

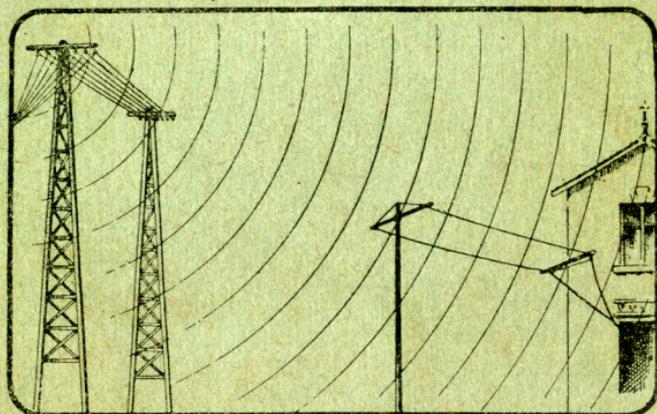
MICHEL ADAM

Ingénieur E. S. E.

LES ONDES RADIOELECTRIQUES

NOTIONS PRATIQUES
A PORTÉE DE TOUS

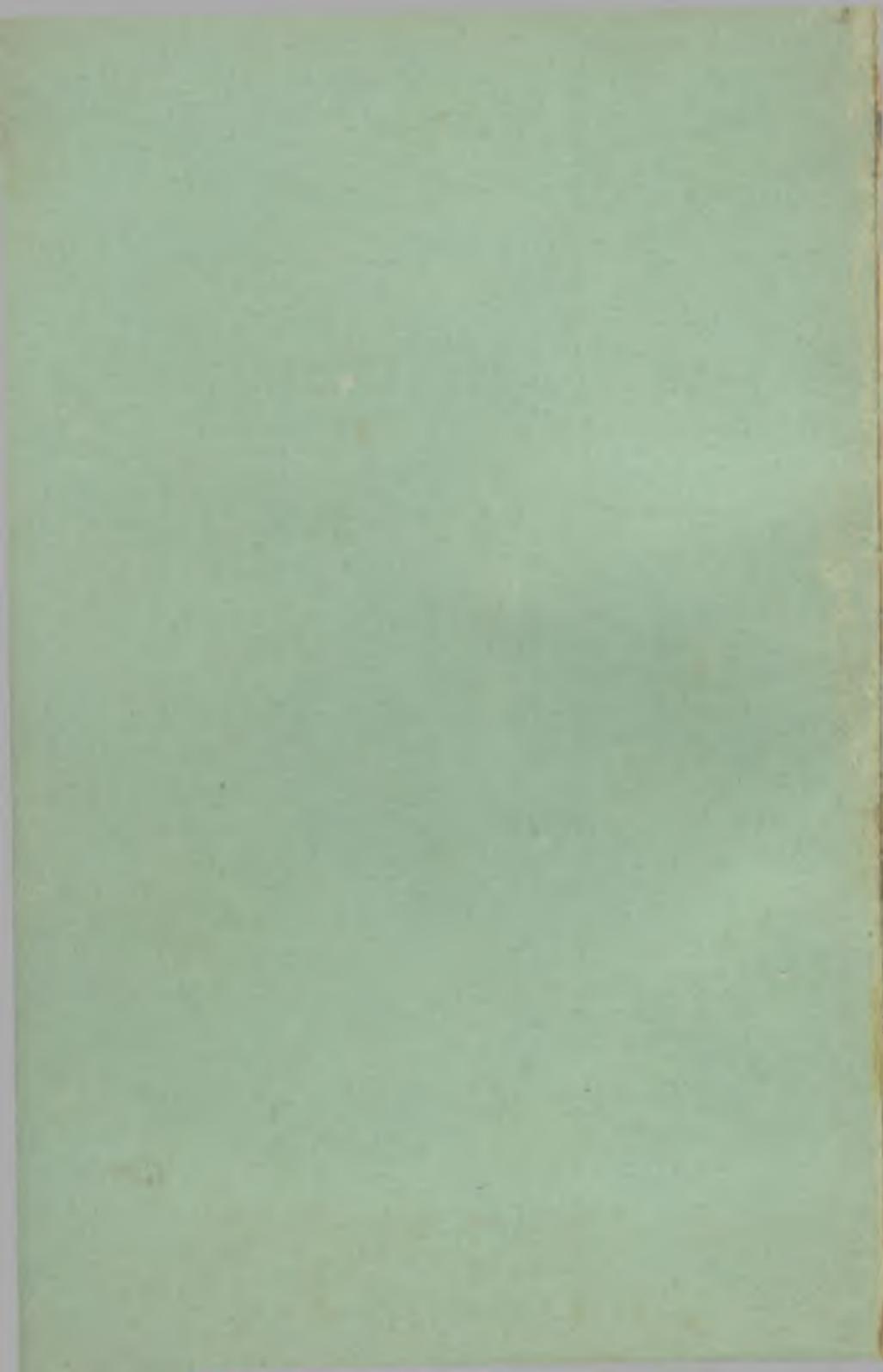
Préface de PAUL JANET



PARIS

Étienne CHIRON, éditeur

40, rue de Seine



MICHEL ADAM

Ingénieur E. S. E.

Rédacteur en chef de *Radioélectricité*.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

NATURE - PROPRIÉTÉS - ANALOGIES

NOTIONS TRÈS PRATIQUES A LA PORTÉE DE TOUS

PRÉFACE DE M. PAUL JANET

Directeur du Laboratoire central et de l'École Supérieure d'Électricité.

BIBLIOTHÈQUE DE *RADIOÉLECTRICITE*

*Tous droits de reproduction réservés en France et à l'Étranger.
Copyright by Michel Adam.*

PRÉFACE



Voici un petit livre de vulgarisation qui arrive à son heure. Il rendra les plus grands services à un grand nombre des innombrables amateurs qui s'occupent aujourd'hui de la télégraphie et de la téléphonie sans fil et qui, allant au plus pressé, se sont dirigés tout droit vers les résultats à obtenir sans trop se préoccuper des moyens employés et de la base scientifique sur laquelle ils reposent.

La vulgarisation est une arme à deux tranchants : mal employée, elle donne l'illusion de la science, sans être la science même ; bien employée, elle doit faire naître le désir d'aller plus loin et d'approfondir des notions exactes, mais qu'elle ne fait qu'indiquer. En tout cas, pour être de bon aloi, elle doit être présentée par un auteur qui cache derrière elle une science profonde et sûre. Nous avons l'assurance que tel est le cas pour le petit livre que nous présentons aujourd'hui au public : sans avoir la prétention de vouloir remplacer les théories rigoureuses dont on ne peut se passer lorsqu'on veut véritablement dominer les faits, il donne sur l'explication de ces faits une idée d'ensemble qui est loin d'être inutile et qui, j'en suis certain, donnera à plus d'un l'ambition de poursuivre ces études si attachantes. C'est donc bien volontiers que nous présentons au public l'ouvrage de notre ancien élève, M. Michel Adam, en lui souhaitant tout le succès qu'il mérite.

31 mars 1925.

P. JANET.

INTRODUCTION



Il n'est guère plus de gens, quels que soient leur degré d'instruction et leurs aptitudes, qui ne s'intéressent au progrès ininterrompu des sciences physiques. Les réalités qu'elles nous apportent dépassent souvent de beaucoup les rêves des féeries, et l'effet de leurs conséquences est incalculable.

On comprend aisément la faveur dont jouissent auprès du public les découvertes nouvelles, que chacun essaye de s'assimiler dans la mesure de ses moyens. Par malheur, ces moyens sont généralement fort limités : à mesure que la science progresse, ses découvertes deviennent plus subtiles ; elles tendent à devenir intangibles, insaisissables, inconcevables, parce qu'elles échappent à nos sens et sortent souvent des limites de l'entendement commun.

Nous ne comprenons facilement que les phénomènes qui tombent sous nos sens : c'est la raison pour laquelle nous saisissons rapidement les applications de la mécanique, qui se révèlent à nos yeux par la forme et par le mouvement. En ce qui concerne les autres phénomènes, nous devons, pour en avoir une idée, en imaginer une représentation mécanique. Il n'a été donné à personne de voir ni d'entendre directement les rayons X et les ondes hertziennes : il est pourtant possible de les concevoir en se basant sur leurs propriétés caractéristiques et en s'aidant d'analogies commodes et fécondes.

L'essor actuel de la radiophonie incite nombre de gens à se documenter sur la question : c'est là un louable effort. Mais combien parmi eux referment le livre à peine entr'ouvert et doivent renoncer à en pénétrer le sens ? La plupart des ouvrages qui traitent du nouveau sujet ne sont pas écrits à l'intention du grand public.

La tâche que nous entreprenons aujourd'hui vise à exposer sous la forme la plus simple les phénomènes essentiels qui se manifestent en radioélectricité. Dans cette intention, nous avons eu recours à un grand nombre d'images et d'analogies familières susceptibles d'illustrer l'explication et de rendre le sujet lumineux.

Les premières études, inspirées par la suite d'articles que nous avons récemment publiés dans *Radioélectricité*, sont consacrées aux ondes radioélectriques, à leur nature et à leur propagation, que nous analysons en détail. Puis viennent des notions sur la transmission et la réception des ondes, ainsi que sur la vibration des antennes. Nous exposons ensuite les principes essentiels des transmissions radiophoniques, les procédés de modulation et le rôle de la longueur d'onde, les circonstances naturelles qui facilitent ou entravent la propagation des ondes. Les deux derniers chapitres traitent de deux questions nouvelles qui sont à l'ordre du jour : les communications simultanées multiplex le long des réseaux de lignes métalliques et la concentration des ondes en faisceaux dirigés.

Nous sommes heureux d'exprimer ici à notre éminent professeur, M. Paul Janet, toute notre reconnaissance pour la clarté de son enseignement, qui nous a révélé le sens physique des phénomènes électriques, et notre bien vive gratitude pour avoir bien voulu présenter au public ce petit ouvrage.

M. ADAM.

INITIATION A LA RADIOÉLECTRICITÉ

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

NATURE · PROPRIÉTÉS · ANALOGIES

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES ONDES

LES VIBRATIONS ET LES ONDES. — L'ÉCHELLE DES FRÉQUENCES. — LES TRANSMISSIONS SANS FIL. — QU'EST-CE QUE L'ÉTHER. — UN MODE DE TRANSMISSION A GRANDE PORTÉE. — LA NATURE DES ONDES. — ÉLÉMENTS CARACTÉRISTIQUES DES ONDES. — FRÉQUENCE DE LA VIBRATION ET LONGUEUR D'ONDE.

La physique, telle que nous la présente l'enseignement, est à vrai dire une science tant soit peu géométrique et souvent très mathématique. On aime à nous montrer un rayon lumineux sous la forme d'un trait de craie tracé sur un tableau noir : il n'en est pas moins vrai que ce rayon lumineux a une existence physique dont ne peut tenir compte aucun schéma. À mesure que s'étend le champ des connaissances, la physique quitte un peu son apparence géométrique pour prendre

une physionomie propre. Chacun des champs qu'elle explore ne nous apparaît plus comme un domaine réservé entouré de haies épaisses et de fossés profonds. Nous avons plutôt l'impression de découvrir un panorama sans bornes ; la vue s'étend sur les différents champs, et l'on aperçoit l'ordre dans lequel ils sont groupés. Ils s'appellent pesanteur, optique, électricité, magnétisme, lumière, que sais-je encore ? Leurs séparations ne sont pas des solutions de continuité, mais plutôt d'harmonieuses transitions, et leur groupement forme l'immense domaine de la physique, qui englobe l'ensemble des phénomènes naturels.

De cette vue panoramique à travers la physique, nous retenons surtout un fait, qui domine tous les autres : la nature profonde, l'origine de tous les phénomènes naturels paraît être la vibration. Tout est vibration : soit qu'il s'agisse à proprement parler d'une oscillation, soit qu'il s'agisse de la propagation d'un mouvement vibratoire, c'est-à-dire d'une onde. Vibrations mécaniques et électriques, ondes élastiques (ondes sismiques, vagues de la mer, marées), ondes sonores, ondes électriques, ondes calorifiques, ondes lumineuses, ondes radiologiques (rayons X) et radioactives : tout est vibration.

Or les vibrations mécaniques sont connues depuis des siècles : les ressorts en sont des applications fort anciennes ; les ondes sismiques et les marées sont étudiées depuis l'origine des temps, et il en serait de même des ondes sonores, puisque la musique, dit-on, aurait été inventée par Tubal Caïn. Il a fallu attendre le XIX^e siècle et les travaux de Fresnel pour entendre parler des ondes lumineuses ; l'étude des vibrations électriques a suivi de près avec la découverte de l'induction et du courant alternatif. Les travaux sur les ondes lumineuses se poursuivent avec les ondes radiologiques

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

et radioactives, après les découvertes de Rœntgen et de Curie. La dernière venue est la science des ondes électriques ou radioélectricité, qui complète heureusement le vaste domaine de la physique, où elle restait encore inexplorée, il y a seulement trente ans.

Il nous est nécessaire d'ouvrir ici une parenthèse pour exposer l'aspect sous lequel se présente cette multitude de phénomènes physiques, car ils se succèdent

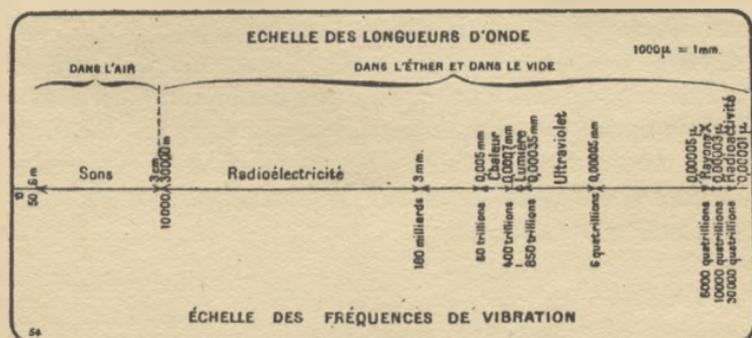


Fig. 1. — ÉCHELLES COMPARÉES DES LONGUEURS D'ONDE ET DES FRÉQUENCES DE VIBRATION DES DIVERSES RADIATIONS CONNUES. — Les chiffres qui indiquent les fréquences expriment le nombre de périodes de vibration par seconde. — Les longueurs d'onde sont évaluées suivant leur grandeur en mètres (*m*), millimètres (*mm*) ou millièmes de millimètre (*μ*).

dans un ordre à la fois logique et rigoureux. Considérés au point de vue de leur caractère oscillant, un élément essentiel suffit à les classer : la fréquence des mouvements vibratoires, c'est-à-dire le nombre de ces mouvements de va-et-vient exécutés par seconde dans chacun des ordres de phénomènes. Nous reviendrons d'ailleurs plus longuement sur cette notion. La gamme des phénomènes vibratoires peut ainsi être assimilée à une échelle, dont les échelons seraient les fréquences de vibration : le clavier du piano nous représente une fraction (ô combien petite !) de cette gigantesque échelle, sept octaves

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

seulement. De bas en haut de l'échelle, les phénomènes vibratoires se succèdent dans l'ordre suivant : les vibrations mécaniques, les sons, les ondes électriques, les ondes calorifiques, les ondes lumineuses, les ondes ultra-violettes, les rayons X, la radioactivité. Le dessin schématique que nous en donnons (fig. 1) fera comprendre aisément l'énorme portée de cette gamme fantastique, qui couvre plus de 64 octaves !

Voilà donc située et identifiée cette nouvelle science ; la radioélectricité, qui se classe entre la musique, d'une part, et la chaleur et la lumière, d'autre part, n'a donc rien de mystérieux et ne peut que bénéficier du charme de la première et de la clarté de la seconde. Nos lecteurs connaissent toutes les applications de cette science, dont nous ne visons à leur expliquer que les phénomènes essentiels.

*
* * *

On sait que la radiophonie, comme sa sœur aînée la radiotélégraphie, est basée sur la propagation des ondes radioélectriques, appelées couramment ondes hertziennes et, plus précisément, ondes électromagnétiques.

Il semble, si l'on s'en rapporte à la généralité des avis exprimés par le grand public, qu'il y ait quelque chose de mystérieux et d'obscurément caché dans la nature de ces ondes : beaucoup de gens, pour qui tous les phénomènes électriques restent inexplicables, se refusent à se laisser initier aux phénomènes radioélectriques : rien n'est plus simple cependant, si l'on fait appel à des comparaisons élémentaires, bien que ces phénomènes ne soient pas directement sensibles et que le corps humain ne possède aucun sens électrique ou radioélectrique.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

Par quel secret mécanisme s'établissent les communications sans fil? Telle est l'objection, formulée ou non, qui se présente naturellement à l'esprit. Alors que de toutes parts les courants électriques aux multiples applications sont captés par des fils conducteurs, il semble inconcevable de réaliser une communication électrique sans liaison métallique conductrice.

Ce paradoxe plus apparent que réel tient à ce que les phénomènes radioélectriques sont d'une nature différente des phénomènes produits par les courants continus et alternatifs industriels, sans que toutefois ils présentent avec ces derniers aucune solution de continuité. Il n'est même pas nécessaire d'invoquer les phénomènes électriques pour faire comprendre le mécanisme des phénomènes radioélectriques.

*
* *

Nous avons à toute heure sous les yeux la manifestation de communications sans fil. Une conversation à haute voix peut s'établir entre deux personnes situées à quelques mètres l'une de l'autre, sans qu'aucun fil les réunisse ; on sait que, en ce cas, la parole est transmise par la couche d'air qui sépare les deux interlocuteurs et que les ondes sonores émises par la bouche de l'un viennent impressionner le tympan de l'autre. Le son peut d'ailleurs être transmis tout aussi bien par les corps liquides et solides, notamment par l'eau et par les métaux ; par contre, le son ne se propage pas dans le vide, comme le démontre l'expérience très simple qui consiste à placer une sonnerie électrique sous la cloche d'une machine pneumatique.

Nous trouverons encore très facilement un autre exemple non moins caractéristique que celui du son : c'est celui de la propagation de la lumière. Nous ne

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

sommes reliés par aucun fil au soleil, qui nous transmet pourtant une énorme quantité de lumière et, ce qui est encore mieux, toute l'énergie dont nous savons disposer.

On a mis à profit cette constatation en réalisant d'après elle sur ce principe d'utiles communications sans fil : cette dénomination est très justement applicable aux signaux des phares et au télégraphe lumineux de Chappe.

Par quel mécanisme se propage donc la lumière ? Ce n'est pas l'air qui la véhicule, car elle nous arrive du soleil à travers les espaces interplanétaires qui réalisent un vide aussi complet que nous pouvons l'imaginer ; d'ailleurs, la lumière artificielle est diffusée par la lampe électrique à travers le vide de l'ampoule.

Par contre, il est manifeste que la matière, qu'elle soit à l'état solide, liquide ou gazeux, est un obstacle plus ou moins considérable à la propagation de la lumière.

Les recherches scientifiques ont amené à admettre l'existence d'un milieu impondérable, l'éther, qui se trouverait universellement répandu dans tout l'espace, même dans le vide le plus absolu. Ceci implique, par conséquent, que ce milieu ne possède aucune des propriétés de la matière et, en particulier, aucune inertie.

De même que l'air et la matière transmettent les ondes sonores, l'éther transmet les ondes lumineuses et, comme nous allons le voir, les ondes radioélectriques, qui sont de nature identique à la lumière.

