec la pression, il est possible théoriquement de réaliser ainsi des condensateurs capables de supporter des tensions élevées sans que leurs dimensions dépassent les limites admissibles pour une capacité donnée :

dans la pratique, il semble que l'emploi de ces appareils doive conduire à des complications assez grandes. Les condensateurs à air ne présentant pas de pertes d'énergie par échauffement du diélectrique, leur utilisation permet de réduire l'amortissement des oscillations engendrées⁽¹⁾.

Quel que soit le système employé, on est toujours obligé d'accoupler entre eux un assez grand nombre de condensateurs. *Les connexions doivent être aussi courtes que possible et doivent présenter la plus faible résistance et la plus faible self-induction possible.* On dispose, pour cela, les condensateurs très près les uns des autres, et l'on effectue les connexions au moyen de larges bandes de cuivre. Pour permettre de modifier à volonté la capacité utilisée, on rassemble les condensateurs en un certain nombre de batteries dont les extrémités sont reliées à des bornes ou plots de prise de courant. Par des connexions appropriées, on peut alors grouper facilement les batteries entre elles, d'après les résultats que l'on veut obtenir.

Le groupement des batteries peut être fait en série ou en parallèle. Dans le premier cas, chaque batterie n'a à supporter qu'une fraction de la tension totale de charge, mais la capacité diminue proportionnellement au nombre des batteries mises en série : dans le second cas, chaque batterie a à supporter la tension totale de charge, et la capacité augmente proportionnellement au nombre des batteries⁽²⁾.

(1) Des condensateurs à air sont en service dans les postes transatlantiques Marconi de Clifden et de Glace Bay.

(2) Ce résultat est évident si l'on considère l'exemple de deux condensateurs simples semblables ayant chacun une capacité c et pouvant supporter chacun une tension de charge v .

Quand les deux condensateurs sont connectés en série (fig. 1), la tension totale se répartit également entre eux : elle peut donc avoir une valeur double $2v$. D'autre part, l'ensemble est exactement équivalent à un seul condensateur dont le diélectrique aurait une épaisseur double (puisqu'on peut supposer le fil de jonction assez court pour que les armatures intermé-

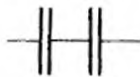


FIG. 1.

Les tensions adoptées sont généralement trop élevées pour que l'on puisse établir des condensateurs pratiques capables de les supporter directement. Aussi est-on conduit à former des groupes de deux ou trois batteries en série et à accoupler ces groupes en parallèle. Soit une batterie de capacité c établie pour une tension normale v . Si l'on veut doubler la tension v en conservant une capacité totale c , il faudra employer *quatre* batteries semblables groupées deux par deux en série, les deux groupes étant connectés en parallèle. Pour comparer entre elles des batteries différentes, il faut bien tenir compte des tensions de fonctionnement : une batterie de deux microfarads sous 50 000 volts a, par exemple, une puissance moitié moindre qu'une batterie de un microfarad sous 100 000 volts.

Pour éviter qu'une batterie de condensateurs soit détériorée par une surtension accidentelle supérieure à la tension limite de fonctionnement, on a coutume de placer en dérivation sur chaque batterie un petit éclateur de protection dont la distance explosive correspond à la tension limite de fonctionnement.

Éclateurs.

Dans les premières installations radiotélégraphiques, on

diarres viennent en contact et ne jouent plus aucun rôle) : la capacité a donc une valeur moitié moindre ($c/2$).

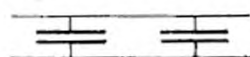


Fig. 2.

Quand les deux condensateurs sont connectés en parallèle (fig. 2), chacun d'eux est soumis à la tension totale et les capacités s'ajoutent.

Dans l'un et l'autre cas, en doublant le nombre des condensateurs, on double l'énergie totale emmagasinée. En effet, dans le premier cas, elle a pour valeur :

$$(c/2)(2v)^2 = 2cv^2.$$

Dans le second cas, elle a pour valeur

$$(2c)v^2 = 2cv^2$$

s'est servi d'éclateurs formés simplement de deux sphères en laiton de 2 à 5 centimètres de diamètre : chacune d'elles était vissée à une tige ; l'une était fixe et l'autre mobile. On réglait l'écartement des sphères de façon à obtenir le maximum d'effet. Plus tard, la puissance mise en jeu ayant considérablement augmenté, on a dû étudier différents modèles d'éclateurs spéciaux.

Un éclateur ne donne de bons résultats que si la tension explosive et la résistance de l'étincelle restent invariables quand l'intervalle explosif⁽¹⁾ et les conditions électriques du circuit restent invariables. Pour cela il faut que les électrodes ne s'échauffent en aucun point et que l'air (ou le gaz) compris entre elles se renouvelle constamment. En outre, il est nécessaire que la nature du métal et du diélectrique, ou la disposition adoptée, rendent très difficile l'établissement d'un arc et que l'éclateur ne produise que des étincelles franchement oscillantes.

La tension explosive dépend :

de l'intervalle explosif ;

des dimensions, de la nature et de la température des électrodes ;

de la nature, de la température et de la pression du gaz environnant⁽²⁾.

Pour éviter l'échauffement des électrodes, on leur donne la plus grande masse possible et on les dispose de façon que les étincelles ne jaillissent pas toujours aux mêmes points,

(1) La tension explosive est la différence de potentiel nécessaire, pour que l'étincelle jaillisse entre les électrodes.

L'intervalle explosif est la distance qui sépare les surfaces les plus voisines des électrodes.

(2) Dans la pratique, on n'emploie que des éclateurs dont le diélectrique est un gaz (air, acide carbonique, etc.). Les éclateurs immergés dans le pétrole ou dans un liquide quelconque n'ont pas donné de bons résultats, à cause de la décomposition du liquide qu'il faut renouveler constamment.

mais se déplacent constamment. Les éclateurs formés de deux gros cylindres ou de deux grand anneaux parallèles donnent, à ce point de vue, de bons résultats : les premiers offrent l'avantage que l'on peut, par une simple rotation des cylindres, renouveler les surfaces le long desquelles jaillissent les étincelles. Le refroidissement est encore meilleur si, au lieu d'électrodes massives, on se sert d'électrodes

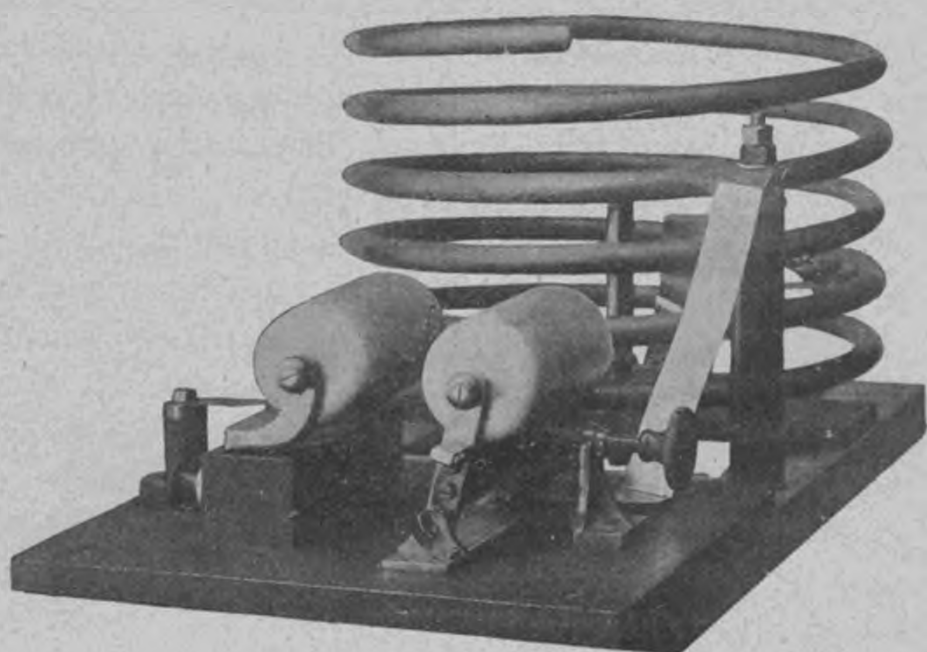


FIG. 238.

creuses munies d'une circulation d'eau intérieure, mais cette complication n'est pas indispensable. Pour éviter la formation d'arc, on établit souvent les électrodes en zinc, ou quelquefois en aluminium, dont les vapeurs présentent la propriété d'étouffer l'arc : l'amortissement a alors une valeur plus élevée ainsi que cela a été mentionné au chapitre v, page 76.

L'éclateur employé par la C. G. R. (modèle adopté par la Guerre et la Marine) est représenté par la figure 238 ⁽¹⁾.

(1) L'hélice en tube de cuivre visible derrière l'éclateur sert pour l'accouplement de l'antenne (accouplement mixte).

Deux gros cylindres massifs en zinc soit disposés parallèlement l'un à l'autre. Chacun des deux est supporté par un axe autour duquel il peut tourner à frottement dur. L'un des axes est fixe ; l'autre est supporté par un cadre à pivot de telle façon que l'écartement des cylindres soit réglable à

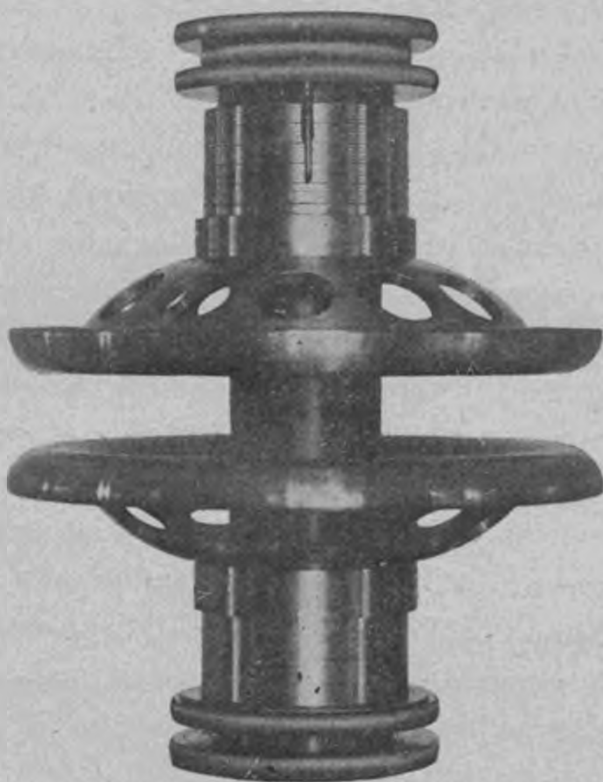


FIG. 239.

volonté au moyen d'une vis de rappel. Une autre vis de rappel, agissant sur l'axe fixe, permet d'assurer le parallélisme parfait des deux cylindres, de façon que les étincelles courent constamment le long de leurs surfaces en regard.

L'éclateur Telefunken est formé de deux gros anneaux parallèles, supportés chacun par une coupelle. Le modèle adopté par l'Administration des Postes et Télégraphes, et que représente la figure 239, lui ressemble beaucoup. Sous l'effet du champ magnétique qu'elles créent, les étincelles tour-

nent constamment le long des bords des deux coupelles, dont l'écartement est réglable à volonté par une vis supérieure.

Pour obtenir un bon refroidissement et une rupture nette des étincelles, on peut avoir recours à un jet d'air comprimé, ou employer des électrodes rotatives, ou bien faire tourner, entre des électrodes fixes, une pièce mobile. Afin d'accroître la tension explosive, on peut disposer l'éclateur dans un récipient hermétique rempli de gaz comprimé : l'air étant décomposé par les étincelles, il faut assurer son renouvellement ou se servir d'acide carbonique comprimé. M. Fessenden a obtenu de bons résultats en employant une plaque et une tige disposées dans de l'air comprimé à environ 5 kilogrammes par centimètre carré. M. Fleming a utilisé des éclateurs à azote comprimé.

Les éclateurs à gaz comprimé offrent l'avantage d'être silencieux : il en est de même des éclateurs à vide (tubes à mercure, par exemple). Dans les autres éclateurs, les étincelles produisent un bruit assourdissant qu'on s'est souvent préoccupé d'étouffer. Pour cela, on peut disposer les électrodes dans un récipient clos ou presque clos, mais il faut alors remplacer l'air par de l'acide carbonique, ou disposer dans le récipient un produit chimique capable d'absorber les vapeurs nitreuses engendrées. Il suffit, en général, de placer l'éclateur (avec les appareils à haute tension) dans une chambre close dont les parois sont garnies d'une épaisse couche de feutre.

Bobines d'accouplement et d'antenne.

Les bobines d'accouplement ou d'accord sont généralement formées de quelques tours d'un gros tube ou d'une bande de cuivre nu, parfois argenté, enroulé sous forme d'une hélice de 50 à 100 centimètres de diamètre. Ces tours doivent

être suffisamment écartés les uns des autres pour que des étincelles ne puissent pas jaillir entre eux: dans leur disposition, on doit veiller avec le plus grand soin à ce qu'il ne se produise pas de courants de Foucault ou de courants induits. A ce point de vue, quand l'intensité du courant oscillant exige l'emploi d'un tube de très gros diamètre, il est bon de le fendre dans sa longueur.

La figure 240 montre une bobine dans laquelle les différents tours parallèles sont indépendants les uns des autres et sont soutenus par des isolateurs en porcelaine. Avec des pinces spéciales reliées soit à la tige centrale T, soit à des bandes de cuivre B, on peut mettre en circuit, dans le primaire et dans le secondaire, les nombres de tours nécessaires pour obtenir l'accouplement voulu.

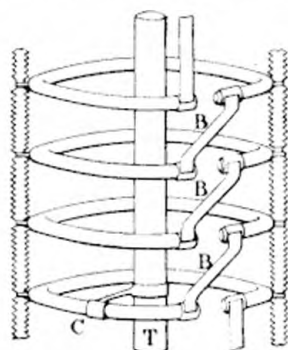


FIG. 240.

Quand on excite l'antenne par accouplement mixte, on peut simplifier et employer une hélice continue en tube de cuivre (fig. 241): la tige centrale T est reliée au circuit oscillant: la pince de connexion mobile B est reliée à l'autre extrémité du circuit oscillant et à la terre; la pince de connexion mobile A est reliée à l'antenne. En modifiant les positions des pinces A, B et C sur l'hélice, on peut régler la valeur de l'accouplement.

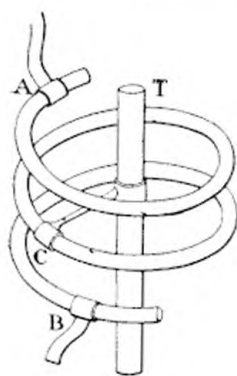


FIG. 241.

Comme cela a déjà été signalé, tous les conducteurs qui constituent le circuit oscillant sont formés de bandes métalliques de grande largeur ou de tubes de forte section, parce que les oscillations

de haute fréquence passent uniquement dans les couches superficielles (effet pelliculaire). Si l'on emploie des conducteurs pleins, ceux-ci doivent être formés de câbles constitués par un grand nombre de fils très fins. Pour réduire au minimum l'amortissement, on doit disposer les appareils et les circuits de façon que les connexions soient aussi courtes que possible et que toute perte d'énergie soit évitée.

Les bobines de self-induction employées pour augmenter la longueur d'onde propre de l'antenne transmettrice ⁽¹⁾ sont

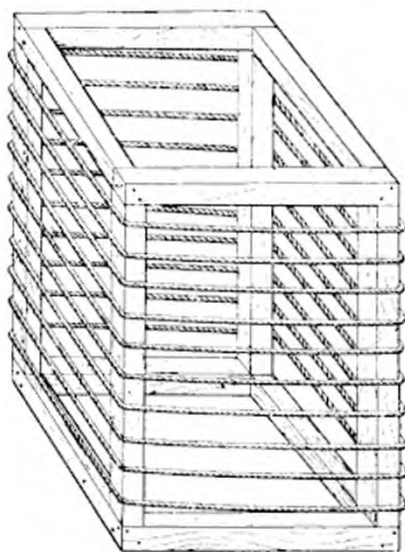


FIG. 242.

généralement formées d'une dizaine de tours d'un câble nu enroulé en hélice sur un cadre isolant (fig. 242). Au moyen de pinces de connexion que l'on fixe directement sur le câble, on intercale dans l'antenne une portion convenable de la bobine de self-induction.

Pour permettre de modifier progressivement la self-induction sans aucun déplacement des connexions, la G. f. D. T. a établi un appareil, nommé *variomètre*, dont le principe a été indiqué au chapitre XIV (page 337, fig. 219). Le variomètre se compose d'un disque fixe et d'un disque rotatif

(1) On doit éviter autant que possible d'intercaler au pied de l'antenne une bobine de self-induction destinée à augmenter la longueur d'onde, car, dans ces conditions, la portée des communications diminue très vite. Si le poste doit travailler avec plusieurs longueurs d'onde, il vaut mieux, quand cela est possible, constituer le système aérien par deux ou trois antennes partielles que l'on emploie ensemble ou séparément.

(fig. 243) portant chacun deux bobines semi-circulaires. Si les disques sont placés de façon que les flux des quatre bobines soient concordants, la self-induction est maxima ; si leur position est telle que les flux soient opposés, la self-induction est minima ; pour toute position intermédiaire, la

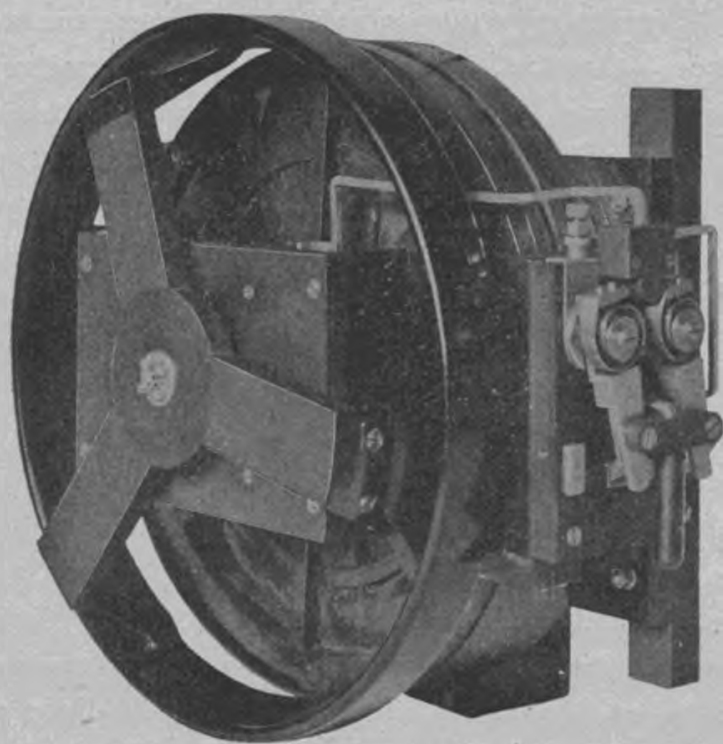


FIG. 243.

self-induction a une valeur intermédiaire. Les bobines d'un variomètre sont établies avec un conducteur composé de fils de sept centièmes de millimètre reliés en parallèle. Le nombre de ces fils dépend de l'intensité du courant oscillant : il s'élève à 480 dans les petits postes, à 3 000 dans les postes de 8 kilowatts, et à plusieurs milliers dans les postes de grande puissance. L'enroulement est fait de telle façon que tous les fils individuels présentent la même résistance

ohmique et la même résistance inductive, afin que le courant total se répartisse également entre eux.

Appareils de mesure.

Les différents appareils de mesure employés sur le circuit primaire (voltmètre, ampèremètre, fréquencemètre) sont ceux dont l'usage est courant dans l'industrie. Sur le circuit secondaire ou l'antenne, on se sert constamment d'ampèremètres thermiques: lorsqu'il s'agit de mesurer des courants oscillants de forte intensité, la construction de ces appareils doit différer notablement de celle des appareils industriels.

D'après son principe même ⁽¹⁾, l'ampèremètre thermique ne peut être employé *directement* qu'à la mesure des intensités relativement faibles. Pour que la répartition du courant soit uniforme dans le fil dilatable, il ne faut pas que son diamètre soit supérieur à quelques dixièmes de millimètres, et l'intensité que l'on peut y faire passer est limitée à 10 ampères au maximum.

Pour la mesure des courants industriels, on branche l'ampèremètre en dérivation entre les extrémités d'une portion déterminée du conducteur principal AB ou d'une résistance R de faible valeur embrochée sur ce conducteur ⁽²⁾ (figure 244). Connaissant la résistance r' de l'ampèremètre et des fils

(1) Un fil fin f , tenu entre deux bornes fixes BB' , est traversé par le courant qui y détermine un certain échauffement: sa dilatation sert à mesurer l'intensité du courant. Pour cela, on fixe au fil f un fil de soie s qui, après être passé sur une poulie P , est tiré par un ressort R . Sur la poulie est calée l'aiguille A qui se déplace devant un cadran gradué.



FIG. 1.

(2) On peut aussi (quand il s'agit de courant alternatif) relier l'ampèremètre au secondaire d'un petit transformateur spécial dont le primaire est embroché sur le conducteur principal.

de jonction, et la résistance r de la portion R du conducteur principal, il est facile de calculer le rapport des courants circulant dans l'une et l'autre branche: la mesure du courant dérivé permet donc de déterminer la valeur du courant principal.

Pour la mesure des courants de grande fréquence, ce procédé ne peut plus convenir, à cause de leur inégale répartition dans les conducteurs, qui empêche de déterminer exactement le rapport du courant dérivé au courant principal⁽¹⁾. M. Broca a employé l'artifice suivant: un certain nombre de fils fins semblables (dix par

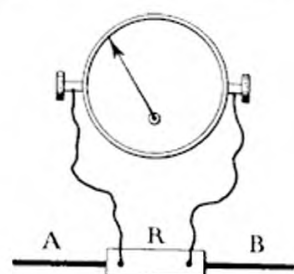


FIG. 244.

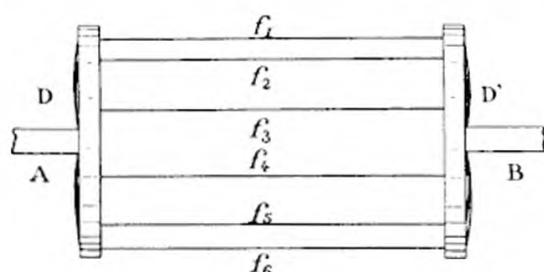


FIG. 245.

exemple) sont tendus entre deux disques isolants DD' (figure 245) de façon à être tous équidistants les uns des autres et équidistants des centres des disques. L'en-

semble constitue une sorte de cage cylindrique. Le courant est amené par le centre des deux disques et se répartit également entre les fils, en raison de la symétrie parfaite du système. Chaque fil est donc traversé par une fraction bien connue du courant principal (un dixième, s'il y a dix fils): la dilatation de l'un quelconque d'entre eux peut être utilisée, comme dans un ampèremètre thermique ordi-

(1) La résistance qu'un conducteur oppose aux courants de grande fréquence est très mal connue. Par suite de l'effet pelliculaire et des courants induits dans la masse du conducteur, elle varie énormément avec la fréquence, et cette variation dépend elle-même de la grosseur du conducteur.

naire, pour la mesure du courant partiel, de laquelle on déduit la valeur du courant total.

La maison Carpentier a construit un ampèremètre thermique basé sur un principe différent. Le fil dilatable est unique, mais il est subdivisé en un certain nombre de portions par chacune desquelles passe une fraction du courant total. Par exemple (figure 246) le courant est amené par les

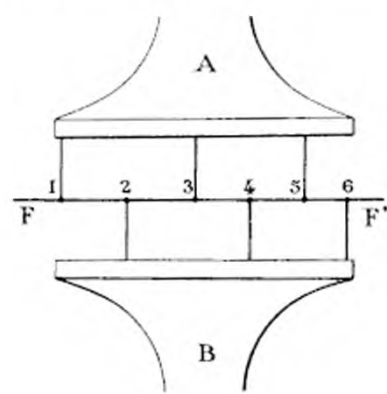


FIG. 246.

est disposé le fil fin dilatable FF'. Celui-ci est divisé en un certain nombre de sections égales 12, 23, 34, 45, 56..., etc. Chacun des points 1, 3, 5... est relié à la pièce A; chacun des points 2, 4, 6... est relié à la pièce B: ces jonctions sont faites par des connexions en clinquant très légères, toutes identiques entre elles. Le

courant circulant entre A et B trouve, dans tous les circuits partiels composés chacun de deux connexions et d'une portion du fil FF', des parcours identiques comme self-induction et comme résistance: il se répartit donc également entre eux, quelle que soit la fréquence. La dilatation du fil FF' sert, comme dans les ampèremètres ordinaires, à la mesure du courant par le déplacement d'une aiguille fixée à une poulie sur laquelle passe un fil de soie.

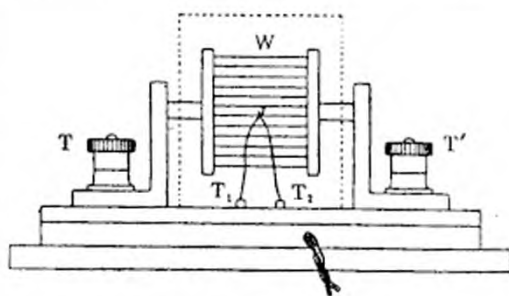


FIG. 247.

M. Fleming a adopté la disposition qu'indique la figure 247. Des fils W, de deux dixièmes de millimètre de diamètre,

sont tendus entre deux joues fixes parallèles en laiton et sont disposés suivant une surface cylindrique de façon que le courant total se répartisse uniformément entre eux : leur nombre dépend de l'intensité à mesurer. Sur l'un des fils W est fixé un petit élément thermo-électrique aboutissant aux bornes T_1T_2 , qui sont reliées à un galvanomètre sensible. L'échauffement du fil W donne naissance, dans le thermo-élément, à une force électromotrice : le courant ainsi engendré dans le circuit du galvanomètre dépend de cet échauffement et par conséquent de l'intensité du courant partiel, qui est une fraction connue du courant total. La déviation de la partie mobile du galvanomètre peut donc indiquer directement l'intensité du courant oscillant total.

Pour la mesure de la valeur maxima de la tension, le meilleur procédé consiste à employer un petit éclateur à intervalle réglable ayant pour électrodes deux sphères de dimensions convenables. L'éclateur est établi pour permettre la mesure exacte de la distance explosive (l'une des sphères est portée par une vis micrométrique, par exemple). Pour déterminer la différence de potentiel entre deux points, on branche l'appareil entre eux et on augmente progressivement l'intervalle explosif jusqu'à ce que l'étincelle cesse de jaillir. A ce moment, on note la valeur de l'intervalle explosif et on en déduit la valeur de la tension explosive en se servant d'un tableau, dressé une fois pour toutes. Les électrodes doivent avoir toujours exactement le même diamètre que celles employées pour l'établissement de ce tableau, puisque la tension explosive dépend de leur forme. Il faut éviter aussi tout échauffement des électrodes, qui abaisserait la tension explosive pour un intervalle donné.

Les ondemètres utilisés dans la pratique consistent tous

en un circuit oscillant fermé comprenant un condensateur réglable et une bobine de self-induction invariable ou réglable⁽¹⁾. L'appareil employé par la C. G. R. est représenté à titre d'exemple par la figure 248. Un condensateur à plaques mobiles et une bobine de self-induction sont disposés l'un au-dessus de l'autre. Un ampèremètre thermique est placé à l'intérieur de la bobine. Pour effectuer une mesure, on laisse la

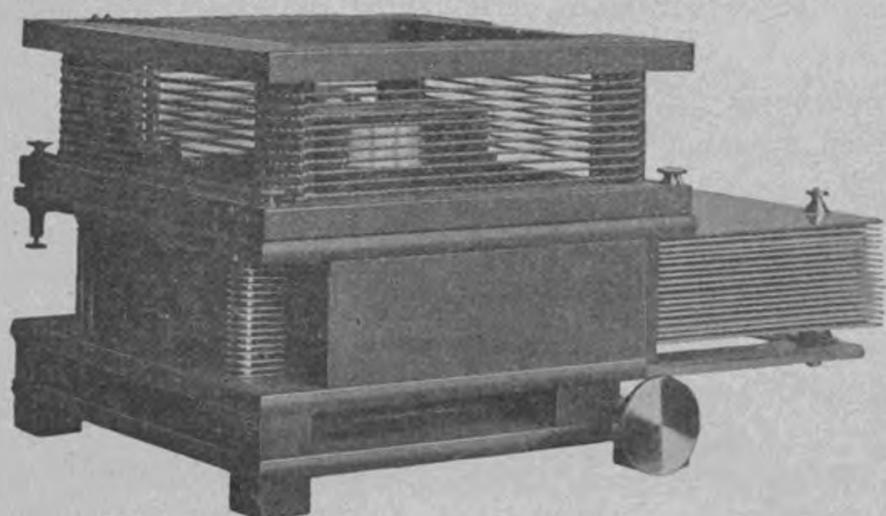


FIG. 248.

self-induction invariable, et on déplace le paquet de plaques mobiles du condensateur (qui coulisse comme un tiroir) jusqu'à ce que l'ampèremètre indique un maximum. Une échelle graduée, portée par la partie mobile de l'appareil, indique la longueur d'onde correspondante.

Antennes et prises de terre.

Les différentes formes d'antennes employées dans la pra-

(¹) Les schémas de principe des différents ondemètres ont été donnés au chapitre XI (page 207).

tique ont été décrites au chapitre x, page 200 : il n'y a donc pas lieu d'y revenir. Il importe d'insister sur le fait que l'isolement doit être aussi parfait que possible. Un condensateur ou une bobine de self-induction auxiliaires sont in-

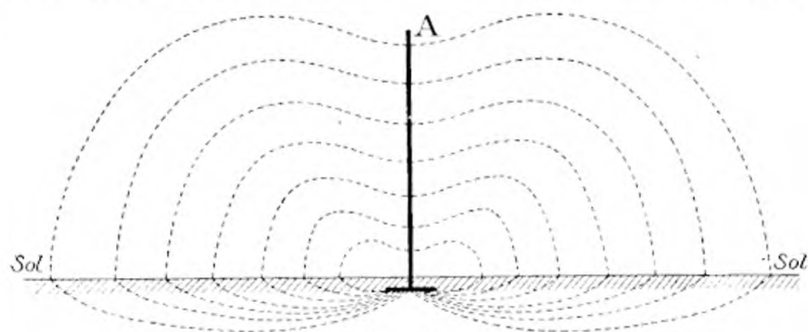


FIG. 249.

tercalés au pied de l'antenne, si l'on veut pouvoir raccourcir ou allonger la longueur d'onde. En général, un poste donné emploie pour la transmission une longueur

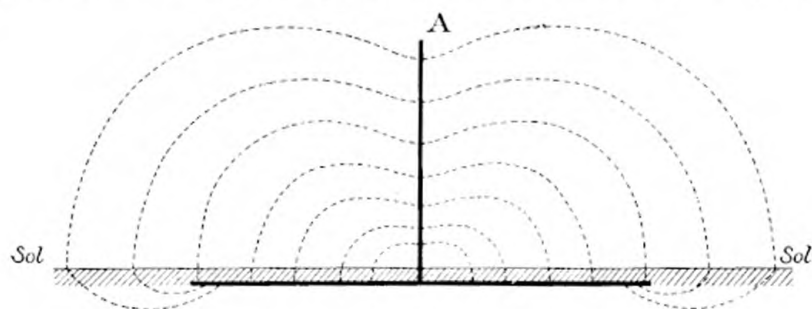


FIG. 250.

d'onde donnée, et les réglages sont effectués une fois pour toutes.

La prise de terre de l'antenne présente une importance capitale. Elle doit être constituée par des plaques métalliques (cuivre ou zinc) ou un réseau de fils enfoui dans un sol humide, à moins que l'on emploie un « contrepoids » formé d'un réseau conducteur de très grande surface et agissant par sa capacité.

Il y a intérêt à donner à la prise de terre la plus grande étendue possible. Les lignes de force du champ électrique créé dans le voisinage de l'antenne ne passent pas seulement par l'air, mais aussi en partie par le sol. Comme l'a indiqué M. Zenneck, il doit donc se produire dans la terre des courants qui donnent lieu à une perte d'énergie. En examinant les figures 249 et 250 tracées par M. Zenneck pour la répartition approximative des lignes de force électriques, on se

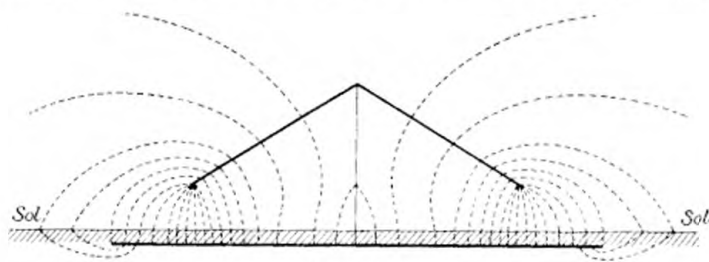


FIG. 251.

rend compte que les courants de terre sont d'autant moins importants que la surface de la prise de terre est plus grande : il en est de même des pertes d'énergie qu'ils occasionnent. Dans les cas d'antennes en cône ou en parapluie, si le réseau de fils constituant la prise de terre a une surface supérieure à la surface couverte par l'antenne (figure 251), presque toutes les lignes de force traversent uniquement l'air, et très peu d'entre elles cheminent dans le sol.

APPAREILS EMPLOYÉS POUR LA RÉCEPTION

Il y a peu de choses à ajouter, au point de vue pratique, aux indications déjà données sur les appareils employés pour la réception. Nous allons passer rapidement en revue ce qui a trait aux antennes et accessoires, aux détecteurs, et aux récepteurs.

Antennes et accessoires.

L'*antenne* aboutit à un commutateur à fiches ou à plots qui permet de la relier soit aux circuits de transmission, soit aux circuits de réception : les uns et les autres sont connectés en permanence à la prise de terre. Généralement, ce commutateur est disposé de façon à empêcher automatiquement toute fausse manœuvre, c'est-à-dire à rendre impossible la mise en marche des appareils de transmission quand l'antenne est branchée sur les appareils de réception. Le commutateur d'antenne employé par la Guerre et la Marine comprend simplement une fiche qui verrouille un interrupteur placé sur le circuit primaire des appareils de transmission : quand la fiche est à la position de réception, l'interrupteur est forcément ouvert. Dans les appareils de la C. G. R., la manette de manœuvre commande à la fois le commutateur d'antenne et le rhéostat de mise en marche du moteur primaire ou l'interrupteur du circuit primaire, de façon que tous les circuits et appareils de transmission soient inactifs quand l'antenne est reliée aux circuits de réception.

Les *bobines d'accouplement* sont réalisées très simplement au moyen de carcasses en bois ou en ébonite portant un certain nombre de tours de fil : une des bobines peut se déplacer par rapport à l'autre, soit parallèlement à elle-même, soit par rotation autour d'une charnière : on peut ainsi modifier à volonté l'accouplement. En outre, des curseurs mobiles permettent de mettre en circuit, dans chacune des bobines, un nombre variable de tours. Généralement, le détecteur peut être branché en deux endroits différents par le simple jeu d'un commutateur : dans l'une des positions, il est relié à l'antenne par un accouplement rigide ; dans l'autre, par un ac-

couplement lâche. Le premier montage est employé pour recevoir des signaux quelconques parvenant à l'antenne ; le second pour recevoir les signaux d'un poste déterminé avec lequel on désire communiquer exclusivement sans trouble.

Les *bobines de self-induction réglables* sont formées d'un assez grand nombre de tours de fil sur lequel frotte un curseur mobile qui permet de modifier la longueur de la portion active. Ces bobines peuvent être construites très simplement, puisqu'il n'y a aucune précaution particulière à prendre pour l'isolement, toujours suffisant pour les très faibles oscillations engendrées à la réception.

Les *condensateurs réglables* sont souvent constitués par des feuilles d'étain séparées par des feuilles de papier paraffiné : des fiches de contact extérieures permettent d'introduire dans le circuit un plus ou moins grand nombre de feuilles. Ils peuvent aussi être constitués par deux groupes de plaques d'aluminium alternant entre elles : un groupe est fixe, et l'autre est mobile ; ce dernier est supporté par une glissière dans laquelle il peut coulisser. Un volant et une vis sans fin permettent de déplacer les plaques mobiles et de faire varier ainsi progressivement la capacité.

Détecteurs.

Les principaux types de détecteurs d'ondes et les montages employés ont été décrits en détail. Pour les besoins de la pratique, ils doivent être comparés entre eux aux points de vue suivants : *sensibilité ; sécurité ; simplicité ; possibilité d'une bonne syntonie ; vitesse de fonctionnement ; enregistrement des télégrammes et signal d'appel.*

La *sensibilité* des détecteurs magnétiques, thermiques,

électrolytiques, à cristaux, à vide, est bien supérieure à celle du cohéreur. Les trois derniers semblent à peu près équivalents ; peut-être le détecteur à cristaux est-il le plus sensible de tous, mais son réglage est parfois délicat.

La *sécurité de fonctionnement* est plus grande avec un cohéreur de faible sensibilité qu'avec un détecteur thermique, électrolytique, ou à cristaux. Il est vrai que, pour parer à une avarie quand on fait usage de détecteurs électrolytiques ou thermiques, on a soin de disposer plusieurs appareils sur un même support et de les relier aux différents plots d'un commutateur qui permet de mettre en service l'un ou l'autre d'entre eux. Le détecteur magnétique semble donner de bons résultats au point de vue de régularité de fonctionnement. Les détecteurs à vide sont plus robustes que les détecteurs électrolytiques ou thermiques.

Au point de vue de la *simplicité des installations*, on peut faire les remarques suivantes : le cohéreur est accompagné d'un tapeur, d'un relais, d'un enregistreur et d'une ou deux piles : il exige, ainsi que les relais, des réglages fréquents et délicats. Les détecteurs à vide doivent être accompagnés d'une source d'énergie auxiliaire dont le rôle est de maintenir le filament incandescent ; les détecteurs thermiques et électrolytiques fonctionnent simplement avec un téléphone et un potentiomètre ; les détecteurs magnétiques ⁽¹⁾ et à cristaux n'ont pas besoin de différence de potentiel auxiliaire.

Pour la *réalisation d'une bonne syntonie*, l'avantage des détecteurs d'effet total, utilisant l'énergie intégrale des ondes reçues, a déjà été signalé : cet avantage est capital s'il s'agit d'ondes entretenues. D'autre part, le détecteur magnétique (détecteur d'effet maximum) offre une supériorité importante

(1) Il s'agit des appareils du type Marconi qui comportent, il est vrai, un mouvement d'horlogerie. Ceux dans lesquels l'aimantation variable du noyau est produite par un courant intermittent entraînent à une assez grande complication.

pour l'utilisation des effets de résonance : la résistance et (à peu de chose près) la self-induction de sa bobine primaire, intercalée dans le circuit oscillant, conservent toujours la même valeur ; dans les autres détecteurs, au contraire, la résistance et la capacité varient énormément sous l'action des oscillations.

La *vitesse de fonctionnement* est évidemment beaucoup plus grande avec les détecteurs à réception téléphonique qu'avec les détecteurs à réception mécanique, tels que le cohéreur : avec les premiers, la seule masse à mettre en mouvement est celle d'une membrane téléphonique, dont l'inertie est très faible, tandis qu'avec les seconds, les pièces mobiles du relais, de l'enregistreur Morse, etc., ont une inertie importante et ne se mettent en mouvement que successivement. Evidemment, les systèmes à galvanomètres avec enregistrement photographique présentent une vitesse de réception comparable à celle des systèmes à téléphones, mais il n'est pas certain que ces appareils soient pratiques.

Le fait qu'un détecteur permet l'*enregistrement des télégrammes* a, dans beaucoup de cas, une grande importance. A ce point de vue, le cohéreur présente une incontestable supériorité. Néanmoins, on est parvenu récemment, de divers côtés, à actionner au moyen de détecteurs thermiques, électrolytiques, ou magnétiques, des galvanomètres ou des relais spéciaux de très grande sensibilité : au prix de certaines complications, on peut alors obtenir l'inscription photographique ou directe des signaux.

L'enregistrement des signaux n'est pas seul à considérer : il est souvent important qu'un détecteur se prête à l'emploi d'une *sonnerie d'appel*. Dans les postes où la réception est faite uniquement au téléphone, il faut qu'un homme soit constamment en faction, avec cet appareil à l'oreille, pour voir si l'antenne est impressionnée par quelque signal. Cela

n'est évidemment possible que dans les installations importantes, pourvues d'un personnel suffisamment nombreux. Dans les petits postes, il faut que le surveillant soit prévenu par une sonnerie ou par quelque autre signal. C'est là un gros avantage du cohéreur. M. Fessenden est parvenu, paraît-il, à établir un relais téléphonique capable de fermer le circuit d'un appareil avertisseur ou enregistreur : ce relais fonctionnerait sous l'action d'un courant équivalent à celui qui suffit pour impressionner une membrane téléphonique. La G. f. D. T. a, de son côté, réalisé un dispositif qui permet la mise en fonctionnement d'une sonnerie d'appel au poste récepteur quand le poste transmetteur émet un signal d'une durée d'au moins dix secondes.

Récepteurs.

Les *téléphones* dont on se sert avec l'un des détecteurs précédents n'ont rien de particulier. On choisit généralement des appareils présentant une grande résistance ohmique. Dans les anciens téléphones, du type Bell, un aimant droit (fig. 252) porte une petite bobine B dans laquelle circulent les courants variables. Les variations d'aimantation du noyau, produites par ces courants, déterminent des modifications corrélatives dans les actions magnétiques exercées sur la membrane, et celle-ci se met à vibrer en produisant un son dont la hauteur dépend de la fréquence des courants variables. Les téléphones employés actuellement sont d'un modèle très réduit et comportent tous un double aimant plat portant une petite bobine sur chacun de ses pôles. Un potentiomètre permet de régler

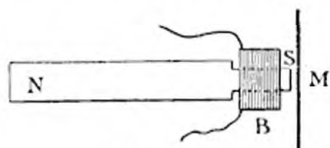


FIG. 252.

facilement la différence de potentiel employée, de façon à obtenir le maximum de sensibilité.

Avec les dispositifs à étincelles musicales, on cherche à sélectionner les signaux en utilisant des *monotéléphones* établis pour répondre seulement à la note musicale normalement employée. Les monotéléphones ont été très complètement étudiés par MM. Mercadier et Magunna pour la réalisation pratique du système de télégraphie multiplex Mercadier, qui consiste dans l'émission simultanée, sur une même ligne, de plusieurs télégrammes transmis avec des courants alternatifs de fréquences différentes (250 à 1 000): à l'arrivée, le triage de ces différents courants superposés est effectué par des relais monotéléphoniques répondant chacun à une fréquence unique.

Le relais monotéléphonique Mercadier-Magunna consiste en une membrane horizontale sous laquelle agit un électro-aimant et sur laquelle appuie, avec une très grande légèreté, une pointe de contact en platine iridié : la membrane et la pointe sont reliées à un circuit contenant une pile et un relais ordinaire très sensible. Quand la bobine de l'électro-aimant est parcourue par un courant alternatif ayant pour fréquence la fréquence propre de vibration de la membrane, celle-ci se met à vibrer : l'intimité du contact existant entre son centre et la pointe est modifiée, et il se produit une variation de la résistance électrique de ce contact. Cette variation est suffisante pour qu'un courant circule dans le circuit auxiliaire du relais, qui ferme alors le circuit principal des appareils enregistreurs. Dans les dispositifs radiotélégraphiques à étincelles musicales, le détecteur donne naissance, dans le circuit récepteur, à des impulsions de courant dont la fréquence est égale au rythme des décharges du dispositif transmetteur. Ces impulsions de courant traversent la bobine de l'électro-aimant du relais téléphonique

et ne mettent la membrane en vibration que si leur fréquence correspond à sa fréquence propre. On dispose donc ainsi d'un moyen absolu de sélectionner les signaux ⁽¹⁾, le poste récepteur restant muet à toutes les impulsions qui ne se produisent pas avec le rythme voulu : en outre, l'emploi du relais monotéléphonique permet la mise en action d'appareils enregistreurs quelconques.

Un *relais sélectif téléphonique* est employé par la G. f. D. T. avec le nouveau dispositif Telefunken à étincelles musicales.

Les impulsions de courant auxquelles le détecteur donne naissance passent par la bobine d'un électro-aimant dans le champ duquel se déplace une armature très légère. Celle-ci a une fréquence propre d'oscillation déterminée correspondant à la note musicale du poste transmetteur avec lequel on désire communiquer. L'armature appuie contre la membrane d'un microphone, intercalé dans un circuit qui contient un téléphone ou un deuxième électro-aimant et une pile :

les impulsions de courant engendrées dans ce second cir-

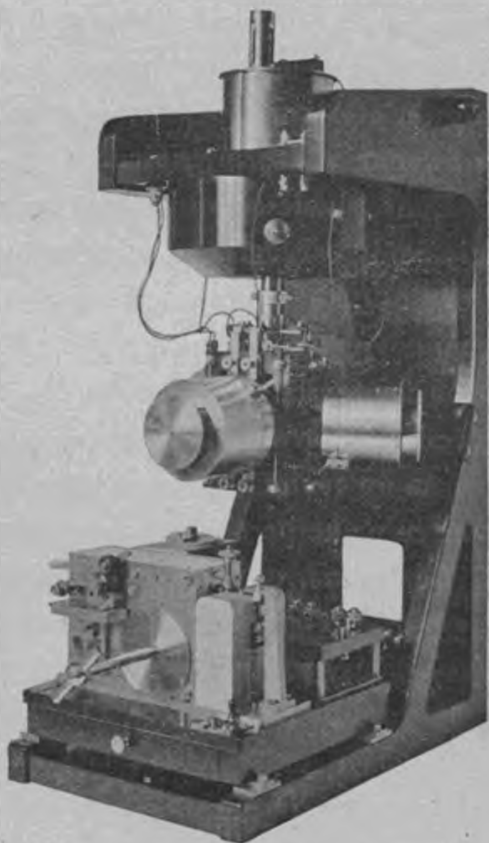


FIG. 253.

(1) On pourrait évidemment, sans aucune difficulté, recevoir simultanément, avec plusieurs relais monotéléphoniques de fréquences différentes, les télégrammes.

cuit ont une intensité beaucoup plus grande que celles du premier circuit. Avec trois renforcements successifs, on parvient, avec un courant initial d'un dix-millième de milliampère, à obtenir un courant final de quelques milliampères, capable d'actionner un téléphone haut-parleur ou un appareil enregistreur accompagné d'un relais ordinaire. La figure 253 montre un relais sélectif à triple renforcement, employé sur les navires. Un tel appareil permet une sélection d'environ 20 pour 100, c'est-à-dire qu'il reste muet aux signaux émis avec une note musicale dont la fréquence diffère de 20 pour 100 de sa fréquence propre. Pour obtenir une sélection plus aiguë, atteignant 2 pour 100, la G. f. D. T. utilise un circuit « filtreur » intermédiaire.

Dans plusieurs nouvelles installations, on a réussi à enregistrer les signaux en utilisant un *galvanomètre* d'une extrême sensibilité et un rayon lumineux qui tombe sur une bande de papier photographique. Le galvanomètre comprend un fil très fin tendu entre les pôles d'un puissant aimant : ce fil découvre, lorsqu'il se déplace, une fente étroite par laquelle passe un rayon lumineux. Les différents appareils construits sur ce principe sont tous à peu près semblables.

Les *relais*, qui ont pour fonction de fermer le circuit d'une sonnerie d'appel ou d'un enregistreur Morse et du tapeur (cohéreur) sont de deux types distincts. Les uns sont à palette mobile ; les autres à cadre mobile. Dans les premiers (fig. 254), un aimant en U est formé de la culasse C, de la branche D, et de la branche E_1E_2 subdivisée en deux noyaux parallèles E_1 et E_2 : ceux-ci portent chacun une bobine B_1B_2 (¹) et forment deux électro-aimants. L'aimant perma-

émanant de plusieurs postes qui transmettent avec des rythmes différents (notes musicales différentes).

(¹) L'aimantation permanente des noyaux E_1E_2 a pour effet d'augmenter la sensibilité de l'appareil. Un tel relais est dit *polarisé*.

nent D C ($E_1 E_2$) a, par exemple, son pôle sud en D et son pôle nord en E_1 et E_2 . Si un courant circule dans les bobines $B_1 B_2$, son action magnétisante renforce l'aimantation de l'un des deux noyaux E_1 ou E_2 et affaiblit celle du second. Une palette mobile en fer doux P, placée entre les masses polaires des électro-aimants, est alors attirée par l'une d'elles et ferme en F_1 ou F_2 le circuit de l'enregistreur⁽¹⁾.

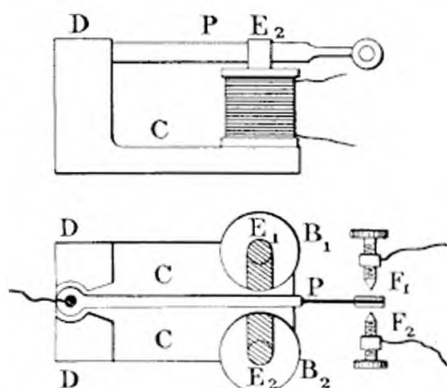


FIG. 254.

Dans les relais à cadre mobile, le courant circule dans une petite bobine B (fig. 255) enroulée sur un cadre léger qui peut pivoter entre les masses polaires d'un aimant A. L'axe du cadre porte, comme la palette de l'appareil précédent, une petite tige dont l'extrémité vient toucher un contact fixe quand le cadre se déplace.

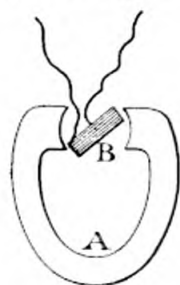


FIG. 255.

Dès qu'un courant traverse la bobine B, les effets d'attraction ou de répulsion qui s'exercent entre le champ magnétique créé par lui et le champ de l'aimant A déterminent la rotation du cadre et la fermeture du circuit. La figure 256 montre un relais Darras à cadre mobile très fréquemment employé dans les postes radiotélégraphiques

français. Cet appareil, d'un réglage commode, est d'une extrême sensibilité. Il fonctionne normalement sous l'action d'un courant d'un centième de milliampère, et, dans cer-

(1) Sur la figure, on a laissé, pour plus de clarté, un intervalle assez grand entre les contacts fixes $F_1 F_2$ et les contacts de la palette mobile, mais, dans la réalité, cette distance est extrêmement réduite et presque imperceptible à l'œil nu : le déplacement de la palette, nécessaire pour la fermeture du contact, est extrêmement petit.

tains cas, sa sensibilité peut être poussée encore plus loin. L'aimant plat est peu volumineux : le cadre très léger se déplace entre les masses polaires de cet aimant et un anneau central en fer doux par lequel se referment les lignes de force magnétiques. L'axe du cadre porte un petit contact

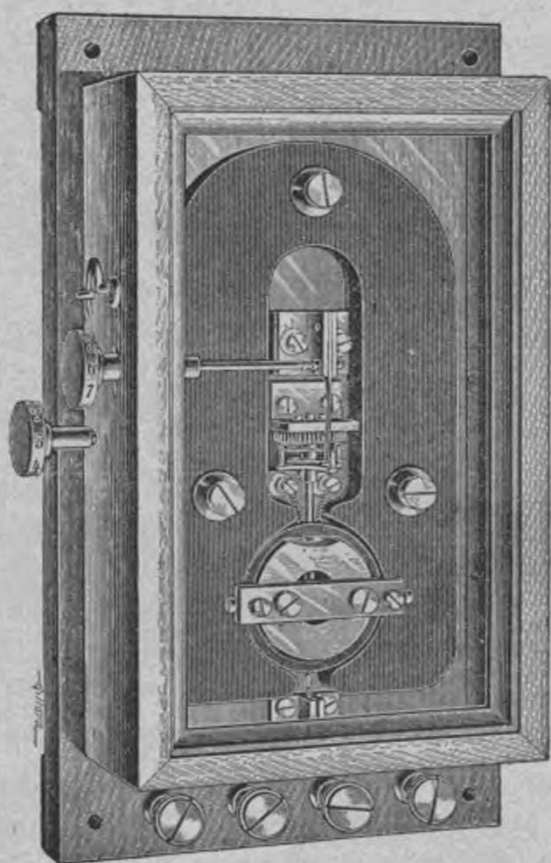


FIG. 256.

qui vient s'appuyer contre l'une des butées fixes. Des vis extérieures, visibles sur la figure, permettent de régler à volonté l'écartement.

L'enregistreur Morse est un appareil assez connu pour qu'il soit superflu d'insister longuement sur lui. Son principe est le suivant : un double électro-aimant E (fig. 257) agit sur une armature A qu'il fait osciller autour d'un axe. Cette armature commande une pa-

lette dont l'extrémité C va appuyer, contre une molette M garnie d'encre, une bande de papier qui se déroule sous l'action d'un mécanisme d'horlogerie. L'encre de la molette M est assuré par un rouleau de feutre imbibé d'encre placé au-dessus d'elle. Le déroulement du papier est produit par l'action de deux rouleaux de serrage qui tirent la bande à eux en la pinçant comme un laminoir. Tout le mécanisme d'horlogerie est contenu dans une boîte mé-

talique rectangulaire : il peut être remonté au moyen d'une clé et arrêté ou mis en route au moyen du toc *t*. Dans certains appareils, le mouvement d'arrêt ou de mise en route est produit automatiquement par l'action ou la cessation du courant.

L'*appareil d'appel*, employé avec le cohéreur dans les anciens postes, consiste simplement en une sonnerie dont le circuit se trouve fermé par le relais lorsque le détecteur est impressionné. Avec les détecteurs récents, utilisant le téléphone comme appareil récepteur, on n'est pas parvenu, en général, à réaliser un signal d'appel. Cependant, la G. f. D. T.

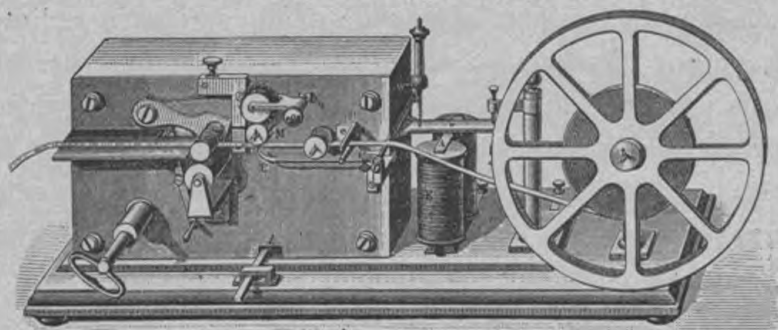


FIG. 257.

a établi un appareil qui peut être mis en circuit à la place du téléphone et qui fait fonctionner une sonnerie lorsque le poste transmetteur émet un signal continu (trait) pendant au moins dix secondes. Cet appareil comprend un galvanomètre à cadre mobile très sensible dont l'aiguille arrive à être suffisamment déviée si les impulsions de courant durent dix secondes : quand la déviation est suffisante, l'aiguille tombe entre les dents d'une roue qu'entraîne un mouvement d'horlogerie et est poussée vers le bas par une dent. Ce déplacement ferme le circuit d'une sonnerie d'alarme qui retentit jusqu'à ce que le télégraphiste ait déclenché l'aiguille au moyen d'un levier et ait remplacé l'appareil par un téléphone pour recevoir les signaux. Les signaux étrangers ou parasites restent sans action, parce que leur durée est trop courte.

CHAPITRE XVI

DESCRIPTION DE QUELQUES POSTES RADIOTÉLÉGRAPHIQUES

Pour compléter qui précède, nous allons décrire très succinctement les installations de quelques postes radiotélégraphiques français ou étrangers. La partie intéressante de ces postes réside surtout dans les dispositifs employés pour la transmission ou la réception, dispositifs dont les schémas ont été donnés aux chapitres précédents. Il ne reste donc à parler que de l'ensemble des installations, sur lequel, d'ailleurs on possède généralement peu de documents.

Postes de la Guerre.

Nos principales places fortes de l'Est : Verdun, Toul, Epinal, Belfort, sont reliées par des communications radiotélégraphiques avec le poste établi à Paris à la tour Eiffel.

Les antennes sont soutenues par des mâts ou pylônes, sauf à Belfort, où l'aérien est supporté par un promontoire rocheux sur lequel est bâtie l'ancienne citadelle.

Dans chaque poste, un alternateur alimente un transformateur à résonance sans fuites qui charge, sous une tension limite de 80 000 volts, un condensateur GaiFFE à plaques de 0,075 microfarad. La figure 258 donne une vue de ce condensateur, ainsi que de l'éclateur à cylindres et de la bobine d'accouplement.

La réception est faite au moyen de détecteurs électrolyti-

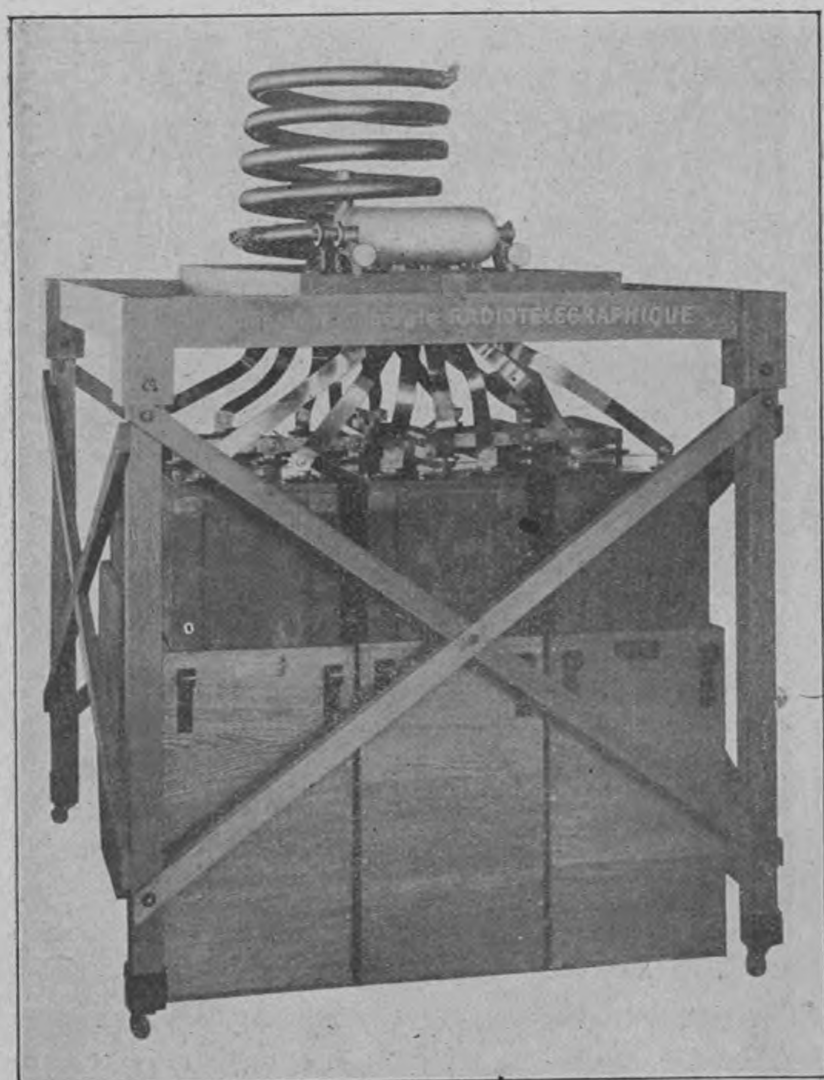


FIG. 258.

ques. Les dispositifs employés sont ceux indiqués au chapitre XIII (fig. 179 et 181, pages 288 et 289).

Le poste de la tour Eiffel est entièrement souterrain et

comprend des locaux pour le placement des appareils, les études et expériences, et le logement du personnel de garde.

L'antenne est formée par une nappe de six conducteurs aériens, disposés comme l'indique la figure 259. La partie supérieure de chaque fil aboutit à trois isolateurs successifs

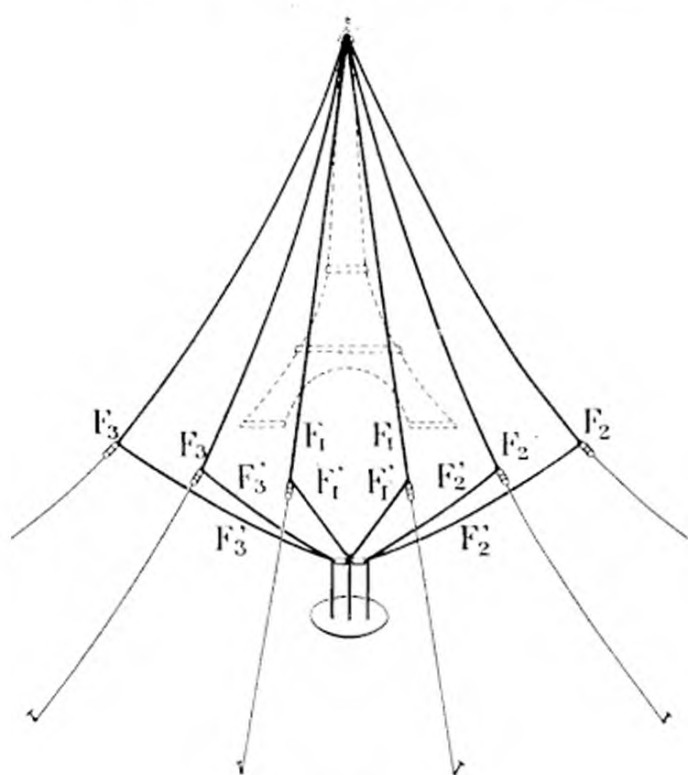


FIG. 259.

en porcelaine amarrés aux arcades qui surmontent la troisième plate-forme de la tour. Les portions actives de ces conducteurs sont prolongées par des câbles tendeurs, avec interposition d'isolateurs spéciaux. Chacun de ces isolateurs est formé par deux grosses poulies en porcelaine, distantes d'un mètre et reliées l'une à l'autre par un large collier en caoutchouc capable de résister à un effort de traction de 5 000 kilogrammes. Les conducteurs qui composent l'antenne sont des câbles de 4 millimètres de diamètre présentant une très grande solidité.