* * *

Il semble bien difficile *a priori* de donner une définition précise de ce fluide, l'éther des physiciens, que l'on n'est jamais parvenu à voir, ni à peser, ni à isoler. Cependant, de même que l'on peut reconnaître d'après un portrait littéraire une physionomie inconnue, de

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

même nous pouvons essayer de vous révéler l'éther d'après quelques-unes de ses propriétés les plus tangibles. Henri Poincaré, qui excellait à rendre aisément compréhensibles les phénomènes les plus subtils et les plus complexes, nous a représenté très simplement les propriétés de l'éther.

Les théories les plus récentes sur la constitution de la matière nous apprennent que tous les corps solides, liquides ou gaz, métalloïdes et métaux, sont composés d'un très grand nombre de corpuscules, qui non seulement ne sont pas contigus, mais encore sont très éloignés les uns des autres. La densité moyenne de ces corpuscules est assez variable et dépend notamment de l'état du corps examiné : au sein des gaz, cette densité est plus faible qu'au milieu des liquides et des solides. Mais, dans tous les cas, on peut dire que la constitution corpusculaire de la matière est analogue à celle d'un système planétaire : la distance de deux corpuscules est aussi grande par rapport à leurs dimensions moyennes que la distance de deux astres par rapport à leurs diamètres.

Sous quel aspect pouvons-nous donc imaginer l'éther ? — C'est un milieu infiniment plus ténu que la matière et nous savons qu'il pénètre et qu'il baigne en quelque sorte tous les corps. Nous pouvons donc le concevoir sous la forme d'une poussière de grains infiniment plus petits et plus mobiles que les corpuscules matériels. Nous comprenons alors comment l'éther se trouve répandu partout : les grains qui le composent circulent entre les corpuscules matériels aussi librement qu'une planète au milieu des étoiles et qu'une nappe d'eau à travers un grillage. La matière se laisse imprégner par l'éther comme une éponge par l'eau.

Mais comment pouvons-nous expliquer que les vibrations de l'éther, qui se transmettent facilement

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

à travers la plupart des corps, soient arrêtées par une simple paroi métallique, alors qu'elles traversent des murs de pierre? Un phénomène nouveau intervient lorsque les agitations de l'éther rencontrent sur leur passage un corps conducteur : elles s'y heurtent en effet à un autre fluide, l'électricité, que l'on peut également s'imaginer comme constitué par une infinité de grains beaucoup plus fins que les corpuscules maté-

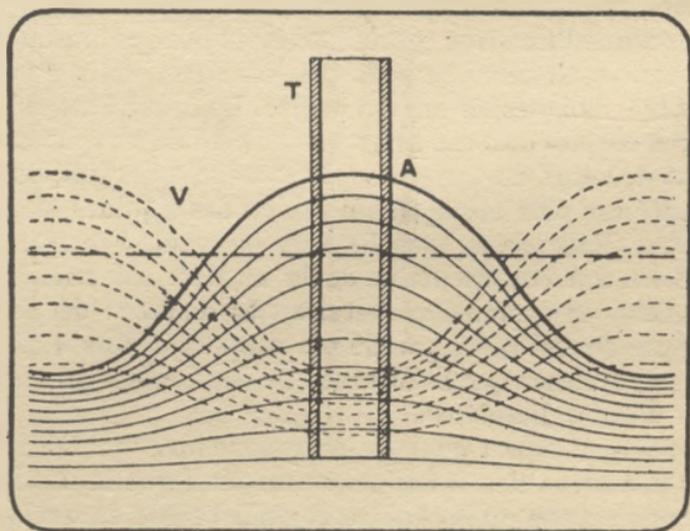


Fig. 2. — OSCILLATIONS DE L'EAU DANS UN TUBE AU PASSAGE DE VAGUES. — A, niveau de l'eau ; T, tube de verre ; V, vague.

riels. Lorsque les grains d'éther tentent de pénétrer à travers un corps conducteur, ils entraînent dans leur agitation les grains d'électricité, dont le mouvement à la surface du métal crée un courant électrique.

Ce mouvement d'entraînement moléculaire possède de nombreuses analogies mécaniques. On peut concevoir les vibrations de l'éther comme des vagues liquides ; si nous plaçons perpendiculairement à la surface d'une

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

eau agitée un large tube de verre ouvert aux deux bouts, nous voyons le niveau de l'eau dans le tube suivre exactement le mouvement des vagues, monter et descendre avec leurs crêtes. Le tube de verre nous donne l'image d'un fil métallique, dans lequel les vibrations de l'éther induisent un courant alternatif d'électricité (fig. 2).

Inversement, si à l'aide d'un piston, par exemple, nous produisons artificiellement une variation alter-

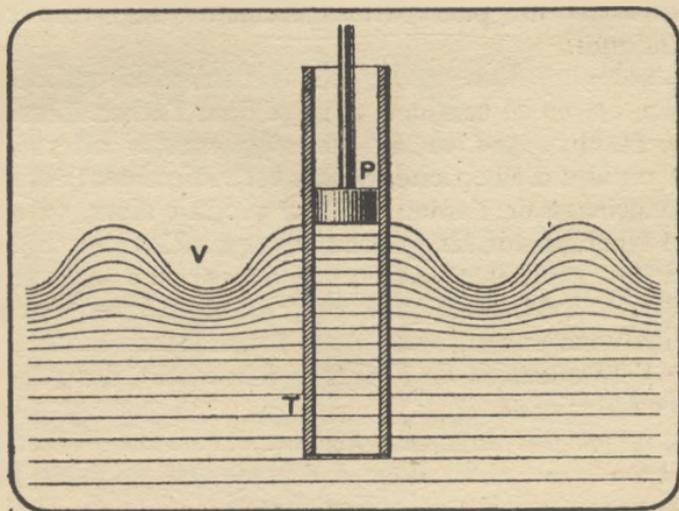


Fig. 3. — VAGUES PROVOQUÉES PAR UN PISTON DÉPLACÉ DANS SON CORPS DE POMPE. — T, tube ; P, piston ; V, vagues.

native du niveau de l'eau dans le tube de verre, nous créons une série de vagues à la surface de l'eau où il plonge (fig. 3). Transposons ce résultat dans le domaine électrique : si l'on fait passer dans un fil conducteur un courant alternatif, on provoque le déplacement des molécules d'éther qui baignent ce fil et l'ébranlement de l'éther au voisinage de ce fil. On peut encore donner de ce phénomène une image très simple : si

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

nous imprimons un mouvement longitudinal de va-et-vient à un crayon que nous serrons dans le poing, nous constatons que les rides de la peau sont entraînées dans le mouvement, comme les vagues de l'éther sont brassées par le courant alternatif dans le fil conducteur.

Nous avons dès lors un aperçu du rôle que joue l'éther dans la transmission des vibrations lumineuses, calorifiques et, plus particulièrement, des vibrations électriques.

L'antenne d'un poste de transmission radioélectrique est un fil conducteur noyé dans l'éther. Lorsque l'on établit dans ce fil des mouvements alternatifs très rapides d'électricité, l'éther est violemment ébranlé au voisinage de l'antenne. Il se produit alors, au sein de l'éther, des ondes qui sont comparables aux vagues que l'on produit en agitant vivement une eau tranquille. Si, à une certaine distance de notre antenne, nous en dressons une seconde, nous constaterons facilement que l'ébranlement de l'éther y fera naître des oscillations électriques.

L'image des déplacements corrélatifs de l'éther et de l'électricité suffit donc à donner une première idée d'une transmission radioélectrique.

*
* *

Cependant, aucun des deux modes de transmission que nous venons d'envisager, son et lumière, ne peut donner entièrement satisfaction. Le son des cloches les plus puissantes est étouffé dans un rayon de quelques kilomètres autour du clocher. La lumière du phare, qui réalise des portées beaucoup plus considérables, se disperse encore avec une trop grande facilité ; d'ailleurs, la brume et les nuages l'absorbent rapidement.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

Le problème de la transmission consistait à trouver un mode de propagation possédant les qualités de la lumière sans être susceptible d'une dispersion et d'une absorption aussi intense. On conçoit que la solution d'un tel problème se soit fait attendre pendant plus de quarante siècles ! L'humanité, en effet, a su dès les premiers âges émettre des sons et les entendre, produire de la lumière et la voir : ce n'est que de nos jours qu'elle apprit à émettre des ondes radioélectriques et à les recevoir, parce que, si nous avons des yeux et des oreilles, nous ne possédons pas de *sens radioélectrique*, de même que nous n'avons pas de sens électrique. Ce n'est pas un mal irréparable, parce que nous savons y suppléer courageusement par l'invention d'appareils qui traduisent à nos sens les phénomènes électriques qui ne leur sont pas directement perceptibles : le voltmètre, l'ampèremètre, le téléphone, qui sont d'un usage constant dans la pratique industrielle, font de notre œil un véritable sens électrique. D'autres appareils jouent le même rôle et rendent des services analogues : tels sont notamment les détecteurs d'ondes radioélectriques.

*
* *

Qu'est-ce donc que les ondes radioélectriques et, tout d'abord, qu'est-ce que les ondes ?

Il est d'usage de répondre à ces questions en faisant appel à l'analogie. Certes, ce ne sont pas les comparaisons classiques qui font défaut ; mais elles ont déjà été fort exploitées, et le lecteur nous saura gré de n'y revenir que très brièvement.

On sait que, lorsque l'on jette une pierre à la surface d'une eau tranquille, on y produit une série de rides concentriques dont les cercles vont en s'élargissant et en s'affaiblissant avec une vitesse constante. Ces rides

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

sont formées par des bourrelets d'eau, qui présentent, par rapport au niveau moyen, l'aspect de *talus* et de *fossés* successifs. D'où le nom d'*ondes élastiques* qui leur

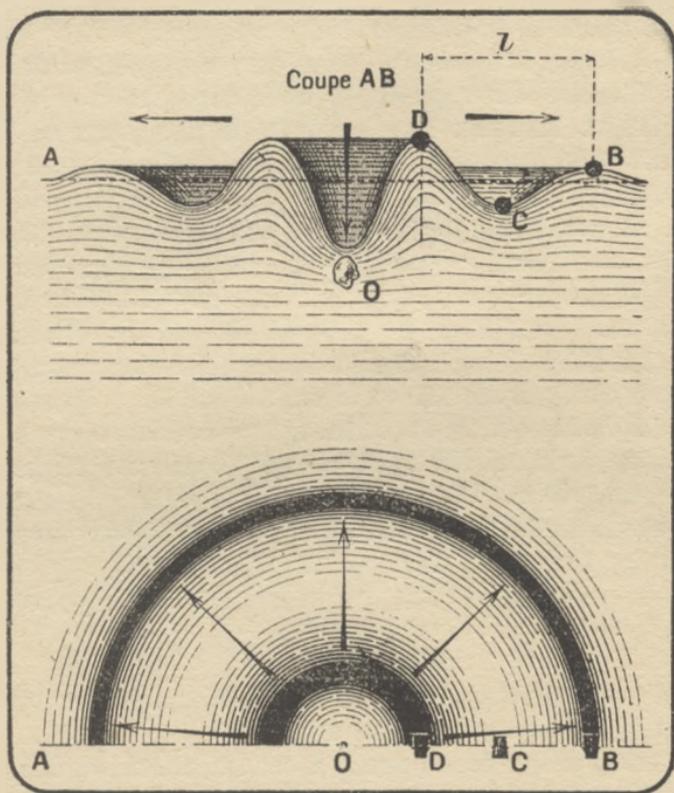


Fig. 4. — PROPAGATION DANS L'EAU D'UN TRAIN D'ONDES AMORTIES PROVOQUÉ PAR LA CHUTE D'UNE PIERRE EN O. — AB, coupe diamétrale; B, C, D, bouchons de liège se déplaçant verticalement; $BD = l$, longueur d'onde. Les flèches indiquent la propagation.

est donné, en raison de l'ondulation qui se propage à la surface de l'eau. On dit que ces ondes *rayonnent* à l'entour de la source, c'est-à-dire de leur origine. A mesure

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

que les ondes se propagent, leurs cercles s'élargissent, ce qui explique pourquoi leur intensité diminue : les talus s'effondrent en comblant les fossés (fig. 4 et 5).

Ces observations élémentaires effectuées sur des ondes visibles nous permettent de concevoir les propriétés générales des ondes invisibles, inaudibles et imperceptibles, de quelque nature qu'elles soient :

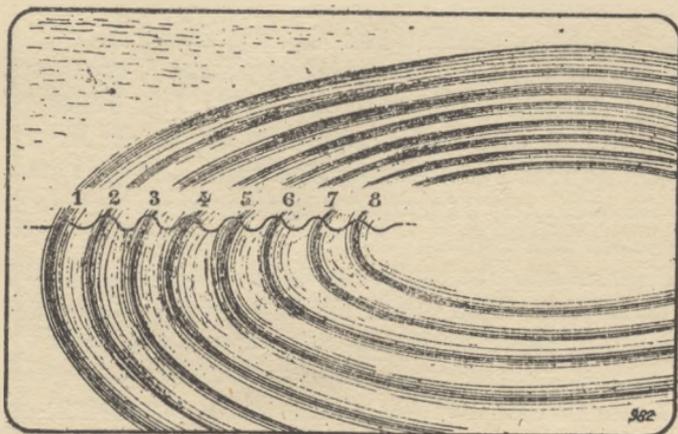


Fig. 5. — ONDES ÉLASTIQUES PRODUITES A LA SURFACE DE L'EAU PAR LA CHUTE D'UNE PIERRE. — Les ondes successives se suivent dans l'ordre indiqué. L'intensité varie à l'inverse du diamètre.

ondes sonores, ondes lumineuses, ondes radioélectriques ; car, s'il est vrai que nous voyons la lumière, par définition, il n'en est pas moins exact que la forme même des ondes lumineuses échappe à l'acuité de notre œil, au moins directement.

Remarquons cependant que, tandis que les rides se propagent à la surface de l'eau, les ondes sonores, lumineuses, radioélectriques se transmettent dans tout l'espace, où elles prennent la forme de sphères concentriques. Comme les phénomènes relatifs aux ondes n'intéressent qu'une petite région de l'espace, on peut ad-

mettre qu'en chaque point de l'espace les ondes sont planes et que leurs plans sont parallèles à la direction de la propagation.

Le mouvement de propagation des ondes n'apparaît pas clairement lorsque l'on regarde les rides de l'eau : aussi indiquerons-nous plus loin un procédé qui permet de reproduire très simplement le mouvement des ondes et de l'étudier à loisir.

Rappelons seulement l'expérience classique qui consiste à observer le mouvement apparent d'un bouchon de liège flottant à la surface de l'eau. Les ondes élastiques qui prennent naissance à la chute de la pierre communiquent à ce bouchon des oscillations qui l'élèvent et l'abaissent régulièrement à la surface du liquide sans le déplacer aucunement dans le sens horizontal.

Ceci nous montre que les ondes élastiques ne sont pas des bourrelets d'eau qui se déplacent en bloc, en entraînant à leur suite les objets flottants, mais plutôt des oscillations à la surface du liquide, oscillations régulières qui se propagent en rides concentriques avec une vitesse déterminée. Si l'on jette une pierre le long du bord d'un canal de largeur connue, il suffit, pour calculer cette vitesse, de compter le temps que mettent les ondes pour se propager jusqu'à l'autre bord.

La vitesse de propagation des ondes élastiques est faible. Les ondes sonores vont plus vite et parcourent dans l'air approximativement 330 mètres par seconde, comme il est facile de s'en rendre compte : lorsque l'on pousse un cri à 160 mètres environ de l'oree d'un bois, on en perçoit l'écho au bout d'une seconde. Quant aux ondes radioélectriques et lumineuses, elles se propagent toutes deux dans l'éther avec une même vitesse très grande, qui se chiffre par 300 000 kilomètres par seconde ; ce qui n'empêche pas que les ondes lumineuses rayonnées par certains astres très éloignés de notre Terre ne

mettent pas moins de quatre cents ans pour nous parvenir !

*
* *

Les ondes ne sont jamais solitaires ; on ne peut les

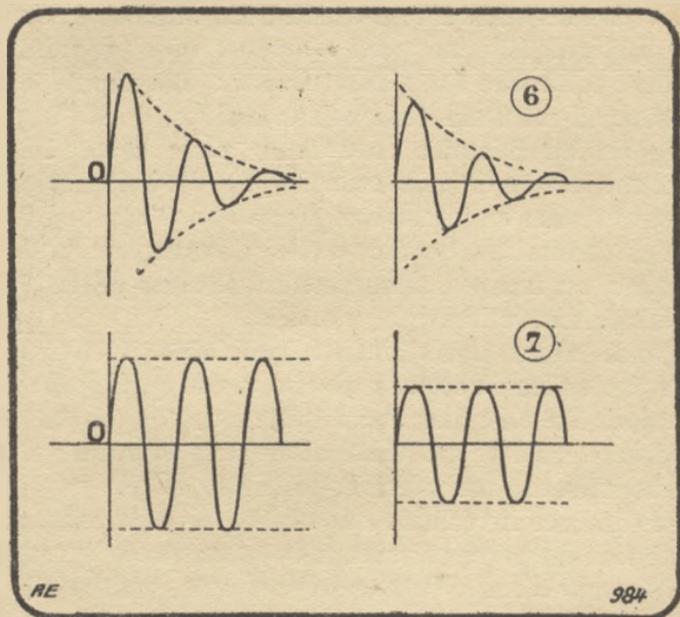


Fig. 6 et 7. — REPRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES FORMES DE TRAINS D'ONDES. — 6. Propagation d'un train d'ondes amorties. — 7. Propagation d'un train d'ondes entretenues dans l'espace et le temps.

observer qu'en groupe, en famille en quelque sorte : c'est ce que l'on nomme un *train d'ondes*, parce que les ondes se suivent comme les différents wagons d'un train. Il arrive cependant de parler d'une seule onde, sans qu'il s'agisse toujours là d'un terme collectif applicable à toute une série d'ondes. En réalité, l'onde « unique » est une fiction de notre esprit, commode assurément parce qu'elle facilite le raisonnement ; on appelle ainsi l'en-

semble de la déformation comportant à la fois un talus et un fossé consécutifs.

La raison pour laquelle les ondes apparaissent toujours en groupe est facile à comprendre ; une oscillation ne peut s'arrêter brusquement, sans quoi elle ne serait pas en réalité une oscillation, mais une simple déformation. Elle ne peut s'arrêter que progressivement, c'est-à-dire en s'amortissant : elle donne alors naissance à un train d'ondes successives, dont l'importance va en décroissant et qui, pour cette raison, prennent le nom d'*ondes amorties* (fig. 6). Telles sont les ondes obtenues en jetant une pierre dans l'eau ; en frappant au contraire la surface de l'eau d'une série de chocs réguliers, on forme une succession de rides égales dites *ondes entretenues* (fig. 7).

L'onde étant parfaitement semblable à elle-même dans toutes les directions où elle rayonne, il suffit évidemment de l'étudier dans l'une quelconque de ces directions. Elle se présente alors sous la forme d'une courbe sinueuse caractéristique (fig. 8 et 9).

La distance invariable qui sépare le point culminant d'une ride du point culminant de la suivante est appelée *longueur d'onde*. Cette notion simple, puisqu'elle se ramène à la connaissance d'une longueur, est absolument primordiale dans la science des phénomènes vibratoires, puisqu'elle suffit à caractériser l'une quelconque des ondulations réparties sur l'immense gamme des vibrations, à condition toutefois que l'on connaisse la nature du milieu où elle se propage, métal, eau, air, éther.