A chaque conducteur aérien ($F_1 F_1 F_2 F_2 F_3 F_3$) est fixé un fil de jonction ($F'_1 F'_1 F'_2 F'_2 F'_3 F'_3$). Les fils de jonction (F'_1 et F'_1 , F'_2 et F'_2 , F'_3 et F'_3) étaient d'abord réunis deux par deux à une cinquantaine de mètres du sol pour former trois conducteurs de descente verticaux, aboutissant dans la cour intérieure découverte du poste souterrain : ces trois conducteurs étaient maintenus écartés et isolés les uns des autres, à leur partie supérieure, par deux fortes tiges d'ébonite. Actuellement, les trois fils de descente ont été réunis ensemble pour former un seul conducteur. La période propre d'oscillation de l'antenne totale correspond à une longueur d'onde de 2 000 mètres environ.

La prise de terre est formée par un grand nombre de plaques de zinc enfouies dans le sous-sol, que la proximité de la Seine maintient toujours humide. La surface totale de ces plaques atteint plusieurs centaines de mètres carrés.

Le courant alternatif nécessaire est emprunté au réseau de distribution de la rive gauche dont la tension est abaissée de 3 000 à 220 volts par un transformateur. Le circuit primaire comprend deux bobines de self-induction réglables (servant pour l'obtention de la résonance primaire) et une résistance réglable que court-circuite le manipulateur. Deux groupes de lampes à incandescence tubulaires à filament droit forment des lignes de fuites destinées à protéger le circuit d'alimentation contre l'action des oscillations, comme cela a été expliqué page 348 (fig. 226). Le courant traverse le primaire d'un transformateur sans fuites magnétiques, dont le secondaire charge, sous une tension de 60 000 volts environ, le condensateur du circuit oscillant. La tension sera élevée à 100 000 volts environ quand l'installation du poste aura été complétée.

Le condensateur définitif comprendra 896 tubes Moscicki de six centimètres de diamètre et d'un mètre environ de

longueur, répartis en sept batteries de 128 tubes. Chaque batterie est formée de deux groupes de 64 tubes horizontaux, supportés par un châssis en fer et facilement amovibles : ces deux groupes sont connectés en série. La figure 260 montre l'une d'elles : une telle batterie a 2^m,40 de hauteur, 1^m,20 de largeur et 1^m,16 de profondeur. Chaque tube peut être retiré par le fond, c'est-à-dire du côté opposé aux connexions, et être remplacé sans aucun démontage. Les sept batteries seront reliées en parallèle et l'ensemble présentera une capacité totale de 0,7 microfarad, pour une tension de charge de 110 000 volts : la disposition sera telle que les connexions soient aussi courtes que possible. Ce condensateur sera le plus puissant de ceux actuellement utilisés en radiotélégraphie.

Les dispositifs employés pour la transmission et la réception sont ceux précédemment décrits (pages 288 et 289, fig. 179, 180 et 181). L'antenne contient six tours de la bobine d'accouplement, dont deux tours environ sont intercalés dans le circuit oscillant. La valeur de l'accouplement, pour la transmission, est comprise entre 0,10 et 0,18 (10 à 18 pour 100). La quantité d'énergie mise en jeu est actuellement d'une quinzaine de kilowatts : elle atteindra probablement une soixantaine de kilowatts quand le condensateur aura sa capacité définitive.

Pour la réception, on se sert de détecteurs électrolytiques, ou bien du détecteur à cristaux du capitaine Brenot, qui a donné de très bons résultats au point de vue de la sensibilité et de la commodité d'emploi.

Outre les postes fixes, l'Armée emploie des postes transportables destinés à assurer les communications en campagne. Les uns sont établis dans des voitures, automobiles ou hippomobiles ; les autres sont prévus pour être démontés et transportés à dos de mulet.

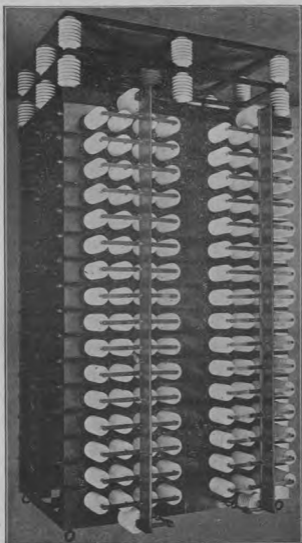


Fig. 260

Dans les voitures automobiles, le courant primaire est fourni par un alternateur de 4 kilowatts qu'entraîne, au moyen d'un embrayage particulier et d'une chaîne, le moteur de la voiture.

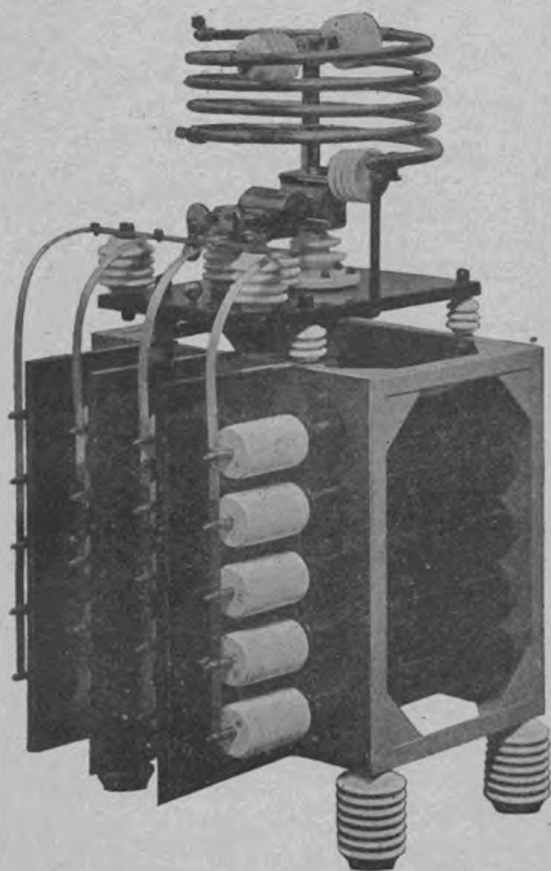


Fig. 261.

Dans les voitures hippomobiles, il est fourni par un petit groupe générateur composé d'un moteur à pétrole et d'un alternateur. Le circuit oscillant est alimenté, sous une tension de 60000 volts environ, par un transformateur à résonance sans fuites magnétiques : il comprend un condensateur de 0,04 microfarad formé de 20 tubes Moscicki, un éclateur à

cylindres et une bobine d'accouplement. La figure 261 montre cet ensemble. L'antenne multiple, de vingt ou trente mètres de hauteur, est supportée par un mât démontable en plusieurs parties : ce mât, établi par la C. G. R., est formé de montants creux en bois de sapin collés, entourés de deux épaisseurs

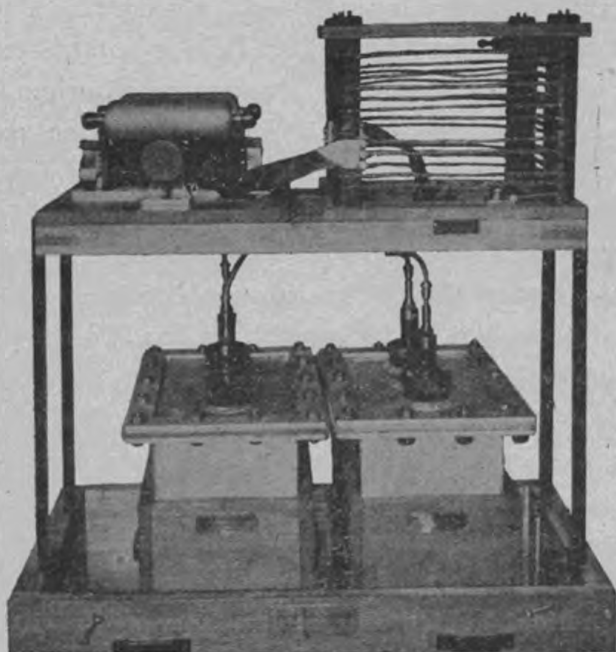


FIG. 261.

de toile vernie ; il est très léger et peut être dressé facilement.

Les postes transportables à dos de mulet comprennent un transformateur à fuites à noyau droit, de $1^{kw},5$ de puissance, dont la bobine primaire et la bobine secondaire sont facilement démontables. La tension secondaire est de 40000 volts. Deux batteries de condensateurs GaiFFE à plaques, de 0,01 microfarad, sont contenus dans des cuves en zinc remplies de pétrole. La figure 262 montre un de ces postes.

Postes de la Marine.

La Marine a installé, pour le service des escadres, trois stations radiotélégraphiques de grande puissance à Toulon, Oran et Bizerte. Des postes plus faibles ont été établis à Ajaccio, Brest, Cherbourg, Dunkerque, Lorient, Port-Vendres et Rochefort pour la correspondance publique générale. Enfin, les cuirassés, les croiseurs, et la plupart des contre-torpilleurs ont été munis d'appareils radiotélégraphiques dont la puissance, variable suivant l'importance des bâtiments, permet d'atteindre des portées minima de 700 kilomètres (2 000 kilomètres la nuit), de 300 kilomètres et de 150 kilomètres.

Dans leur ensemble, les postes de la Marine ont beaucoup d'analogies avec les postes de la Guerre, dont ils sont dérivés. Dans les postes de Toulon, Bizerte et Oran, un alternateur d'une quinzaine de kilowatts alimente un transformateur sans fuites magnétiques : des bobines de self-induction permettent l'obtention de la résonance primaire. Le manipulateur, à sa position de repos, ferme le circuit sur une résistance de compensation, comme cela a été expliqué précédemment (fig. 182, page 290). Le secondaire du transformateur charge un condensateur formé de deux batteries comprenant chacune 36 tubes Moscicki verticaux de six centimètres de diamètre et de 1^m,38 de hauteur. En couplant ces deux batteries en parallèle ou en série, on obtient une capacité de 0,4 microfarad ou de 0,1 microfarad. Le premier couplage est employé quand le poste transmet avec une longueur d'onde de 1 350 mètres et le second quand le poste transmet avec une longueur d'onde de 750 mètres. La valeur de l'accouplement est comprise entre 0,08 à 0,1 (8 à 10 pour 100).

L'antenne du poste du Mourillon, près de Toulon, est représentée par la figure 263. Trois pylônes de 75 mètres de hauteur supportent des rideaux de 70 mètres de longueur comprenant chacun un grand nombre de fils. La longueur d'onde

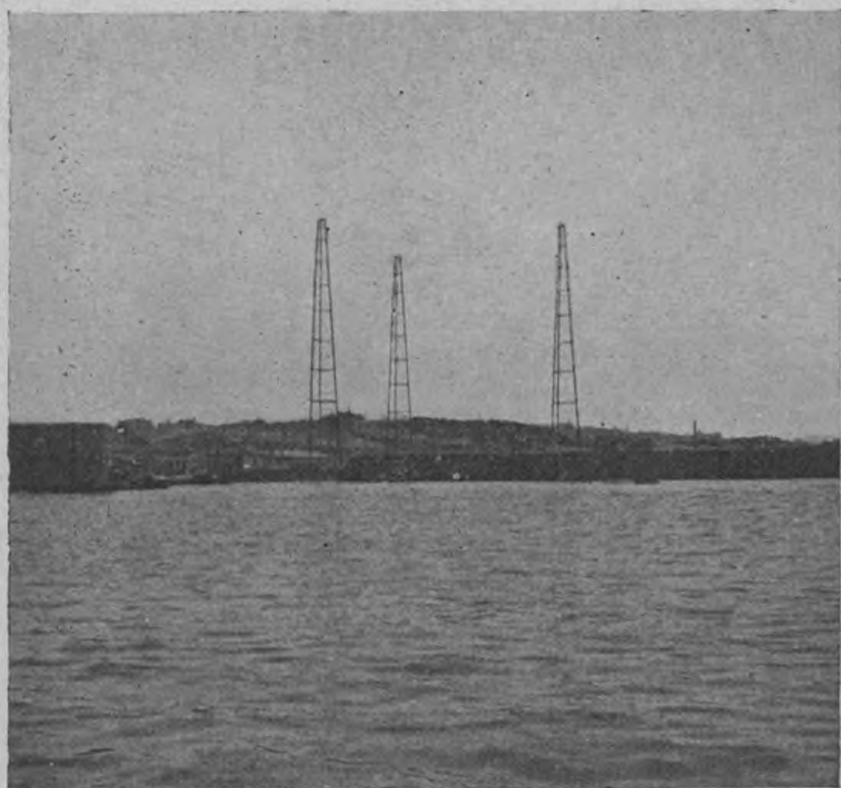


FIG. 263.

normale est de 750 mètres ; on utilise aussi, pour les transmissions, la longueur d'onde de 1 350 mètres.

Les postes de grands bâtiments comprennent, pour la transmission, un alternateur d'environ 4 kilowatts sous 250 volts, un transformateur à fuites magnétiques, un condensateur Gaiffe à plaques, un éclateur à cylindres, une bobine d'accouplement mixte, un condensateur d'antenne et une bobine

de self-induction d'antenne. Cet ensemble est représenté par

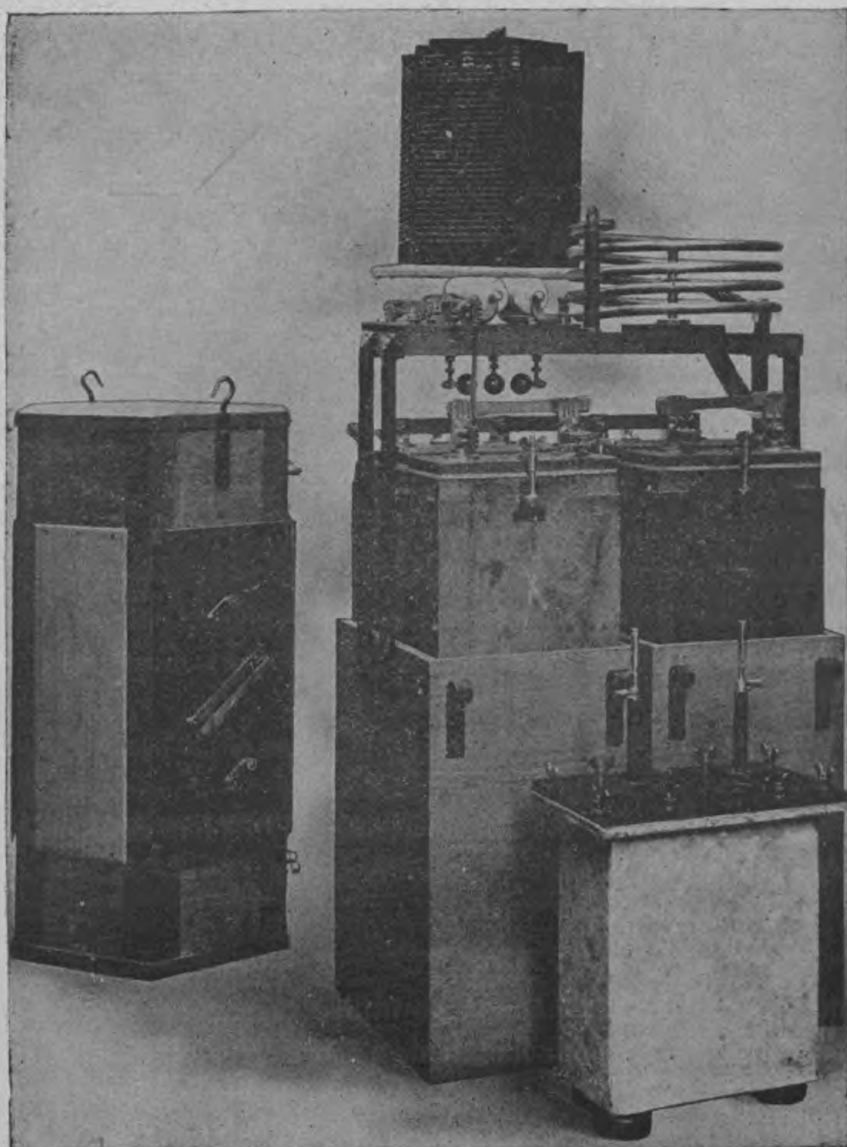


FIG. 264.

la figure 264 sur laquelle on voit à gauche le transformateur à fuites à noyau droit avec connexions extérieures pour le

couplage des bobines secondaires, et en avant le condensateur d'antenne. Au-dessus du condensateur principal, on aperçoit nettement l'éclateur à trois boules destiné à protéger les deux batteries contre des surtensions dangereuses.

L'antenne, en forme de T, est généralement formée de deux brins horizontaux et de deux brins de descente. Les longueurs d'onde employées sont de 300, 450, 600 et 750 mètres : la première et la troisième servent pour les communications avec les postes côtiers ; les deuxième et quatrième pour les communications entre navires d'escadre. La longueur d'onde normale est de 450 mètres : pour obtenir la longueur d'onde de 300 mètres, on intercale un condensateur dans l'antenne ; pour obtenir celles de 600 et de 750 mètres, on y intercale une plus ou moins grande portion de la bobine de self-induction. L'accouplement employé est compris, en général, entre 0,1 et 0,12 (10 à 12 pour 100).

Le condensateur du circuit oscillant comprend deux batteries composées chacune de deux blocs de plaques, soit en tout quatre blocs distincts. Avec les deux batteries en série, on dispose d'une capacité de 0,025 microfarad capable de supporter une tension de 80 000 volts : cette capacité correspond à la longueur d'onde normale de 450 mètres. Avec les deux batteries en parallèle, on dispose d'une capacité de 0,1 microfarad capable de supporter 40 000 volts ; cette capacité correspond à la longueur d'onde de 750 mètres. Pour obtenir les longueurs d'onde de 300 et 600 mètres, on connecte les éléments de chaque batterie de façon à avoir des capacités de 0,0125 et 0,750 microfarad. Les modifications de groupements sont effectuées très rapidement au moyen de connexions appropriées.

Le transformateur à fuites porte deux groupes de deux bobines secondaires (fig. 230, page 352) qui peuvent être reliées en tension ou en parallèle par déplacement d'une

connexion extérieure. Quand les deux batteries du condensateur sont en série (longueur d'onde 450 mètres), les deux demi-secondaires sont connectés en série et produi-

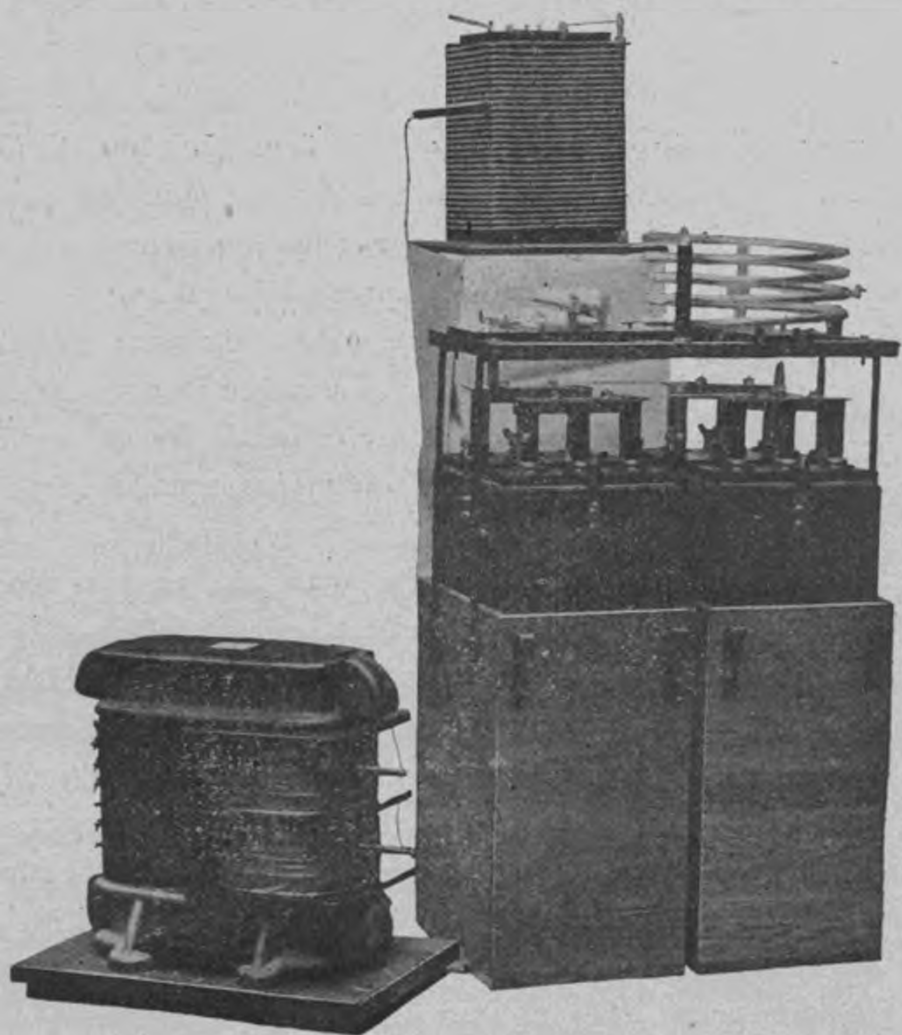


Fig. 265.

sent une tension de 80 000 volts. Quand les deux batteries sont reliées en parallèle (longueur d'onde 750 mètres), les deux demi-secondaires sont connectés en parallèle et donnent 40 000 volts. D'après la construction même du transformateur à fuites, la résonance primaire se produit dans ces deux cas sans que l'on ait à s'en occuper. Quand le poste transmet avec

les longueurs d'onde de 300 ou 600 mètres, on obtient la résonance primaire en modifiant la vitesse de rotation de l'alternateur (entraîné par un moteur électrique) pour changer la fréquence du courant primaire; on peut aussi se passer de la résonance primaire s'il ne s'agit pas de communiquer à de grandes distances. On parfait les réglages en modifiant la self-induction de la bobine intercalée dans le circuit primaire.

La figure 265 représente les appareils de transmission d'un poste de faible puissance avec transformateur à double noyau.

La réception est faite d'après le dispositif indiqué au chapitre XIII, page 292. La figure 266 montre une table de

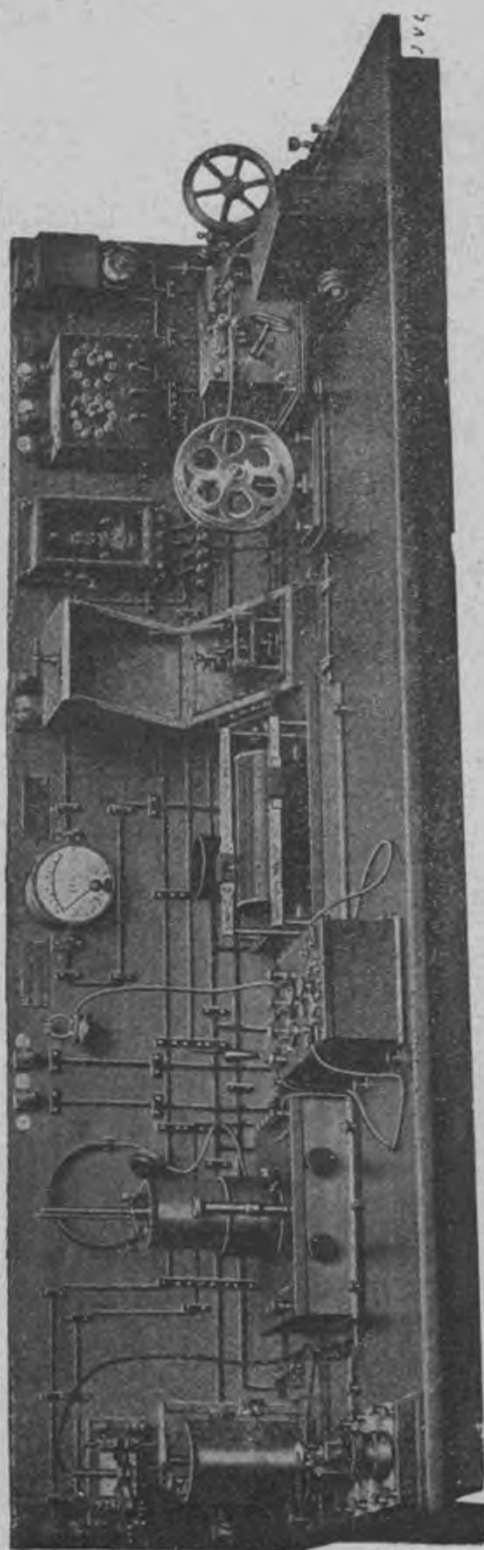


Fig. 265.

réception (poste de grand bâtiment) sur laquelle sont disposés tous les appareils, à l'exception du détecteur magnétique. Le fil d'antenne, après avoir traversé un commutateur à fiche visible en haut à gauche ⁽¹⁾, aboutit à la bobine d'accord (à gauche) : de là, le courant passe par un commutateur qui permet d'utiliser, soit un détecteur électrolytique ⁽²⁾, soit le

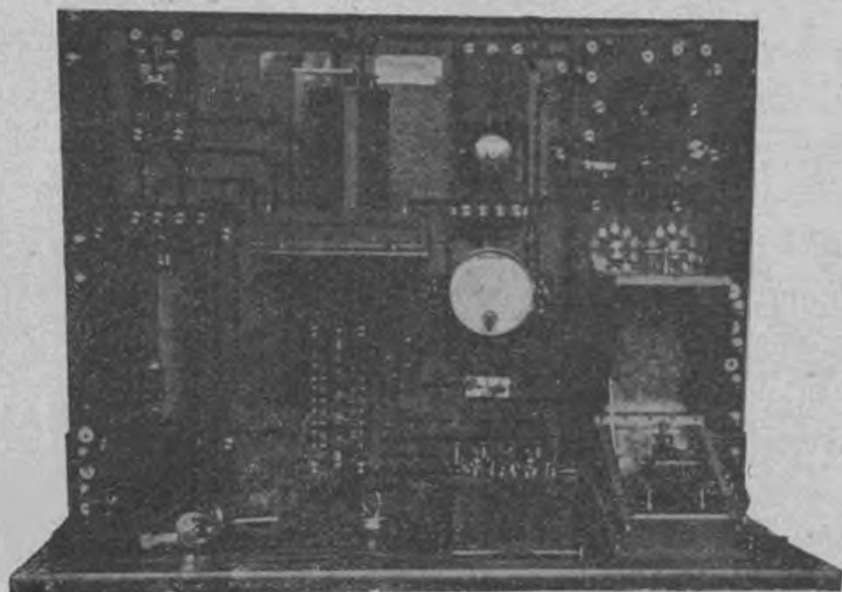


FIG. 267.

cohéreur, soit le détecteur magnétique. On voit à gauche, sur la table, les bobines d'accouplement des électrolytiques ⁽³⁾ et la boîte contenant ces appareils, au-dessus de laquelle est suspendu un téléphone : au milieu est placée la bobine de réglage du circuit du cohéreur qui est disposé, avec son teneur, dans la boîte rectangulaire ouverte ; sur la paroi verticale, au-dessus de l'enregistreur Morse, on aperçoit un

⁽¹⁾ Ce commutateur coupe le circuit primaire de transmission quand l'antenne est sur la position de réception.

⁽²⁾ Trois de ces appareils sont montés sur un même plateau et l'un ou l'autre d'entre eux peut être mis en circuit par la manœuvre d'un petit commutateur.

⁽³⁾ L'accouplement peut être mixte ou inductif, à volonté.

relais Darras et un potentiomètre à commutateur. La boîte placée en avant et munie d'un bouton de sonnerie contient deux éléments de pile et sert au réglage du cohéreur.

Dans les postes de contre-torpilleurs, on s'est efforcé de réduire autant que possible la place occupée. La figure 267 donne une vue des appareils employés pour la réception. En haut à droite est placé le commutateur d'antenne ; au-dessous de lui, la bobine d'accord ; au milieu en bas, le commutateur à bascule qui permet de recevoir avec le détecteur électrolytique ou avec le cohéreur ; au-dessus, la bobine d'accouplement. Le cohéreur est visible à droite sur la table avec son potentiomètre à plots au-dessus de lui.

Postes de l'administration des Postes et Télégraphes.

L'Administration des Postes et Télégraphes a installé, sous la direction de M. Petit, des postes radiotélégraphiques aux Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône), à Fort-de-l'eau (Alger), à Ouessant, à Boulogne et à Porquerolles. Elle projette d'établir un poste de grande puissance près de Saint-Nazaire, pour assurer des communications transatlantiques avec un poste Marconi établi sur la côte américaine. Les postes des Saintes-Maries et d'Alger contiennent chacun une double installation, permettant le fonctionnement sur courant continu avec bobine d'induction, ou sur courant alternatif avec transformateur.

Le dispositif employé sur courant continu est indiqué par la figure 268. Une batterie d'accumulateurs⁽¹⁾ alimente sous une différence de potentiel de 120 volts, le circuit primaire qui contient le manipulateur i , l'un ou l'autre des interrup-

(1) Cette batterie est chargée par une génératrice qu'entraîne un moteur à pétrole.

teurs Klingelfuss H_1 ou H_2 , la résistance réglable R et le primaire P d'une bobine Klingelfuss. Le manipulateur i est un appareil à contacts plongés dans l'eau distillée : les interrup-

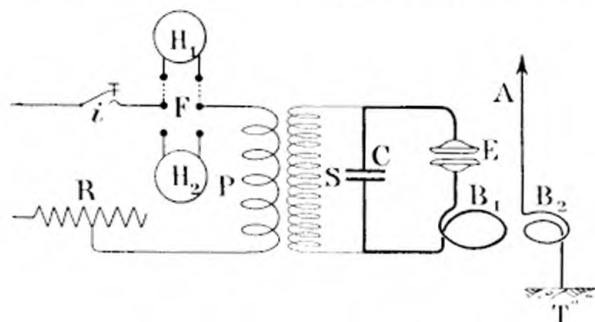


FIG. 268.

teurs rotatifs H_1 ou H_2 peuvent être mis l'un ou l'autre en circuit par la manœuvre d'un commutateur F à double direction.