Une autre notion, aussi fondamentale que la précédente, est celle de la *fréquence* ; on appelle ainsi le nombre d'ondes d'une transmission qui passent pendant une seconde en un point donné de l'espace. Or la vitesse de propagation des ondes est un nombre constant qui

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

caractérise la nature du milieu où s'effectue la transmission : elle est pour les ondes sonores de 330 mètres par seconde dans l'air et de 1 500 mètres par seconde dans l'eau ; pour les ondes lumineuses et électriques, de 300 000 kilomètres par seconde approximativement dans le vide et dans l'air. Il en résulte que la fréquence

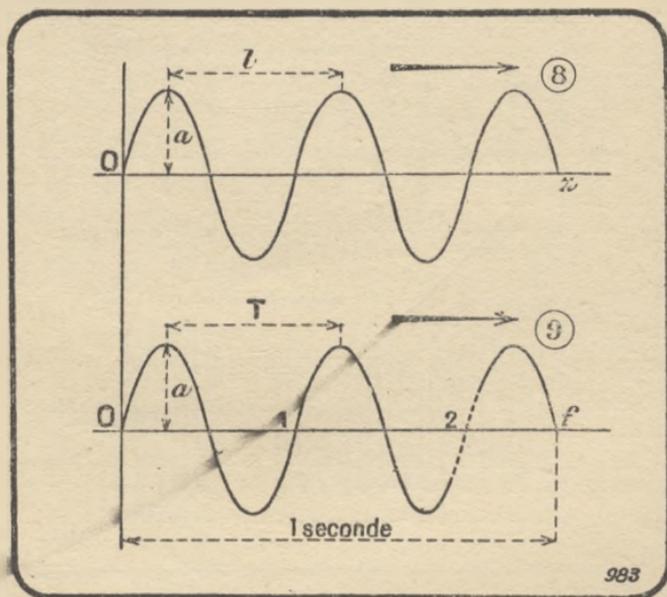


Fig. 8 et 9. — REPRÉSENTATION D'UN TRAIN D'ONDES ENTRETENUES DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE. — 8. Train d'ondes entretenues dans l'espace. — 9. Train d'ondes entretenues dans le temps : λ , longueur d'onde ; f , fréquence ; T , période de vibration.

d'une transmission donnée est un nombre constant qui la caractérise et que cette fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde.

Toutes les ondes radioélectriques étant de même nature, c'est donc par leur longueur d'onde qu'on les

distingue les unes des autres. Il suffit de dire, pour définir une transmission, qu'elle est effectuée sur 1 753 mètres de longueur d'onde, par exemple.

On comprend aisément ces notions de fréquence et de longueur d'onde lorsque l'on compare les ondes radio-électriques aux autres radiations. La fréquence, en

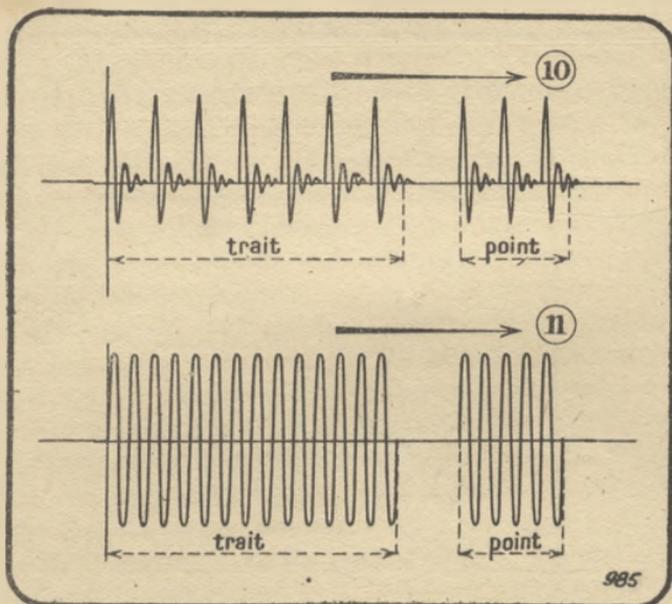


Fig. 10 et 11. — TRAINS D'ONDES AMORTIES ET ENTRE-TENUES, DÉCOUPÉS PAR LA MANIPULATION. — 10. Manipulation sur ondes amorties. — 11. Manipulation sur ondes entretenues.

effet, peut nous paraître abstraite sous ce nom, mais c'est pourtant une notion innée à laquelle sont bien habitués, sans que nous nous en doutions, notre œil et notre oreille.

A quelle notion, en effet, pouvons-nous rattacher la hauteur d'un son et la couleur, si ce n'est à celle de fréquence ? Sans doute, il importe peu à notre oreille

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

que le *la* du milieu du clavier corresponde à une fréquence de 435 vibrations doubles par seconde ; mais, sans faire appel aux nombres, elle sait apprécier avec sûreté tous les intervalles musicaux, qui ne sont que des rapports de fréquences, et cela pour plus de sept octaves consécutives. Il en est de même de notre œil qui, sans savoir exprimer en millièmes de millimètre la longueur d'onde de la lumière, discerne parfaitement les différentes nuances de la gamme des couleurs. Les rayons ultra violets, les rayons X eux-mêmes sont, comme les rayons lumineux, de la même nature que les ondes radioélectriques, dont ils ne se distinguent que par la valeur de leur fréquence.

Nous espérons que ces quelques données ont permis à nos lecteurs de se faire de la nature des ondes et de leurs propriétés caractéristiques une idée qu'ils préciseront dans le chapitre suivant, grâce à un mode de représentation plus précis des ondes et de leur propagation.



CHAPITRE II

PROPAGATION DES ONDES

L'HÉLICE. — PROPRIÉTÉS D'UN TIRE-BOUCHON A HÉLICE.
— REPRÉSENTATION D'UN TRAIN D'ONDES ENTRE-
TENUES DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE. — IMAGE
DE LA PROPAGATION D'UN TRAIN D'ONDES. — APPLI-
CATIONS CONCRÈTES DE CES NOUVELLES IMAGES. —
MÉCANISME DE LA TRANSMISSION DES ONDES.

Nous venons d'exposer précédemment les principes fondamentaux communs aux différents modes de transmission par ondes, qu'il s'agisse du son, de la lumière ou de la radioélectricité. Nous avons surtout essayé de faire comprendre la nature et la forme des ondes.

Il nous reste à en étudier la transmission proprement dite, c'est-à-dire l'émission, la propagation et la réception, en nous plaçant particulièrement au point de vue des phénomènes radioélectriques. On sait que le principe général de la transmission radioélectrique est le suivant : les ondes, rayonnées par une antenne d'émission, se propagent à travers l'éther et sont recueillies par un collecteur (antenne ou cadre), qui les draine vers l'appareil de réception. Nous expliquerons **d'abord** le mécanisme de la propagation **d'une onde libre** à travers l'espace, **pour aborder** ensuite les questions relatives à l'émission et à la réception, qui font intervenir le mode de vibration des antennes.

Pour exposer clairement le mouvement des ondes et leur transmission, il nous suffit d'avoir recours à un appareil fort simple, que l'on trouvait dans toutes les familles, avant la crise de l'abstentionisme : nous avons

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

nommé le tire-bouchon. Nous avons choisi cet outil, en raison de sa simplicité et de son aspect très particulier. Chacun sait qu'un tire-bouchon a la forme d'une hélice : or, ce sont la forme et les propriétés mêmes de cette hélice qui vont nous permettre d'expliquer le mécanisme de la propagation des ondes.

*
* *

A priori, cette comparaison ne peut guère nous surprendre, parce que les propriétés de l'hélice sont l'objet de multiples applications, aussi bien dans la nature que dans l'industrie humaine.

Considérons, en effet, les phénomènes naturels : la météorologie nous apprend que les trombes et les tourbillons d'eau et de sable prennent la forme d'hélices ; il suffit, pour vous en convaincre, de regarder l'eau de votre lavabo lorsqu'il se vide. Dans le monde végétal, la croissance des tiges herbacées vous amène à faire la même constatation : une tige de haricot possède un mouvement de croissance hélicoïdal. Examinez sur les tiges ligneuses la distribution des pousses et des feuilles, sur un tronc de pin écorcé, l'orientation des fibres : vous conviendrez qu'elles se répartissent sur des hélices. Contemplez une simple pomme de pin : vous constatarez immédiatement que les écailles dessinent à sa surface deux réseaux d'hélices de sens contraires.

La mécanique utilise, depuis la plus haute antiquité, les propriétés de l'hélice : les moulins à vent en sont sans doute la première application industrielle, et certains moulins à eau sont basés sur le même principe. Les uns et les autres sont **actuellement en voie de disparition**, pour céder la place aux turbines aériennes hydrauliques et à vapeur, dont le principe est identique.

La mécanique moderne réalise, grâce à l'hélice, des

démultiplications considérables. N'oublions pas que l'hélice est universellement employée comme propulseur pour les navires et les avions.

Il n'est pas jusqu'à l'architecture qui n'ait tenu à mettre à profit les propriétés de l'hélice : les escaliers en vis de Saint-Gilles du moyen âge en sont une curieuse application.

L'électricité en fin, bien qu'elle ne fasse appel que rare-

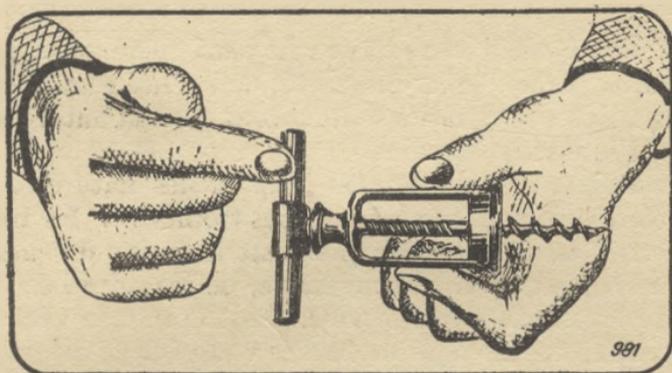


Fig. 12. — FIGURATION DE LA PROPAGATION DES ONDES. — Tenir dans la main la chape d'un tire-bouchon à hélice, dont l'autre main fait tourner régulièrement la manette. L'aspect de la vrille du tire-bouchon est alors celui d'un train d'ondes en mouvement.

ment aux comparaisons mécaniques, n'a pas renoncé à utiliser l'hélice : c'est, en effet, la règle du tire-bouchon de Maxwell, qui indique le sens du phénomène de l'induction électromagnétique.

* * *

Considérons attentivement un tire-bouchon dit à « hélice » (fig. 12). Nous pouvons tirer de ce petit appareil les représentations à la fois les plus concrètes et les plus fidèles, relatives aux ondes et à leur propagation.

Nous distinguons, d'une part, l'espèce de vrille qui

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

est la partie essentielle de l'outil ; mais nous remarquons, d'autre part, que cette vrille, en forme d'hélice, termine une tige régulièrement filetée et susceptible de s'engager dans un écrou, qui peut lui-même tourner autour de l'axe de la vis. Le tire-bouchon permet ainsi d'étudier le mouvement de rotation d'une hélice et le mouvement de

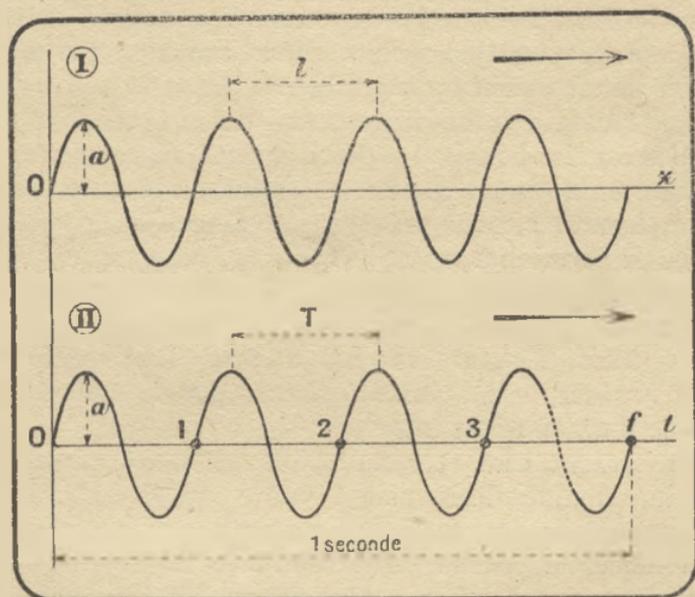


Fig. 13. — REPRÉSENTATION D'UN TRAIN D'ONDES ENTRE-TENUES A UNE DISTANCE ASSEZ GRANDE DE LA SOURCE D'ÉMISSION. — I. Représentation dans l'espace : a , amplitude de l'onde ; l , longueur d'onde ; Oz , direction de la propagation. — II. Représentation dans le temps : a , amplitude de l'onde ; T , période de vibration ; 1, 2, 3, numéros d'ordre des ondes ; f , fréquence ou nombre d'ondes se succédant en une seconde ; Ot , axe le long duquel est compté le temps qui s'écoule.

la vis dans son écrou, que l'on appelle mouvement hélicoïdal.

Ces principes nous permettent d'exposer très simplement dans les paragraphes suivants le mécanisme de la propagation des ondes.

*
* *

Un même train d'ondes entretenues se présente sous deux aspects différents, suivant qu'on l'observe dans le temps ou dans l'espace, qu'on le considère à un instant donné ou bien en un point donné. De là provient la difficulté que l'on éprouve à concevoir nettement la propagation ; nous allons montrer comment le tire-bouchon résoud le problème (fig. 13).

On constate immédiatement que le contour de l'hélice du tire-bouchon a précisément l'aspect du train d'ondes entretenues dont nous avons parlé antérieurement. Ajoutons, pour prévenir une objection, que cette hélice se terminant en pointe donne, à son extrémité, l'image d'un train d'ondes amorties. Nous avons donc obtenu un premier résultat en considérant l'hélice :

Un train d'ondes entretenues peut être représenté dans l'espace, à un instant donné, par le contour de l'hélice d'un tire-bouchon.

On obtient une représentation nette en projetant sur une feuille de papier l'ombre du tire-bouchon.

L'amplitude des ondes est mesurée par le diamètre de l'hélice ou par sa projection. La longueur d'onde, que nous avons définie plus haut, est évidemment égale au pas (1) de l'hélice.

Nous savons, d'autre part, comment les diverses ondes d'un train d'ondes se succèdent en un point donné de l'espace : l'observation d'un bouchon de liège placé à la surface de l'eau nous l'a montré. Le

(1) On sait que l'on nomme pas de l'hélice la distance qui sépare deux points d'intersection consécutifs de l'hélice avec une génératrice quelconque du cylindre ; en particulier la distance entre deux sommets consécutifs du contour apparent ou entre deux points consécutifs sur l'axe (0 et 1, 1 et 2, 2 et 3, etc., sur la fig. 13).

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

bouchon oscille au passage des ondes, et ses oscillations sont représentées dans le temps par la même courbe sinueuse que les amplitudes des ondes dans l'espace :

Un train d'ondes entretenues peut être représenté dans le temps en un point donné par le contour de l'hélice d'un tire-bouchon.

L'amplitude des ondes est encore mesurée par le diamètre de l'hélice ; mais, en ce cas, le pas de l'hélice ne représente plus la longueur d'onde, mais la *période* de l'oscillation, c'est-à-dire le temps au bout duquel l'onde s'est propagée d'une longueur d'onde.

On obtient donc des courbes identiques en représentant successivement l'état du train d'ondes dans le temps et dans l'espace. Ce résultat était évident *a priori*, puisque, quelle que soit la fréquence de succession des ondes, elles se propagent dans l'éther avec une *vitesse constante*, qui est identique à la vitesse de la lumière.

Cette circonstance explique que la longueur du trajet parcouru par les ondes est à chaque instant proportionnelle au temps mis pour le parcourir.

La *période* ou durée nécessaire pour qu'une onde soit remplacée par la suivante est proportionnelle à la longueur d'onde. En effet, lorsqu'on se déplace sur une route avec une vitesse constante, la durée de l'étape est proportionnelle au trajet qu'il s'agit de parcourir.

*
* *

De ce que nous venons d'exposer, concernant la représentation du train d'ondes dans le temps et dans l'espace, il est facile de déduire le mouvement de propagation d'une onde dans l'espace.

Supposons que notre tire-bouchon représente l'as-

pect du train d'ondes dans l'espace, à un instant donné. Ce train se propage à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde.

Nous pouvons donc donner une image exacte du phénomène en imprimant à l'axe de l'hélice un mouvement de translation à vitesse constante ou, ce qui revient au même, à cause des propriétés de l'hélice, en lui imprimant un mouvement de rotation uniforme.

Prenant d'une main la chape du tire-bouchon (Voir fig. 12), nous faisons tourner régulièrement l'axe.

Animée d'un mouvement de rotation uniforme, l'hélice du tire-bouchon reproduit fidèlement le mouvement de propagation des ondes.

On obtient une image plus nette en observant le mouvement de l'ombre de l'hélice projetée sur une feuille de papier (fig. 14).

On analyse facilement ce mouvement en traçant un repère fixe sur la feuille de papier. On constate alors aisément que l'une des ondes est remplacée par la suivante au bout du temps nécessaire pour que l'hélice effectue un tour complet.

Comme le pas de l'hélice correspond à la longueur d'onde de la transmission, la vitesse de rotation en tours par seconde qu'il faut imprimer à l'axe de l'hélice est égale au nombre de périodes qui se succèdent en une seconde, c'est-à-dire à la fréquence de la transmission. On obtient ainsi une représentation de la fréquence sinon tangible, du moins directement mesurable.

*
* *

Prenons un exemple pratique : pour donner une idée exacte de la propagation d'un train d'ondes sur la longueur d'onde de 20 000 mètres (par exemple, la longueur

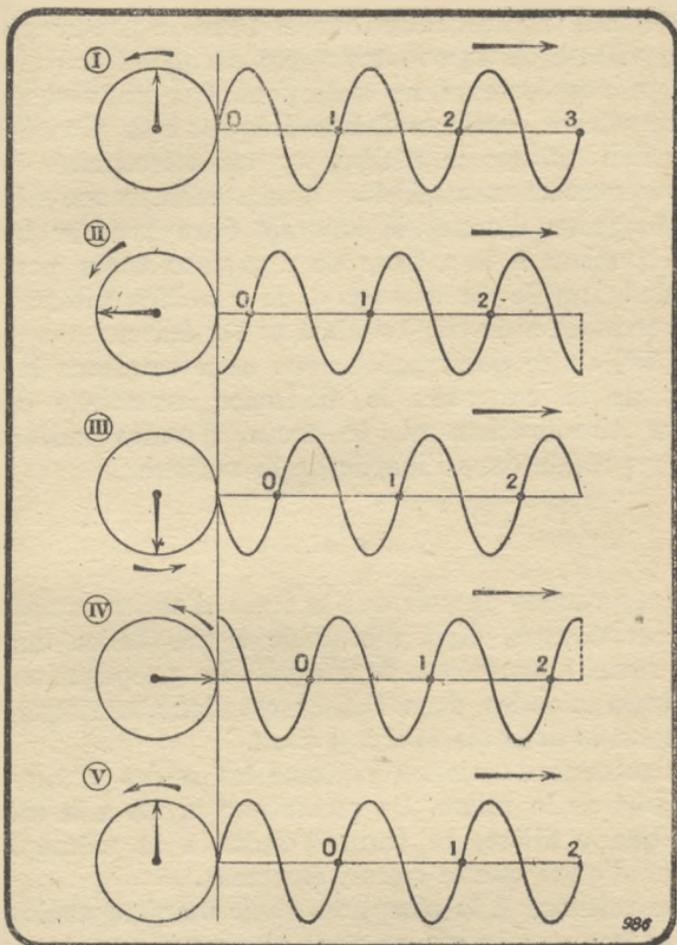


Fig. 14. — IMAGE DE LA PROPAGATION DES ONDES DONNÉE PAR L'HÉLICE D'UN TIRE-BOUCHON QUE L'ON FAIT TOURNER D'UN MOUVEMENT RÉGULIER. — Les figures I, II, III, IV, V représentent les divers aspects du contour du tire-bouchon à un quart de tour d'intervalle. Au bout d'un tour complet (V) les ondes se sont propagées d'une longueur égale à la longueur d'onde et les ondes 0, 1, 2 sont venues remplacer respectivement les ondes 1, 2, 3. Les cadrans figurés sur la gauche représentent en bout la manette du tire-bouchon.

d'onde de la station radioélectrique de la Croix-d'Hins), dont la fréquence des ondes est de 15 000 périodes par

seconde, il faudrait faire tourner l'axe du tire-bouchon. à la vitesse de 15 000 tours par seconde !