Le secondaire de la bobine charge le condensateur C formé

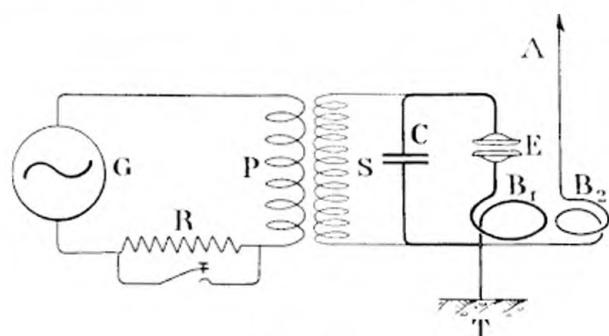


FIG. 269.

de 14 tubes Moscicki (capacité 0,07 microfarad pour 60 000 volts). L'éclateur E est du modèle à coupelles décrit page 365, figure 239. La bobine d'accouplement B_1 comprend une spire de 1^m,10 de diamètre formée d'un ruban de cuivre de 32 centimètres de largeur ; la bobine secondaire B_2 , disposée à l'intérieur de la précédente, comprend une spire et demie de 75 centimètres de diamètre formée d'un ruban de cuivre de

3 centimètres de largeur. La valeur de l'accouplement est d'environ 0,1 (10 pour 100).

Le dispositif employé sur courant alternatif est représenté par la figure 269. Un alternateur G alimente le primaire P

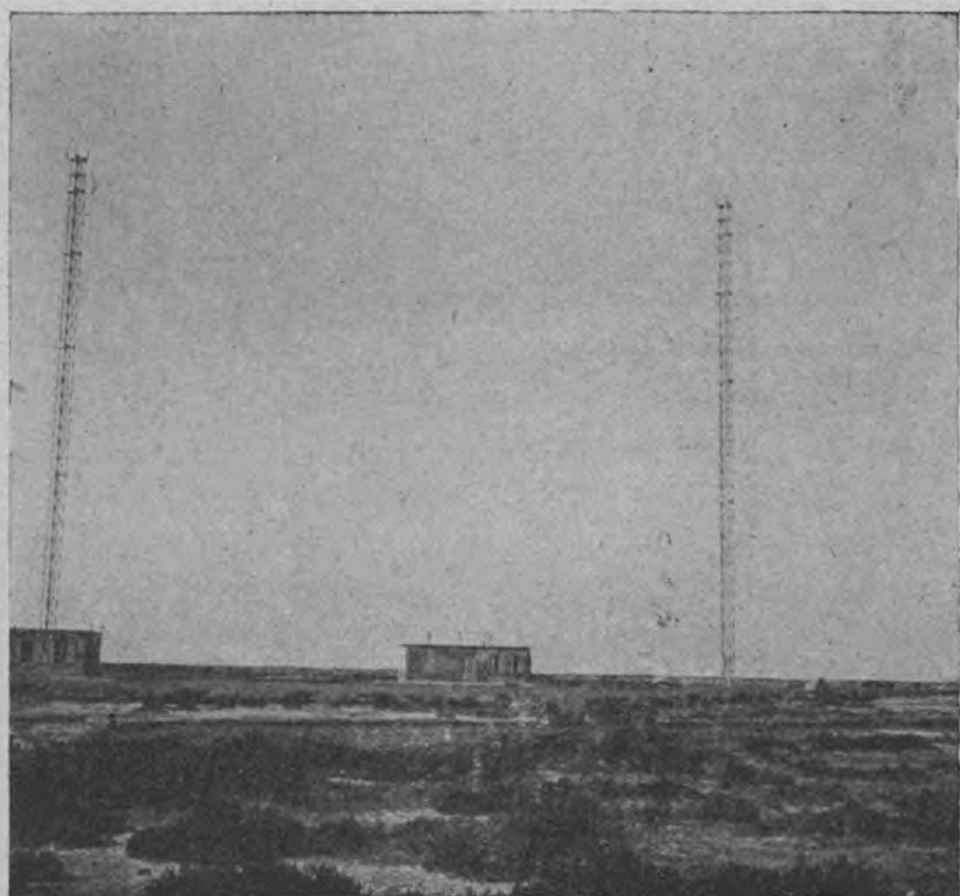


FIG. 270.

d'un transformateur à fuites magnétiques. Le manipulateur est branché en dérivation sur la résistance R qu'il court-circuite. Le secondaire S du transformateur charge le condensateur C formé de 4 batteries de 14 tubes Moscicki⁽¹⁾ (deux batteries en série forment un groupe, les deux groupes sont

⁽¹⁾ A Fort-de-l'eau les condensateurs employés pour l'émission sur courant alternatif sont des condensateurs GaiFFE à plaques.

connectés en parallèle : capacité 0,07 microfarad pour 110 000 volts). La tension de charge est deux fois plus élevée que sur courant continu. La bobine d'accouplement B_1 comprend une spire de 1^m,20 de diamètre formée d'un ruban de cuivre de 32 centimètres de largeur ; la bobine secondaire B_2 , disposée à l'intérieur de la précédente, comprend une spire et demie de 75 centimètres de diamètre formée d'un ruban de cuivre de 5 centimètres de largeur. La valeur de l'accouplement est à peu près la même que dans le cas précédent. Les bobines B_1 et B_2 sont reliées entre elles à leur partie inférieure.

L'antenne en harpe est supportée par deux pylônes de 76 mètres de hauteur (fig. 270). Elle consiste en un rideau de 90 mètres de longueur comprenant 22 fils. La longueur d'onde est de 600 mètres.

Pour la réception, on peut employer à volonté un mon-

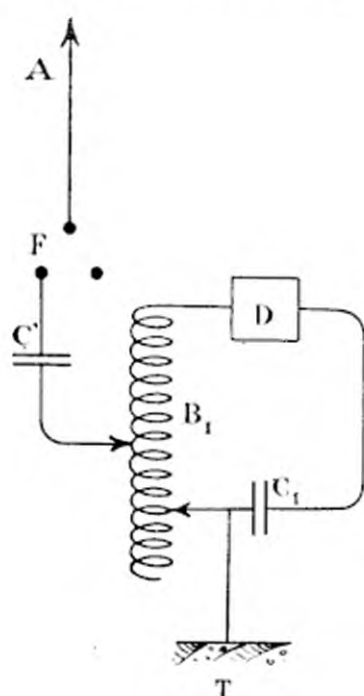


FIG. 271.

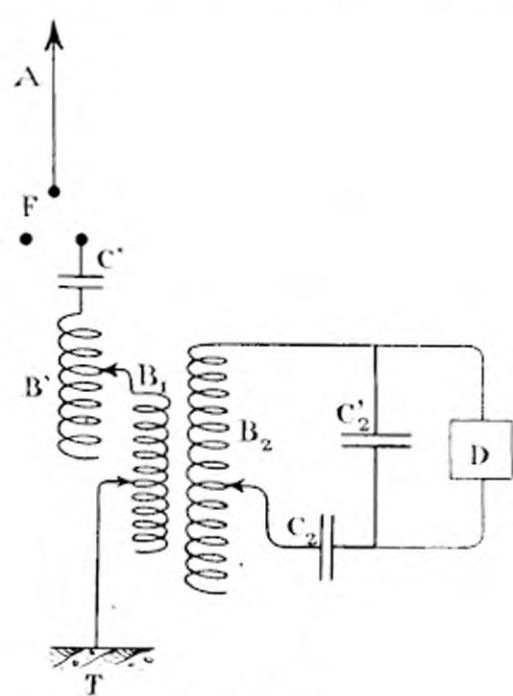


FIG. 272.

tage à accouplement mixte ou un montage à accouplement inductif. Le premier est utilisé comme dispositif d'attente ;

le second comme dispositif de travail avec une bonne syntonie. On passe simplement de l'un à l'autre en manœuvrant un commutateur F.

Le premier dispositif est représenté par la figure 271 ; le second par la figure 272. Sur ces schémas, C' et B' représentent les condensateurs et les bobines de self-induction réglables servant à l'accord, B_1 et B_2 les bobines d'accouplement à nombre de spires variables, C_1C_2 les condensateurs

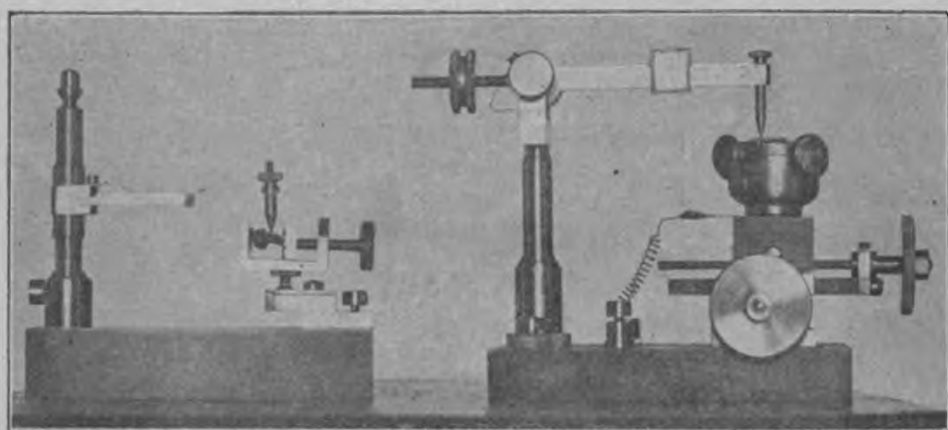


FIG. 273.

FIG. 274.

réglables des circuits oscillants, et D les détecteurs (3 appareils, dont l'un ou l'autre peut être mis en service par la manœuvre d'un commutateur).

Les détecteurs employés sont des appareils à cristaux, fonctionnant sans pile, qu'a étudiés M. Meunier. Chacun d'eux comprend (fig. 273 et 274) une pointe métallique et un cristal de pyrite de fer naturel provenant de gisements particuliers. Ces détecteurs sont extrêmement robustes et présentent une sensibilité équivalente, sinon supérieure, à celle des meilleurs électrolytiques.

L'administration des Postes et Télégraphes a installé aussi, à Boulogne-sur-Mer, un poste radiotélégraphique équipé avec le dispositif Bellini-Tosi (décrit au chapitre XI, page 241).

Le système aérien est soutenu par quatre pylônes en fer de 46 mètres de hauteur placés aux angles d'un carré de 80 mètres de côté. Quatre câbles d'acier, tendus entre les sommets de ces pylônes, supportent chacun, dans leur partie médiane, un rideau de 20 mètres de longueur, formé de six conducteurs en cuivre disposés parallèlement à quatre mètres les uns des autres. Deux rideaux opposés sont reliés ensemble haut et bas pour former un aérien dirigeable (couple d'antennes ou cadre); la jonction supérieure a 80 mètres de longueur environ et la jonction inférieure 127 mètres, les rideaux descendant obliquement vers l'extérieur du carré de base. Les extrémités inférieures des rideaux sont à 8 mètres au-dessus du sol; les extrémités supérieures sont environ à 44 mètres de hauteur.

La longueur d'onde propre de l'antenne est de 900 mètres; la longueur d'onde employée est de 300 mètres; l'antenne vibre donc en trois quarts d'onde.

Le poste est équipé avec une bobine Klingelfuss alimentée par des accumulateurs, et une petite batterie de condensateurs Moscicki. Avec une dépense d'énergie de 0,5 kilowatt, ses signaux ont été nettement reçus au poste de Fort-de-l'Eau (Alger), à une distance d'environ 1 600 kilomètres.

Postes Telefunken.

La G. f. D. T. a installé un grand nombre de postes radiotélégraphiques dans ces dernières années et a équipé la plupart des bateaux allemands. Le dispositif Telefunken actuellement adopté par elle a été décrit en détail au chapitre xiv, page 334 (système à étincelles musicales, avec excitation par impulsions): le dispositif à étincelles raréfiées précédemment employé a été décrit au chapitre xiii, page 282.

La figure 275 montre l'ensemble des appareils transmet-

teurs d'un poste de forte puissance (10 kilowatts). Le secondaire du transformateur charge une batterie de cinq conden-

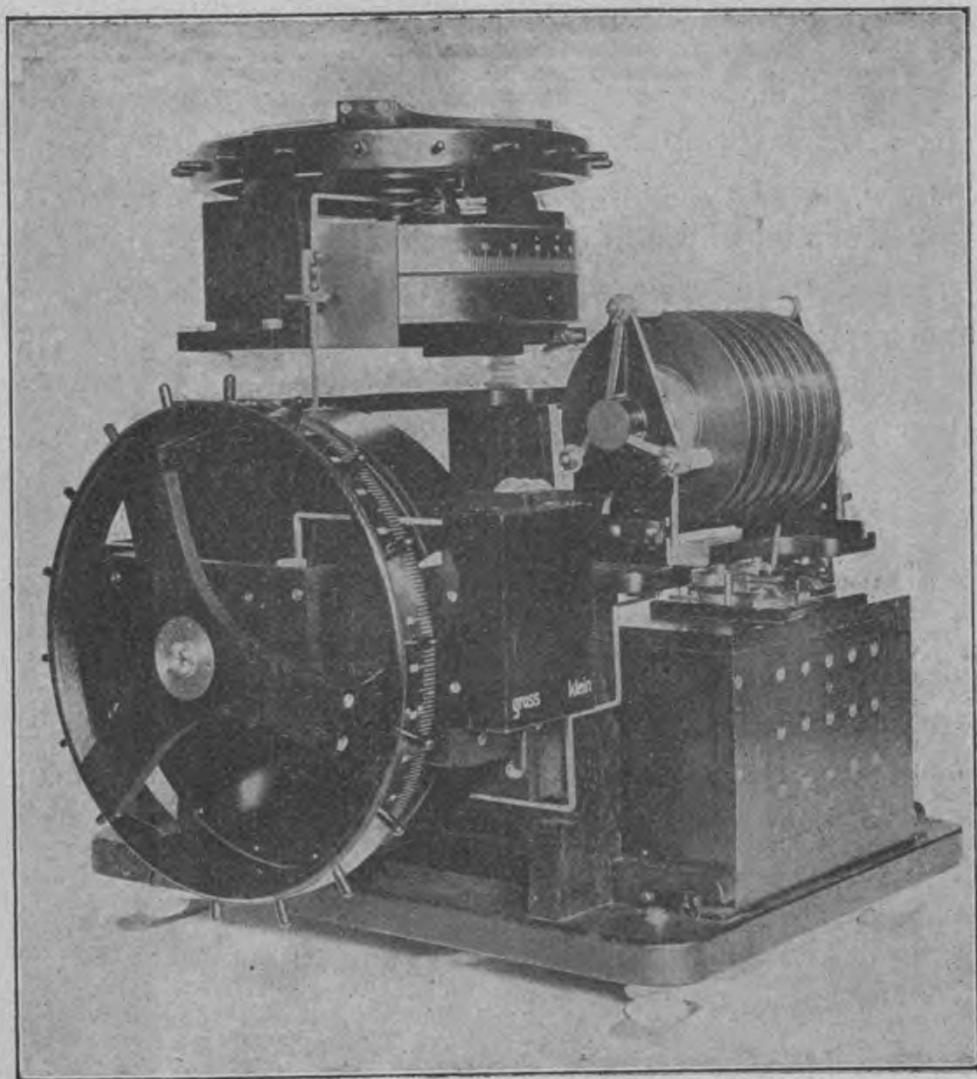


FIG. 275.

sateurs tubulaires disposée en arrière⁽¹⁾. Le circuit secondaire comprend l'éclateur à plateaux, visible à droite, sur la caisse en bois, et le variomètre d'accouplement, avec cercle extérieur

(¹) Avec le dispositif à étincelles musicales (environ 1 000 décharges par seconde), la capacité nécessaire est infiniment moins grande qu'avec un dispositif à étincelles raréfiées (20 décharges par seconde) absorbant la même quantité d'énergie primaire.

graduée, disposé à gauche. A la partie supérieure de ce groupe est placé le variomètre d'antenne, qui permet de modifier la longueur d'onde. Dans ces deux variomètres, il suffit de faire tourner le cercle extérieur, muni de saillies, pour modifier progressivement la self-induction de l'appareil. Le primaire du transformateur est alimenté par un alternateur dont la fréquence peut varier entre 250 et 1 000 périodes par seconde, suivant la vitesse de rotation. En général, la fréquence employée est de 500 (1 000 alternances, donnant 1 000 décharges par seconde). Pour modifier la hauteur du son musical des signaux, on modifie la fréquence de l'alternateur, ou bien on fait varier la résonance primaire au moyen d'une bobine de self-induction.

Deux puissantes stations radiotélégraphiques ont été établies par la G. f. D. T. à Nordreich, à l'embouchure de l'Elbe, et à Nauen, à une quarantaine de kilomètres de Berlin. Ces deux postes présentent des dispositions à peu près semblables, sauf la forme d'antenne ; ils travaillent tous deux avec des longueurs d'onde de 2 000 mètres environ.

L'antenne du poste de Nordreich est en forme de pyra-

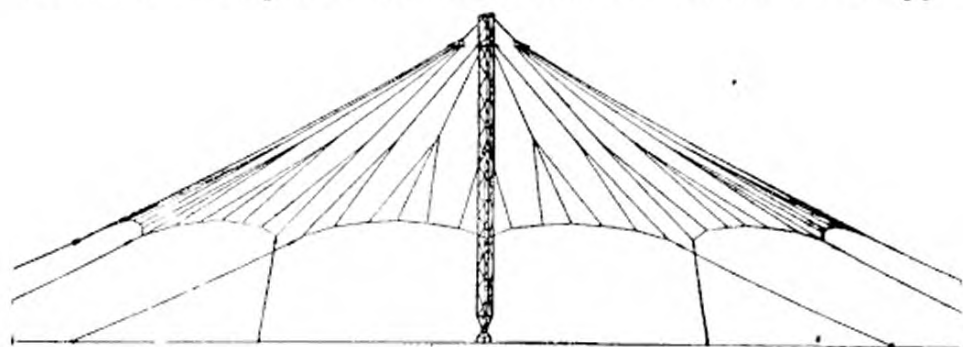


FIG. 276.

mide renversée et est soutenue par quatre pylônes. Celle de Nauen est en forme de parapluie et est supportée par une tour en fer de 100 mètres de hauteur isolée du sol : sa disposition générale est représentée par la figure 276. La tour

triangulaire a quatre mètres de côté. Trois montants, assemblés par des traverses diagonales, sont parallèles entre eux depuis le haut de la tour jusqu'à six mètres du sol. Au pied de la tour, il se réunissent pour aboutir à une sphère de fonte logée dans un socle convenable. La fondation en béton repose sur une couche de matière isolante. Une plate-forme, à laquelle conduisent des escaliers, est située à 96 mètres du sol : l'antenne est hissée par trois poulies, placées à quatre mètres au-dessus de la plate-forme. Trois haubans en fer sont fixés à 75 mètres de hauteur : ils aboutissent à des ancrages placés à 200 mètres du pied de la tour et servent à maintenir celle-ci verticale. Ces haubans sont isolés du sol et de la tour par des pièces en bois imprégné qui, à la partie supérieure, sont plongées dans l'huile.

Le système aérien est constitué par un grand nombre de fils de bronze disposés en forme de parapluie et couvrant une surface de 60 000 mètres carrés. La partie supérieure comprend 54 fils sur chacun desquels se ramifient, au quart de leur longueur, deux nouveaux fils ; la partie inférieure comprend donc 162 fils. Du sommet de l'antenne partent 54 fils qui descendent parallèlement à la tour en enveloppant celle-ci. La capacité d'une telle antenne a une valeur considérable.

La prise de terre consiste en fils de fer enfouis dans le sol : ces fils rayonnent comme ceux de l'antenne ; l'ensemble comprend 108 conducteurs qui se subdivisent en 324. L'établissement de la prise de terre a absorbé 54 kilomètres de fils de fer enfouis à 25 centimètres de profondeur ; la surface ainsi couverte atteint 126 000 mètres carrés. Le sol est très humide et présente une bonne conductibilité électrique.

Le courant est fourni par un alternateur de 65 kilowatts, entraîné par une machine à vapeur. Le transformateur charge un condensateur composé de 36 tubes de 1^m,50 de hauteur (fig. 277) ; la capacité est d'environ 0,04 microfarad pour

70 000 volts. Le circuit oscillant comprend un groupe de six éclateurs multiples, nettement visibles sur la figure.

Il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que, avec

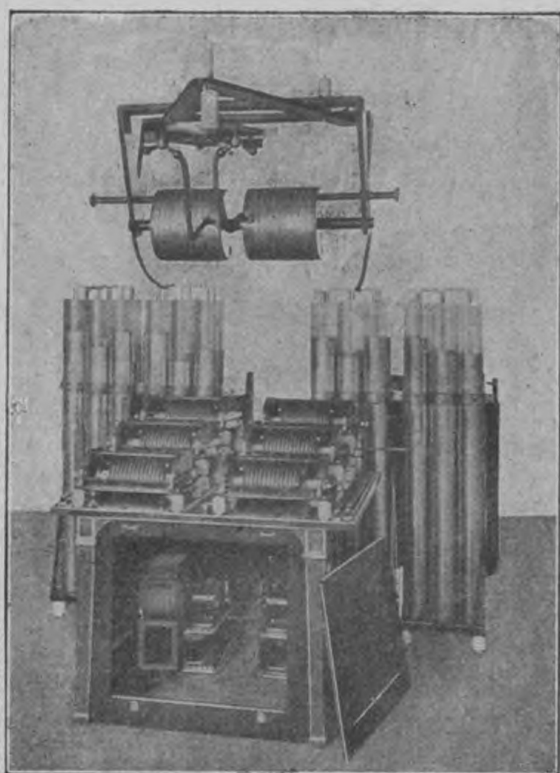


FIG. 277.

le dispositif à étincelles raréfiées précédemment utilisé, le poste de Nauen employait, pour la même puissance primaire un condensateur de 360 tubes ayant une capacité de 0,44 microfarad.

Postes Poulsen.

Des postes du système Poulsen ont été établis par l'Amal-

gamated Radiotelegraph C^o (1) à Lyngby, près de Copenhague ; à Esbjerg, dans le Jütland ; à Cullercoats, près de Newcastle ; et à Knockroe, près de Tralee, en Irlande : ce dernier devra

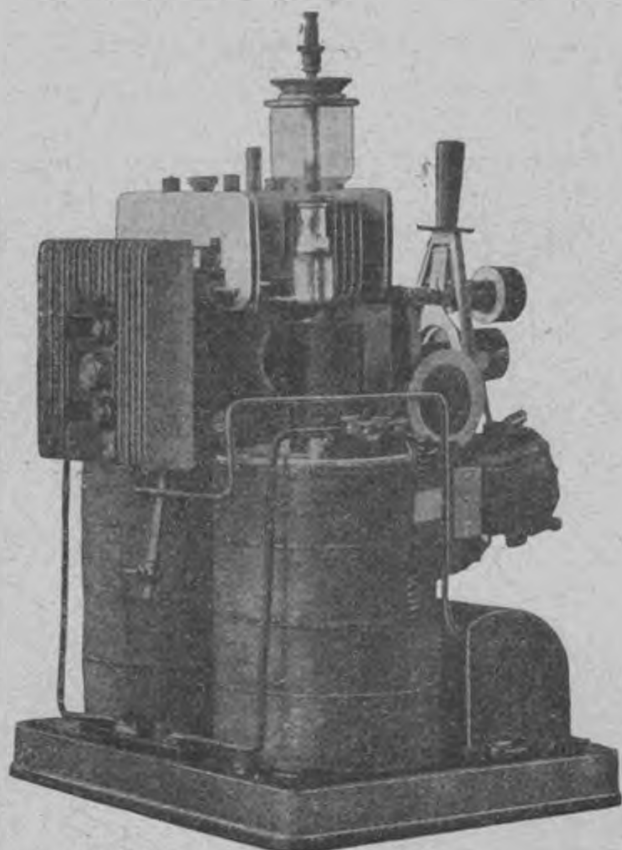


FIG. 278.

assurer des communications transatlantiques avec une autre station radiotélégraphique établie à Terre-Neuve.

Au poste de Lyngby, l'antenne en harpe est supportée par deux mâts de 70 mètres de hauteur, distants de 90 mètres : elle comprend 23 fils de cuivre : un réseau de fils nus, tendus sur le sol, lui sert de contrepoids.

Le courant d'alimentation est fourni par une génératrice à courant continu d'une douzaine de kilowatts entraînée par

(1) Cette Compagnie exploite les brevets de Forest et Poulsen.

un moteur à pétrole ; la tension est de 500 volts. L'appareil Poulsen est représenté par la figure 278. Deux électro-aimants très puissants produisent le champ magnétique nécessaire au soufflage de l'arc, qui jaillit entre un gros charbon et une électrode de cuivre. Celle-ci est refroidie par une circulation d'eau quand la puissance en jeu dépasse quatre ki-

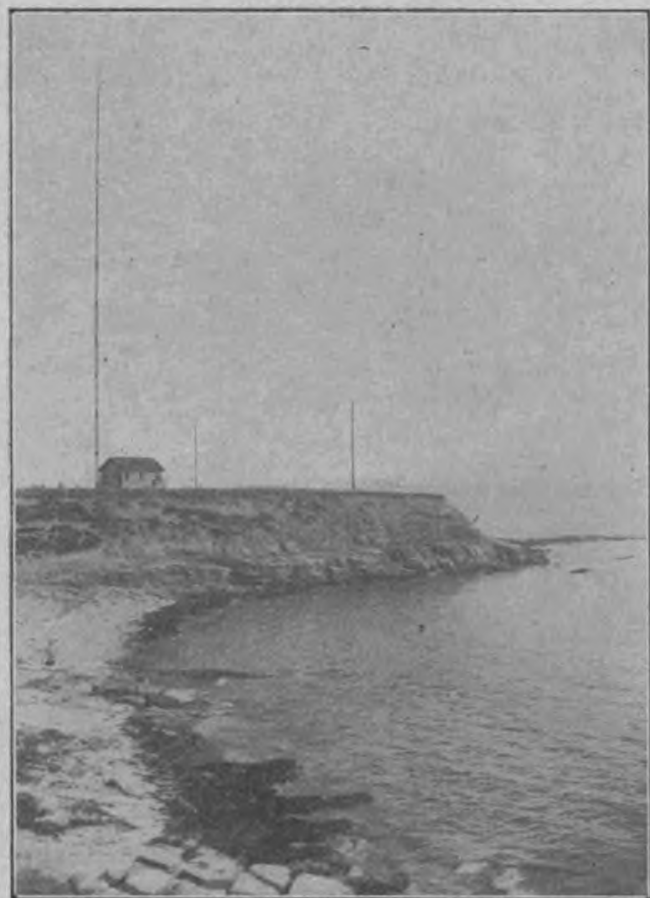


FIG. 279.

lowatts ; le cylindre de charbon tourne lentement sur lui-même sous l'action d'un petit moteur électrique (visible à droite, à mi-hauteur, sur la figure 278). Le godet placé à la partie supérieure de l'appareil contient de l'alcool qui tombe goutte à goutte sur l'électrode de cuivre. La chambre de

combustion en fonte, dans laquelle est enfermé l'arc, est munie de nervures en forme d'ailettes qui assurent un bon refroidissement.

Les montages utilisés pour la transmission et la réception ont été décrits au chapitre XIV, pages 298 et 303. Le manipulateur substitue au circuit oscillant un circuit compensateur, dans sa position de repos (voir figure 188). Pour la réception, on emploie à Lyngby l'appareil à enregistrement photographique précédemment décrit (page 305), avec lequel on a pu atteindre à une vitesse de réception extrêmement élevée (près de 5 mots par seconde) ⁽¹⁾.

Le poste de Cullercoats, que représente la figure 279, contient une double installation, l'une avec courant alternatif et dispositif à étincelles raréfiées, d'après le dispositif de Forest, l'autre avec courant continu, d'après le dispositif Poulsen.

L'antenne, en forme de parapluie, est supportée par un seul mât en bois de 70 mètres de hauteur maintenu par de nombreux haubans et érigé sur un massif de béton.

Elle est composée de huit fils en bronze équidistants, ancrés

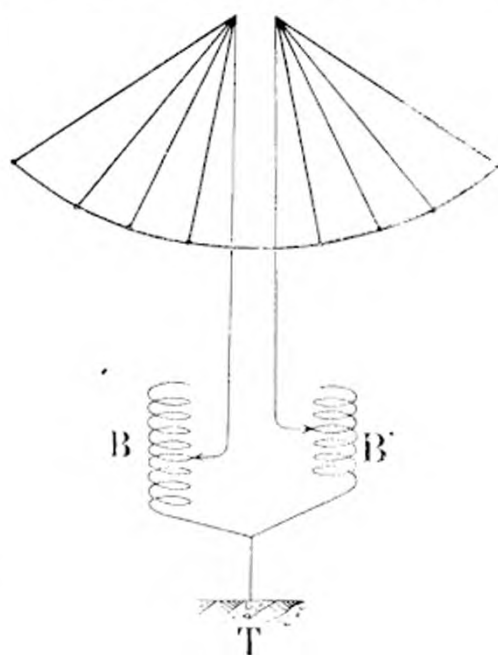


FIG. 280.

⁽¹⁾ Avec les dispositifs à ondes entretenues (ou à étincelles musicales) on peut obtenir des vitesses de transmission infiniment plus considérables qu'avec les dispositifs à étincelles raréfiées, puisqu'il n'y a pas de vides (ou des vides très courts) entre les émissions d'ondes.

au sol sur une circonférence de 70 mètres de diamètre concentrique au pied du mât. Les cinquante mètres supérieurs de chaque fil constituent la portion active, isolée de la portion inférieure par une longue tige d'ébonite : les extrémités des portions actives sont toutes reliées entre elles par un conducteur

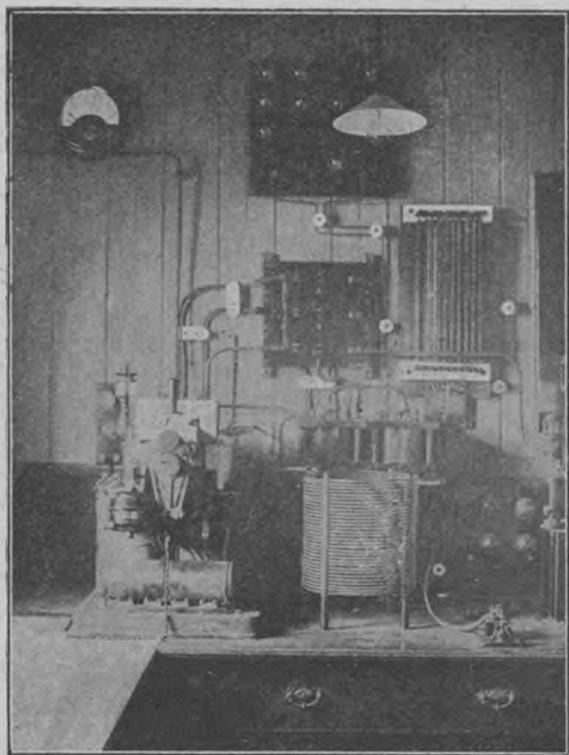


FIG. 281.

qui forme un polygone octogonal. A leur partie supérieure, les huit fils sont reliés quatre par quatre ensemble, formant ainsi deux groupes : chaque groupe est connecté à un conducteur de descente soutenu le long du mât par des isolateurs spéciaux en porcelaine. Quand ces deux conducteurs sont séparés à leur base, le système aérien constitue une antenne en boucle ; quand ils sont réunis, il forme une antenne

ordinaire. Le schéma de la figure 280 donne une idée de cette disposition. La prise de terre est formée par 70 fils de cuivre de 2 millimètres de diamètre et d'une quarantaine de mètres de longueur rayonnant dans toutes les directions.