Que nos lecteurs ne s'effraient pas pour si peu : cette vitesse correspond à la fréquence la plus faible que l'on ait encore réalisée en radioélectricité. Pour représenter les transmissions d'amateurs sur 200 mètres de longueur d'onde, il faudrait faire tourner notre tire-bouchon à la vitesse de 1 500 000 tours par seconde ! Inutile de dire qu'à de pareilles vitesses ne résisteraient ni le tire-bouchon ni l'opérateur.

C'est, en ce point précis, que nous touchons le défaut de la cuirasse : la différence essentielle entre notre tire-bouchon et le train d'ondes radioélectriques réside dans l'inertie de la matière.

*
* * *

Nous venons de voir que le train d'ondes, amorties ou entretenues, était semblable à une hélice ou, ce qui revient au même, à une vis. La propagation de ce train d'ondes dans l'éther est donc analogue au *mouvement de la vis dans son écrou*.

L'antenne d'émission rayonne les ondes comme la vis sort de la filière. De même que la vis a le même pas que la filière, ce train d'ondes a la même longueur d'onde que le circuit émetteur.

On raisonne à la réception d'une manière analogue. De même que la vis ne peut s'engager que dans un écrou de même pas, le train d'ondes ne peut faire vibrer qu'une antenne de réception accordée sur la même longueur d'onde.

On voit combien est étroite l'analogie entre la longueur d'onde et le pas de l'hélice. La longueur d'onde caractérise la transmission radioélectrique, comme le pas caractérise la vis.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

Nous étudierons au chapitre V, plus particulièrement, le mécanisme de l'antenne de réception et la vibration des collecteurs d'ondes.

Pour nous familiariser avec les phénomènes oscillatoires, nous rappellerons d'abord sommairement les vibrations de la matière et la propagation des ondes dont elle est le siège.



CHAPITRE III

VIBRATIONS DE LA MATIÈRE

OSCILLATIONS DU PENDULE. — RESSORT ET BALANCIER.
— ONDES ÉLASTIQUES ET ONDES SONORES. — TRANS-
FORMATIONS DIVERSES DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE.

Le chapitre que nous allons développer est une introduction nécessaire à l'étude de la radioélectricité. Il est indispensable, en effet, lorsque l'on ne peut recourir à l'abstraction et au calcul, ce dont nous nous gardons bien, de donner en premier lieu la description de phénomènes tangibles avant d'aborder ceux que nous ne pouvons étudier directement.

Jusqu'à présent, nous avons toujours considéré la propagation des ondes radioélectriques comme un phénomène indépendant de l'énergie électrique qu'elles rayonnent. Il n'est sans doute pas inutile de rapprocher dans l'esprit de nos lecteurs ces deux ordres de phénomènes, différents en fait, mais étroitement connexes.

A un certain point de vue, la propagation des ondes peut être envisagée comme une manifestation secondaire de la transmission de l'énergie dans l'espace, disons plus exactement dans l'éther. Les ondes ne sont que le véhicule de l'énergie en déplacement, véhicule très particulier, j'en conviens, et qui ne ressemble guère à ceux qui sont couramment utilisés en traction ; mais véhicule très général cependant, si l'on veut bien ouvrir les yeux sur tous les phénomènes qui se manifestent autour de nous : ondes élastiques, ondes sonores,

ondes radioélectriques, ondes calorifiques, ondes lumineuses et ondes radiologiques sont les modestes agents de la transmission de l'énergie, sous quelque forme qu'elle se présente.

*
* *

Les oscillations les plus tangibles pour nous sont assurément celles qui affectent la matière, puisqu'elles nous sont révélées au moins par l'un de nos sens : toucher, ouïe ou vue, parfois même par la collaboration intime de ces trois sens réunis. Nous avons parlé précédemment des mouvements sismiques et des marées, phénomènes plus ou moins irréguliers, peu accessibles aux mesures et que nous laisserons de côté. D'ailleurs les vibrations de la matière se traduisent à nos sens sous des formes tellement nombreuses que nous n'avons réellement que l'embarras du choix.

Deux exemples surtout nous paraissent à retenir : celui du pendule et celui du balancier, qui s'imposent par leur simplicité et par la multiplicité de leurs applications, en horlogerie au moins.

Rien de plus simple et de plus instructif que de considérer le balancier d'une horloge en mouvement. Nos lecteurs se rappellent assurément quelles sont les raisons des oscillations effectuées par ce balancier : ce malheureux Juif errant de l'horlogerie, déplacé de sa position d'équilibre stable, qui s'aligne sur la verticale de son axe de suspension, cherche éperdument à reprendre cet équilibre. Et c'est au cours de cette folle galopade qu'il exécute ses oscillations régulières qu'un mécanisme compensateur, l'échappement, s'applique à entretenir indéfiniment.

Analysons de plus près le mouvement du balancier. Pour le mettre en branle, nous l'avons d'abord écarté de sa position d'équilibre ; cette manœuvre a relevé

la masse et lui a communiqué par cela même une certaine quantité d'énergie par le seul fait qu'elle se

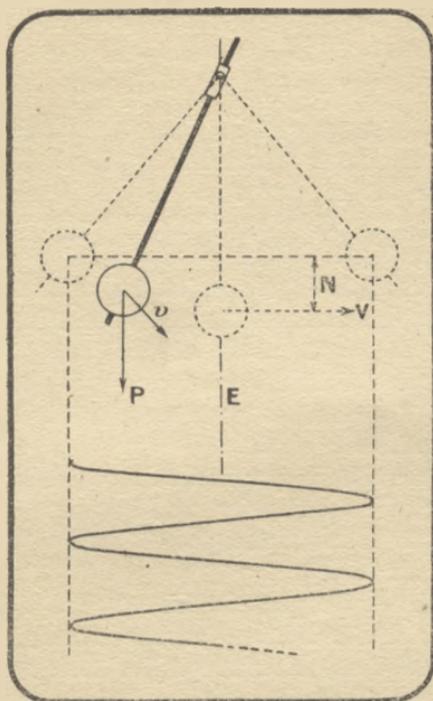


Fig. 15. — OSCILLATIONS D'UN BALANCIER. — E, position d'équilibre; v , vitesse du balancier à un moment donné; V , vitesse maximum du balancier lorsqu'il passe par la verticale; N , différence de niveau; P , poids du balancier; O , oscillations supposées tracées par le balancier armé d'un styilet sur une feuille de papier qui se déplace verticalement avec une vitesse de translation constante.

trouvait alors à un niveau inférieur. De même l'eau des torrents, élevée depuis la plaine par les nuages, possède une quantité d'énergie, dont il est possible de récupérer une partie dans les moulins à eau et les turbines des usines hydroélectriques. Ce phénomène est représenté sur la figure 15.

Cette énergie, que l'on a appelée potentielle parce qu'elle est contenue en puissance, ne cherche qu'à se dissiper. C'est précisément le cas pour le pendule. Abandonné à lui-même, le balancier, sollicité par la pesanteur, s'empresse de

reprendre sa position d'équilibre. Dans sa course, il abandonne progressivement toute l'énergie potentielle qu'il avait acquise, mais il prend une vitesse de plus en plus grande à mesure qu'il se rapproche

de la verticale. L'énergie qu'il perd, il la regagne sous une autre forme, car sa vitesse lui communique une énergie de mouvement. Personne n'ignore les manifestations de cette énergie de mouvement : c'est l'énergie que possède une balle, un obus, un train en marche ; c'est elle qui provoque si souvent les accidents. Cette énergie de mouvement augmente à mesure que l'énergie potentielle diminue, et elle atteint son maximum, en même temps que la vitesse, au moment même où le balancier passe par la verticale.

Si le balancier, dans son mouvement, atteignait la verticale avec une vitesse extrêmement faible, comme cela se passerait si la masse était noyée dans un bain de glycérine, il s'arrêterait dans cette position qui correspond à son équilibre stable. Dans le cas général, il franchit cette position avec une vitesse assez grande, et les phénomènes que nous venons d'observer se succèdent alors en sens inverse.

A mesure que la masse remonte, le balancier perd de sa vitesse ; son énergie de mouvement diminue et son énergie potentielle augmente, jusqu'à ce que la masse ait atteint la position symétrique de celle d'où elle est partie : à cet instant, le pendule s'arrête, l'énergie de mouvement est nulle, et l'énergie potentielle atteint la valeur maximum qu'elle avait au départ.

A partir de ce moment, les phénomènes se reproduisent identiquement et le pendule continue à osciller.

Au cours de ces oscillations du balancier, nous remarquons une transformation constante de l'énergie mise en jeu, qui se manifeste par un échange incessant de l'énergie potentielle en énergie de mouvement et réciproquement. Notons que l'énergie totale, qui est à chaque instant la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie de mouvement, reste constante, ce qui vérifie le principe de la conservation de l'énergie.

De l'exemple du pendule il est facile de rapprocher celui du balancier d'une montre (fig. 16) : on sait que cet organe se compose essentiellement d'un petit volant en miniature, sur l'axe duquel est fixé un ressort spiral. Lorsque l'on abandonne à lui-même ce balancier

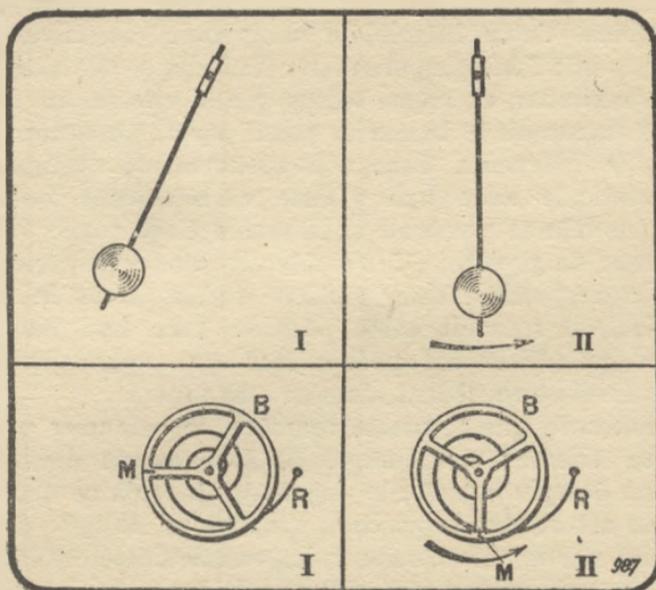


Fig. 16. — LES TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE DANS LE PENDULE ET DANS LE BALANCIER (B, balancier ; R, ressort spiral ; M, repère). — L'énergie, emmagasinée sous la forme d'énergie potentielle en I, est entièrement transformée en énergie de mouvement en II ; puis la transformation inverse s'accomplit.

après lui avoir donné une légère torsion, il se met à exécuter une série d'oscillations, entretenues d'ailleurs par l'échappement du ressort moteur. La fréquence de ces oscillations est caractéristique d'un balancier donné. L'analyse de ce phénomène nous conduit au même résultat que pour le pendule ; en donnant une légère torsion au balancier, on emmagasine dans le spiral une

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

énergie potentielle, qui rappelle le système à sa position d'équilibre en même temps qu'elle se transforme en énergie de mouvement, à mesure que le volant prend de la vitesse. C'est exactement la transformation inverse qui s'effectue lorsque, après que le système a dépassé

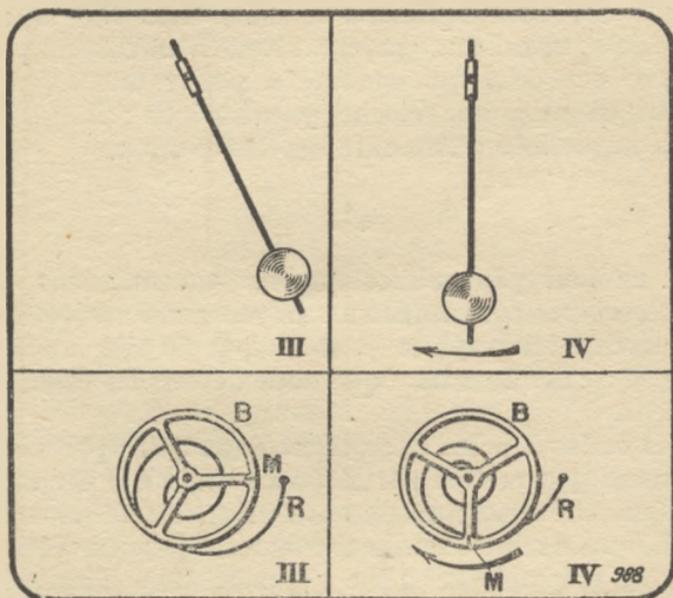


Fig. 16 bis. — LES TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE DANS LE PENDULE ET DANS LE BALANCIER A RES-SORT SPIRAL (B, balancier ; R, ressort spiral ; M, repère). — Au cours de la seconde alternance, les mêmes phénomènes se reproduisent dans l'ordre inverse : l'énergie se présente sous forme d'énergie de mouvement en IV, puis elle revient à l'état primitif I, sous forme d'énergie potentielle.

sa position d'équilibre, la vitesse du volant diminue. Là encore se manifeste la conversion incessante de l'énergie mécanique de l'une de ses formes dans l'autre.

Il est d'ailleurs plus intéressant, à notre point de vue, de considérer la propagation des vibrations qui se

déplacent. Nous venons d'établir, en nous basant sur la transmission des ondes à la surface de l'eau, les propriétés essentielles des ondes en général. Nous tirerons aisément profit de ces connaissances en étudiant d'abord leur application à des ondes d'une espèce facilement accessible à nos sens : aux ondes sonores qui se propagent, comme chacun le sait, dans les milieux matériels : métal eau, gaz, etc... Nous n'en voulons pour preuve que celle qui consiste à placer une sonnerie électrique sous une cloche pneumatique ; il devient alors impossible d'entendre ses battements.

* * *

Il ne faut pas oublier que les transmissions par ondes sonores constituent un moyen aussi antique que précaire de télégraphier — et surtout de téléphoner — sans fil : c'est à ce titre que nous devons les étudier à présent.

Les ondes sonores parcourent dans l'air approximativement 330 mètres par seconde, comme il est facile de s'en rendre compte en observant, montre en main, le phénomène de l'écho. Leur fréquence joue en musique un rôle prépondérant : elle s'appelle alors hauteur de la note émise ; on peut la mesurer facilement, bien que cette mesure soit généralement sans intérêt ; en effet, les musiciens apprécient à l'oreille la fréquence, non pas d'une façon absolue en indiquant le nombre de vibrations effectuées par seconde, mais en valeur relative, en appréciant l'*intervalle* de fréquence entre la note émise et le *la* du diapason.

Aux ondes sonores se rattachent les ondes ultrasonores, de même nature que les ondes premières, mais imperceptibles à notre oreille, parce que leur fréquence relativement élevée les rend muettes, en quelque sorte.

Ou plutôt c'est nous qui sommes sourds pour ces vibrations trop rapides.

Il est commode, pour étudier les particularités de ces ondes, d'analyser ce qui se passe dans un tuyau sonore en vibration.

A l'extrémité d'un tuyau indéfiniment prolongé, on adapte une lame solide susceptible de vibrer (fig. 17, I). Les vibrations de cette lame se transmettent de proche en proche sous forme d'ondes sonores par la colonne d'air enfermée dans le tuyau, si bien que cette colonne d'air présente bientôt, à un instant donné, l'aspect d'une série de compressions et de dilatations. Nous avons représenté ce phénomène sur la figure en indiquant les tranches d'air par des hachures, qui sont d'autant plus serrées que la compression est plus forte. Les ondes de compression et de dilatation se propagent dans la colonne d'air avec la vitesse uniforme du son ; la distance qui sépare deux maxima consécutifs de pression ou de dilatation est égale à la longueur d'onde de la vibration sonore émise.

Les diverses tranches d'air du tube, qui sont successivement le siège de compressions et de dilatations à mesure que l'onde se propage, oscillent comme un pendule ou un balancier entre deux positions fixes d'ailleurs très rapprochées (fig. 17, II). Il ne s'agit là, en effet, que du déplacement élémentaire des particules d'air qui se compriment ou se détendent au passage de l'onde. Sous l'effet de la vitesse qui lui est transmise par les couches d'air voisines, chaque tranche d'air se déplace très légèrement en se tendant comme un ressort pneumatique ; puis elle regagne sa position primitive, la dépasse en se détendant outre mesure, la rejoint à nouveau et continue à osciller comme une section de piston dans un corps de pompe. L'explication du phénomène est facile à trouver si l'on se reporte

aux résultats indiqués pour l'oscillation du pendule ou du balancier : on comprend que l'énergie de mouvement se transforme incessamment en énergie potentielle, l'énergie de rappel, et inversement ; la somme de ces deux énergies reste invariablement constante dans tous les cas.

A la différence des cas du pendule et du balancier, nous n'avons plus affaire à un système mécanique rigide et solide, où les transmissions s'effectuent instantanément, mais à un système élastique, où les transmissions s'opèrent au moyen d'ondes de proche en proche.

Or le tuyau sonore indéfini n'est qu'une fiction du raisonnement ; dans la pratique, la longueur d'un tuyau sonore est parfaitement définie. Supposons qu'il s'agit d'un tuyau fermé, un tuyau d'orgue par exemple (fig. 17, III). Les ondes qui prennent naissance près de l'anche se propagent dans le tube avec la vitesse du son dans l'air, comme nous venons de le voir. On distingue l'onde de vitesse et l'onde de compression ; arrivées au fond du tube, elles se réfléchissent en rebrous-sant chemin vers l'anche. L'onde de vitesse est évidemment nulle au fond du tube, alors que l'onde de compression est maximum. De la superposition des ondes directes et réfléchies, qui se propagent, naît un régime d'*ondes stationnaires*, qui oscillent sur place sans se propager. En effet, il existe une onde stationnaire de vitesse qui est maximum au voisinage de l'anche et nulle au fond du tube et une onde stationnaire de compression qui est évidemment nulle à la hauteur de l'anche et maximum au fond du tube. Entre ces deux positions extrêmes, les deux ondes croissent ou décroissent constamment, en sorte que la longueur du tube correspond exactement à un quart de la longueur de l'onde stationnaire. On dit que le tuyau sonore vibre en *quart d'onde*. C'est ainsi qu'un tuyau sonore de 19 centimètres

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

environ donne la note dite *la-3*, correspondant à une longueur d'onde dans l'air de 76 centimètres.

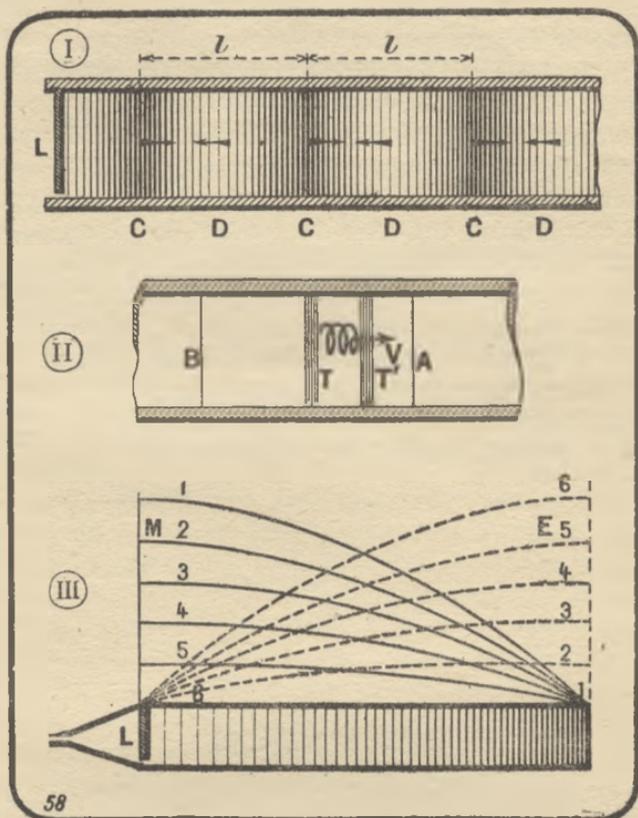


Fig. 17. — VIBRATION ET PROPAGATION DES ONDES SONORES. — I. Vibrations d'un tuyau sonore indéfini : L, lame vibrante ; C, compressions ; D, dilatations ; l , longueur d'onde. — II. Déplacements d'une tranche d'air en vibration : T, T', tranche d'air ; V, vitesse ; A, B, limites de vibrations. — III. Répartition de l'énergie dans un tuyau sonore vibrant en quart d'onde : L, lame vibrante ; M, courbe de répartition de l'énergie de mouvement ; E, répartition de l'énergie élastique.

La répartition des échanges d'énergie correspond exactement à celle de la vitesse et de la pression dans les

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

diverses tranches d'air du tube. Il est évident que l'énergie de mouvement se répartit essentiellement dans les tranches d'air avoisinant l'anche d'un tuyau et où la vitesse de déplacement est maximum. L'énergie potentielle, c'est-à-dire l'énergie de compression, est localisée presque entièrement vers le fond du tube, où la pression est maximum et la vitesse de vibration nulle. Dans les autres régions du tuyau, la répartition de l'énergie dépend de la position de la tranche d'air par rapport aux extrémités ; toutefois la somme des énergies des deux espèces est constante en chaque section du tuyau.

En résumé, tous ces phénomènes, qu'il s'agisse des oscillations locales d'un pendule ou d'un balancier, des ondes progressives ou des ondes stationnaires, ne sont que les instruments de l'incessante transformation de l'énergie mécanique en ses deux formes réciproques, énergie potentielle et énergie de mouvement.



CHAPITRE IV

L'ÉLECTRICITÉ A HAUTE FRÉQUENCE OU RADIOÉLECTRICITÉ.

LE CIRCUIT OSCILLANT. — LES TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. — LES PHÉNOMÈNES RADIO-ÉLECTRIQUES NATURELS. — L'ÉETHER. — ROLE DE L'ANTENNE. — CONCEPTION ÉLÉMENTAIRE DE LA VIBRATION DES ANTENNES. — LES TRANSFORMATIONS DIVERSES DE L'ÉNERGIE RADIOÉLECTRIQUE.

Avant d'entreprendre l'étude des phénomènes radio-électriques proprement dits, il nous faut rappeler très brièvement les propriétés du circuit électrique oscillant. Nous serons puissamment aidés dans cette tâche par les considérations que nous venons d'exposer à propos des systèmes mécaniques et élastiques. Nos lecteurs savent tous que, pour plus de facilité, on classe un peu arbitrairement l'électricité en deux catégories, selon les effets qu'elle produit. L'une d'elles, l'électricité statique, reste localisée à la surface des conducteurs ; l'autre, l'électricité dynamique, les parcourt. Pour simplifier le langage, nous appellerons la première : électricité potentielle (ou au repos), telle qu'elle apparaît aux bornes d'un condensateur chargé ; la seconde, électricité en mouvement, puisqu'elle est caractérisée par les courants électriques.

Cette énergie électrique potentielle, que nous venons de définir et que nous rencontrons dans le condensateur, est exactement de même nature que l'énergie mécanique potentielle que nous avons considérée dans le pendule

et dans le balancier, que l'énergie élastique potentielle dans les ondes sonores, progressives et stationnaires. Il ne s'agit naturellement pas de démontrer l'identité de ces deux énergies d'essences différentes, mais de

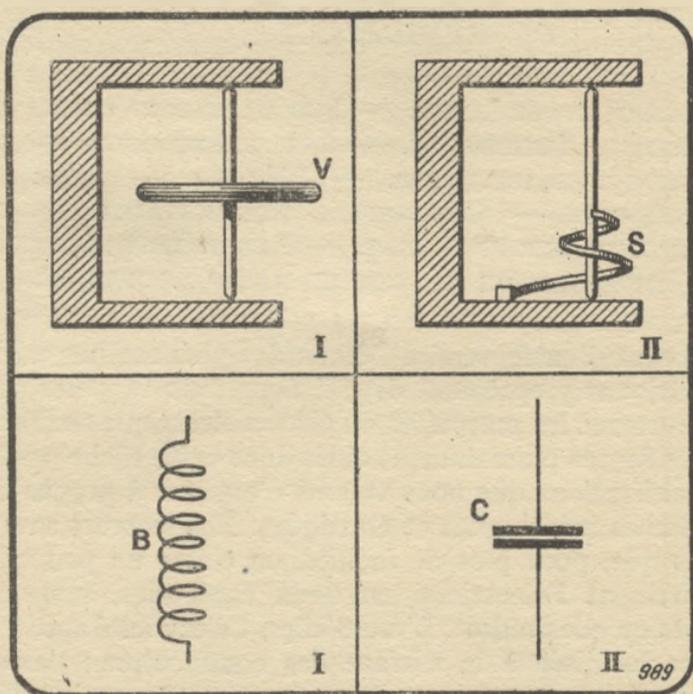


Fig. 18. — ANALOGIES MÉCANIQUES DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES. — I. Le volant V du balancier est analogue à la bobine B parcourue par un courant. — II. Le ressort spiral S est analogue au condensateur C.

faire comprendre qu'elles sont analogues et présentent des propriétés comparables.

En effet, la différence de potentiel à laquelle on soumet les armatures du condensateur que l'on charge est analogue à la différence de niveau dont on élève la masse du pendule, qui doit ensuite retomber, et à la

tension du ressort spiral, lorsque l'on imprime une torsion au balancier (fig. 18). Notons que l'analogie se poursuit dans les termes : la *différence de potentiel*, qui correspond à la *différence de niveau*, est aussi appelée

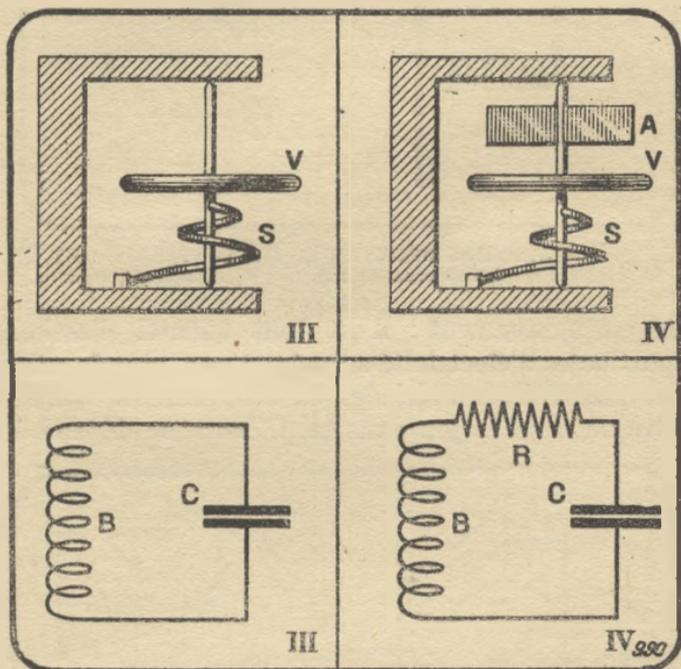


Fig. 18 bis. — ANALOGIES MÉCANIQUES DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES. — III. Le système du balancier, composé d'un volant V et d'un ressort spiral S, est analogue au circuit électrique oscillant composé d'une bobine B et d'un condensateur C. — IV. Le balancier, muni d'un amortisseur A, est analogue au circuit oscillant avec une résistance R.

tension électrique, alors qu'elle correspond à la *tension mécanique* du ressort (fig. 19).

L'énergie potentielle ainsi mise en jeu dépend à la fois de la capacité du condensateur et de la différence de potentiel à ses bornes.

On montre aussi facilement que l'énergie que pos-

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

sède un courant électrique circulant dans un conducteur est semblable à celle que possède une masse maté-

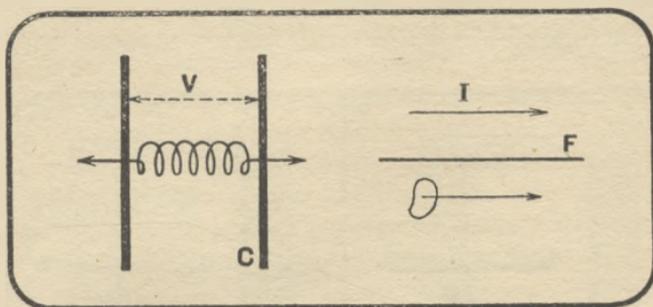


Fig. 19. — ANALOGIES MÉCANIQUES DE LA TENSION ET DU COURANT. — C, condensateur ; F, fil ; V, tension ; I, courant.

rielle en mouvement : il est tout naturel d'assimiler les particules d'électricité animées d'une grande vitesse à des particules matérielles en mouvement. L'énergie électrique mise en jeu dans ce phénomène dépend à la

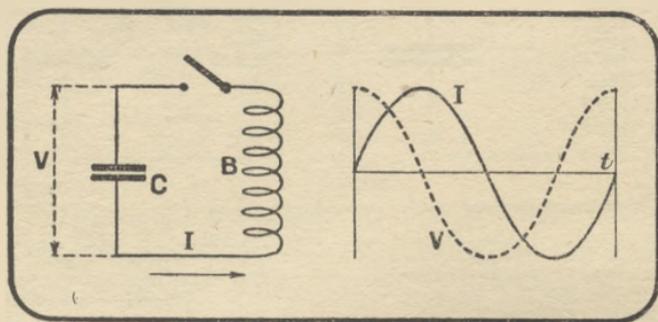


Fig. 20. — CIRCUIT ÉLECTRIQUE OSCILLANT. — C, condensateur ; B, bobine ; V, tension de charge oscillante ; I, courant.

fois de l'intensité de courant, c'est-à-dire de la vitesse de la quantité d'électricité, et de l'inertie électrique du circuit, qui est analogue à la masse matérielle.

Examinons rapidement ce qui se produit dans un

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

circuit oscillant lorsque l'on décharge le condensateur à travers la bobine en fermant l'interrupteur (fig. 20). Le condensateur se décharge entièrement ; mais, entraînée en quelque sorte par la vitesse acquise, l'électricité quitte bientôt la bobine pour recharger le condensateur en sens inverse. Après quoi le condensateur se décharge à nouveau, et la charge d'électricité se met à osciller incessamment entre la bobine et le condensateur. Ce phénomène peut être rapproché très intimement du

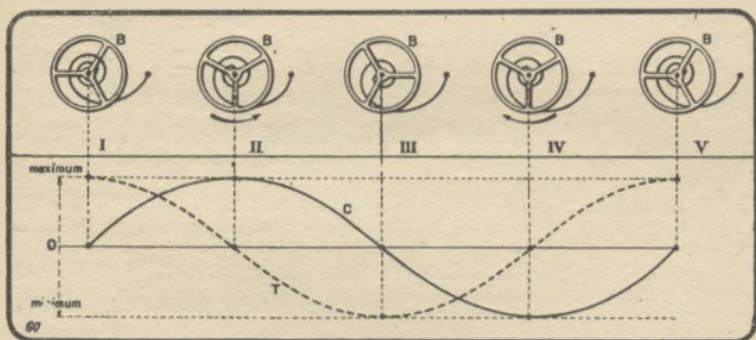


Fig. 21. — ANALOGIE MÉCANIQUE DE LA TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LE CIRCUIT OSCILLANT. — B, balancier ; T, courbe représentant les tensions mécaniques et électriques ; C, courbe représentant le courant électrique et la vitesse de rotation du balancier.

phénomène de la vibration mécanique : l'énergie potentielle, renfermée dans le condensateur chargé comme dans le ressort tendu, cherche à se neutraliser ; mais, en vertu de la conservation de l'énergie, elle ne parvient qu'à se transformer en énergie de mouvement, qui s'emmagasine momentanément dans la bobine du circuit, comme elle s'emmagasine dans le volant du balancier (fig. 21). Si une résistance mécanique s'opposait au mouvement du balancier, ses vibrations s'amortiraient bientôt ; il en est de même des oscillations électriques ; qui s'amortissent si le circuit oscillant présente une résistance électrique.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

L'énergie électrique totale mise en jeu, qui est à chaque instant la somme de ces deux énergies élémentaires, reste constante comme dans le cas du balancier.

* *
* * *

Maintenant que nous sommes renseignés sur les propriétés des oscillations électriques en général, nous allons aborder l'examen des oscillations électriques de haute fréquence, que leur nature spéciale a permis de classer en une science particulière : la radioélectricité. Nos lecteurs savent, en effet, qu'à partir d'une certaine fréquence de vibration les phénomènes électriques cessent d'être localisés à l'intérieur des conducteurs ; ils gagnent progressivement la surface de séparation des corps isolants et des corps conducteurs et quittent même ces conducteurs pour rayonner librement au dehors sous forme d'ondes. En résumé, les phénomènes radio-électriques apparaissent lorsque l'on produit, d'une manière ou d'une autre, des mouvements alternatifs d'électricité extrêmement rapides.

De tels phénomènes ont d'ailleurs existé de tout temps bien avant que l'on ait inventé la télégraphie sans fil. Les météores nous en offrent un exemple caractéristique : ce qui se passe lorsque la foudre éclate. En premier lieu, nous apercevons l'éclair, qui parvient à nos yeux avec la vitesse de la lumière, c'est-à-dire presque instantanément (300 000 kilomètres par seconde). Un autre phénomène se produit alors simultanément, que nous ne percevons pas directement. En même temps que l'éclair et devant le tonnerre, moins rapide, l'onde radioélectrique rayonne avec la même vitesse que la lumière. Toutefois bien des amateurs de T. S. F., dont les sens n'enregistrent pas les ondes, vous diront qu'ils ont *entendu* des orages loin-

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

tains, imperceptibles à leurs yeux et à leurs oreilles : les ondes radioélectriques qui émanent des orages impressionnent, en effet, les appareils récepteurs de T. S. F., où elles se manifestent sous la forme de « parasites » gênants.

Les esprits curieux peuvent se demander par quels

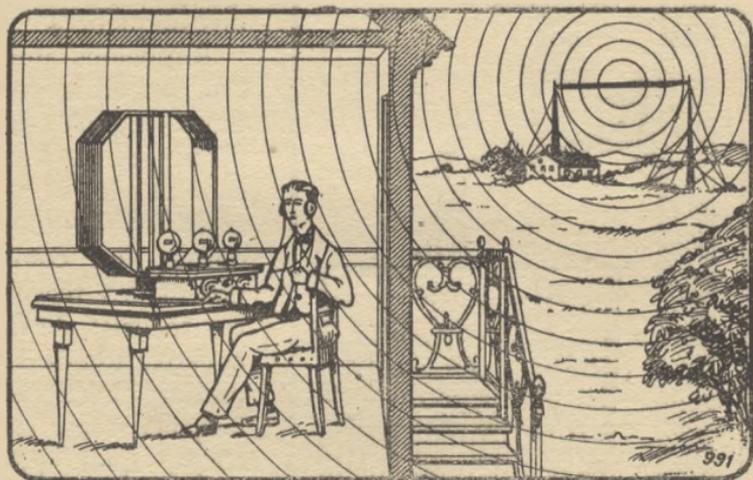


Fig. 22. — LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES, QUI SE PROPAGENT DANS L'ÉTHER, TRAVERSENT AVEC FACILITÉ LES OBSTACLES MATÉRIELS, MAUVAIS CONDUCTEURS DE L'ÉLECTRICITÉ.

mécanismes se propagent les ondes radioélectriques. Nous avons vu comment les ondes élastiques se propageaient dans l'eau, les ondes sonores dans l'air ; les ondes lumineuses peuvent, dans une certaine mesure, se propager dans la matière translucide, mais nous savons qu'elles rayonnent aussi bien dans le vide le plus parfait, à travers lequel elles nous parviennent du soleil et des astres. Les physiciens ont donc été amenés, comme nous l'avons dit plus haut, à concevoir pour véhicule des ondes lumineuses un milieu impon-

dérable, l'éther, qui se trouverait universellement répandu dans tout l'espace, même dans le vide le plus absolu. L'étude des propriétés des ondes électriques a montré l'identité de nature de ces ondes avec les ondes

lumineuses, dont elles ne diffèrent que par la gamme des fréquences.

Rappelons que l'on conçoit facilement le rôle de l'éther en se basant sur les principes les plus modernes qui composent les récentes théories de la constitution de la matière et d'après lesquels tous les corps, quel que soit leur état, seraient formés d'un très grand nombre de corpuscules

extrêmement petits et aussi distants les uns des autres, par rapport à leurs dimensions, que les astres d'un système planétaire. L'éther serait aussi composé de corpuscules, mais infiniment plus ténus que les corpuscules matériels : si bien que l'éther baignerait les corps comme l'eau traverse une passoire ou, si vous préférez, un lit de sable (fig. 22 et 22 bis).

Comment pouvons-nous, dès lors, concevoir les

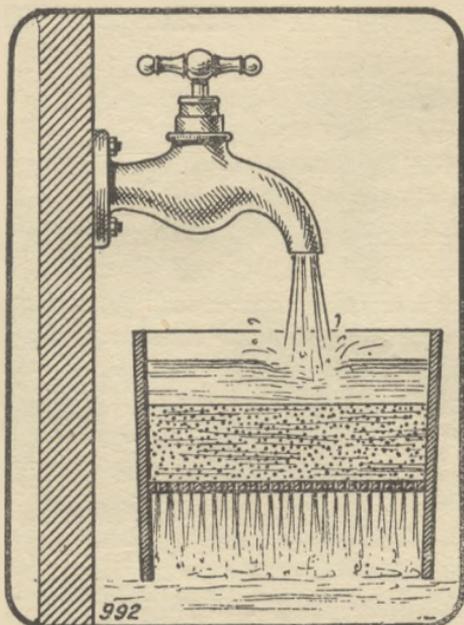


Fig. 22 bis. — LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES TRAVERSENT LES OBSTACLES MATÉRIELS AVEC LA MÊME FACILITÉ QU'UN COURANT D'EAU TRAVERSE UNE NAPPE DE SABLE SANS ÊTRE RETENU.

vibrations de l'éther ? Ces ondes, analogues aux rides de l'eau et aux compressions de l'air, traversent sans aucune difficulté les corps isolants, mais sont arrêtées par les corps conducteurs, parce qu'elles s'y heurtent à un autre fluide, l'électricité, aussi ténu que l'éther. A la surface du métal, les vibrations de l'éther entraînent les grains d'électricité, dont le mouvement engendre un courant électrique.