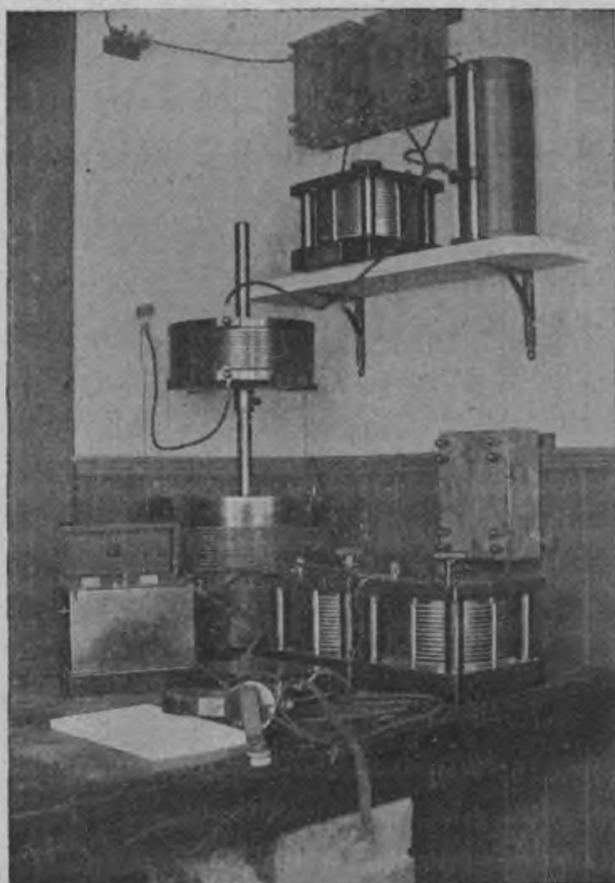


FIG. 282.

La longueur d'onde propre de l'antenne est de 800 mètres : pour la réduire à 600 mètres, en cas de besoin, on intercale au pied une petite batterie de bouteilles de Leyde.

Les transmissions avec dispositif Poulson ont généralement lieu avec une longueur d'onde de 1200 mètres. Les appareils employés sont visibles sur la figure 281. Le générateur à arc est placé à gauche, la bobine d'accouplement

au milieu, et le manipulateur à droite. En raison des faibles tensions employées, l'isolement des appareils est très facile.

Pour la réception, on branche un circuit oscillant sur l'une des bobines B ou B' (fig. 280), et, en se servant de l'antenne en forme de boucle, on peut faire varier la longueur d'onde entre 800 et 2500 mètres : pour les petites longueurs

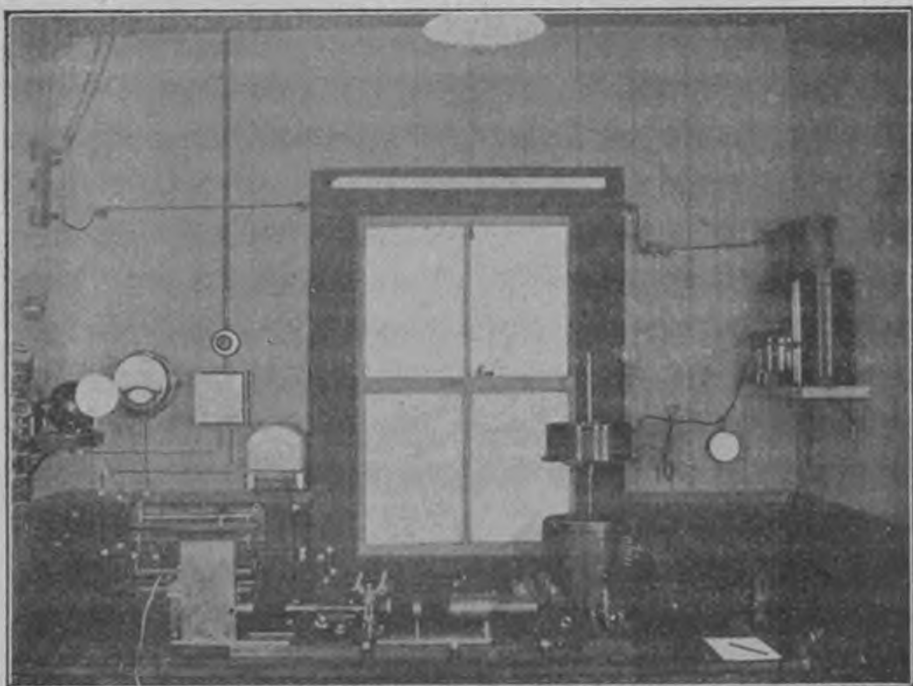


FIG. 283.

d'onde, on intercale un condensateur réglable au pied de l'antenne. La réception des signaux ordinaires est faite avec un détecteur électrolytique : celle des signaux émis par un poste Poulsen est faite au moyen du tikker associé à un téléphone ou bien au moyen du récepteur à enregistrement photographique.

La figure 282 montre les appareils employés pour la réception avec téléphone et tikker. On voit combien l'accouplement entre l'antenne et le circuit oscillant est lâche, par

l'écartement existant entre les deux bobines superposées soutenues par une tige verticale, qui réalisent cet accouplement. La planchette supérieure porte une bobine de self-induction et un condensateur d'antenne, tous deux réglables. A droite, sur la table, est placé le condensateur réglable du circuit oscillant.

La figure 283 montre les appareils employés pour la réception avec l'enregistreur photographique.

Le poste de Knockrøe est muni d'un appareil Poulsen de très grande puissance, dans lequel l'arc est soufflé par le champ magnétique avec une telle violence qu'il s'étale sur une surface d'une quinzaine de centimètres de diamètre. Le courant continu d'alimentation est fourni, sous une différence de potentiel de 500 volts, par une génératrice d'une centaine de kilowatts, et par une batterie d'accumulateurs. La fréquence normale des oscillations est de 100 000 par seconde; la longueur d'onde utilisée est donc de 3 000 mètres. Le manipulateur agit, comme précédemment, en substituant au circuit d'utilisation un circuit compensateur.

L'antenne offre une surface rayonnante extrêmement considérable. Trois mâts de 120 mètres de hauteur sont placés aux sommets d'un grand triangle dont le poste occupe le centre: ils supportent la partie supérieure de l'antenne. Celle-ci comprend trois cents fils, disposés en forme de cône, qui aboutissent à neuf mâts de 22 mètres de hauteur répartis sur une circonférence de 650 mètres de diamètre. La surface couverte par l'antenne est de 280 000 mètres carrés. Les extrémités inférieures des fils sont reliées entre elles et forment un conducteur unique qui pénètre dans le poste. Le circuit oscillant contient un condensateur de 0,035 microfarad formé par des plaques métalliques suspendues dans l'air. L'excitation de l'antenne est faite par induction avec accou-

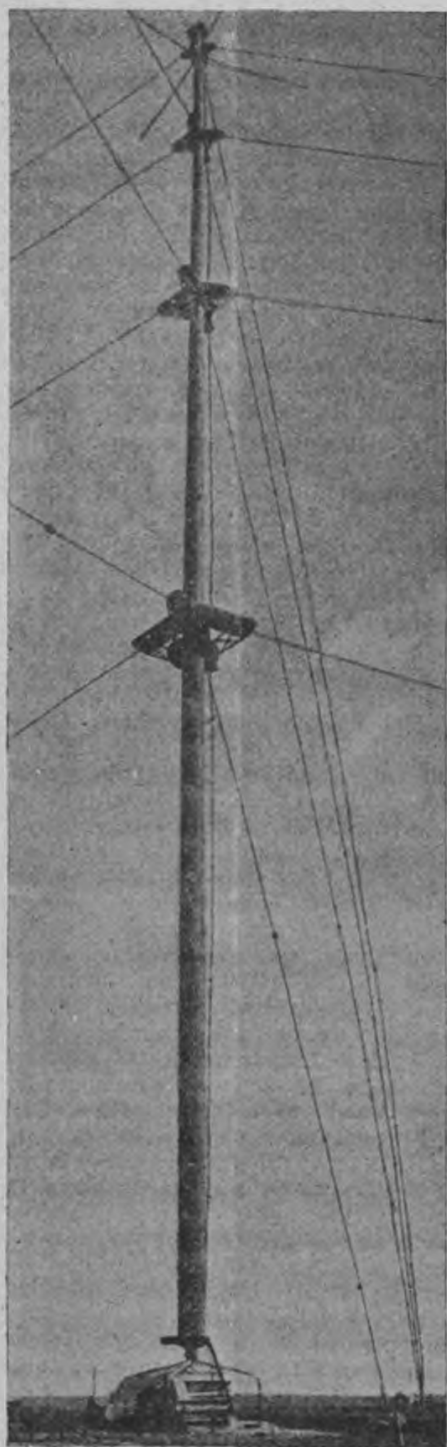


Fig. 284.

plement lâche, ou souvent par dérivation avec accouplement très rigide.

Pour la réception, on se sert du téléphone avec tikker, ou bien d'un détecteur thermoélectrique actionnant un enregistreur photographique.

Un poste analogue est en construction à Terre-Neuve. L'Amalgamated Radiotelegraph C^o estime que les dispositions adoptées permettront d'assurer des communications transatlantiques avec toute la sécurité possible.

Postes Fessenden.

La National Signalling C^o a établi, à Boston et aux environs, un assez grand nombre de postes du système Fessenden.

En 1906, elle a installé à Brant Rock (près de Boston) et à Machrihanish (Écosse) deux postes de grande puissance destinés à assurer des communications transatlantiques.

Le support d'antenne du poste de Machrihanish est représenté par la figure 284. Un mât creux en acier de 120 mètres de hauteur reposait, par une sphère en acier, sur un support convenable noyé dans un massif de béton et isolé du sol : ce mât était maintenu vertical par douze haubans en câbles d'acier placés à différentes hauteurs et solidement ancrés dans le sol dont ils étaient isolés électriquement. Malheureusement, l'un des ancrages ayant cédé lors d'un fort coup de vent, le mât est tombé et s'est rompu en plusieurs endroits peu de temps après son installation : il n'a pas été reconstruit depuis. Pendant la période de fonctionnement de ce poste, on a pu constater que les transmissions présentaient une très grande puissance. Les dispositifs employés n'ont donné lieu à aucune publication.

Postes Marconi.

La Compagnie Marconi s'est occupée, dès 1901, de l'installation des postes radiotélégraphiques de grande puissance. Le premier d'entre eux a été établi à Poldhu (Pointe de Cornouailles). L'antenne était supportée par quatre tours en bois de 72 mètres de hauteur placées aux sommets d'un carré de 66 mètres de côté : elle avait la forme d'une pyramide renversée (fig. 285), chaque face comprenant plusieurs centaines de fils de cuivre également espacés à leur partie supérieure et réunis ensemble à leur partie inférieure. On employait, pour la transmission, le dispositif Fleming décrit au chapitre XIII, page 264. L'énergie mise en jeu atteignait une centaine de kilowatts.

Des postes analogues furent installés à Glace Bay (Terre-Neuve), puis à Cape Cod (près de New-York). Ces postes, qui devaient établir entre eux des communications trans-

atlantiques régulières, ne purent remplir cette destination : ceux de Poldhu et de Cape Cod assurent depuis lors un ser-

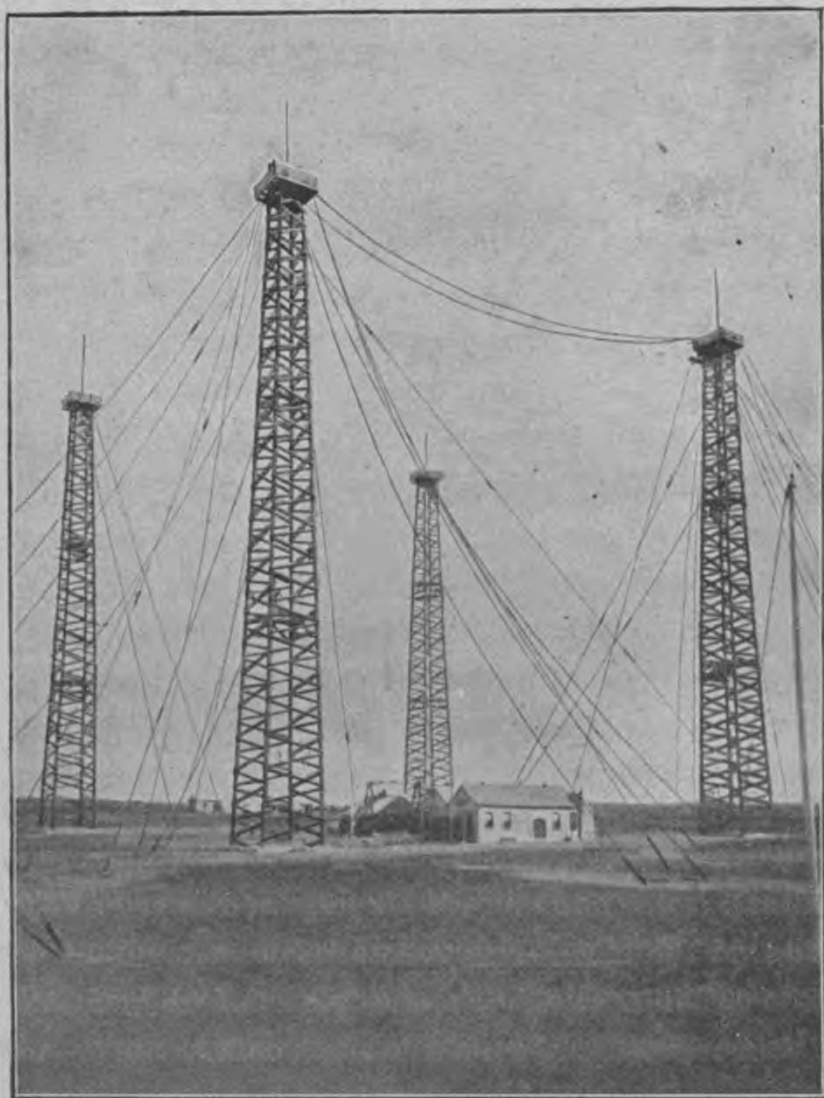


FIG. 285.

vice régulier de messages avec les paquebots anglais faisant le trajet entre Liverpool et New-York, messages qui permettent à ces bateaux d'imprimer à bord un journal quotidien.

En 1907, la Compagnie Marconi a installé deux puissantes stations destinées à communiquer exclusivement entre

elles de part et d'autre de l'Atlantique : l'une a été établie à Glace Bay (Terre-Neuve) et l'autre à Clifden (Irlande). Chacun des postes de Glace Bay ou de Clifden est muni d'une antenne horizontale (figure 286) composée de fils qui s'élèvent verticalement à 70 mètres de hauteur pour s'étendre ensuite horizontalement sur une longueur de plus de 300 mètres. L'antenne est supportée par des mâts en bois. Les extrémités libres des antennes de Clifden et de Glace Bay ont été orientées de façon à être exactement opposées l'une à l'autre. La longueur d'onde est d'environ 5 000 mètres ⁽¹⁾.



FIG. 286.

Le circuit oscillant comprend un condensateur à air formé de plaques parallèles suspendues par des isolateurs en porcelaine : la capacité du condensateur de Glace Bay est de 1,75 microfarad pour 50 000 volts ; celle du condensateur de Clifden est de 1,15 microfarad pour 80 000 volts. Le dispositif employé est celui que représente la figure 213, chapitre XIV. La puissance des machines génératrices est de 350 kilowatts.

Pour la réception, on utilise généralement le détecteur à vide de Fleming (valve) avec le montage indiqué au chapitre XIII, page 272. Le son musical correspondant au rythme des décharges produites par l'éclateur tournant (environ 300 par seconde) permet de distinguer facilement les signaux.

Les communications transatlantiques ont été assurées au commencement de 1908 : les messages venant d'Amérique étaient reçus très nettement à Clifden (4 000 kilomètres), à

(1) Les deux ondes simultanées, résultant de l'accouplement inductif de l'antenne et du circuit oscillant, ont des longueurs d'onde respectives de 4 165 et de 4 900 mètres.

Brant Rock (5 800 kilomètres) et à la Tour Eiffel. En 1909 le poste de Glace Bay a été détruit par un incendie et le service n'a pu être repris qu'en mai 1910⁽¹⁾.

La Compagnie Marconi installe actuellement à Coltano, pour le compte du gouvernement italien, un poste destiné à assurer des communications avec les colonies de l'Est africain et avec la République Argentine. D'autre part, le gouvernement anglais, d'accord avec elle, a formé le vaste projet de relier toutes ses colonies entre elles et avec la métropole par un réseau de postes radiotélégraphiques de grande puissance établis à Malte, en Égypte, aux Indes, en Australie, au Canada, etc.

Remarques sur les communications radiotélégraphiques.

L'emploi de la radiotélégraphie s'est beaucoup répandu dans ces dernières années. Sur mer, ce moyen de communication peut rendre d'inappréciables services : il en est de même dans certains cas spéciaux, où des liaisons rapides doivent être établies entre deux points isolés. Pour les armées en campagne et les flottes, la radiotélégraphie est un auxiliaire indispensable. Quelques brèves remarques sur les particularités observées et sur les résultats obtenus ne seront donc pas superflues.

C'est un fait bien connu que les communications radiotélégraphiques sont infiniment meilleures la nuit que le jour — à tel titre que les transmissions à longue distance se font généralement de nuit — et que les portées atteintes sont bien plus considérables sur mer que sur terre. Le premier

(1) La taxe est de 0 fr. 60 par mot avec minimum de dix mots.

fait paraît devoir être expliqué par l'action du soleil sur les couches supérieures de l'atmosphère, cette action ayant pour effet de rendre l'air relativement conducteur ⁽¹⁾ et d'occasionner ainsi une plus rapide absorption de l'énergie transmise par les ondes. Le second fait paraît devoir être attribué d'une part à la bonne conductibilité électrique de la mer et d'autre part à l'absence d'obstacles matériels qui, pour diverses causes, produisent un éparpillement ou une absorption de l'énergie transmise. Le mode de fonctionnement des antennes et le mécanisme de la propagation des ondes électromagnétiques ne sont malheureusement pas connues d'une façon assez exacte pour que l'on puisse analyser les phénomènes produits.

Quand deux postes communiquent ensemble pendant le jour, il arrive fréquemment que, sans aucune cause apparente, les signaux reçus s'affaiblissent brusquement, deviennent complètement imperceptibles, puis réapparaissent au bout de quelques minutes (ou parfois de quelques heures) pour acquérir graduellement la même intensité qu'auparavant. Il est vraisemblable que ce fait doit être attribué à l'action de courants ou de vagues d'air plus conducteur qui, dans leur déplacement, se trouvent momentanément sur le trajet des ondes et les absorbent comme une vague de brouillard intercepte les rayons lumineux.

D'après de nombreuses observations et, en particulier, d'après les résultats expérimentaux obtenus par M. Marconi, les communications à courtes distances souffrent beaucoup

(1) Cette conductibilité est due à l'ionisation des molécules gazeuses sous l'effet des rayons ultra-violettes contenus dans les rayons solaires. Ces rayons ultra-violettes sont fortement absorbés dans les parties supérieures de l'atmosphère, et les couches d'air contenues dans ces régions sont plus fortement ionisées que les couches inférieures.

moins de l'action solaire que les communications aux longues distances et sont presque aussi bonnes le jour que la nuit. Cela tient sans doute à ce que les ondes, dans leur propagation, n'ont pas eu le temps de se dilater suffisamment pour atteindre les couches supérieures d'air conducteur et cheminent uniquement dans les couches inférieures de l'atmosphère. Pour la même raison, les ondes de faible amplitude sont moins absorbées que les ondes de grande amplitude.

Dans les communications transatlantiques, on a constaté que, le matin et le soir, pendant de courtes périodes, les réceptions sont très difficiles et souvent impossibles. Ces périodes sont celles où, par suite de la différence de longitude, le jour ou la nuit s'étendent sur une partie seulement du trajet des ondes. M. Marconi suppose que, en passant d'une région obscure dans une région éclairée ou inversement, les ondes subissent une sorte de réflexion qui les fait dévier.

On admet en général que l'absorption subie par les ondes est d'autant plus faible que la longueur d'onde est plus grande. Cela a été confirmé par la pratique de la radiotélégraphie et par des expériences de M. Marconi faites avec des longueurs d'onde exceptionnellement grandes de 8000 mètres : au cours de ces expériences, les réceptions ont été aussi bonnes, sinon meilleures, de jour que de nuit. On doit signaler cependant un fait très curieux observé quotidiennement aux postes de Clifden et de Glace-Bay. Les deux ondes λ_1 et λ_2 engendrées simultanément par le système émetteur de chacun de ces postes ayant des longueurs d'onde d'environ 4165 et 4900 mètres, on utilise la seconde pour le service normal : régulièrement, trois heures après le coucher du soleil à Clifden et trois heures avant le lever du soleil à Glace Bay, l'onde la plus courte est seule percep-

tible avec une intensité remarquable, pendant une heure environ. Cet effet se produit si régulièrement que les opérateurs ont pris l'habitude d'accorder toujours leurs appareils de réception sur l'onde la plus courte pendant cette période de la journée. Cet exemple montre que, dans certaines conditions, une onde de faible longueur d'onde peut être décelée à très grande distance plutôt qu'une onde de grande longueur d'onde.

Un autre fait curieux, observé dans tous les postes radiotélégraphiques, est que, avec les mêmes appareils et les mêmes réglages, la netteté des réceptions varie beaucoup. Certaines nuits, les signaux reçus ont une intensité surprenante; d'autres nuits, leur intensité est dix fois moindre; d'autres nuits encore, il est impossible de les percevoir.

Si la constitution de l'atmosphère et l'action de la lumière solaire jouent un rôle capital en radiotélégraphie, la conductibilité du sol, la nature du terrain, et, peut-être, l'orientation des courants terrestres ne sont pas beaucoup moins importants.

Le rayon d'action d'un poste dépend de la constitution de sa prise de terre et du degré d'humidité du sol environnant. D'autre part, la portée des communications entre deux postes séparés par un espace de terre ferme varie énormément suivant la composition du terrain et des obstacles interposés: elle est plus grande si les postes sont séparés par des terrains de formation récente que s'ils sont séparés par des terrains primitifs: elle est fortement réduite si des montagnes rocheuses et surtout des montagnes contenant des gisements de minerai de fer se trouvent sur le trajet des ondes.

Enfin, l'état électrique de l'atmosphère et les perturbations qui s'y produisent constituent fréquemment un obstacle aux communications radiotélégraphiques, surtout dans les ré-

gions tropicales. Ces perturbations se produisent plutôt la nuit que le jour dans certaines régions, et plutôt le jour que la nuit dans d'autres : elles varient aussi suivant les saisons.

Après ces remarques, on peut donner quelques exemples des services qu'est capable de rendre la radiotélégraphie. Les paquebots qui font le service de Liverpool à New-York restent en communication presque constante avec l'un ou l'autre des deux continents et reçoivent quotidiennement un grand nombre de télégrammes d'ordre général ou privé. De graves sinistres ont été évités grâce aux appels de détresse des bâtiments en perdition. L'émission d'un signal, faite toutes les nuits à minuit par le poste de la tour Eiffel⁽¹⁾, donne l'heure de l'Observatoire aux bateaux situés dans un rayon de trois mille kilomètres ; un pendule spécial, installé dans ce même poste, provoquera l'émission de signaux qui permettront aux navires de déterminer leur longitude.

Pendant la campagne du Maroc, tous les télégrammes ont été expédiés par le poste de la tour Eiffel au cuirassé *Kléber*, mouillé en rade de Casablanca. Ce navire les transmettait à son tour aux petits postes transportables établis à l'intérieur des terres : souvent même, ceux-ci parvenaient à les recevoir directement. Inversement, toutes les dépêches de l'intérieur étaient radiotélégraphiées par les petits postes du *Kléber*, qui les transmettait au poste de la tour Eiffel. Le nombre de mots échangés ainsi pour le service du ministère de la Guerre a atteint le chiffre de 3 000 par jour.

(1) Le poste est relié à l'Observatoire de Paris par une ligne sur laquelle est branché le manipulateur à relais du C^t Ferrié (page 356). Un contact électrique, produit à minuit à l'Observatoire, envoie le courant sur la ligne et détermine l'émission du signal.

TROISIÈME PARTIE

LA RADIOTÉLÉPHONIE

CHAPITRE XVII

PRINCIPE ET HISTORIQUE DE LA RADIOTÉLÉPHONIE

On peut dire que la téléphonie sans fil remonte aux temps les plus reculés : l'appareil vocal de l'homme engendre des ondes sonores ; ces ondes se propagent par le mouvement vibratoire de l'air, et vont impressionner le détecteur ou récepteur très perfectionné qu'est l'oreille. La portée des communications est assez réduite avec ce système : elle a pu être fortement augmentée par l'emploi de porte-voix, de surfaces paraboliques, etc., mais, malgré tout, elle reste limitée à quelques centaines de mètres.

La découverte du téléphone et du microphone a permis de reproduire la parole et les sons à grande distance par un procédé électrique. Une source d'énergie électrique (pile) alimente un transmetteur (microphone) : celui-ci donne naissance à des courants qui varient comme les modulations de la voix. Ces courants sont transmis par des fils conducteurs à un appareil récepteur (téléphone) où ils impriment à un organe convenable (membrane) des vibrations reproduisant leurs propres variations, c'est-à-dire les modulations de la voix.

En radiotéléphonie, la source d'énergie électrique est un émetteur d'ondes, capable de produire des oscillations électromagnétiques aussi régulières que possible : le transmetteur (microphone) a pour fonction de faire varier l'amplitude ⁽¹⁾ des oscillations d'après les modulations de la voix. Les ondes électromagnétiques, propagées par le mouvement vibratoire de l'éther, vont impressionner un détecteur : celui-ci agit dans un circuit contenant le récepteur, et y fait circuler des courants qui varient comme les modulations des ondes transmises, c'est-à-dire comme les modulations de la voix : le récepteur reproduit donc la parole ou les sons.

Production des sons et de la parole.

Les sons sont engendrés par les vibrations d'un organe élastique quelconque : il sont propagés par les vibrations longitudinales ⁽²⁾ du milieu dans lequel ils ont pris naissance (milieu gazeux, liquide ou solide), ces vibrations se transmettant de proche en proche et donnant lieu à une *onde sonore*. La propagation des sons s'effectue très facilement dans les gaz, difficilement dans les liquides et très mal dans les solides : le cas de la propagation dans les gaz est le seul qui nous intéresse.

Si, en un point quelconque d'un milieu gazeux, nous donnons naissance à un son (en faisant vibrer une corde à violon, par exemple) des ondes sonores sont produites dans

(1) On a proposé aussi de faire varier la fréquence des oscillations au lieu de leur amplitude.

(2) Les ondes électromagnétiques sont propagées, comme cela a été expliqué au chapitre III, page 51, par des vibrations *transversales* de l'éther, c'est-à-dire par des vibrations perpendiculaires à la direction de propagation. Les sons sont propagés par des vibrations *longitudinales* du milieu gazeux, liquide, ou solide, c'est-à-dire par des vibrations qui s'effectuent suivant la direction de propagation.

toutes les directions environnantes. En un point d'une de ces directions, le milieu gazeux (de l'air par exemple) présente une pression variable, dont la valeur instantanée oscille de part et d'autre de la valeur moyenne : cette pression sera supérieure à la pression moyenne pendant une demi-période d'une vibration, puis inférieure à la pression moyenne pendant l'autre demi-période de cette vibration.

Un son est caractérisé par sa *hauteur*, qui dépend de la fréquence des vibrations ; le *la normal* du diapason correspond à une fréquence de 435 vibrations par seconde. Deux sons de même hauteur peuvent présenter des *timbres* différents, dus à la présence de vibrations d'ordre supérieur, superposées aux vibrations fondamentales et dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale : de telles vibrations sont appelées *harmoniques*. Enfin deux sons de même hauteur et de même timbre ont des *intensités* différentes si les amplitudes des vibrations sont différentes.

Les fréquences fondamentales des sons musicaux parfaitement purs sont comprises entre 40 et 4000 vibrations par seconde, à peu près. Le son le plus élevé qui soit perceptible à notre oreille correspond à une fréquence d'environ 33000 vibrations par seconde.

Les cordes vocales, placées au fond du larynx des hommes et des animaux sont mises en vibration par l'air expiré des poumons : leurs vibrations donnent le son fondamental, auquel s'ajoutent de très nombreuses harmoniques dues à la forme de la bouche, aux mouvements de la langue, à la position des dents, etc. Le son fondamental peut subir des déformations très variables et très importantes ; ce sont ces déformations qui donnent naissance à la parole, dont l'étude présente une extrême complexité.

Un exemple montrera les modifications que peut faire su-

bir à la courbe d'un son fondamental la superposition d'harmoniques supérieurs. Les figures 287, 288, 289 reproduisent

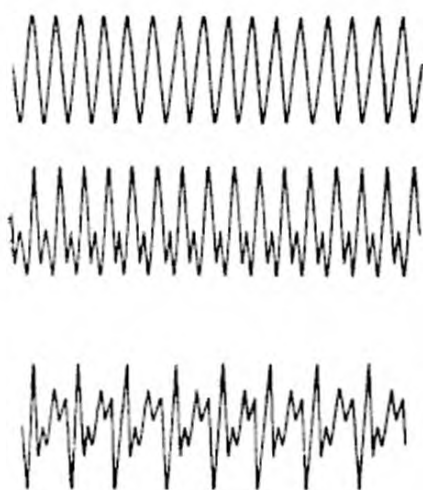


FIG. 287, 288 et 289.

les courbes relevées expérimentalement par M. Duddell pour les vibrations correspondant à l'émission de la voyelle O dans trois mots différents.

Les harmoniques supérieures de la voix présentent des fréquences qui atteignent quelques milliers : en pratique, on peut négliger celles dont la fréquence est supérieure à 1200 vibrations par seconde. Leur

amplitude peut être faible sans qu'elles cessent de jouer un rôle capital dans la constitution de la parole : cette amplitude n'est souvent que le centième de l'amplitude des vibrations fondamentales et suffit cependant pour déterminer l'émission d'une consonne accompagnant une voyelle.

Téléphonie avec fils.

Si l'on parle devant une membrane élastique formée d'un disque très mince maintenu sur son pourtour, les variations de pression de l'air l'obligent à effectuer des vibrations semblables à celles qui donnent naissance aux ondes sonores. La téléphonie électrique se résume dans la commande à distance d'une seconde membrane qui, sous l'effet d'impulsions convenables, reproduit les vibrations de la première et donne ainsi naissance à des ondes sonores identiques aux ondes agissantes.

Dans la téléphonie avec fils, un transmetteur T (figure 290)

est accouplé, par les conducteurs l_1 et l_2 , à un récepteur R. Le transmetteur comprend un microphone, un ou deux éléments de pile et un petit transformateur (bobine de microphone).