Ainsi, lorsque l'on établit dans l'antenne, fil conducteur noyé dans l'éther, des mouvements alternatifs rapides d'électricité, l'éther, violemment ébranlé, devient le siège d'ondes comparables aux vagues que l'on produit à la surface de l'eau. Une seconde antenne, tendue au voisinage de la première, est influencée par les ondes de l'éther, qui y font naître, inversement, des oscillations électriques.

Nous venons ainsi de mettre en évidence le rôle des antennes en radioélectricité : l'antenne, ce fil conducteur tendu dans l'air, est l'agent de la transformation des vibrations électriques à haute fréquence en ondes radio-électriques de l'éther et aussi de la transformation inverse.

C'est de l'antenne de transmission que s'échappent les ondes qui rayonnent les messages ; c'est l'antenne de réception qui les recueille. Aussi devons-nous approfondir un peu la façon dont les ondes se comportent sur les antennes.

Analysons d'abord ce qui se passe lorsque l'onde aborde l'antenne de réception. Cette onde libre de l'éther donne naissance sur l'antenne qu'elle rencontre à deux ondes électriques, une onde de tension et une onde de courant, qui présentent au même instant le même aspect de courbe sinueuse. Au passage de l'onde, chacun des éléments de l'antenne se comporte comme un *petit circuit oscillant élémentaire* où l'énergie de mouvement

se transforme constamment en énergie potentielle et réciproquement : c'est ce que nous apprennent les remarques que nous avons faites à propos du circuit oscillant et du tuyau sonore.

Or, tel le tuyau sonore, l'antenne a une longueur déterminée, qui représente ordinairement un quart de

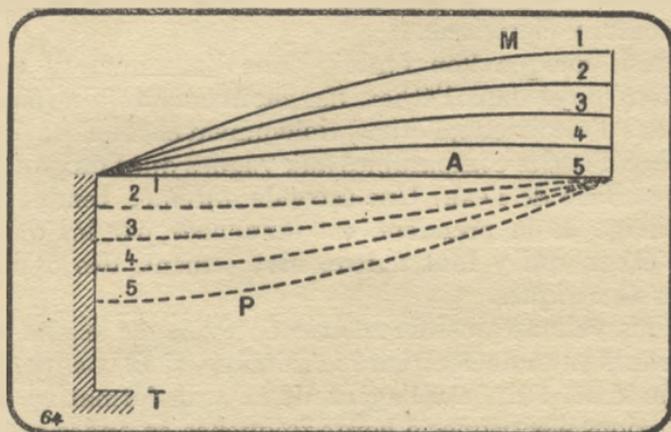


Fig. 23. — RÉPARTITION A DIVERS INSTANTS, 1, 2, 3, 4, 5 DE L'ÉNERGIE OSCILLANTE SUR ANTENNE EN QUART D'ONDE. — M, énergie de mouvement (courant); P, énergie potentielle (tension).

longueur d'onde lorsqu'elle est accordée électriquement. Il en résulte que les ondes progressives se réfléchissent aux extrémités et donnent lieu à la production d'ondes stationnaires; une onde de courant, maximum à l'extrémité mise à la terre, et une onde de tension, maximum à l'extrémité isolée. Chaque élément de l'antenne est alors le siège d'un échange incessant d'énergie potentielle (énergie du condensateur) en énergie de mouvement (énergie de courant), la somme de ces deux énergies restant constante en chaque élément. Il est évident que l'énergie potentielle domine vers l'extrémité isolée de l'antenne et que l'énergie

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

de mouvement est d'autant plus grande que l'on se rapproche davantage de l'extrémité mise à la terre (fig. 23).

En résumé, nous venons de voir combien sont analogues les manifestations de l'énergie, qu'il s'agisse de la mécanique ou de l'électricité, des phénomènes localisés ou des phénomènes vibratoires.



CHAPITRE V

VIBRATION DES ANTENNES

LONGUEUR D'ONDE PROPRE D'UNE ANTENNE. — EXCITATION D'UNE ANTENNE SOUS LE CHOC D'UN TRAIN D'ONDES. — PROPAGATION DES ONDES DE TENSION. — PROPAGATION DES ONDES DE COURANT. — ONDES STATIONNAIRES SUR L'ANTENNE ET LEUR IMAGE.

Nous avons montré précédemment comment l'on pouvait appliquer à l'onde radioélectrique une analogie mécanique et assimiler son mouvement dans l'éther à celui d'un tire-bouchon. Ce mouvement, qui est celui de la vis dans son écrou, va nous permettre d'expliquer à présent comment l'on peut concevoir la vibration des antennes, qu'il s'agisse d'une antenne de transmission, qui rayonne les ondes, ou d'une antenne de réception, qui les absorbe, et expliquer les phénomènes particuliers dont ces antennes sont le siège.

Pour plus de simplicité, les deux ordres de phénomènes étant connexes, nous nous bornerons à exposer le fonctionnement d'une antenne de réception sous l'excitation d'un train d'ondes entretenues.

*
* *

Nous avons indiqué précédemment comment l'on pouvait concevoir l'action des vibrations de l'éther sur l'antenne, sorte de récepteur noyé au sein de ce milieu. Les idées que nous venons de développer sur

la nature et la propagation des ondes électromagnétiques vont nous permettre d'aller plus loin dans cette voie.

Nous pouvons imaginer, comme nous l'avons montré au chapitre II, qu'un train d'ondes est une sorte de vis qui s'engage dans son écrou, l'antenne. Une condition essentielle à réaliser est donc, comme nous venons de le voir, que la vis et l'écrou aient le même pas, autrement dit que l'antenne soit *accordée* sur la longueur d'onde de la transmission.

Sans entrer à présent dans le détail du réglage des antennes, nous pouvons dire cependant que tout système d'antennes possède une *longueur d'onde propre* qui le caractérise. Cette longueur d'onde propre, qui dépend essentiellement des dimensions géométriques de l'antenne (forme de l'antenne, longueur, hauteur au-dessus du sol), correspond à une réalité concrète lorsque l'antenne a une forme élémentaire : si elle est constituée par un simple fil tendu mis à la terre à l'une de ses extrémités et isolé à l'autre extrémité, sa longueur d'onde propre est très sensiblement égale au quadruple de sa longueur géométrique, ce qui s'explique aisément lorsque l'on étudie sa vibration. La longueur d'onde propre d'une antenne peut être modifiée de façon à s'identifier avec la longueur d'onde de la transmission à émettre ou à recevoir : c'est en cette modification que réside le *régla*ge de l'antenne.

Nous supposons donc, pour plus de simplicité, que nous utilisons une antenne accordée sur la longueur d'onde de la transmission à recevoir. Pour rendre le mécanisme de la réception plus aisément tangible, nous avons admis que la longueur de l'antenne, depuis son extrémité isolée jusqu'à son extrémité enterrée, était égale à une longueur d'onde trois quarts (sept quarts de longueur d'onde) de la transmission à rece-

voir. En pratique, des considérations multiples obligent généralement à employer des antennes d'une longueur beaucoup plus faible.

* * *

Que se passe-t-il à partir du moment où les vibrations d'un train d'ondes atteignent l'antenne ?

Nous savons déjà qu'aux vibrations de l'éther dans l'espace environnant et pénétrant l'antenne correspondent des déplacements corrélatifs d'électricité à la surface de l'antenne.

Ces déplacements rapides d'électricité apparaissent sous forme de courants dans l'antenne ; sous l'effet de la résistance électrique apparente de l'antenne en haute fréquence, ces courants développent des tensions électriques correspondantes.

Ainsi une même onde radioélectrique fait naître dans l'antenne qu'elle rencontre ce que l'on pourrait appeler une *onde de courant* et une *onde de tension*. Bien entendu, les intensités de cette onde de courant et de cette onde de tension sont à chaque instant proportionnelles à l'intensité de l'onde radioélectrique qui leur a donné naissance.

C'est précisément ce que nous avons indiqué sur les figures 24 et 25, où les courbes D, qui représentent, sur la première, l'onde de tension et, sur la seconde, l'onde de courant sont identiques.

Sur les divers diagrammes, l'antenne a été figurée sous la forme d'un fil rectiligne horizontal A mis à la terre à son extrémité gauche et isolé à son extrémité droite.

* * *

Le diagramme (I) (fig. 24) représente l'onde de tension D à un moment donné de sa propagation le long

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

de l'antenne. L'extrémité isolée de l'antenne n'arrête

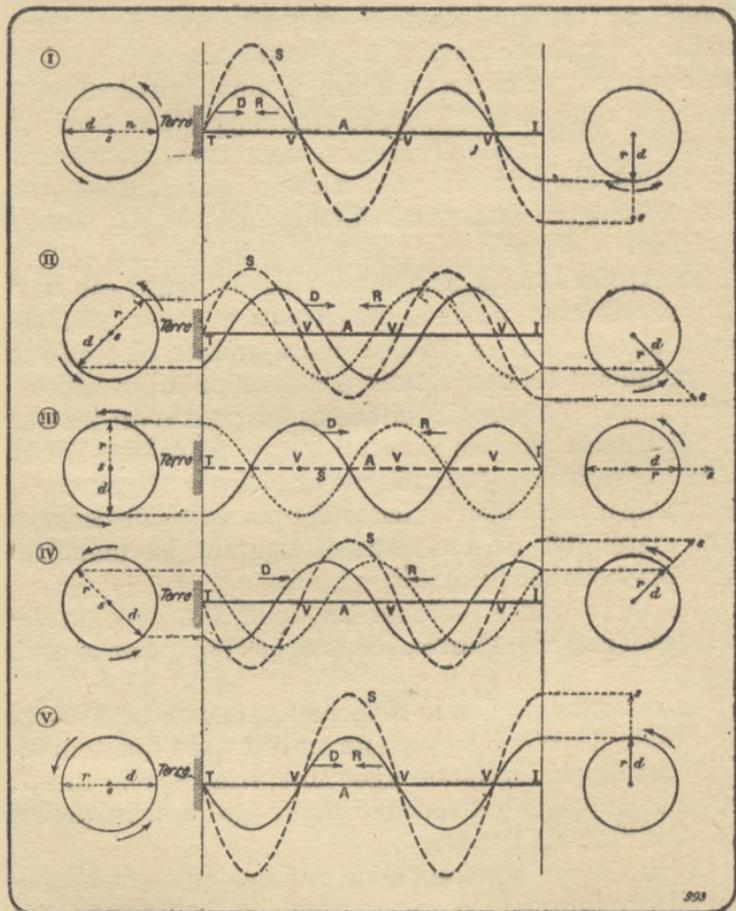


Fig. 24. — RÉFLEXION DES ONDES DE TENSION SUR UNE ANTENNE LONGUE DE SEPT QUARTS D'ONDE. — D, onde directe ; R, onde réfléchie ; S, onde stationnaire ; A, antenne ; I, extrémité isolée ; T, extrémité à la terre ; d , r , s , index représentatifs du mouvement des ondes et correspondant à la position de la manette des tire-bouchons qui les figurent. Les cinq graphiques représentent cinq phases consécutives de la propagation des ondes sur l'antenne de sept quarts d'onde pendant la durée d'une demi-période de vibration.

pas la course de l'onde radioélectrique, qui poursuit sa

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

route à travers l'éther. Il n'en est pas de même de l'onde de tension, dont le domaine est forcément limité à l'antenne ; arrivée à l'extrémité isolée, cette onde revient sur son chemin, donnant naissance à une *onde réfléchie* R qui, sur le graphique (I), se confond avec l'onde directe. Toutefois, nous remarquons sur les autres diagrammes qu'il n'en est pas ainsi et que l'on distingue nettement l'onde directe et l'onde réfléchie.

La représentation sur le plan de la figure est bien peu parlante et ne rend pas compte exactement du phénomène. Nous avons une image animée plus exacte en assimilant les deux ondes à des vis ou à des hélices, comme nous l'avons fait ci-dessus. Si nous représentons l'onde directe par une vis « qui tourne à droite », l'onde réfléchie se trouve être une vis « qui tourne à gauche », comme le montre bien les index d, r placés sur les cadrans aux extrémités de l'antenne et figurant les manettes des tire-bouchons correspondants.

Les deux ondes, comme les deux vis, sont symétriques l'une de l'autre, comme on l'aperçoit sur la figure.

Autrement dit, l'onde réfléchie correspond à l'image de l'onde directe à travers un miroir plan qui tournerait autour de l'antenne avec une vitesse telle que le nombre de tours par seconde serait égal à la fréquence de vibration de l'onde.

Ce mode de représentation animée nous fait comprendre pourquoi la répartition de la tension sur l'antenne est celle que l'on constate effectivement.

En premier lieu, la forme et la position de l'onde réfléchie pouvaient être prévues *a priori*. Sa forme est évidemment la même que celle de l'onde directe, car nous supposons que les phénomènes dont l'antenne est le siège ne donnent lieu à aucune déperdi-

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

tion d'énergie, par suite à aucun amortissement de

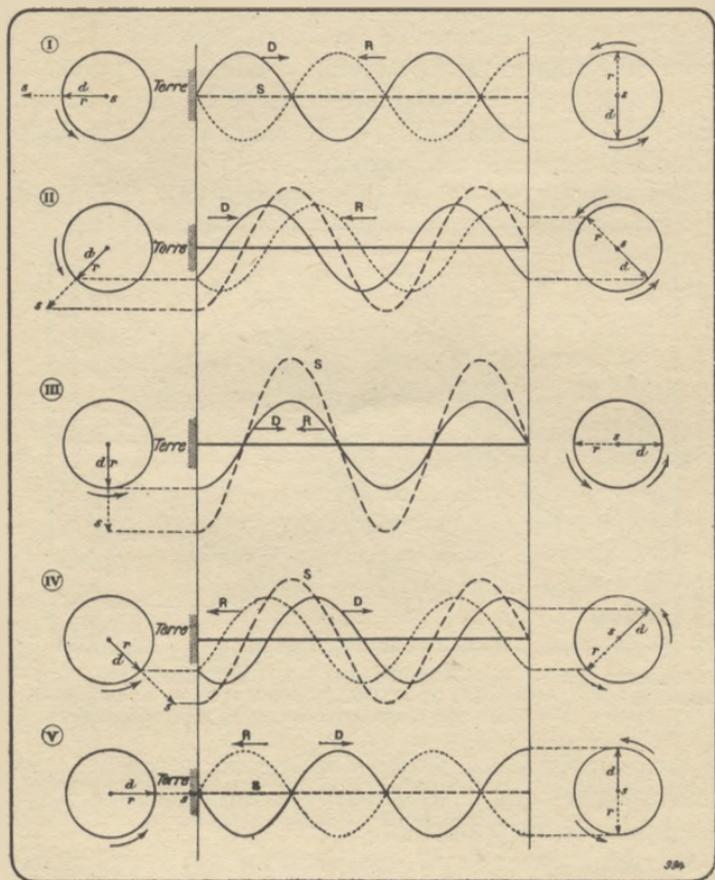


Fig. 25. — RÉFLEXION DES ONDES DE COURANT SUR UNE ANTIENNE LONGUE DE SEPT QUARTS D'ONDE. — D, onde directe ; R, onde réfléchie ; S, onde stationnaire ; d , r , s , index représentatifs du mouvement des ondes et correspondant à la position de la manette des tire-bouchons qui les figurent. Les cinq graphiques représentent cinq phases consécutives de la propagation des ondes sur l'antenne, phases correspondant à celles des ondes de tension.

l'intensité de l'onde, ce que l'on admet aisément.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

En second lieu, il est naturel qu'à l'extrémité isolée de l'antenne la réflexion n'altère pas la valeur de la tension et que l'intensité de l'onde réfléchie, égale à celle de l'onde directe, s'ajoute à elle en ce point.

D'autre part, à l'extrémité mise à la terre, la tension est évidemment nulle, et les index d et r des ondes directe et réfléchie sont opposés.

Les graphiques (I) à (V) représentent différentes

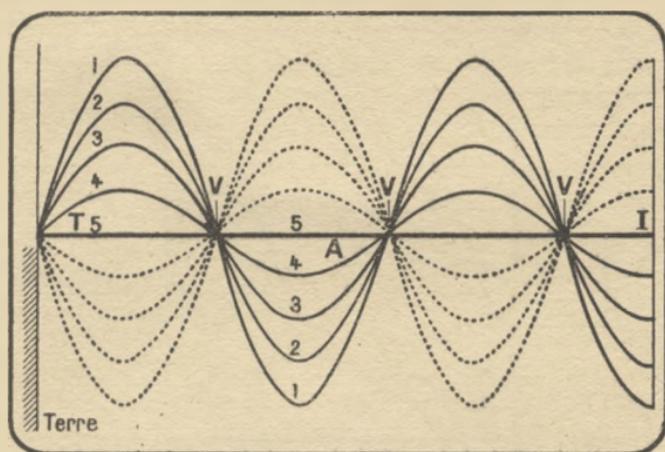


Fig. 26. — ONDES STATIONNAIRES DE TENSION SUR UNE ANTENNE LONGUE DE SEPT QUARTS D'ONDE. — A, antenne ; T, extrémité mise à la terre ; I, extrémité isolée ; V, ventres de courant.

phases consécutives du phénomène de la réflexion des ondes, phases qui se succèdent pendant la durée d'une demi-période de vibration.

On remarque que la courbe sinueuse S qui représente la répartition de la tension résultante s'aplatit progressivement jusqu'en (III), où toute tension s'annule, pour reprendre en (V) sa forme primitive.

On observe également qu'en certains points de l'antenne, désignés par la lettre V et qui sont situés à des distances évaluées par des multiples entiers

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

de la longueur d'onde, la tension est toujours nulle.

Les autres points de la courbe S se déduisent facilement par l'observation des cadrans indiquant le mouvement de l'onde directe et de l'onde réfléchie. Cette tension varie entre la valeur zéro et la valeur maximum S suivant la position du point considéré sur l'antenne.

On obtient ainsi, en définitive, pour la valeur de la tension aux différents points de l'antenne, la représen-

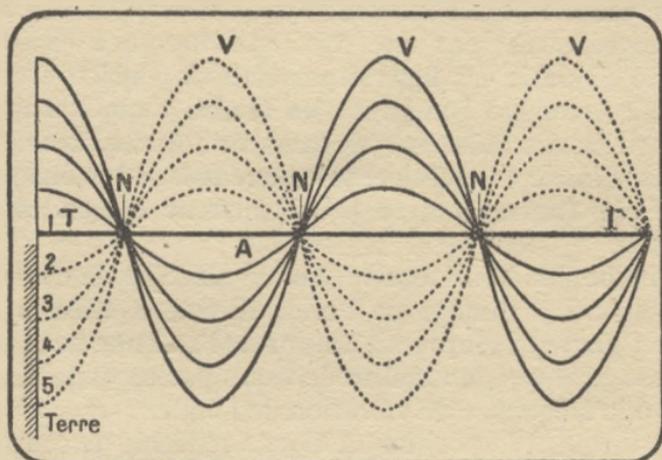


Fig. 27. — ONDES STATIONNAIRES DE COURANT SUR UNE ANTENNE DE SEPT QUARTS D'ONDE. — A, antenne ; T, extrémité à la terre ; I, extrémité isolée ; N, nœuds de courant ; V, ventres.

tation de la figure 26, qui indique l'état des tensions en différentes phases de la vibration (1, 2, 3, 4, 5).

*
* *
*

La propagation des ondes de courant s'explique aussi aisément que celle des ondes de tension.

Les divers graphiques de la figure 25 représentent différentes phases de la propagation des ondes sur l'antenne, phases qui correspondent exactement à celles des ondes de tension représentées sur la figure 24.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

C'est pourquoi l'on remarque que les courbes D représentant les ondes directes sont respectivement les mêmes sur les deux groupes de diagrammes.

Par contre, les ondes réfléchies de courant (R, fig. 25) sont en *retard* ou en *avance*, suivant les phases de la vibration, sur les ondes réfléchies de tension (R, fig. 24), et cette différence suffit à changer totalement l'aspect du phénomène.

Si, comme précédemment, l'onde directe de courant est représentée par une vis « qui tourne à droite », l'onde réfléchie est figurée par une vis « qui tourne à gauche », comme l'on peut s'en rendre compte d'après la position des index sur les cadrans latéraux. Les deux ondes, directe et réfléchie, se trouvent être symétriques l'une de l'autre comme précédemment les ondes de tension.

Comme l'onde de tension, l'onde réfléchie de courant correspond à l'image de l'onde directe à travers un miroir plan qui tournerait autour de l'antenne avec une vitesse telle que le nombre de tours par seconde serait égal à la fréquence de vibration de l'onde.

La forme et la position de l'onde réfléchie de courant peuvent être facilement déterminées. La forme est évidemment la même que celle de l'onde directe. D'autre part, lorsque l'onde directe atteint l'extrémité isolée de l'antenne, elle doit s'y réfléchir de façon que le courant résultant soit constamment nul à cette extrémité. Il s'ensuit que l'onde réfléchie de courant doit être, à la différence de l'onde réfléchie de tension, exactement opposée à l'onde directe à l'extrémité isolée de l'antenne.

Les phénomènes de réflexion des ondes de courant et de tension ne différant que par l'écart d'une demi-période qui subsiste entre les ondes réfléchies, on conçoit que les ondes résultantes S soient semblables et se suivent à un quart de période.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

La figure 27 représente la distribution du courant résultant le long de l'antenne pour différentes phases du phénomène.

*
* * *

Nous avons vu précédemment pour quelle raison les phénomènes qui résultent des vibrations d'une antenne sous l'excitation du choc des ondes, et que nous allons sommairement décrire, prennent le nom d'*ondes stationnaires*.

On comprend facilement cette dénomination limpide. Jusqu'à présent, nous n'avons considéré que des ondes qui se propageaient, qu'elles soient ondes radioélectriques proprement dites, ondes de courant ou ondes de tension le long d'une antenne.

Il suffit de jeter un coup d'œil sur les courbes des figures 26 et 27 pour convenir que nous n'avons plus affaire à ces ondes progressives, qui paraissent ramper le long de leur axe de propagation et dont les différentes phases semblent provenir d'un même déplacement le long de cet axe.

Les nouvelles ondes n'avancent ni ne reculent ; elles se contentent d'osciller sur place, et leurs vibrations n'affectent pas leur position, mais seulement leur intensité ; d'où leur nom d'*ondes stationnaires*.

Ce résultat est vraiment curieux : deux ondes dont l'amplitude est constante et la position variable, l'onde directe et l'onde réfléchie, donnent naissance à une onde dont la position est constante et l'amplitude variable.

Les deux graphiques des figures 26 et 27 permettent de suivre facilement les oscillations de ces ondes stationnaires.

Il apparaît immédiatement que les ondes stationnaires ont la même fréquence et, par suite, la même longueur d'onde que les ondes qui leur ont donné naissance.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

Elles présentent en outre le long de l'antenne une répartition curieuse.

Les ondes stationnaires de tension ont toujours une intensité nulle à l'extrémité mise à la terre de l'antenne et une intensité maximum à l'extrémité isolée ; de plus, leur intensité est nulle en des points V espacés de demi-longueur d'onde en demi-longueur d'onde à partir de l'extrémité mise à la terre. Au milieu du secteur déter-

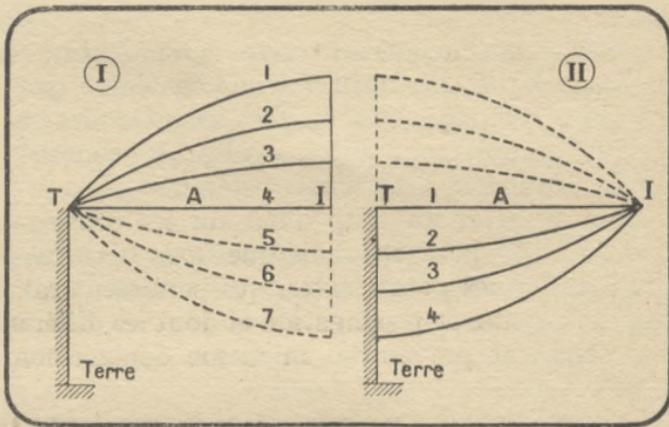


Fig. 28. — ONDES STATIONNAIRES DE TENSION (I) ET DE COURANT (II) SUR UNE ANTENNE VIBRANT EN QUART D'ONDE. — A, antenne « quart d'onde » ; T, extrémité à la terre ; I, extrémité isolée.

miné par deux de ces points, l'onde de tension est toujours maximum, et cette intensité maximum varie elle-même entre une valeur déterminée et zéro suivant les diverses phases de la vibration. C'est ce que montrent bien les courbes 1, 2, 3, 4, 5, qui représentent les phases successives du phénomène.

Les ondes stationnaires de courant vibrent suivant un processus analogue. Mais, au contraire des ondes de tension, elles sont toujours maximum à l'extrémité mise à la terre et nulles à l'extrémité isolée. Les points

V, où la tension est nulle, correspondent à un courant maximum et sont appelés, pour cette raison, des *ventres* de vibrations. Les points N, où la tension est maximum, sont traversés par un courant nul et sont dénommés *nœuds* de vibration.

D'une façon générale, les vibrations de la tension et du courant sont analogues, et il semble que l'on peut passer de l'un des types d'ondes stationnaires à l'autre

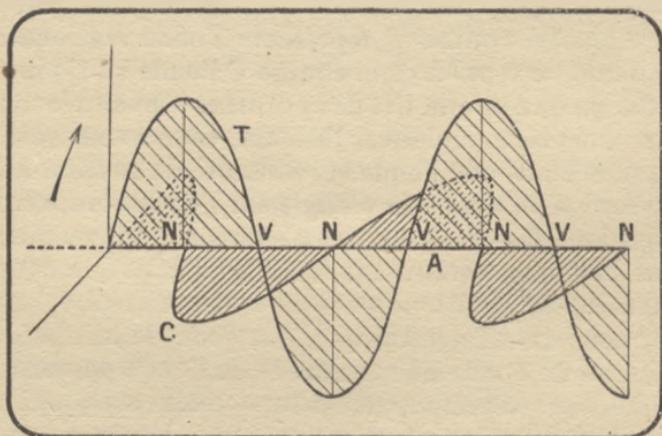


Fig. 29. — IMAGE DE LA SUCCESSION DES ONDES STATIONNAIRES DE TENSION T ET DE COURANT C. — A, antenne, axe de rotation du système des ondes T et C; N, V, nœuds et ventres de courant. La flèche indique le sens de la rotation des ondes maxima.

au moyen d'un déplacement égal à un quart de longueur d'onde le long de l'antenne.

En général, les conditions de meilleure utilisation des antennes conduisent à en réduire la longueur à un quart de longueur d'onde environ; dans ces conditions, l'antenne rayonne ou absorbe le maximum d'énergie possible. On dit alors que l'antenne vibre en *quart d'onde*; ce mode de vibration, couramment utilisé, est représenté par la figure 28.

Comment peut-on se représenter la succession des

ondes stationnaires? La réponse à cette question est donnée par les courbes des figures 24 et 25. Tout se passe comme si la courbe S était la projection, sur le plan de la figure, des courbes S du graphique I (fig. 24) et du graphique III (fig. 25), supposées tracées sur un plan pivotant autour de l'antenne avec une vitesse telle que le nombre de tours par seconde serait égal à la fréquence de vibration de l'onde.

Cette image nous est précisément donnée par la figure 29. La courbe T représente l'onde stationnaire maximum de tension et la courbe C l'onde stationnaire maximum de courant. Ces deux courbes sont situées dans deux plans rectangulaires. En effet, nous avons remarqué, plus haut, que l'onde stationnaire de courant était en retard d'un quart de période sur l'onde stationnaire de tension; les plans des deux courbes étant rectangulaires, la courbe du courant succède en effet à la courbe de tension un quart de période après celle-ci. D'autre part, nous avons montré que, par suite de la réflexion différente de l'onde de courant et de l'onde de tension, les courbes représentant deux ondes stationnaires étaient semblables et décalées l'une par rapport à l'autre d'un quart de longueur d'onde.

Les deux ondes stationnaires T et C se déduisent donc l'une de l'autre :

1° Par un déplacement dans l'espace égal à un quart de longueur d'onde le long de l'antenne ;

2° Par un déplacement dans le temps, égal à un quart de période et correspondant à un angle droit dans la rotation des courbes autour de l'antenne.

Ces déplacements simultanés et correspondants, dans le temps et dans l'espace, nous montrent que les deux ondes stationnaires maximum de courant et de tension peuvent être considérées comme deux aspects d'une même vis sur deux plans perpendiculaires.

CHAPITRE VI

A PROPOS DE LA CAPACITÉ DES CONDENSATEURS

CONDENSATEURS A ARMATURES ÉVIDÉES. — RÉPARTITION DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES ARMATURES ÉVIDÉES.
— APPLICATION AUX ANTENNES EN NAPPE.

Il est une question qui se rattache indirectement à la transmission des ondes parce qu'elle intéresse le fonctionnement des collecteurs d'ondes et de tous les systèmes utilisant des condensateurs électriques. Cette question, à laquelle nous allons répondre après l'avoir exposée, peut s'exprimer sous la forme suivante :

Dans quelle mesure affaiblit-on la capacité d'un condensateur en diminuant la surface de ses armatures ?

Dissipons d'abord un premier malentendu. Certains nous diront : la question ne se pose pas, puisque aussi bien chacun sait que, toutes choses égales d'ailleurs, la capacité d'un condensateur est proportionnelle à la surface de ses armatures.

Cette proposition n'est pas rigoureusement exacte. Elle n'est valable que dans le cas d'un condensateur à lames minces et lorsque l'on fait varier d'une façon simple la surface des armatures, soit en ajoutant ou en enlevant des lames comme dans les condensateurs fixes, soit en rapprochant ou en éloignant progressivement l'une des armatures de l'autre, comme dans les condensateurs variables.

Il n'en est plus de même si la modification de l'armature est répartie sur toute la surface. C'est précisé-

ment ce qui advient si l'on perfore l'une des armatures ou même les deux de petits trous qui n'altèrent pas considérablement la valeur de leur superficie. On peut réaliser aisément l'expérience avec une épingle ou un poinçon. Bien que l'armature soit, de ce chef, transformée en passoire, ses propriétés n'en sont pas sensiblement modifiées le plus souvent. L'altération est d'autant moins sensible que les armatures sont plus éloignées. On pourra, sans modifier la valeur de la capacité, percer des trous plus grands et plus nombreux dans un condensateur à air que dans un condensateur à lame de mica, dont les armatures sont plus rapprochées. L'altération sera encore plus faible si les trous de deux armatures en regard sont distribués à leur surface d'une façon quelconque et si l'on évite de les placer vis-à-vis les uns des autres.

Empressons-nous de dire que ces indications sont données seulement à titre d'expériences et que nous ne conseillons nullement à nos lecteurs de perforer leurs condensateurs. Les observations que nous venons de faire n'ont d'applications intéressantes que lorsque l'on désire réaliser des condensateurs à air de grandes dimensions.

Supposons qu'il s'agit d'un condensateur formé par deux grandes plaques métalliques parallèles distantes de quelques centimètres, par exemple. Si l'on perfore ces plaques d'un grand nombre de trous de poinçon, on ne constate aucune altération sensible de la valeur de la capacité, quels que soient le nombre et la dimension des trous, à condition qu'ils ne soient pas jointifs et ne compromettent pas la rigidité des armatures (fig. 30).

Remplaçons ces plaques perforées par des nappes de treillis métallique fin, de mêmes dimensions, placées à la même distance : le résultat reste négatif, et il en est

de même si l'on augmente sensiblement la grosseur des mailles. A partir d'une certaine grosseur, on note une faible diminution de la capacité, qui s'accuse à mesure

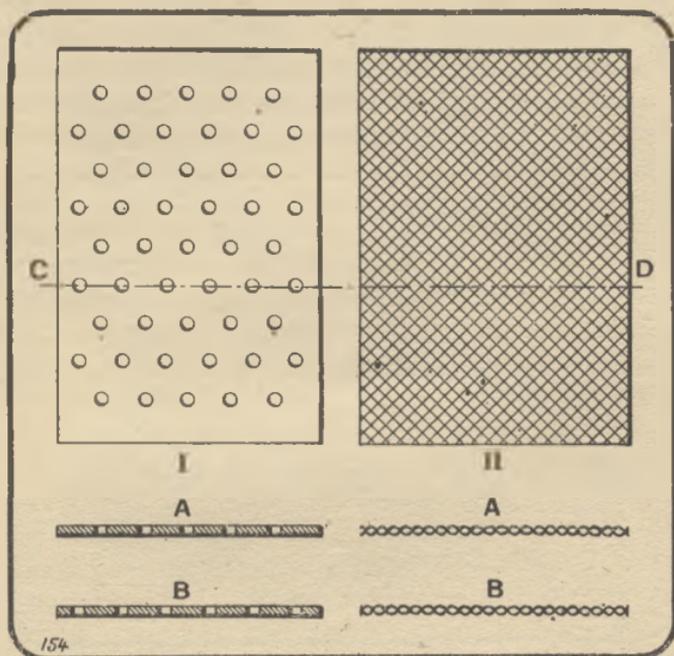


Fig. 30. — CONDENSATEURS A ARMATURES ÉVIDÉES. — Armatures perforées I; et de treillis II; AB, coupe des armatures suivant CD.

que la maille devient plus grosse par rapport à la distance des deux armatures.

Il n'en est pas moins vrai que, lorsque les mailles sont de dimensions moyennes, le condensateur ainsi réalisé possède une capacité égale à celle du condensateur à armatures pleines.

Ce résultat est remarquable, si l'on considère que la surface d'un treillis de fil fin est extrêmement faible par rapport à celle d'une lame pleine de mêmes dimen-

sions. Ce fait prouve que, pour réaliser un condensateur, une armature de treillis est équivalente à une armature pleine, à cette condition que la dimension des mailles soit relativement faible par rapport à l'écartement des armatures.

Bien que remarquable, ce résultat n'est nullement surprenant. On sait, en effet, que les armatures d'un condensateur n'interviennent que pour retenir en quel-

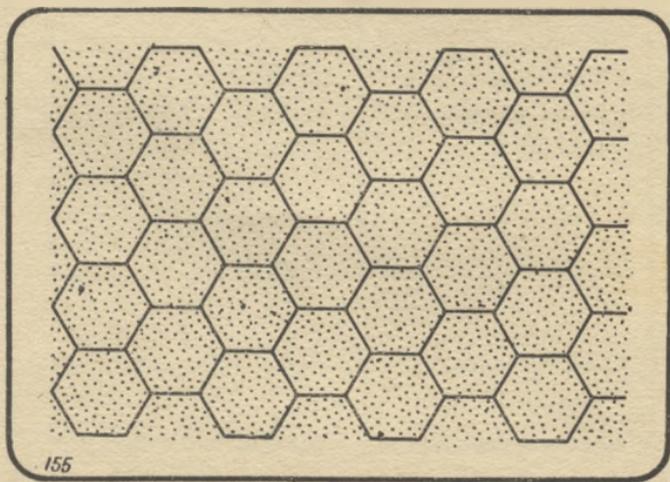


Fig. 31. — RÉPARTITION RÉGULIÈRE DES GRAINS D'ÉLECTRICITÉ ENTRE LES MAILLES D'UN TREILLIS SERRÉ.

que sorte l'électricité à la surface et même à l'intérieur de l'isolant (air, mica, etc.) qui les sépare. Le résultat est le même si ces surfaces, au lieu d'être entièrement métalliques, sont *métallisées* par un simple treillis. Si le treillis est suffisamment fin par rapport à la distance des armatures, l'électricité est retenue dans chaque maille comme elle le serait à la surface d'une armature entièrement métallique (fig. 31); si le treillis devient trop lâche, l'espace n'est plus convenablement utilisé, et la capacité du condensateur faiblit (fig. 32).

Une comparaison simple, empruntée à la physique, fera bien comprendre le mécanisme d'un condensateur de treillis. Si l'on relève un treillis plongé dans une dissolution visqueuse, par exemple dans du liquide glycérique obtenu en mélangeant de l'eau de savon et de la glycérine, on constate qu'une mince pellicule de ce liquide est tendue sur chaque maille comme la paroi d'une bulle de savon. Cette pellicule est d'autant plus solide et

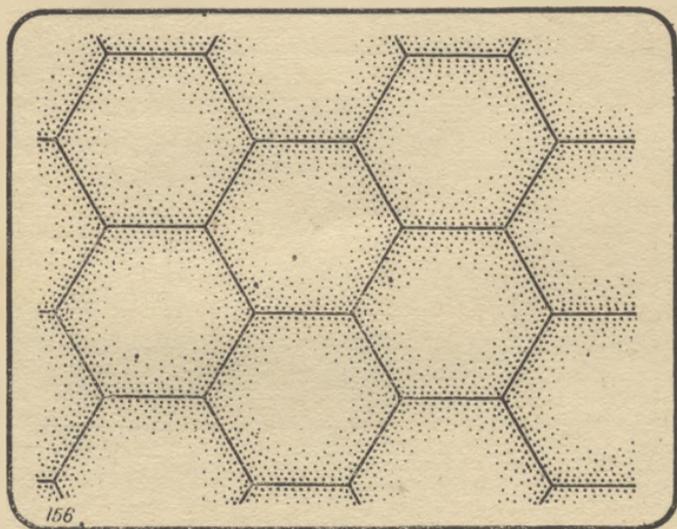


Fig. 32. — RÉPARTITION IRRÉGULIÈRE DES GRAINS D'ÉLECTRICITÉ ENTRE LES MAILLES D'UN TREILLIS LACHE. — La densité d'électricité, plus forte au bord des mailles, est nulle en leur centre.

mieux formée que la maille est plus petite ; sa fragilité croît avec la grosseur de la maille, et elle finit par éclater. Il en est du liquide glycérique comme de l'électricité, retenue à la surface de la maille métallique.