Le microphone consiste en une membrane vibrante M sur laquelle agissent les ébranlements de l'air : ses vibrations produisent des variations dans l'intimité des contacts existant entre des morceaux de charbon juxtaposés, placés derrière elle : à leur tour, les variations dans l'intimité des contacts déterminent des variations corrélatives de la résis-

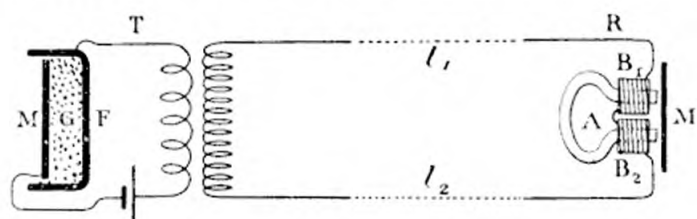


FIG. 290.

tance électrique du système. Tout appareil à contacts imparfaits, tels que ceux utilisés dans les cohéreurs, peut servir de microphone : aussi existe-t-il un grand nombre de transmetteurs téléphoniques. En général, on emploie de la grenaille de charbon G comprise entre la membrane métallique M (fig. 290) et le fond F d'une cuvette également métallique : le charbon offre l'avantage de rester inaltérable, tandis que la plupart des métaux se recouvrent d'une pellicule d'oxyde.

La cuvette F et la membrane M sont reliées électriquement à la pile et au primaire de la bobine du microphone. Quand on parle à proximité de la membrane, le courant débité par la pile dans le circuit du microphone et du primaire varie comme la résistance électrique des contacts imparfaits. Les courants induits dans le secondaire présentent donc des modulations analogues à celles de la voix.

Le récepteur téléphonique comprend un aimant A sur les

pôles duquel sont disposées deux petites bobines B_1 et B_2 que traversent les courants variables amenés par les fils de ligne L_1/L_2 . Les pôles de l'aimant agissent sur une membrane M analogue à celle du microphone : sous l'effet des courants variables, leur action magnétique est renforcée ou affaiblie, et ces variations impriment à la membrane des vibrations qui suivent les modulations des courants et engendrent des ondes sonores. Tel est, sommairement décrit, le mécanisme de la reproduction de la parole à distance.

Un bon microphone doit présenter une grande sensibilité pour répondre aux moindres variations de pression de l'air : en pratique, on munit l'appareil d'une embouchure en forme de pavillon qui permet de concentrer au centre de la membrane les effets produits par une masse d'air relativement importante. La membrane doit avoir une fréquence propre de vibration très différente des fréquences de vibration des sons à transmettre, sans quoi elle renforcerait énormément certain d'entre eux par l'effet des phénomènes de résonance : les microphones à grains de charbon présentent la particularité d'accentuer un peu les harmoniques supérieures. Enfin les contacts imparfaits doivent pouvoir laisser passer sans détérioration une intensité de courant relativement forte, pour que le microphone puisse assurer des communications à grande distance : à ce point de vue, on est malheureusement très vite limité, et les microphones ordinaires ne permettent pas l'emploi de courants supérieurs à 1 ampère.

Radiotéléphonie.

En radiotéléphonie, les conducteurs intermédiaires sont supprimés, et le transmetteur doit émettre des ondes élec-

tromagnétiques dont l'amplitude varie suivant les modulations de la parole.

Il est évident, en premier lieu, que la fréquence propre des ondes utilisées doit être supérieure à la fréquence de vibration la plus élevée donnant dans le récepteur un son perceptible à notre oreille⁽¹⁾. Cette condition se trouve toujours réalisée puisque, avec les antennes dont on dispose, on est obligé d'employer des longueurs d'onde inférieures à 3 000 mètres environ, correspondant à des fréquences supérieures à 100 000.

En deuxième lieu, puisque la parole consiste surtout en harmoniques supérieures du son fondamental, harmoniques dont la fréquence peut atteindre quelques milliers de vibrations par seconde⁽²⁾, il faut que les vides existant éventuellement entre deux trains d'ondes consécutifs aient une durée sensiblement inférieure à la plus courte période des vibrations considérées : ces vides devront avoir, par exemple, au maximum, une durée d'un dix-millième de seconde. Si donc l'on songe à employer comme émetteur d'ondes un dispositif à étincelles, on voit qu'il devra produire au moins 10 000 décharges par seconde.

En 1900, M. Fessenden entreprit des essais avec un émetteur qui produisait 10 000 décharges par seconde. Le montage employé est indiqué par la figure 291. Une bobine d'induction, mise en action par un interrupteur spécial donnant

(1) Cette fréquence-limite varie beaucoup suivant les individus. Certaines personnes perçoivent difficilement un son correspondant à 10 000 vibrations par seconde, tandis que d'autres perçoivent encore un son correspondant à une fréquence de 20 000. En fait, il semble que la fréquence de 33 000 vibrations par seconde constitue la limite au delà de laquelle il est impossible à l'oreille humaine de percevoir un son.

(2) Les harmoniques dont la fréquence est supérieure à 2 000 peuvent être négligées en pratique sans qu'il en résulte d'altération notable.

environ 10 000 interruptions par seconde, alimentait l'éclateur E embroché dans l'antenne. Un circuit oscillant, formé du condensateur C et de la bobine de self-induction L, était placé en dérivation sur l'éclateur E.

Le microphone M était relié à la bobine primaire B_1 d'un transformateur dont la bobine B_2 était intercalée directement sur l'antenne. M. Fessenden a employé aussi un phonocondensateur formé de deux plaques (fig. 292) dont l'une

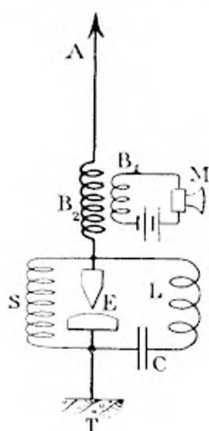


Fig. 291.

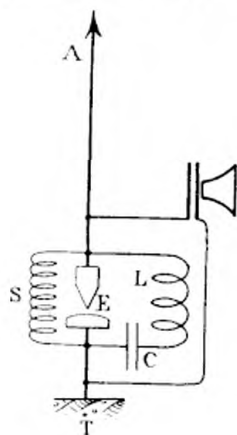


Fig. 292.

était fixe et l'autre formait la membrane vibrante devant laquelle on parlait : les variations de distance entre ces plaques déterminaient des variations de capacité, et par suite, des variations de la fréquence des ondes émises.

M. Fessenden, s'étant rendu compte qu'il était très important que l'étincelle conservât une longueur invariable, fut conduit à employer comme éclateur une pointe en aluminium placée en face d'un disque légèrement bombé en platine iridié : ces électrodes furent placées, par la suite, dans de l'air comprimé. Quand tout était bien réglé, on pouvait transmettre la parole à quelques centaines de mètres, mais on entendait dans le récepteur des crachements insupportables.

D'autres expériences furent poursuivies avec un éclateur

tournant donnant 20 000 étincelles par seconde, alimenté par une machine à courant continu à 5 000 volts : les électrodes étaient en platine iridié. Les résultats ne furent pas plus satisfaisants.

Ensuite, M. Fessenden s'est servi d'un éclateur à gaz comprimé, puis d'un dispositif à arc chantant. Les électrodes métalliques (fig. 196, page 310) étaient refroidies par une circulation d'eau intérieure ; elles étaient généralement placées dans un gaz comprimé. Cette méthode permit d'obtenir des résultats encourageants (1903 et 1904), mais on percevait toujours dans le récepteur des crachements intenses. Dans un autre dispositif, l'arc jaillissait entre une pointe fixée derrière une membrane de microphone et la tranche d'un disque tournant avec une très grande rapidité. Ces deux électrodes étaient reliées à une génératrice à courant continu à 5 000 volts par l'intermédiaire de résistances de valeur élevée : le circuit oscillant était branché en dérivation sur l'arc à la manière habituelle.

En 1905, M. Fessenden employa un alternateur à 10 000 périodes alimentant un transformateur dont le secondaire était relié à un éclateur à azote comprimé. Il se produisait une étincelle par alternance (20 000 étincelles par seconde). Les résultats furent beaucoup plus satisfaisants, et la distance franchie atteignit 40 kilomètres, mais le bruit de friture était inévitable. On reconnut alors que tout dispositif dans lequel les oscillations ne sont pas engendrées d'une façon continue est impropre à la radiotéléphonie, et M. Fessenden entreprit de produire directement les courants de grande fréquence nécessaires pour l'excitation de l'antenne. Après avoir essayé un appareil à deux disques dentés tournant en sens inverses et produisant une fréquence de 200 000 par seconde, puis un dispositif à deux éclateurs combinés dans lequel l'action alternative de deux champs ma-

gnétiques déterminait le jaillissement successif de l'étincelle dans un éclateur ou dans l'autre, M. Fessenden se consacra à l'étude d'un alternateur à très haute fréquence : le dispositif auquel il a été ainsi conduit sera décrit plus loin.

Pour la réception, M. Fessenden s'est servi du détecteur électrolytique.

De son côté M. Majorama a entrepris dès 1904 des expériences de radiotéléphonie avec un dispositif donnant 10 000 décharges par seconde. L'éclateur était relié à un transformateur dont le circuit primaire, alimenté par du courant alternatif, contenait de fortes bobines de self-induction destinées à limiter l'intensité de courant aussitôt après l'éclatement de chaque étincelle. En employant de faibles distances explosives il a pu, avec un tel dispositif, obtenir un grand nombre de décharges dans chaque alternance du courant primaire.

Les variations d'amplitude des ondes émises étaient produites par des variations de longueur des étincelles correspondant aux modulations de la voix. Pour cela, on employait un éclateur formé d'une électrode fixe et d'une électrode mobile : celle-ci était constituée par un jet de mercure mis en vibration par l'action des courants microphoniques, et les variations de la distance explosive correspondaient aux variations de ces courants. Les modifications de longueur des étincelles provoquaient des modifications corrélatives dans l'amplitude des oscillations engendrées.

Plus tard, M. Majorama s'est servi d'un éclateur tournant donnant 20 000 décharges par seconde. Le microphone intercalé directement entre l'éclateur et l'antenne différait notablement des appareils ordinaires et sera décrit plus loin.

Le détecteur utilisé pour la réception était un appareil magnétique.

CHAPITRE XVIII

DISPOSITIFS EMPLOYÉS EN RADIOTÉLÉPHONIE

La Radiotéléphonie repose sur l'emploi des appareils suivants :

un émetteur produisant des ondes suffisamment continues pour transmettre les harmoniques supérieures de la voix ;

un dispositif capable de modifier le caractère des ondes émises suivant les modulations de la parole ;

un détecteur dont l'effet soit proportionnel à l'amplitude des ondes incidentes.

L'émetteur d'ondes peut être alimenté par un alternateur à haute fréquence ou par un dispositif à arc convenablement réglé ⁽¹⁾. Les différents générateurs d'ondes entretenues étudiés au chapitre xiv conviennent pour cette application. Mais il est extrêmement difficile, avec un appareil à arc, d'obtenir des oscillations bien régulières et d'éviter les variations de régime, de longueur ou de fixité de l'arc, ou les changements de température des électrodes, toutes causes qui se traduisent par des sifflements ou des crachements incessants dans le téléphone du poste récepteur.

Le dispositif capable de modifier le caractère des ondes émises suivant les modulations des ondes acoustiques peut agir soit sur l'amplitude, soit sur la fréquence des oscillations engendrées, soit sur les deux à la fois. En général, on

⁽¹⁾ L'emploi d'un arc chantant pour la radiotéléphonie a été indiqué en 1902 par M. Blondel.

emploie un appareil microphonique⁽¹⁾ agissant directement ou inductivement sur l'antenne ou sur un circuit oscillant accouplé avec elle : cet appareil peut aussi faire varier l'intensité du courant d'alimentation, la longueur de l'arc, la capacité ou la self-induction du circuit oscillant, etc. Les variations de fréquence produisent, au poste récepteur, les mêmes effets que les variations d'amplitude des ondes reçues. En effet, l'antenne réceptrice étant accordée sur la fréquence normale du transmetteur, toute modification de celle-ci entraîne un désaccord qui se traduit par une diminution d'amplitude des oscillations engendrées — et par une diminution d'effet sur le détecteur.

Parmi les différents appareils utilisés pour la réception, ceux qui conviennent sont les détecteurs d'effet total, tels que les électrolytiques, les thermiques ou thermo-électriques, les détecteurs à vide et les détecteurs à cristaux fonctionnant sans pile auxiliaire. Ces appareils font agir, dans le circuit du récepteur téléphonique, des courants dont l'intensité varie comme les modulations des ondes.

Il importe de préciser la différence fondamentale existant entre la radiotélégraphie et la radiotéléphonie.

La radiotélégraphie repose sur l'émission et la réception de signaux conventionnels. Le caractère des ondes émises importe peu et n'intervient que pour l'obtention d'une syntonie aiguë ; la portée des communications dépend seulement de l'amplitude initiale ou, si l'on veut, de la puissance instantanée des ondes engendrées.

En radiotéléphonie au contraire, les ondes engendrées doivent avoir une pureté et une constance absolues. Leurs modulations doivent suivre celles de la parole, dont les har-

(1) Composé, en général, de plusieurs microphones groupés convenablement ensemble.

moniques ont souvent une amplitude cent fois plus petite que celle de la fréquence fondamentale. Ces harmoniques devant être perçues par le poste récepteur, le même transmetteur aura donc une portée infiniment moins grande pour des communications radiotéléphoniques que pour des communications radiotélégraphiques. Autrement dit, on devrait mettre beaucoup plus d'énergie en jeu dans le premier cas que dans le second pour obtenir la même portée minima.

Dispositif Fessenden.

La disposition adoptée en dernier lieu par M. Fessenden est représentée par la figure 293. L'alternateur G à très haute fréquence est fermé sur le circuit des quatre bobines B_1 , qui contient un microphone M : celles-ci agissent inductivement sur les quatre bobines B_2 . L'ensemble CLR (capacité, self-induction et résistance réglable) équilibre l'antenne, comme cela a été expliqué au chapitre XIV page 319. Cette disposition permet de

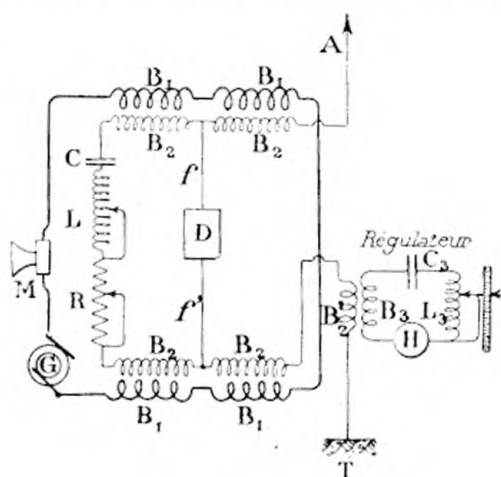


FIG. 293.

transmettre et de recevoir la parole sans aucune modification de connexions: dans la pratique, on ne réalise pas tout à fait l'équilibre absolu, de façon que, au moment de la transmission, le détecteur D se trouve faiblement influencé et que l'opérateur entende ses propres paroles dans le téléphone récepteur.

Le courant total débité par l'alternateur traversant le microphone M, cet appareil a dû être établi d'une façon tout à fait spéciale. Il consiste en une carcasse annulaire contenant de la grenaille de charbon et fermée par deux plaques munies d'électrodes en platine iridié. Ces électrodes sont refroidies toutes deux par une circulation d'eau : l'une d'elles porte en son centre un trou à travers lequel passe une tige fixée à la membrane du microphone. L'autre extrémité de cette tige porte une « bêche » en platine iridié, placée dans la grenaille de charbon. Un tel microphone peut supporter, paraît-il, des courants de 15 ampères.

Pour que le microphone devant lequel on parle puisse être placé (ainsi que le téléphone servant à la réception) à une distance quelconque des appareils et circuits du poste radiotéléphonique, M. Fessenden a établi un relais transmetteur qu'il intercale en M. En principe, ce relais est semblable au microphone précédemment décrit, dont la membrane, au lieu d'être impressionnée directement par les ondes sonores, serait actionnée électromagnétiquement, comme celle d'un récepteur téléphonique ordinaire, par un aimant à enroulement différentiel. Les bobines de cet aimant sont parcourues par des courants variables provenant d'un microphone ordinaire placé n'importe où. D'après l'inventeur, le relais téléphonique ainsi constitué a pour effet d'amplifier quinze fois environ l'intensité des courants microphoniques primitifs.

Le détecteur D peut être un détecteur électrolytique, relié à un téléphone et à un potentiomètre. M. Fessenden emploie aussi son détecteur hétérodyne ⁽¹⁾. Pour la radiotélé-

(1) Il a été question du détecteur hétérodyne au chapitre XIV page 320. C'est un téléphone comprenant deux petites bobines à noyaux, dont l'une est fixe et l'autre est supportée par la membrane en mica. Une des bobines est traversée par un courant de haute fréquence produit au poste récepteur, et l'autre par le courant oscillant engendré par les ondes dans l'antenne réceptrice (ou dans un circuit accouplé

phonie, le courant d'excitation de l'une des bobines du téléphone hétérodyne doit avoir la même fréquence que les ondes reçues ⁽¹⁾; l'autre bobine est traversée par le courant oscillant engendré dans l'antenne réceptrice. Les deux bobines exercent l'une sur l'autre des actions électromagnétiques qui varient avec l'amplitude des ondes reçues : la membrane reproduit alors les modulations des ondes.

Avec les dispositifs décrits, M. Fessenden a pu, paraît-il, assurer des communications radiotéléphoniques à des distances assez importantes, mais aucun essai n'ayant jamais été fait officiellement, il est impossible de connaître le degré d'exactitude des résultats annoncés.

Dispositif Poulsen.

Le dispositif Poulsen est représenté par la figure 294. Le générateur d'oscillations, comprenant un seul arc et un puissant soufflage magnétique, est le même que celui employé en radiotélégraphie et décrit aux pages 298 et 413. On se sert aussi d'un appareil simplifié, d'une puissance de 5 kilowatts. Les électrodes sont placées verticalement. L'électrode de cuivre porte de grandes ailettes de refroidissement H (fig. 295) assurant une large surface

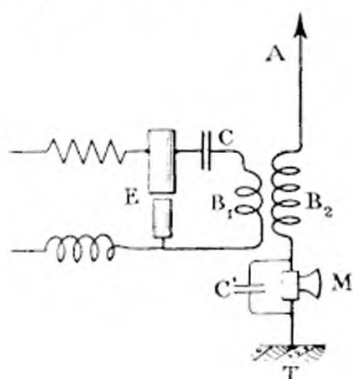


FIG. 294.

avec elle). Pour la radiotélégraphie, les fréquences de ces deux courants doivent différer un peu (de 500 périodes par seconde, par exemple) afin que la membrane du téléphone présente des battements correspondants à un son perceptible à l'oreille : pour la radiotéléphonie, elles doivent être égales.

(1) Cela semble impossible à réaliser en pratique.

de contact avec l'air: son extrémité inférieure est entourée d'un anneau de fer doux A. L'électrode E' est formée d'un disque épais en charbon placé sur le noyau N d'un électro-aimant à bobine unique B. Les lignes de force magnétiques émanant du noyau N vont passer par l'anneau A et déterminent une rotation continue de l'arc qui se déplace le long des bords des électrodes: il est donc inutile de faire tourner le crayon de charbon. Cette disposition ne peut être adoptée que pour les arcs de faible puis-

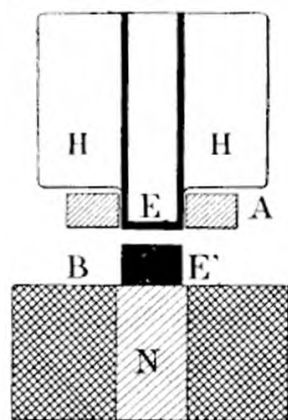


FIG. 295.

sance parce que le soufflage magnétique est beaucoup moins énergique qu'avec un champ transversal.

L'antenne contient à sa base un microphone M accompagné du condensateur C': elle est accouplée inductivement au circuit oscillant. Comme microphone, on emploie six ou huit appareils à grenaille de charbon reliés en parallèle.

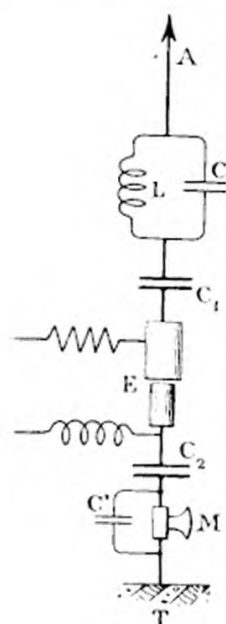


FIG. 296.

Avec les antennes de très grande surface,

qui soutirent une forte proportion d'énergie au circuit oscillant, on a recours au dispositif de la figure 297, où l'arc est intercalé directement dans l'antenne qui contient un circuit auxiliaire CL. Ce circuit agit comme un

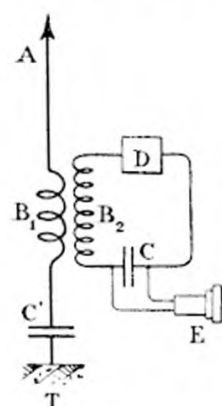


FIG. 297.

volant régulateur et empêche, paraît-il, l'instabilité de l'arc et les variations de fréquence.

Pour la réception, M. Poulsen emploie le montage indiqué par la figure 297. L'antenne agit inductivement, par un accouplement très lâche, sur un circuit contenant le détecteur thermo-électrique D et un condensateur C sur lequel est branché le récepteur téléphonique E. On utilise aussi quelquefois un détecteur à cristaux.

Dispositif Telefunken.

Le dispositif Telefunken est représenté par la figure 298. Le générateur d'oscillations, composé de six ou douze arcs

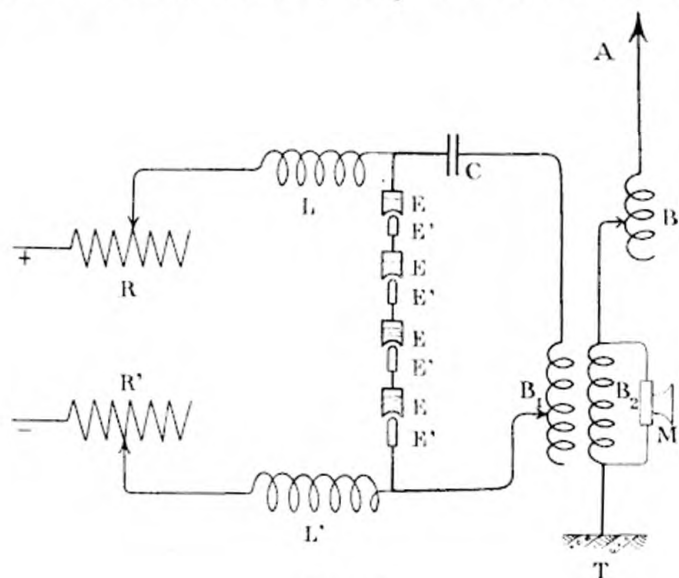


FIG. 298.

en série, est le même que celui décrit au chapitre XIV, page 307. La bobine B_1 du circuit oscillant agit inductivement sur l'antenne qui contient la bobine d'accouplement B_2 et la bobine d'accord B: le microphone est branché entre les

extrémités de cette dernière. Un ampèremètre thermique, placé au pied de l'antenne, complète souvent l'installation. L'accouplement entre le circuit oscillant et l'antenne est très lâche : il est d'environ 0,03 (3 pour 100); l'accouplement entre l'antenne et le circuit du microphone est, au contraire, très rigide.

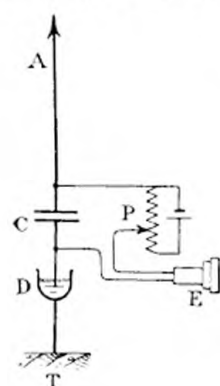


FIG. 299.

Pour la réception, la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie emploie le dispositif représenté par la figure 299, dans lequel l'accouplement est très rigide. Le détecteur électrolytique D est directement embroché dans l'antenne A, qui contient en outre le condensateur C sur lequel est branché le téléphone E et le potentiomètre P. On obtient, paraît-il, une réception plus pure de la parole avec le détecteur intercalé directement dans l'antenne qu'avec un circuit oscillant accouplé, même rigidement, avec elle.

Dispositif de Forest.

Le transmetteur consiste en un arc de Poulsen accouplé à un circuit oscillant : le microphone est placé au pied de l'antenne. Dans son ensemble, ce dispositif est identique à celui de la figure 294 : le condensateur C' est supprimé.

Pour la réception (fig. 300), l'antenne agit inductivement sur un circuit oscillant contenant la bobine B_2 et les condensateurs C_1 et C_2 : en dériva-

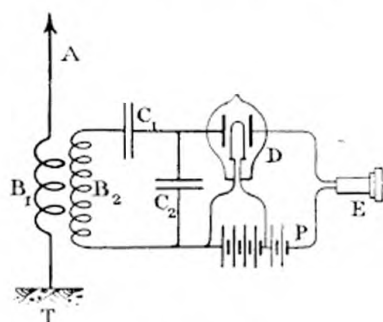


FIG. 300.

tion sur ce dernier est branché un second circuit comprenant le détecteur D (audion), une pile P et un téléphone E.

Dispositif Majorama.

Le dispositif employé pour la transmission consiste aussi en un arc de Poulsen dont le circuit oscillant est accouplé inductivement à l'antenne au pied de laquelle est intercalé le microphone.

Cet appareil, inventé par M. Majorama, est basé sur un principe particulier. Quand une veine liquide tombe verticalement d'un trou étroit percé dans un tube T (fig. 301), elle coule d'abord sous forme d'un jet cylindrique suivant une certaine longueur, puis plus bas, en G, elle présente des contractions et des extensions successives jusqu'au moment où elle se désagrège pour former des gouttes. Si le tube T est soumis à des vibrations ou à des ébranlements, les contractions de la veine liquide et sa décomposition en gouttes commencent beaucoup plus près de l'orifice de sortie: des variations de pression du liquide produisent le même effet.

Si les vibrations du tube ou les variations de pression du liquide présentent un certain rythme, correspondant par exemple aux modulations de la voix, l'influence qu'elles exercent sur la formation des gouttes varie suivant ce même rythme. Pour obtenir ce résultat, M. Majorama emploie un tube T (fig. 302) dont une

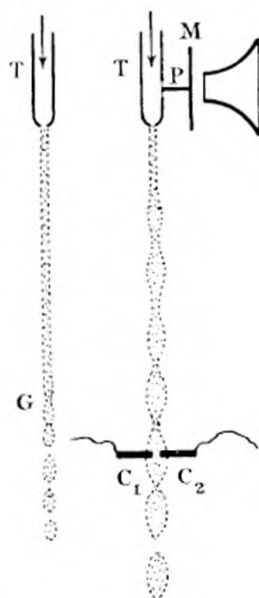


FIG. 301 et 302.

petite portion P, voisine de l'orifice, est relativement mince et élastique : cette portion est reliée à la membrane microphonique M devant laquelle on parle. De l'eau acidulée, amenée au tube sous une pression constante, forme une veine liquide qui tombe à cheval sur deux lames de contact en platine C_1C_2 séparées par un faible intervalle. Le liquide interposé entre les contacts C_1C_2 forme un pont conducteur

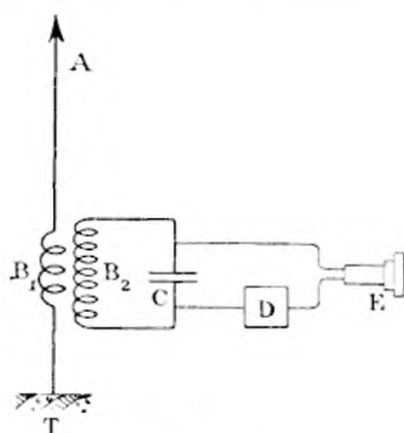


FIG. 303.

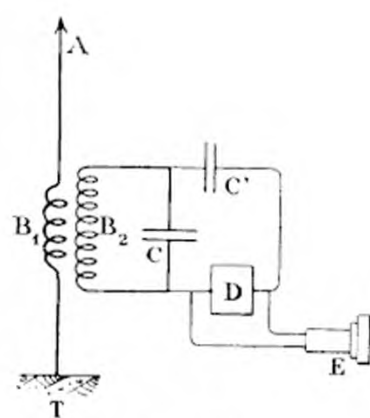


FIG. 304.

dont la résistance électrique est d'autant plus faible que son épaisseur est plus grande.

L'inventeur a pu obtenir, par un réglage convenable, que les variations de résistance électrique correspondent exactement aux variations de pression de l'air agissant sur la membrane M. Grâce au renouvellement incessant du liquide conducteur, ce microphone peut supporter sans échauffement anormal des intensités de courant élevées (10 ampères sous 50 volts).

Pour la réception, M. Majorama utilise soit un détecteur à cristaux, soit un audion. Le détecteur à cristaux est composé d'un fragment de pyrite de fer et d'une pointe en platine, portée par une vis de réglage. Le montage est représenté par la figure 303 : l'antenne A est accouplée inductivement avec un circuit oscillant ; le détecteur D et le

téléphone E sont branchés en dérivation sur le condensateur C. Une modification de ce montage est indiquée par la figure 304 : un circuit contenant le détecteur et un condensateur C' de très faible capacité (quelques millièmes de microfarad) est branché sur le condensateur C, et le téléphone est placé en dérivation sur le détecteur.

Le montage employé avec l'audion est représenté par la figure 305.

L'antenne est accouplée inductivement avec le circuit oscillant B_2CD , comprenant la spirale S et le filament de l'audion. Le téléphone E est relié à la plaque H et au filament métallique F, que le courant de la pile P maintient incandescent ; la pile P' alimente le téléphone.

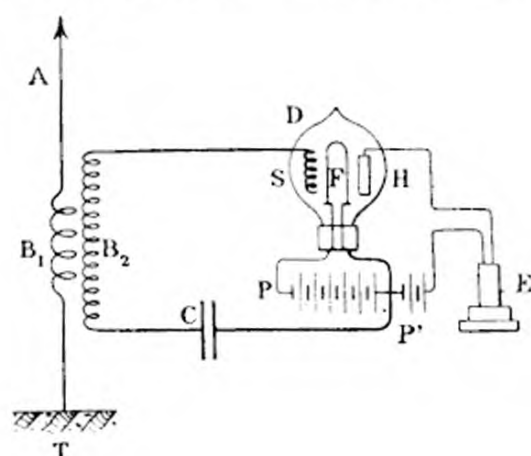


FIG. 305.

Dispositif Collins.

L'arc jaillit entre les tranches de deux disques de charbon dur D_1 et D_2 (fig. 306) tournant en sens inverses avec une grande vitesse : deux électro-aimants de soufflage S_1S_2 , parcourus par le courant principal, exercent sur lui une action énergique. Il y a, en outre, un soufflage produit par un jet d'air comprimé. L'arc est alimenté par une génératrice à courant continu à 2 500 volts.

En dérivation sur l'arc est branché le circuit oscillant C_1BC_2 , auquel l'antenne est accouplée par une portion variable de la bobine B. Le microphone M, alimenté par une

petite génératrice à courant continu à 25 volts, agit inducti-

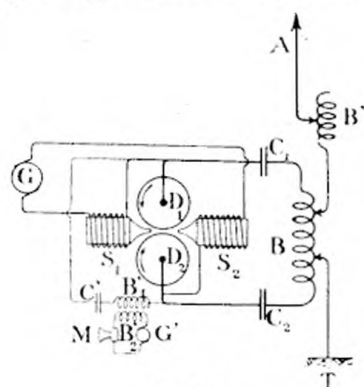


FIG. 306.

vement sur un second circuit oscillant $B'C'$ placé en dérivation sur l'arc. Ce microphone, d'une construction spéciale, est formé de deux membranes entre lesquelles sont placés des grains de charbon: les modulations de la voix agissent sur les deux membranes à la fois, et l'amplitude des variations de courant produites par

cet appareil est plus grande qu'avec les microphones ordinaires.

Pour la réception, M. Collins emploie un détecteur thermo-électrique. Les oscillations traversent un fil résistant qui s'échauffe, et la chaleur dégagée agit sur un thermo-élément formé de deux fils très fins croisés perpendiculaires l'un à l'autre. Le montage employé est indiqué par la figure 307. L'antenne A aboutit à la bobine d'accord B' , puis à la bobine d'accouplement B dont elle comprend une portion variable. Le circuit oscillant contient la bobine d'accouplement B et les deux condensateurs C et C' . Le détecteur est branché en dérivation sur ce dernier: il agit sur le circuit du récepteur téléphonique E, accompagné de la pile P et de la résistance réglable R qui

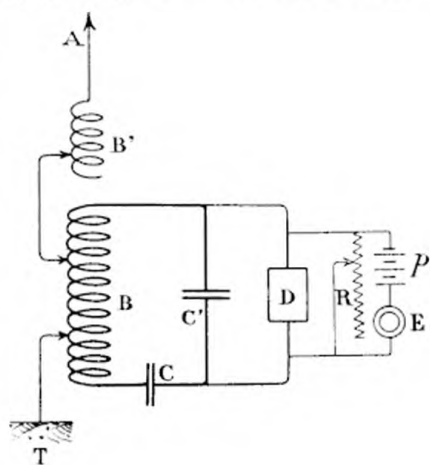


FIG. 307.

est formée de deux plaques de plomb immergées dans de l'eau.

Dispositif Ruhmer.

M. Ruhmer a utilisé un arc jaillissant entre deux fils d'aluminium qui se déplacent perpendiculairement l'un à l'autre avec une grande vitesse (chapitre XIV, page 311). Dans un premier dispositif, il a fait agir inductivement sur le circuit d'alimentation de l'arc les courants variables du microphone (fig. 308). Dans un second dispositif, il a employé un microphone spécial (fig. 309) dans lequel la

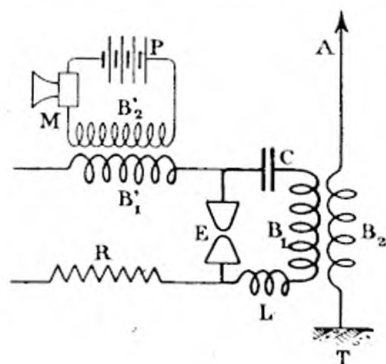


FIG. 308.

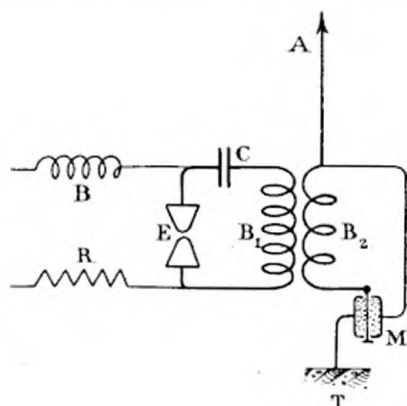


FIG. 309.

membrane est placée entre deux plaques fixes dont elle est séparée par de la grenaille de charbon. Cet appareil agit en même temps comme microphone et comme condensateur à capacité variable : l'une de ses moitiés est intercalée dans un circuit dérivé sur la bobine d'accouplement B_2 ; l'autre moitié est intercalée dans la jonction de l'antenne à la terre.

Pour la réception, M. Ruhmer s'est servi d'abord du détecteur électrolytique, puis d'un détecteur thermoélectrique.

Dispositif Colin et Jeance.

C'est aux lieutenants de vaisseau Colin et Jeance que revient l'honneur d'avoir obtenu des résultats pratiques en radiotéléphonie et d'avoir pu assurer des communications durables, parfaitement nettes, à des distances supérieures à 200 kilomètres.

Pour obtenir une fixité absolue de l'arc, ils le font jaillir entre une petite pointe de charbon d'un millimètre de diamètre et une électrode cylindrique en cuivre de grand diamètre refroidie par une circulation intérieure de pétrole. Le tout est placé dans une atmosphère d'hydrocarbures, dont le dosage est tel que la décomposition de ces gaz produise sur la petite électrode un dépôt de charbon ⁽¹⁾ équivalent à son usure : grâce à cet artifice, la longueur de l'arc reste constante. Un mécanisme régulateur, analogue à celui des lampes à arc, a pour objet de parfaire ce réglage si cela est nécessaire. Il n'y a pas de soufflage magnétique, MM. Colin et Jeance ayant reconnu que l'effet de ce dispositif est mauvais.

Le montage employé est indiqué par la figure 310. Trois arcs en série sont alimentés par une génératrice à courant continu à 500 volts : deux bobines de self-induction LL' et une forte résistance R régularisent le courant d'alimentation :

(1) Dans la fabrication des lampes à incandescence, on emploie couramment ce procédé, qu'on appelle le *nourrissage* des filaments. On dispose les filaments de charbon sous une cloche contenant un hydrocarbure convenable, et on les porte à l'incandescence par le passage d'un courant électrique. Après cette opération, leur diamètre s'est accru et leur surface extérieure est devenue plus régulière.

MM. Colin et Jeance, pour obtenir commodément une atmosphère d'hydrocarbures de composition convenable, emploient un mélange approprié d'un carbure et d'un hydrure qu'ils soumettent à l'action de l'eau dans un appareil semblable à un générateur d'acétylène.

la différence de potentiel aux bornes des trois arcs est d'environ 150 volts en fonctionnement normal. Les électrodes en cuivre E sont refroidies toutes trois par une circulation de pétrole ; les électrodes E' sont formées chacune d'un crayon de charbon de moyen diamètre portant à son extrémité une petite pointe en charbon d'environ 1 millimètre de diamètre : les trois arcs sont enfermés dans un récipient hermétique où

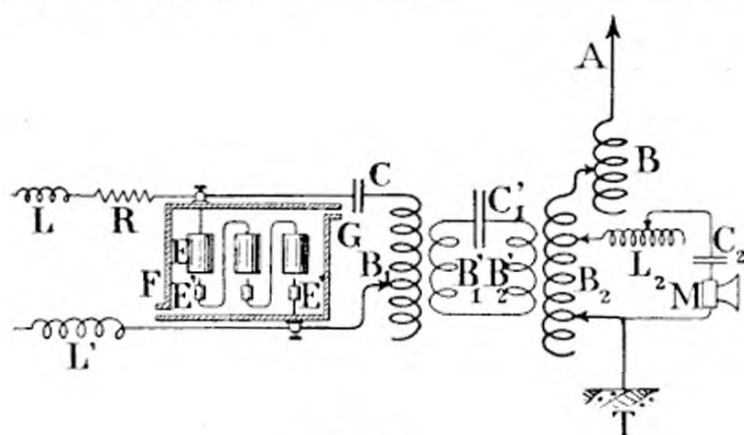


FIG. 310.

circule un courant de gaz convenable qui entre, par exemple, en F pour sortir en G.

Le circuit oscillant CB_1 , branché en dérivation sur l'arc, agit inductivement sur un circuit intermédiaire $B_1' C_1' B_2'$ de très faible amortissement. La bobine B_1' est placée à l'intérieur de la bobine B_1 et peut basculer autour d'un axe : cette disposition permet de modifier facilement l'accouplement. La capacité du condensateur C_1' a une valeur relativement élevée. La fréquence propre d'oscillation des circuits est de 500 000 par seconde, correspondant à une longueur d'onde de 600 mètres. La bobine B_2' agit inductivement sur l'antenne, qui contient la bobine d'accouplement B_2 et la bobine d'accord B.

Le rôle du circuit intermédiaire $B_1' C_1' B_2'$ est extrêmement important.

Quand on accouple l'antenne avec le circuit oscillant B_1C branché sur l'arc, la fréquence varie perpétuellement et prend n'importe quelle valeur: on peut constater, par des mesures faites avec un ondemètre, qu'il existe simultanément un grand nombre d'oscillations instables de fréquences et d'amplitudes différentes. Le seul moyen pour donner, dans ce cas, de la stabilité aux oscillations engendrées et pour obtenir une fréquence à peu près unique correspondant aux constantes du circuit dérivé, consiste à former le circuit d'une bobine de forte self-induction et d'un condensateur de faible capacité: l'énergie utilisable sous forme d'oscillations électromagnétiques est alors très faible.

Au contraire, quand on intercale entre les bobines d'accouplement B_1 et B_2 un circuit intermédiaire $B_1C_1B_2$ de faible amortissement et de forte capacité, la fréquence des oscillations produites devient absolument invariable et l'onde rayonnée par l'antenne est très pure.

L'appareil microphonique est placé dans un circuit oscillant branché en dérivation sur une portion variable de la bobine d'accouplement B_2 : ce circuit contient un condensateur C_2 et une bobine de self-induction L_2 réglables. La fraction du courant oscillant qui passe par le microphone est à peu près le dixième ou le douzième du courant dans l'antenne (environ 0,5 à 0,6 ampère dans le circuit dérivé pour 6 à 8 ampères dans l'antenne).

Comme appareil microphonique, MM. Colin et Jeance emploient seize microphones à grains de charbon du modèle ordinaire fixés sur une planchette et reliés en série; un pavillon acoustique de dimensions convenables concentre sur eux les ondes sonores. Ils ont essayé aussi d'utiliser un microphone constitué par un tube métallique refroidi extérieurement par une circulation d'eau: ce tube contient de la grenaille de charbon et est fermé à chacune de ses extrémités

par une membrane vibrante formée de deux plaques entre lesquelles circule un courant d'eau.

Pour la réception, MM. Colin et Jeance se servent d'un dispositif ordinaire avec détecteur à cristaux.

Les expériences officielles faites avec ce système ont permis de constater que les communications téléphoniques sont parfaitement nettes et durables à des distances supérieures à 200 kilomètres, même dans des circonstances atmosphériques défavorables.

APPENDICE

RÈGLEMENT DE SERVICE

DES POSTES RADIOTÉLÉGRAPHIQUES

(Annexé à la Convention radiotélégraphique internationale).

1. — *Organisation des stations radiotélégraphiques.*

I.

Le choix des appareils et des dispositifs radiotélégraphiques à employer par les stations côtières et les stations de bord est libre. L'installation de ces stations doit répondre, autant que possible, aux progrès scientifiques et techniques.

II.

Deux longueurs d'onde, l'une de 300 et l'autre de 600 mètres, sont admises pour le service de la correspondance publique générale. Toute station côtière ouverte à ce service utilise l'une ou l'autre de ces deux longueurs d'onde. Pendant toute la durée de son ouverture au service, chaque station doit être en état de recevoir les appels faits au moyen de sa longueur d'onde et il n'y peut être fait usage d'aucune autre longueur d'onde pour le service de la correspondance publique générale. Toutefois, chaque Gouvernement peut autoriser l'emploi, dans une station côtière, d'autres longueurs d'ondes destinées à assurer un service de longue portée ou un service autre que celui de la correspondance publique générale et établi conformément aux dispositions de la Convention, à condition que ces longueurs d'onde ne dépassent pas 600 mètres ou qu'elles soient supérieures à 1 600 mètres.

III.

1. La longueur d'onde normale pour les stations de bord est de 300 mètres. Toute station de bord doit être installée de manière à pouvoir se servir de cette longueur d'onde. D'autres longueurs d'onde peuvent être employées par ces stations à condition de ne pas dépasser 600 mètres.

2. Les navires de faible tonnage, qui seraient dans l'impossibilité matérielle de réaliser le dispositif assurant la longueur d'onde de 300 mètres, peuvent être autorisés à employer une longueur d'onde inférieure.

IV.

1. Il est procédé, par les soins du Bureau international, à l'établissement d'une nomenclature des stations radiotélégraphiques visées à l'article 1^{er} de la Convention. Cette nomenclature donne pour chaque station les renseignements suivants :

1^o nom, nationalité et position géographique, pour les stations côtières ; nom, nationalité, signal distinctif du Code international et indication du port d'attache du navire, pour les stations de bord ;

2^o indicatif d'appel (les indicatifs doivent être différenciés les uns des autres) ;

3^o portée normale ;

4^o système radiotélégraphique ;

5^o catégorie des appareils récepteurs (appareils écrivants, à réception auditive ou autre) ;

6^o longueurs d'onde utilisées par la station (la longueur d'onde normale est soulignée) ;

7^o nature du service effectué par la station :

Correspondance publique générale ;

Correspondance publique restreinte (correspondance avec les navires. . . ; correspondances avec les lignes de navigation de. ; correspondance avec les navires munis d'appareils du système. etc., etc.) ;

Correspondance publique de longue portée ;

Correspondance d'intérêt privé ;

Correspondance spéciale (correspondance exclusivement officielle), etc., etc.).

8^o heures d'ouverture ;

9^o taxe côtière ou de bord.

2. Sont compris, en outre, dans la nomenclature les renseignements

relatifs aux stations radiotélégraphiques autres que celles visées à l'article 1^{er} de la Convention qui sont communiqués au Bureau international par l'Administration dont dépendent ces stations.

V.

L'échange de signaux et de mots superflus est interdit aux stations visées à l'article 1^{er} de la Convention. Des essais et des exercices ne sont tolérés dans ces stations qu'autant qu'ils ne troublent point le service d'autres stations.

VI.

1. Aucune station de bord ne peut être établie ou exploitée par une entreprise privée sans autorisation du Gouvernement dont dépend le navire. Cette autorisation fait l'objet d'une licence délivrée par ce Gouvernement.

2. Toute station de bord autorisée doit satisfaire aux conditions suivantes :

(a) le système employé doit être un système syntonisé ;

(b) la vitesse de transmission et de réception, dans les circonstances normales, ne doit pas être inférieure à 12 mots par minute, le mot étant compté à raison de 5 lettres ;

(c) la puissance transmise à l'appareil radiotélégraphique ne doit pas, dans les circonstances normales, dépasser un kilowatt. Une puissance supérieure à un kilowatt peut être employée si le navire se trouve dans la nécessité de correspondre à une distance de plus de 300 kilomètres de la station côtière la plus rapprochée, ou si, par suite d'obstacles, la communication ne peut être réalisée qu'au moyen d'une augmentation de puissance.

3. Le service de la station de bord doit être assuré par un télégraphiste possesseur d'un certificat délivré par le Gouvernement dont dépend le navire. Ce certificat constate la valeur professionnelle du télégraphiste en ce qui concerne :

(a) le réglage des appareils,

(b) la transmission et la réception auditive à une vitesse qui ne doit pas être inférieure à 20 mots par minute,

(c) la connaissance des règlements applicable à l'échanges des communications radiotélégraphiques.

4. En outre, le certificat constate que le Gouvernement a soumis le télégraphiste à l'obligation du secret des correspondances.

VII.

1. Si une Administration a connaissance d'une infraction à la Con-

vention ou au Règlement commise dans une des stations qu'elle a autorisées, elle constate les faits et fixe les responsabilités.

En ce qui concerne les stations de bord, si la responsabilité incombe au télégraphiste, l'Administration prend les mesures nécessaires, et, le cas échéant, retire le certificat. S'il est constaté que l'infraction résulte de l'état des appareils ou d'instructions données au télégraphiste, il est procédé de même à l'égard de la licence accordée au navire.

2. Dans le cas d'infractions réitérées à la charge du même navire, si les représentations faites à l'Administration dont dépend le navire par une autre Administration restent sans effet, celle-ci a la faculté, après en avoir donné avis, d'autoriser ses stations côtières à ne pas accepter les communications provenant du navire en cause. En cas de différend entre les deux Administrations, la question est soumise à un jugement arbitral à la demande de l'un des Gouvernements en cause. La procédure est celle indiquée à l'article 18 de la Convention.

2. — *Durée du service des stations côtières.*

VIII.

1. Le service des stations côtières est, autant que possible, permanent, le jour et la nuit, sans interruption.

Toutefois certaines stations côtières peuvent avoir un service de durée limitée. Chaque Administration fixe les heures de service.

2. Les stations côtières dont le service n'est pas permanent ne peuvent prendre clôture avant d'avoir transmis tous leurs radiotélégrammes aux navires qui se trouvent dans leur rayon d'action et avant d'avoir reçu de ces navires tous les radiotélégrammes annoncés. Cette disposition est également applicable lorsque des navires signalent leur présence avant la cessation effective du travail.

3. — *Rédaction et dépôt des radiotélégrammes.*

IX.

Si le parcours du radiotélégramme s'effectue en partie sur des lignes télégraphiques ou par des stations radiotélégraphiques relevant d'un Gouvernement non contractant, il peut être donné cours à ce radiotélégramme, sous la réserve, tout au moins, que les Administrations dont dépendent ces lignes ou ces stations aient déclaré vouloir appliquer, le cas échéant, les dispositions de la Convention et du Règlement qui

sont indispensables pour l'acheminement régulier des radiotélégrammes, et que la comptabilité soit assurée.

X.

1. Les radiotélégrammes portent en préambule la mention de service " Radio ".

2. Dans la transmission des radiotélégrammes des stations de bord aux stations côtières, il est fait abstraction, dans le préambule, de la date et de l'heure de dépôt.

A la réexpédition sur le réseau télégraphique, la station côtière inscrit, comme indication du bureau d'origine, son nom suivi de celui du navire et elle donne, comme heure de dépôt, l'heure de réception.

XI.

L'adresse des radiotélégrammes destinés aux navires en mer doit être aussi complète que possible. Elle est obligatoirement libellée comme suit :

(a) nom du destinataire avec indication complémentaire, s'il y a lieu ;

(b) nom du navire, tel qu'il figure à la nomenclature, complété par la nationalité et, au besoin, par le signal distinctif du Code international, en cas d'homonymie ;

(c) nom de la station côtière, tel qu'il figure à la nomenclature.

4. — *Taxation.*

XII.

La taxe côtière ne peut dépasser 60 centimes par mot, celle de bord 40 centimes par mot.

Un minimum de taxe, qui ne peut dépasser la taxe côtière ou de bord d'un radiotélégramme de 10 mots, peut être imposé en ce qui concerne les taxes côtières ou de bord.

XIII.

Le pays sur le territoire duquel est établie une station côtière servant d'intermédiaire pour l'échange de radiotélégrammes entre une station de bord et un autre pays est considéré, en ce qui concerne l'application des taxes télégraphiques, comme pays de provenance ou de destination de ces radiotélégrammes et non comme pays de transit.

5. — *Perception des taxes.*

XIV.

La taxe totale des radiotélégrammes est perçue sur l'expéditeur.

Les stations de bord doivent posséder à cet effet les tarifs utiles. Elles ont toutefois la faculté de se renseigner auprès des stations côtières au sujet de la taxation de radiotélégrammes pour lesquels elles ne possèdent pas toutes les données nécessaires.

6. — *Transmission des radiotélégrammes.*

a. *Signaux de transmission.*

XV.

Les signaux employés sont ceux du Code Morse international.

XVI.

Les navires en détresse font usage du signal suivant :

● ● ● ■ ■ ■ ● ● ●

répétés à de courts intervalles.

Dès qu'une station perçoit le signal de détresse, elle doit suspendre toute correspondance et ne la reprendre qu'après avoir acquis la certitude que la communication, motivée par l'appel de secours, est terminée.

Dans le cas où le navire en détresse ajoute à la fin de la série de ses appels de secours l'indicatif d'appel d'une station déterminée, la réponse à l'appel n'appartient qu'à cette dernière station. A défaut de l'indication d'une station déterminée dans l'appel de secours, chaque station qui perçoit cet appel est tenue d'y répondre.

XVII.

1. L'indicatif d'appel, suivi des lettres

● ■ ■ ● ● ■ ● ● ●

“ P R B ”, signifie que le navire ou la station faisant l'appel désire communiquer avec la station appelée à l'aide du Code international des signaux.

La combinaison des lettres P R B est interdite comme indication de service, pour tout autre objet que celui indiqué ci-dessus.

2. Les radiotélégrammes peuvent être rédigés à l'aide du Code international de signaux.

Ceux qui sont adressés à une station radiotélégraphique en vue d'une transmission ultérieure ne sont pas traduits par cette station.

b. *Ordre de transmission.*

XVIII.

Entre deux stations, les radiotélégrammes de même rang sont transmis isolément dans l'ordre alternatif ou par série de plusieurs radiotélégrammes suivant l'indication de la station côtière, à la condition que la durée de la transmission de chaque série ne dépasse pas 20 minutes.

c. *Appel des stations radiotélégraphiques et transmission des radiotélégrammes.*

XIX.

1. En règle générale, c'est la station de bord qui appelle la station côtière.

L'appel ne peut être fait, en règle générale, que lorsque le navire se trouve à une distance de la station côtière inférieure à 75 pour 100 de la portée normale de cette dernière.

3. Avant de procéder à un appel, la station de bord doit régler le plus sensiblement possible son système récepteur et s'assurer que la station côtière qu'elle veut appeler n'est pas en communication. Si elle constate qu'une transmission est en cours, elle attend la première suspension.

4. La station de bord fait emploi, pour l'appel, de l'onde normale de la station côtière.

5. Si, malgré ces précautions, un échange radiotélégraphique public est entravé, l'appel doit cesser à la première demande d'une station côtière ouverte à la correspondance publique. Cette station doit alors indiquer la durée approximative de l'attente.

XX.

1. L'appel comporte le signal



l'indicatif répété trois fois de la station appelée, le mot « de » suivi de l'indicatif de la station expéditrice répété trois fois.

2. La station appelée répond en donnant le signal



suivi de l'indicatif répété trois fois de la station correspondante, du mot « de », de son indicatif et du signal



XXI.

Si une station appelée ne répond pas à la suite de l'appel (article XX) répété trois fois à des intervalles de 2 minutes, l'appel ne peut être repris qu'après un intervalle d'une demi-heure, la station faisant l'appel s'étant d'abord assurée qu'aucune communication radiotélégraphique n'est en cours.

XXII.

1. Aussitôt que la station côtière a répondu, la station de bord fait connaître :

- (a) la distance du navire à la station côtière en milles nautiques,
- (b) le relèvement vrai en degrés comptés de 0 à 360,
- (c) la route vraie en degrés comptés de 0 à 360.
- (d) la vitesse en milles nautiques.
- (e) le nombre de mots qu'elle a à transmettre.

2. La station côtière répond en indiquant le nombre de mots à transmettre au navire.

3. Si la transmission ne peut avoir lieu immédiatement, la station côtière fait connaître à la station de bord la durée approximative de l'attente.

XXIII.

Lorsqu'une station côtière est saisie d'appels provenant de plusieurs stations de bord, la station côtière décide de l'ordre dans lequel les stations de bord seront admises à échanger leurs correspondances.

Pour régler cet ordre, la station côtière s'inspire uniquement de la nécessité de permettre à toute station intéressée d'échanger le plus grand nombre possible de radiotélégrammes.

XXIV.

Avant de commencer l'échange de la correspondance, la station côtière fait connaître à la station de bord si la transmission doit s'effectuer dans l'ordre alternatif ou par séries (article XVIII) ; elle commence ensuite la transmission ou fait suivre ces indications du signal



(invitation à transmettre).

XXV.

La transmission du radiotélégramme est précédée du signal



et terminée par le signal



suivi de l'indicatif de la station expéditrice.

XXVI.

Lorsque le radiotélégramme à transmettre contient plus de 40 mots, la station expéditrice interrompt la transmission après chaque série de 20 mots environ par un point d'interrogation, et elle ne reprend la transmission qu'après avoir obtenu de la station correspondante la répétition du dernier mot bien reçu suivi d'un point d'interrogation.



Dans les cas de transmission par séries, l'accusé de réception est donné après chaque radiotélégramme.

XXVII.

1. Lorsque les signaux deviennent douteux, il importe d'avoir recours à toutes les ressources possibles pour l'achèvement de la transmission. A cet effet, le radiotélégramme est répété, à la demande de la station réceptrice, sans toutefois dépasser trois répétitions. Si, malgré cette triple transmission, les signaux sont toujours illisibles, le radiotélégramme est annulé. Si l'accusé de réception n'est pas reçu, la station transmettrice appelle de nouveau la station correspondante. Si aucune réponse n'est faite après trois appels, la transmission n'est pas poursuivie.

2. Si la station réceptrice juge que, malgré une réception défectueuse, le radiotélégramme peut être remis, elle inscrit la mention de service : « Réception douteuse » à la fin du préambule et donne cours au radiotélégramme.

XXVIII.

Toutes les stations sont tenues d'échanger le trafic avec le minimum de dépense d'énergie nécessaire pour assurer une bonne communication.

d. *Accusé de réception et fin du travail.*

XXIX.

1. L'accusé de réception se donne dans la forme prescrite par le Règlement télégraphique international précédé de l'indicatif de la station transmettrice et suivi de l'indicatif de la station réceptrice.

2. La fin du travail entre deux stations est indiquée par chaque station au moyen du signal



suivi de son indicatif.

e. *Direction à donner aux radiotélégrammes.*

XXX.

1. En principe, la station de bord transmet ses radiotélégrammes à la station côtière la plus rapprochée.

2. Toutefois un expéditeur à bord d'un navire a le droit d'indiquer la station côtière par laquelle il désire que son radiotélégramme soit expédié.

La station de bord attend alors jusqu'à ce que cette station côtière soit la plus rapprochée. Si cette condition n'est pas réalisable, il n'est donné satisfaction à l'expéditeur que si la transmission peut s'effectuer sans troubler le service d'autres stations.

7. — *Remise des radiotélégrammes à destination.*

XXXI.

Lorsque, pour une cause quelconque, un radiotélégramme provenant d'un navire en mer ne peut être remis au destinataire, il est émis un avis de non-remise. Cet avis est remis au navire s'il est possible. Lorsqu'un radiotélégramme parvenu à une station de bord ne peut être remis, cette station en fait part au bureau d'origine par avis de service. Cet avis est transmis autant que possible à la station côtière par laquelle a transité le radiotélégramme, ou, le cas échéant, à la station côtière la plus rapprochée.

XXXII.

Si le navire auquel est destiné un radiotélégramme n'a pas signalé sa présence à la station côtière dans le délai indiqué par l'expéditeur

ou, à défaut d'une telle indication, jusqu'au matin du 29^e jour suivant, cette station côtière en donne l'avis à expéditeur.

Celui-ci a la faculté de demander par avis de service taxé, télégraphique ou postal, adressé à la station côtière, que son radiotélégramme soit retenu pendant une nouvelle période de 30 jours pour être transmis au navire et ainsi de suite. A défaut d'une telle demande, le radiotélégramme est mis au rebut à la fin du 30^e jour (jour de dépôt non compris).

Toutefois, si la station côtière a l'assurance que le navire est sorti de son rayon d'action avant qu'elle ait pu lui transmettre le radiotélégramme, cette station en avise l'expéditeur.

8. — *Télégrammes spéciaux.*

XXXIII.

Ne sont pas admis :

- (a) les télégrammes avec réponse payée,
- (b) les télégrammes-mandats,
- (c) les télégrammes avec collationnement,
- (d) les télégrammes avec accusé de réception,
- (e) les télégrammes à faire suivre,
- (f) les télégrammes de service taxés, sauf en ce qui concerne le parcours sur les lignes du réseau télégraphique,
- (g) les télégrammes urgents, sauf en ce qui concerne le parcours sur les lignes du réseau télégraphique sous réserve de l'application des prescriptions du Règlement télégraphique international.
- (h) les télégrammes à remettre par exprès ou par poste.

9. — *Archives.*

XXXIV.

Les originaux des radiotélégrammes et les documents y relatifs, retenus par les Administrations ou les exploitations privées, sont conservés au moins pendant 12 mois à compter du mois qui suit le mois du dépôt du radiotélégramme avec toutes les précautions nécessaires au point de vue de secret.

Ces originaux et documents sont, autant que possible, envoyés au moins une fois par mois, par les stations de bord, aux Administrations dont elles relèvent.

10. — Détaxes et remboursements.

XXXV.

1. En ce qui concerne les détaxes et remboursements, il est fait application des dispositions du Règlement télégraphique international en tenant compte des restrictions indiquées à l'article XXXIII du présent Règlement et sous les réserves suivantes :

Le temps employé pour la transmission radiotélégraphique, ainsi que la durée du séjour du radiotélégramme dans la station côtière ou dans la station de bord, ne comptent pas dans les délais concernant les détaxes et remboursements.

Le remboursement est supporté par les différentes Administrations ou exploitations privées qui ont participé à l'acheminement du radiotélégramme, chaque Administration abandonnant sa part de taxe. Toutefois, les radiotélégrammes auxquels sont applicables les articles 7 et 8 de la Convention de Saint-Petersbourg restent soumis aux dispositions du Règlement télégraphique international, sauf lorsque l'acceptation de ces radiotélégrammes est le résultat d'une erreur de service.

2. Lorsque l'accusé de réception d'un radiotélégramme n'est pas parvenu à la station qui l'a transmis, la taxe n'est remboursée que lorsqu'il a été établi que le radiotélégramme donne lieu à remboursement.

11. — Comptabilité.

XXXVI.

1. Les taxes côtières et de bord n'entrent pas dans les comptes prévus par le règlement télégraphique international.

Les comptes concernant ces taxes sont liquidés par les Administrations des Gouvernements intéressés. Ils sont établis par les Administrations dont relèvent les stations côtières et communiqués par elles aux Administrations intéressées.

2. Pour la transmission sur les lignes du réseau télégraphique, le radiotélégramme est traité, au point de vue des comptes, conformément au Règlement télégraphique international.

3. Pour les radiotélégrammes originaux des navires, l'Administration dont relève la station de bord est débitée par celle dont relève la station côtière des taxes côtières et télégraphiques ordinaires perçues à bord des navires.

Pour les radiotélégrammes à destination des navires, l'Administration qui a perçu les taxes est débitée directement par l'Administration dont relève la station côtière des taxes côtières et de bord. Cette dernière crédite l'Administration dont relève le navire de la taxe de bord.

Toutefois, dans le cas où l'Administration qui a perçu les taxes est la même que celle dont relève la station du bord, la taxe de bord n'est pas débitée par l'Administration dont dépend la station côtière.

4. Les comptes mensuels servant de base à la comptabilité spéciale des radiotélégrammes sont établis radiotélégramme par radiotélégramme avec toutes les indications utiles et dans un délai de 6 mois à partir du mois auquel ils se rapportent.

5. Les Gouvernements se réservent la faculté de prendre entre eux et avec les exploitations privées (entrepreneurs exploitant des stations radiotélégraphiques, compagnies de navigation, etc.) des arrangements spéciaux en vue de l'adoption d'autres dispositions concernant la comptabilité.

13. — *Dispositions diverses.*

XXXIX

Les Administrations facilitent la communication aux agences d'information maritimes qu'elles agréent des renseignements concernant les avaries et sinistres maritimes ou présentant un intérêt général pour la navigation dont les stations côtières peuvent régulièrement donner communication.

NL.

Les transmissions échangées entre les stations de bord visées à l'article I^{er} de la Convention doivent s'effectuer de manière à ne pas troubler le service des stations côtières, celles-ci devant avoir, en règle générale, le droit de priorité pour la correspondance publique.

NLI.

1. A moins d'arrangements spéciaux entre les intéressés, les dispositions du présent Règlement sont applicables, par analogie, à l'échange radiotélégraphique entre deux navires en mer, sauf les exceptions suivantes :

(a) ARTICLE XIV. La taxe de bord revenant au navire transmetteur est perçue sur l'expéditeur et celle revenant au navire récepteur est perçue sur le destinataire.

(b) ARTICLE XVIII. L'ordre de transmission est réglé chaque fois de commun accord entre les stations correspondantes.

(c) ARTICLE XXXVI. Les taxes des radiotélégrammes en question n'entrent pas dans les comptes prévus à cet article, ces taxes étant acquises aux Administrations qui les ont encaissées.

2. La retransmission des radiotélégrammes échangés entre les navires en mer est subordonnée à des arrangements spéciaux entre les intéressés.

XLII.

Les dispositions du Règlement télégraphique international sont applicables, par analogie, à la correspondance radiotélégraphique en tant qu'elles ne sont pas contraires aux dispositions du présent Règlement.

**NOMENCLATURE DES POSTES COTIERS FRANÇAIS
OUVERTS AU SERVICE RADIOTÉLÉGRAPHIQUE PUBLIC**

SITUATION DU POSTE	ADMINISTRATION DONT DÉPEND LE POSTE	LONGUEUR D'ONDE	INDICATIF D'APPEL
Ajaccio.	Marine.	600 mètres.	TAF
Boulogne.	Postes et Télégraphes.	300 —	UBL
Brest-Kerlaer.	Marine.	600 —	TQF
Cherbourg.	Marine.	600 —	TCF
Dunkerque.	Marine.	600 —	TDF
Fort-de-l'Eau.	Postes et Télégraphes.	600 — ⁽¹⁾	UFO
Lorient.	Marine.	600 —	TLF
Ouessant.	Postes et Télégraphes.	600 — ⁽¹⁾	UOS
Porquerolles.	Postes et Télégraphes.	300 —	UPQ
Rochefort.	Marine.	600 —	TRF
Stes-Maries-de-la-Mer.	Postes et Télégraphes.	600 — ⁽¹⁾	USM

⁽¹⁾ Dans ce poste, le service d'écoute est également assuré sur les ondes de 300 mètres de longueur d'onde.

TABLE ANALYTIQUE DES MATIERES

INTRODUCTION

NOTIONS SOMMAIRES D'ÉLECTROTECHNIQUE.

Chapitre I. — Phénomènes électrostatiques, électrodynamiques et électromagnétiques.

	Pages.
Potentiel.	2
Charge électrique.	3
Condensateurs.	4
Décharge électrique.	6
Courant électrique.	8
Champ magnétique.	11
Induction électromagnétique.	15
Induction mutuelle et self-induction.	17

Chapitre II. — Production et transformation du courant électrique.

Générateurs électriques.	21
Machines à courant alternatif.	23
Machines à courant continu.	27
Bobines de self-induction.	32
Transformateurs.	35
Accouplement magnétique.	39
Bobine de Ruhmkorff.	41

PREMIÈRE PARTIE

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA PRODUCTION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Chapitre III. — Mouvement vibratoire et rayonnement.

Mouvement vibratoire.	45
L'éther.	48
Rayonnement.	50

*Chapitre IV. — Radiation chimique, lumineuse
et électrique.*

Rayons lumineux ; rayons chimiques et calorifiques.	58
Rayons électriques.	60
Énergie rayonnante.	61
Transmission de l'énergie par le mouvement vibratoire.	63

*Chapitre V. — Production des oscillations
électriques.*

Circuits oscillants.	65
Oscillations amorties.	68
Diverses causes d'amortissement.	74
Oscillations entretenues.	78
Production directe des oscillations électriques.	82

Chapitre VI. — La résonance.

Résonance mécanique.	86
Résonance électrique.	91
Accouplement de deux circuits par induction.	96
Transformateurs pour oscillations électriques.	100
Accouplement direct de deux circuits.	101
Accouplement mixte de deux circuits.	103

*Chapitre VII. — Production et propagation
des ondes électromagnétiques.
Expériences de Hertz.*

Excitateur ou oscillateur.	104
Résonateur.	108
Propagation des ondes dans l'espace : Réflexion.	111
— Réfraction.	112
— Interférence.	113
Propagation des ondes dans les fils.	117

DEUXIÈME PARTIE

LA RADIODÉLÉGRAPHIE.

*Chapitre VIII. — Les débuts de la radio-
télégraphie.*

Radioconducteur de Branly.	123
Expériences de Lodge.	125
Expériences de Popoff.	126
Premières expériences de Marconi.	127
Expériences de transmission à travers la Manche.	134

Chapitre IX. — Les détecteurs d'ondes.

Cohéreurs.	139
--------------------	-----

Théorie du fonctionnement des cohérents.	143
Détecteurs thermiques.	147
Détecteurs thermoélectriques.	149
Détecteurs électrolytiques.	151
Théorie du fonctionnement des détecteurs électrolytiques	155
Détecteurs à cristaux.	156
Détecteurs magnétiques.	159
Détecteurs à vide.	168
Propriétés caractéristiques des différents détecteurs.	173

*Chapitre X. — Modes de fonctionnement
et d'utilisation des antennes.*

Phénomènes en jeu dans les antennes transmettrices.	175
Antennes transmettrices excitées directement.	180
— par dérivation.	181
— par induction.	182
Antennes transmettrices à excitation mixte.	187
Phénomènes en jeu dans les antennes réceptrices.	189
Antennes réceptrices agissant directement.	194
— par dérivation.	195
— par induction.	196
— par accouplement mixte.	198
Remarques générales relatives à l'accouplement.	199
Différentes formes d'antennes.	200
Remarque sur le rôle de la terre.	205

Chapitre XI. — Mesure des longueurs d'onde.

Détermination approximative.	207
Bobine de Seibt.	208
Ondemètre Slaby.	211
Ondemètres Fleming.	212
Ondemètre Dönitz.	214
Ondemètres Ferrié.	217
Ondemètre Péri.	223
Remarques sur l'emploi des ondemètres.	223

Chapitre XII. — Syntonie. — Ondes dirigées.

Systèmes syntonisés.	226
Systèmes à élimination.	232
Systèmes à ondes dirigées : dispositifs à miroirs paraboliques.	235
— dispositifs à deux antennes.	236
— antennes horizontales.	238
— dispositif Bellini-Tosi.	241

*Chapitre XIII. — Dispositifs successivement
employés en radiotélégraphie.*

Dispositifs Slaby et Arco.	248
Dispositifs Braun.	252

Dispositifs Lodge et Muirhead.	255
Dispositifs Marconi.	260
Dispositifs Fleming.	263
Résonance primaire.	267
Dispositifs Stone.	274
Dispositifs Fessenden.	276
Dispositifs de Forest.	279
Dispositifs Telefunken.	282
Dispositifs de la Guerre.	287
Dispositifs de la Marine.	289
Dispositif Rochefort.	292
Dispositif Brenot.	293
Dispositif de la C. G. R.	294

Chapitre XIV. — Dispositifs nouvellement employés en radiotélégraphie.

Dispositifs à ondes entretenues.

Dispositifs à arc : dispositif Poulsen.	298
— } dispositif Telefunken.	307
— } dispositif Tissot.	308
— dispositif Fessenden.	310
— dispositif Collins.	311
— dispositif Ruhmer.	311
— dispositif Peuckert.	312
— dispositif de Lepel.	313
Dispositif Fessenden avec alternateur à haute fréquence.	315
Dispositifs utilisant différentes combinaisons : dispositifs Marconi.	321
— dispositif Vreeland.	324
— dispositifs Galetti.	325

Dispositifs à étincelles musicales.

Dispositifs basés sur des procédés mécaniques : dispositif Marconi.	330
— dispositif Balsillie.	331
— divers.	332
Dispositifs basés sur des procédés électriques : dispositif Telefunken.	334
— divers.	338

Chapitre XV. — Appareils employés dans les postes radiotélégraphiques.

Appareils employés pour la transmission.

Bobines d'induction.	341
Interrupteurs.	344
Alternateurs.	347
Transformateurs.	350
Manipulateurs.	353
Condensateurs.	362
Éclateurs.	366

Bobines d'accouplement.	368
Bobines d'antenne.	370
Appareils de mesure.	375
Antennes et prises de terre.	375

Appareils employés pour la réception.

Antennes et accessoires : commutateurs d'antenne.	377
— bobines d'accouplement.	377
— bobines d'accord.	378
— condensateurs.	378
Détecteurs.	379
Récepteurs : téléphones.	381
— monotéléphones.	382
— relais téléphoniques.	383
— relais ordinaires.	384
— relais à cadre mobile.	385
Enregistreur Morse.	386
Appareils d'appel.	387

*Chapitre XVI. — Description de quelques postes
radiotélégraphiques.*

Postes de la Guerre :	Postes des places fortes.	388
—	Poste de la Tour Eiffel.	390
—	Postes transportables.	394
Postes de la Marine :	Poste de Toulon.	396
—	Postes de croiseurs.	397
—	Postes de contre-torpilleurs.	402
Postes des Postes et Télégraphes :	Poste de Saintes-Maries.	403
—	Poste de Boulogne.	407
Postes Telefunken.		408
—	Poste de Nauen.	410
Postes Poulsen :	Poste de Lyngby.	413
—	Poste de Cullercoats.	415
—	Poste de Knockree.	419
Postes Fessenden.		420
Postes Marconi :	Poste de Poldhu.	421
—	Postes de Clifden et Glace Bay.	423
Remarques sur les communications radiotélégraphiques.		424

TROISIÈME PARTIE

LA RADIOTÉLÉPHONIE.

*Chapitre XVII. — Principe et historique
de la radiotéléphonie.*

Production des sons et de la parole.	430
Téléphonie avec fils.	432
Principe de la radiotéléphonie.	434
Historique de la radiotéléphonie.	435

*Chapitre XVIII. — Dispositifs employés
en radiotéléphonie.*

	439
Dispositif Fessenden..	441
Dispositif Poulsen.	443
Dispositif Telefunken.	445
Dispositif de Forest.	446
Dispositif Majorama..	447
Dispositif Collins.	449
Dispositif Ruhmer.	451
Dispositif Colin et Jeance.	452

APPENDICE

Règlement de service des postes radiotélégraphiques..	457
Nomenclature des postes côtiers français ouverts au service radiotélégraphique public.	471

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES ET DES NOMS D'AUTEURS

A

Accouplement direct de deux circuits oscillants, 101.
 Accouplement direct de l'antenne et du circuit oscillant, 181 et 195.
 Accouplement inductif de deux circuits oscillants, 97.
 Accouplement inductif de l'antenne et du circuit oscillant, 182 et 196.
 Accouplement magnétique, 39.
 Accouplement mixte de deux circuits oscillants, 103.
 Accouplement mixte de l'antenne et du circuit oscillant, 187 et 198.
 Accumulateurs, 21.
 Aériens dirigeables *Artom*, 237.
 Aériens dirigeables *Blondel*, 236.
 Aériens dirigeables *Marconi*, 239.
 Alphabet *Morse*, 354.
 Alternance, 25.
 Alternateurs industriels, 27 et 347.
 Alternateurs à haute fréquence, 82 et 315.
 Alternateur *Villard*, 349.
 Amortissement (Différentes causes d'), 74.
 Amortissement dû aux courants parasites, 77.
 Amortissement dû à l'étincelle, 74.
 Amortissement dû aux pertes dans les condensateurs, 77.
 Amortissement dû à la résistance électrique, 76.
 Ampère, 9.
 Ampèremètre, 9.
 Ampèremètre *Broca*, 371.
 Ampèremètre *Carpentier*, 372.

Ampèremètre *Fleming*, 372.
 Ampèremètres thermiques, 10 et 370.
 Amplitude du mouvement vibratoire, 47.
 Antennes (Différentes formes d'), 200.
 Antennes horizontales, 238.
 Antennes multiples, 202.
 Antenne excitée par un circuit oscillant, 181.
 Antennes réceptrices, 189.
 Antennes transmettrices, 175 et 180.
 Appareils employés pour la réception, 376.
 Arc chantant, 80.
Arco, 248 et 282.
Arsonval (d'), 352.
Artom, 237.
 Audion de *Forest*, 170.

B

Balsillie, 331.
Baretter Fessenden, 147.
Bellini, 241.
Bethenod, 295, 339 et 351.
Bjerkness, 295.
Blanc, 145.
Blondel (A), 79, 81, 140, 236, 295, 351, 439.
Blondlot, 110 et 120.
 Bobines d'accord, 378.
 Bobines d'accouplement, 367 et 377.
 Bobines d'antenne, 368.
 Bobines d'induction ou de *Ruhmkorff*, 41 et 341.
 Bobine *Klingelfuss*, 343 et 346.
 Bobine *Rocheport*, 344.
 Bobines de self-induction, 32.
Böse, 108.
 Bouteille de *Leyde*, 5 et 359.

Branly, 124 et 143.
Braun, 236, 252 et 282.
Brenot, 158 et 293.
Broca, 371.
Brown, 235.

C

Capacité électrique, 4.
Carpentier, 342, 343, 372.
Castelli, 141.
 Champ électrique, 2 et 7.
 Champ électrique oscillant, 68.
 Champ magnétique, 11.
 Champ magnétique oscillant, 68.
 Charge électrique, 3.
 Circuits accordés ou syntonisés, 95.
 Circuits accouplés, 93.
 Circuit compensateur, 301.
 Circuit électrique, 9.
 Circuits intérieur et extérieur, 25.
 Circuit magnétique, 35.
 Circuits oscillants, 65.
 Circuit oscillant intermédiaire, 263.
 Circuit oscillant ouvert, 106.
Code Morse, 354.
 Coefficient d'induction mutuelle, 18.
 Coefficient de self-induction, 19.
 Cohéreurs, 138.
 Cohéreur *Blondel*, 140.
 Cohéreur *Castelli*, 141.
 Cohéreur *Ducretet*, 139.
 Cohéreur *Ferrié*, 140.
 Cohéreur *de Forest*, 142.
 Cohéreur *Lodge*, 125.
 Cohéreur *Lodge et Muirhead*, 141.
 Cohéreur *Marconi*, 130.
 Cohéreur *Popoff*, 139.
 Cohéreur *Tommasina*, 140.
 Cohéreur *Walter*, 142.
Colin, 452.
 Collecteur, 30.
Collins, 311 et 449.
 Communications radiotélégraphiques, 424.
 Commutateur d'antenne, 377.
 Condensateurs, 4 et 357.
 Condensateurs à air, 360.
 Condensateurs *Gaiffe*, 360, 389, 395, 398, 400.
 Condensateurs *Moscicki*, 359, 393, 394.
 Condensateurs à plaques, 360.
 Condensateurs réglables, 6 et 378.
 Condensateurs tubulaires, 359.
 Conductibilité électrique, 8.
 Conductibilité unipolaire, 156.

Constante diélectrique, 357.
 Contre-poids d'antenne, 179.
 Courant alternatif, 25.
 Courant électrique, 8.
 Courants de *Foucault*, 26.
 Courant induit, 17.
 Courbe de résonance mécanique, 89.
 Courbe de résonance électrique, 95.
 Courbes de résonance de l'antenne ré-
 ceptrice, 191.
 Cymomètre *Fleming*, 212.

D

Darras, 386.
 Décharge électrique, 6.
 Décharge oscillante, 69.
Dieckmann, 155.
 Diélectriques, 5.
 Différence de potentiel, 3.
 Différentes formes d'antennes, 200.
 Détecteurs, 378.
 Détecteurs à cristaux, 156.
 Détecteur à cristaux *Brenot*, 158.
 Détecteur à cristaux *Dunwoody*, 156.
 Détecteur à cristaux *Mennier*, 158 et 407.
 Détecteur à cristaux *Pickard*, 157.
 Détecteurs électrolytiques, 151.
 Détecteur électrolytique *Ferrié*, 152.
 Détecteur électrolytique *Jéou*, 154.
 Détecteurs électrolytiques *Telefunken*, 155.
 Détecteurs magnétiques, 159.
 Détecteur magnétique *Ferrié*, 163.
 Détecteur magnétique *Fleming*, 164.
 Détecteur magnétique *Marconi*, 160.
 Détecteur magnétique *Rossi*, 167.
 Détecteur magnétique *Walter*, 166.
 Détecteur magnétique *Walter et Ewing*, 165.
 Détecteurs thermiques, 147.
 Détecteurs thermo-électriques, 149.
 Détecteur thermo-électrique *Drude*, 150.
 Détecteurs à vide, 168.
 Détecteur à vide *Fleming*, 168.
 Détecteur à vide *de Forest*, 170.
 Dispositifs radiotélégraphiques à arc, 297.
 Dispositif radiotélégraphique *Artom*, 237.
 Dispositif radiotélégraphique *Balsillie*, 331.
 Dispositifs radiotélégraphiques *Bellini-Tosi*, 241.
 Dispositif radiotélégraphique *Blondel*, 236.

- Dispositifs radiotélégraphiques *Braun*, 236 et 252.
 Dispositif radiotélégraphique *Brenot*, 293.
 Dispositif radiotélégraphique *C. G. R.*, 293.
 Dispositif radiotélégraphique *Collins*, 311.
 Dispositif radiotélégraphique *Ducretet*, 293.
 Dispositifs radiotélégraphiques à étincelles musicales, 327.
 Dispositifs radiotélégraphiques *Fessenden*, 276, 310 et 315.
 Dispositifs radiotélégraphiques *Fleming*, 263.
 Dispositifs radiotélégraphiques de *Forest*, 279.
 Dispositifs radiotélégraphiques *Galetti*, 325.
 Dispositifs radiotélégraphiques de la *Guerre*, 287.
 Dispositifs radiotélégraphiques de *Lepel*, 313.
 Dispositifs radiotélégraphiques *Lodge* et *Muirhead*, 255.
 Dispositifs radiotélégraphiques *Marconi*, 127, 134, 260, 321, 330.
 Dispositifs radiotélégraphiques de la *Marine*, 289.
 Dispositifs nouvellement employés en radiotélégraphie, 296.
 Dispositifs à ondes entretenues, 297.
 Dispositif radiotélégraphique *Peuckert*, 312.
 Dispositif radiotélégraphique *Paulsen*, 298.
 Dispositif radiotélégraphique *Rocheport*, 292.
 Dispositif radiotélégraphique *Ruhmer*, 311.
 Dispositif radiotélégraphique *Slaby-Arco*, 248.
 Dispositif radiotélégraphique *J. Stone*, 274.
 Dispositif radiotélégraphique *Telefunken*, 282, 307, 334.
 Dispositif radiotélégraphique *Tissot*, 308.
 Dispositif radiotélégraphique *Freeland*, 324.
 Dispositifs employés en radiotéléphonie, 439.
 Dispositif radiotéléphonique *Colin* et *Jeance*, 452.
 Dispositif radiotéléphonique *Collins*, 449.
 Dispositifs radiotéléphoniques *Fessenden*, 435 et 441.
 Dispositif radiotéléphonique de *Forest*, 446.
 Dispositifs radiotéléphoniques *Majorana*, 437 et 447.
 Dispositifs radiotéléphoniques *Poulsen*, 443.
 Dispositif radiotéléphonique *Ruhmer*, 451.
 Dispositif radiotéléphonique *Telefunken*, 445.
Dönitz, 214.
Drude, 150.
Ducretet, 139 et 293.
Duddell, 79, 85 et 149.
Dunwoody, 156.
- E**
- Eccles*, 144.
 Éclateurs, 362.
 Éclateur à coupelles, 365.
 Éclateur à cylindres, 364.
 Éclateurs multiples, 335.
 Éclateurs tournants, 330, 332, 333.
 Electrodes, 65.
 Énergie électrique, 9.
 Énergie rayonnante, 61.
 Enregistreur *Morse*, 131 et 387.
 Ether, 84.
 Expériences de *Marconi*, 127 et 134.
 Expériences de *Marconi* avec antennes horizontales, 240.
 Expériences de *Popoff*, 126.
Ewing, 84 et 165.
- F**
- Facteur d'amortissement, 47.
Ferrié, 140, 145, 152, 163, 207, 217, 287, 356.
Fessenden, 85, 147, 155, 276, 310, 315, 420, 435, 441.
Fleming, 164, 169, 212, 263, 372.
 Force électromotrice, 9.
 Force électromotrice induite, 16.
 Force électromotrice alternative, 24.
Forest (de), 142, 155, 170, 279 et 446.
 Fréquence du courant alternatif, 26.
 Fréquencemètre *Hartmann-Kempf*, 89.
 Fréquence d'un mouvement vibratoire, 47.
 Fréquence des oscillations électriques, 70.

Fréquence propre d'oscillation d'un circuit, 71.

G

Gaiffe, 346, 352, 360, 389, 395, 398, 400.
Galetti, 325.
 Galvanomètres, 149.
Garcia, 288.
 Générateurs électriques, 21.
Gatthe, 146.

H

Hartmann, 89.
Hertz (H.), 104.

I

Impédance, 33.
 Induction électromagnétique, 15.
 Induction mutuelle, 17.
 Induction propre, 18.
 Influence du soleil sur les communications radiotélégraphiques, 424.
 Influence du terrain sur les communications radiotélégraphiques, 427.
 Intensité du courant électrique, 9.
 Interférence des rayons électriques, 113.
 Interrupteurs pour bobines d'induction, 345.
 Interrupteur de l'A. E. G., 347.
 Interrupteur *Gaiffe*, 346.
 Interrupteur *Klingelfuss*, 346.
 Interrupteur *Lévy*, 347.
Ives, 155.

J

Janet (P.), 79.
Jeance, 452.
Jégou, 154.

K

Kempf, 89.
Klingelfuss, 343.
Kummetre Fleming, 212.

L

Lebedew, 108.
Leblanc, 84.
Lecher, 119.
Lepel (de), 313.
Lessing, 155.
Lévy (Max), 347.
 Lignes de force électriques, 7.
 Lignes de force magnétiques, 12.
Lodge (Sir O.), 125, 141, 144, 255.
 Longueur d'onde, 55.

M

Machines à courant alternatif, 23.
 Machines à courant continu, 28.
Macku, 155.
Magunna, 382.
Majorama, 437 et 447.
 Manipulateurs, 353.
 Manipulateur automatique, 355.
 Manipulateur *Ferrié*, 351.
 Manipulateurs *Marconi* et *Telefunken*, 355.
Marconi, 127, 134, 160, 240, 260, 321, 330, 421.
Mercadier, 382.
 Mesure de l'intensité du courant, 370.
 Mesure des longueurs d'onde, 207.
 Mesure de la tension, 373.
Meunier, 158 et 407.
 Microfarad, 357.
 Microphone, 433.
 Modèle mécanique représentant une antenne à excitation indirecte, 185.
 Modes d'emploi des antennes transmettrices, 180.
 Modes d'emploi des antennes réceptrices, 194.
 Monotéléphones, 382.
Morse, 354.
Morse (enregistreur), 131 et 387.
Mosicki, 393 et 394.
 Mouvement vibratoire harmonique, 45.
 Mouvement vibratoire amorti, 46.
Muirhead, 141 et 255.
 Multiplicateur *Slaby*, 211.

N

Nœuds d'oscillation, 116.
 Nœuds de courant ou de tension dans l'antenne, 177.

O

Ondemètre C. G. R., 374.
 Ondemètre *Dönitz*, 214.
 Ondemètres *Ferrié*, 217.
 Ondemètres *Fleming*, 212.
 Ondemètre *Marconi*, 216.
 Ondemètre *Péri*, 223.
 Ondemètre *Seibt*, 209.
 Ondemètre *Slaby*, 211.
 Ondes électromagnétiques, 100.

Ondes stationnaires, 116.
 Oscillateur de *Hertz*, 104.
 Oscillations amorties, 68.
 Oscillations électriques, 68.
 Oscillations électromagnétiques, 68.
 Oscillations entretenues, 78.
 Oscillations forcées, 87.
 Oscillations libres, 87.

P

Parole (Production de la), 430.
Péri, 223.
Périkon, 157.
 Période d'un courant alternatif, 25.
 Période d'un mouvement vibratoire, 47.
 Période des oscillations électriques, 70.
 Période propre d'oscillation d'un circuit, 71.
 Période propre d'oscillation d'une antenne, 177.
 Perméabilité magnétique, 14.
Peuckert, 312.
 Phase du mouvement vibratoire, 48.
 Phénomènes en jeu dans les antennes transmettrices, 175.
 Phénomènes en jeu dans les antennes réceptrices, 189.
Pickard, 157.
Pierce, 156.
 Piles électrochimiques, 21.
 Piles thermoélectriques, 22.
Poincaré, 295.
Popoff, 126 et 139.
 Poste radiotélégraphique d'Alger, 403.
 Poste radiotélégraphique de Boulogne, 408.
 Poste radiotélégraphique de Clifden, 423.
 Postes radiotélégraphiques côtiers français, 471.
 Poste radiotélégraphique de Cullercoats, 415.
 Postes radiotélégraphiques *Fessenden*, 420.
 Poste radiotélégraphique de Glace Bay, 423.
 Postes radiotélégraphiques de la *Guerre*, 388.
 Poste radiotélégraphique de Knockroe, 419.
 Poste radiotélégraphique de Lyngby, 413.
 Postes radiotélégraphiques *Marconi*, 421.
 Postes radiotélégraphiques de la *Marine*, 396.

Poste radiotélégraphique de Nauen, 410.
 Poste radiotélégraphique de Poldhu, 421.
 Postes radiotélégraphiques des *Postes et Télégraphes*, 403.
 Postes radiotélégraphiques *Poulsen*, 412.
 Poste radiotélégraphique de Saintes-Maries, 403.
 Postes radiotélégraphiques *Telefunken*, 408.
 Poste radiotélégraphique de Toulon, 396.
 Poste radiotélégraphique de la Tour Eiffel, 390.
 Potentiel, 2.
Poulsen, 81, 298, 412 et 443.
 Propagation des ondes dans l'espace, 111.
 Propagation des ondes dans les fils, 117.
 Propriétés des différents détecteurs, 173.

R

Radiation, 50.
 Radiation chimique, lumineuse et calorifique, 57.
 Radiation électrique, 106.
 Radioconducteur *Branly*, 124.
 Radiotélégraphie, 123.
 Radiotélégrammes (Rédaction, taxation, transmission), 460 et 462.
 Radiotéléphonie (Considérations générales), 429.
 Radiotéléphonie (Principe), 434.
 Radiotéléphonie (Historique), 435.
 Rapport de transformation, 38.
 Rayonnement, 50.
 Rayons électriques, 60.
 Récepteurs, 381.
 Récepteur-enregistreur *Poulsen*, 305.
 Récepteur *Marconi*, 129.
 Récepteur téléphonique, 141.
 Réflexion des rayons électriques, 111.
 Réfraction des rayons électriques, 112.
 Règlement de service des postes radiotélégraphiques, 457.
Reich, 81 et 155.
 Relais, 131.
 Relais à cadre mobile, 385.
 Relais *Darvas*, 386.
 Relais monotéléphonique *Mercadier-Magnana*, 382.
 Relais à palette mobile, 384.
 Relais téléphonique *Telefunken*, 383.
 Réductance, 15.
 Remarques sur l'accouplement des antennes, 199.

Répartition de l'énergie autour d'une antenne horizontale, 240.
 Répartition de la tension le long d'une antenne, 178.
 Résistance électrique, 8 et 11.
 Résistance inductive, 33.
 Résonance électrique, 91.
 Résonance d'un circuit oscillant, 92.
 Résonance mécanique, 86.
 Résonance primaire, 267.
 Résonateur de Hertz, 108.
 Rhéostat, 11.
 Righi, 108 et 110.
 Rigidité diélectrique, 357.
 Rive (de la), 119.
 Rochefort, 292 et 344.
 Rôle de la terre, 204.
 Rossi, 167.
 Rothmund, 155.
 Ruhmer, 311 et 451.
 Rupteur Carpentier, 345.
 Rutherford, 159.

S

Salomons, 84.
 Sarrasin, 119.
 Seibt, 208 et 351.
 Self-induction, 17.
 Shaw, 144.
 Signaux d'appel ou de détresse, 462.
 Silicium, 157.
 Simon, 81.
 Slaby, 211, 248 et 282.
 Sons (Production des), 430.
 Soufflage magnétique de Pare, 79.
 Stations radiotélégraphiques (voir Postes).
 Steinmetz, 84.
 Stone (J. Stone), 274.
 Syntonie, 225.
 Systèmes (voir Dispositifs).
 Systèmes syntonisés, 226.
 Systèmes à élimination, 232.
 Systèmes à ondes dirigées, 234.

T

Télégraphie sans fil (voir Radiotélégraphie).

Telefunken, 282, 307, 334 et 445.
 Téléphone, 381 et 433.
 Téléphonie avec fils, 432.
 Téléphonie sans fils (voir Radiotéléphonie).
 Tension électrique, 3.
 Terre (Prise de), 375.
 Tesla, 83.
 Théorie du fonctionnement des cohérents, 143.
 Théorie du fonctionnement des détecteurs électrolytiques, 155.
 Thermogalvanomètre Duddell, 149.
 Thomson (E.), 78 et 84.
 Thury, 84.
 Tikker, 304.
 Tissot, 163, 289, 295 et 308.
 Tomassina, 140.
 Tosi, 241.
 Tour Eiffel (Poste radiotélégraphique de la), 390.
 Transformateurs, 35.
 Transformateurs à fuites, 351.
 Transformateurs Gaiffe, 352.
 Transformateurs industriels, 350.
 Tubes à vide, 120.

V

Variomètre, 337 et 368.
 Varley, 125.
 Ventres d'oscillation, 116.
 Ventres de courant ou de tension dans l'antenne, 177.
 Villard, 349.
 Vitesse de propagation des ondes, 56.
 Volt, 9.
 Vreeland, 324.

W

Walter, 142 et 165.
 Wien, 295.
 Wilson, 163.

Z

Zenneck, 295.