Ainsi, la densité de l'électricité retenue à la surface des armatures du condensateur reste la même lorsque l'on emploie une plaque métallique ou un treillis. Et cependant, si l'on se rapporte aux surfaces métalliques

réellement utilisées dans l'un et l'autre cas, la densité électrique est évidemment beaucoup plus forte dans le cas du treillis que dans celui de l'armature pleine ; il semblerait qu'il doive en résulter logiquement un accroissement de la résistance du condensateur, et ce serait précisément le cas si les armatures représentaient effectivement la section d'un condensateur parcouru par un courant. Il n'en est rien, parce que les armatures sont surtout le siège de phénomènes statiques impor-

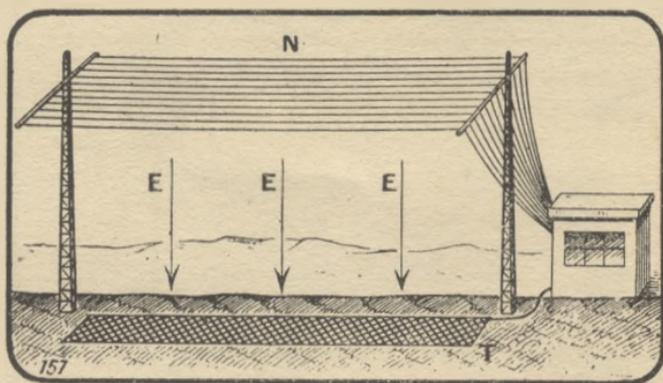


Fig. 33. — ASPECT D'UNE ANTENNE EN NAPPE MUNIE D'UNE PRISE DE TERRE. — Les courants de haute fréquence E issus de l'antenne N se referment par la prise de terre T en traversant le sol.

tants et qu'elles ne sont jamais parcourues, eu égard à la surface qu'elles offrent, que par des courants très faibles. On conçoit donc qu'une réduction, même très grande, de la surface des armatures n'entraîne aucune augmentation appréciable de la résistance du condensateur.

On peut également remplacer le treillis métallique par un réseau de fils parallèles tendus. Les résultats sont sensiblement les mêmes que pour le treillis ; on ne parvient à noter une diminution appréciable de la capacité que lorsque l'écart de deux fils consécutifs devient

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

trop considérable par rapport à la distance des armatures.

Ces considérations nous amènent à parler d'un condensateur à air d'un type très spécial : l'antenne en nappe horizontale. A l'appui de ce que nous avons montré, sa capacité est sensiblement la même que si une plaque métallique s'était substituée à la nappe de fils. Il y a lieu toutefois de tenir compte, pour une hauteur donnée de la nappe, de la répartition des fils et de

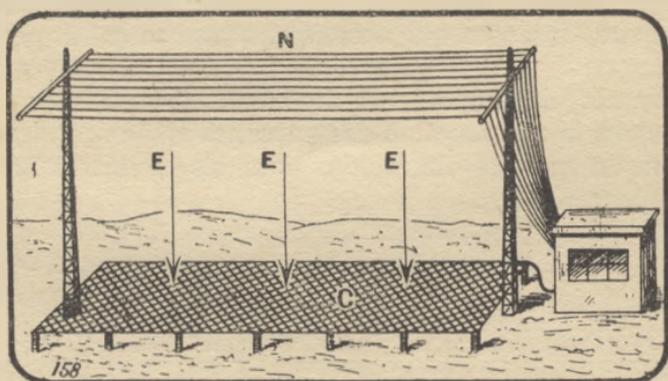


Fig. 34. — ASPECT D'UNE ANTENNE MUNIE D'UN ÉCRAN DE TERRE. — Les courants de haute fréquence E issus de l'antenne N se referment par le contrepois C sans rencontrer la résistance du sol.

leur espacement, qui doit être plus faible sur les bords de la nappe qu'au centre.

Les essais récemment effectués sur les contrepois et les prises de terre des antennes corroborent ce que nous avons dit des armatures de treillis et de fils. La résistance électrique propre des contrepois et des prises de terre est toujours négligeable par rapport à la résistance rencontrée dans le sol par les courants qui se referment (fig. 33 et 34). D'ailleurs, l'emploi du treillis présente sur celui du métal plein deux avantages importants : en premier lieu, l'économie de matière, puisque,

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

à égalité de surface enveloppée, un treillis de fil est notablement plus léger qu'une plaque métallique pleine ; en second lieu, l'économie d'énergie.

Nous avons vu que, pour les courants transportés, les réseaux de fil n'offraient pas plus de résistance que les plaques pleines ; ils en offrent même moins en haute fréquence, puisque l'on sait que les courants de cette espèce se propagent de préférence à la surface des conducteurs ; d'autre part, ils évitent par leur répartition la formation au sein de la masse métallique de courants parasites intenses qui accroissent beaucoup les pertes d'énergie.

On conçoit l'importance des treillis et des réseaux de fils dans la construction des antennes et des condensateurs de grandes dimensions pour les circuits à haute fréquence.



CHAPITRE VII

LES ACTIONS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES A DISTANCE

RÔLE DE L'ÉETHER DANS LES ACTIONS A DISTANCE. —
LES HYPOTHÈSES DE MAXWELL. — COURANTS ÉLEC-
TRIQUES DANS LES CONDUCTEURS ET DANS LES ISOLANTS.
— CORPUSCULES DE L'ÉETHER ET GRAINS D'ÉLECTRICITÉ.
— LES FORCES ÉLECTRIQUES ET LES FORCES MAGNÉ-
TIQUES. — RÉCIPROCITÉ DE LEURS ACTIONS.

Comment pouvons-nous essayer d'expliquer les actions à distance ? Ce problème troublant a longtemps tourmenté les chercheurs, qui ne pouvaient pas admettre que des actions physiques importantes, et notamment celles qui mettent en jeu des quantités d'énergie considérables, pussent être transmises sans aucun intermédiaire tangible, voire même dans le vide le plus absolu.

Les astronomes paraissent s'être émus les premiers de cet apparent paradoxe, qui semble absurde à nos sens. Bien qu'il soit considéré à juste titre comme le génial révélateur de la gravitation universelle, Newton lui-même se défend d'affirmer qu'en fait les corps réagissent les uns sur les autres dans le vide, mais se contente plutôt d'indiquer que tout se passe comme s'il en était ainsi, tellement cette proposition lui semble absurde en soi.

Aussi, pour accorder l'évidence de leurs observations avec le bon sens de leur intuition, les physiciens ont-ils été dans l'obligation d'imaginer un milieu universellement répandu à travers la matière et à travers le vide

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

le plus absolu, qui fût capable de transmettre certaines des actions s'exerçant à distance et telles qu'aucun intermédiaire matériel ne pût expliquer leur existence ; ce milieu, c'est l'*éther*, dont nous avons déjà eu l'occasion d'entretenir nos lecteurs.

Il ne nous paraît pas inutile de revenir sur cette question si importante qu'elle est à la base de toute la physique moderne. En effet, nous n'avions fait qu'entrevoir un côté du problème, celui qui concerne particulièrement la propagation des ondes. Le problème est beaucoup plus vaste, en réalité, et nous allons montrer qu'il englobe en outre la plupart des phénomènes électriques, qui trouvent ainsi un nouveau point de rapprochement avec la science des ondes.

Comme nous le disions plus haut, ce problème est né de l'observation de faits précis qui n'ont pu trouver leur explication dans la physique élémentaire : par exemple, la transmission à distance des forces mécaniques, des forces électriques, des forces magnétiques (fig. 35 et 36). Autant il est facile de concevoir la transmission d'une force par l'intermédiaire de la matière, par exemple la traction d'un train par une locomotive, autant il est difficile de l'imaginer dans le vide absolu, lorsqu'elle s'exerce entre deux planètes par exemple. La difficulté est la même pour se représenter le mécanisme de l'attraction ou de la répulsion de deux boules de sureau électrisées, de l'attraction ou de la répulsion de deux aimants. Les théoriciens dissimulent cette apparente détresse sous des conceptions abstraites : ils disent que les actions à distance se transmettent par l'intermédiaire de « champs de forces », dont ils connaissent sinon la nature, du moins les propriétés essentielles, ce qui leur est beaucoup plus utile pour en tirer leurs déductions. Il n'en est pas moins vrai que l'amateur de réalités physiques a besoin de se repré-

senter d'une façon concrète ces échafaudages mathématiques, fût-ce au prix d'une hypothèse hardie.

Dans cette voie, le physicien anglais Maxwell est

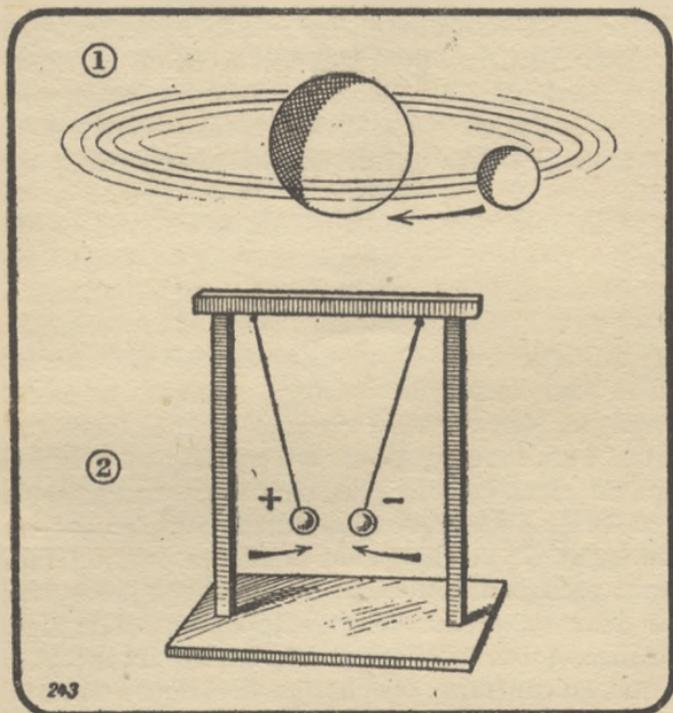


Fig. 35. — ACTIONS A DISTANCE DE L'ÉNERGIE GRAVITIQUE ET DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. — 1, attraction newtonienne des planètes ; 2, attraction de deux boules de sureau électrisées.

certainement l'un de ceux qui ont le plus contribué, vers la fin du XIX^e siècle, à éclairer la question. Bien que des théories plus transcendantes aient été proposées depuis, la théorie de Maxwell reste à la base de l'interprétation des phénomènes électriques et magnétiques et s'applique également aux ondes électromagnétiques. Très connues des techniciens, les hypothèses de Maxwell

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

sont moins bien connues du grand public, parce que l'on a souvent négligé de les lui exposer simplement. C'est ce que nous allons essayer de faire, en montrant ensuite comment ces hypothèses permettent de passer de l'électricité et du magnétisme à la radioélectricité ; rappelons d'ailleurs que Maxwell a édifié sa théorie dans le seul but de relier entre eux les phénomènes connexes de l'électricité et du magnétisme et de montrer qu'ils sont de même nature que les phénomènes lumineux.

Les savants qui précédèrent Maxwell n'avaient guère étudié les phénomènes électriques que dans leurs rapports avec les corps conducteurs, qu'il s'agît soit de charges électriques localisées à leur surface, comme en électrostatique, soit de charges électriques en mouvement sous forme de courants, comme en électrodynamique. Maxwell eut l'idée d'associer aussi les corps isolants à ses investigations, qui portèrent d'abord sur l'appareil électrique le plus simple : le condensateur. Les théories anciennes admettaient simplement que, au moment de la charge du condensateur, un faible courant prenait naissance pour véhiculer sur ses armatures deux quantités d'électricité égales et de signes contraires, qui se localisaient à la surface du métal. On sait que, au contraire, ces charges électriques ne restent pas à la surface, mais pénètrent plus ou moins profondément dans le corps isolant qui sépare les deux armatures. Cela provient de ce que le courant de charge se referme à travers le condensateur ; toutefois, à cause de la nature de l'isolant, le courant qui le traverse ne présente pas les mêmes caractères que le courant qui circule à travers les fils de connexion. Alors que les conducteurs n'opposent au passage du courant qu'une faible résistance, l'isolant en oppose une énorme. Mais, tandis que la résistance des conducteurs n'a pour effet

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

que de les échauffer sous l'influence du passage du courant, la résistance du condensateur accumule au sein de l'isolant l'énergie électrique de la charge, qui est

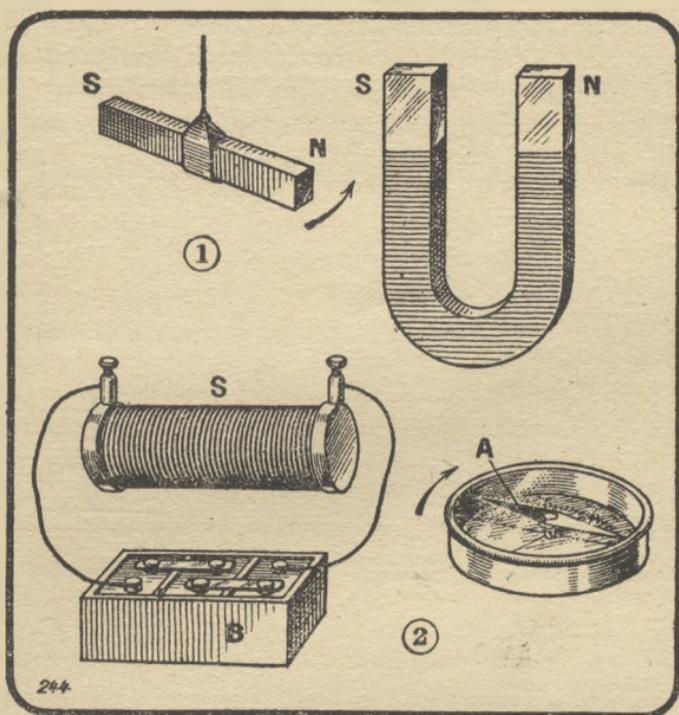


Fig. 36. — ACTIONS A DISTANCE DE L'ÉNERGIE MAGNÉTIQUE. — 1, attraction de deux pôles d'aimant de noms contraires; 2, attraction d'un pôle de boussole par une bobine parcourue par un courant. Ces actions s'expliquent par les déformations élastiques de l'éther.

restituée lorsque l'on décharge cet appareil (fig. 37). Tout se passe comme si la charge avait pour effet de bander une sorte de ressort électrique qui serait libéré à la décharge. On saisit alors la différence qui existe entre la résistance de frottement du conducteur, qui

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

ne produit que de la chaleur au passage du courant, et la résistance élastique de l'isolant, qui agit comme un ressort mécanique.

Maxwell a donné le nom de *courants de déplacement* à ces courants particuliers qui traversent les corps isolants ; ils présentent par ailleurs les mêmes propriétés que les courants de conduction qui traversent les conducteurs et sont susceptibles, comme eux, de produire à

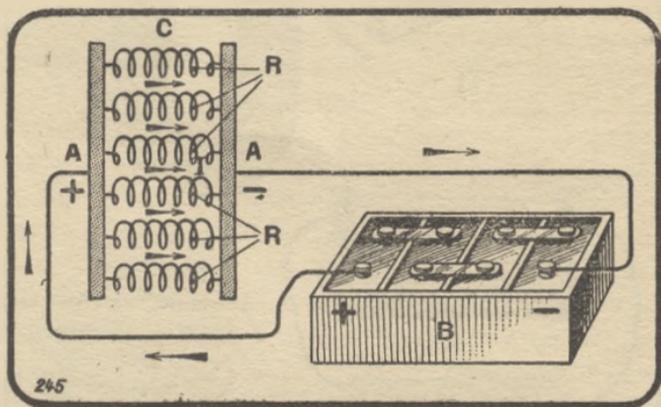


Fig. 37. — ANALOGIE MÉCANIQUE DE LA TENSION ÉLECTRIQUE D'UN CONDENSATEUR. — La tension électrique de la batterie qui charge le condensateur C a pour effet de faire passer dans les fils de connexion un courant qui se referme à travers l'isolant I sous forme d'un petit courant de déplacement, donnant entre les armatures une tension électrique analogue à la tension mécanique des ressorts R.

distance des actions électriques et magnétiques. Inversement, une perturbation électrique ou magnétique quelconque donne toujours lieu à un courant dans un corps conducteur ou isolant.

On conçoit que dans un milieu isolant pratiquement indéfini, ces perturbations puissent ainsi se transmettre de proche en proche sous forme de courants sans être absorbées, sauf au contact des corps conducteurs. C'est

ainsi que l'on arrive à expliquer la nature de la propagation des ondes radioélectriques.

Avant de pénétrer plus avant dans le domaine des ondes, essayons d'exposer le mécanisme des actions électriques et mécaniques à faible distance.

Pour imaginer à la fois la transmission des phénomènes électriques et des phénomènes magnétiques, Maxwell dut concevoir l'éther comme composé de parti-

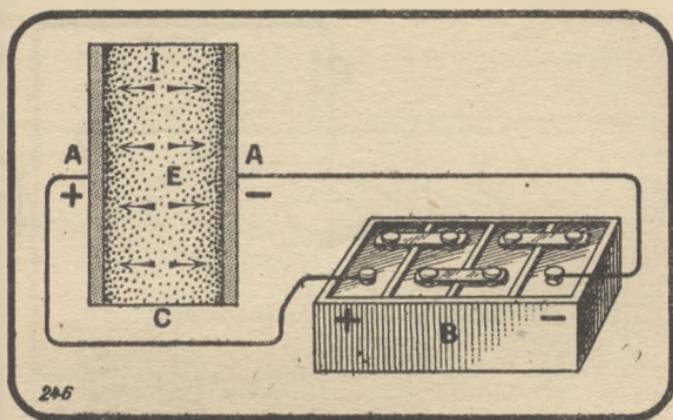


Fig. 38. — MÉCANISME DE LA CHARGE D'UN CONDENSATEUR. — Les grains d'électricité E répartis dans l'isolant I à l'entour tendent à se précipiter vers les armatures A, d'autant plus vite que les armatures sont plus rapprochées et la tension de charge plus élevée.

cules extrêmement ténues qui imbiberaient les molécules de tous les corps. L'éther serait lui-même imprégné de particules encore plus ténues, constituées par les grains d'électricité.

Cela étant, on explique facilement les phénomènes électriques. Lorsque l'on charge un condensateur, les grains d'électricité répartis dans l'isolant à l'entour tendent à se précipiter vers les armatures ; cet afflux est d'autant plus considérable que les armatures sont plus rapprochées et que la tension de charge est plus

élevée (fig. 38). Lorsque l'on décharge le condensateur, les grains d'électricité se dirigent par les fils de connexion d'une armature vers l'autre et tendent à se neutraliser.

La propagation des actions magnétiques est plus compliquée. On sait que, lorsque l'on répartit de la limaille de fer sur un carton horizontal traversé par un

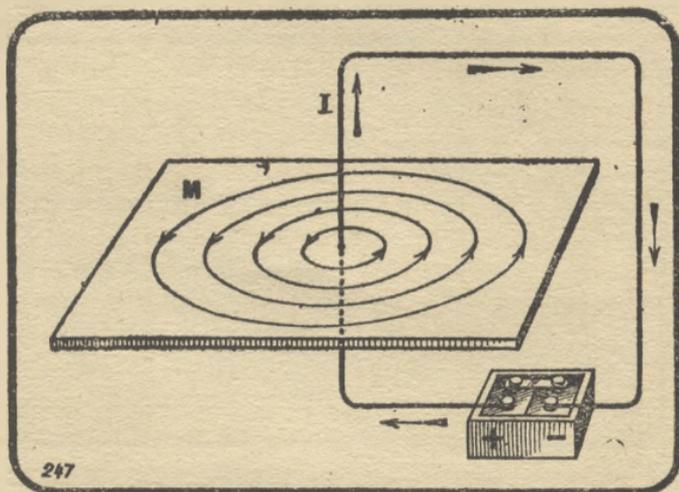


Fig. 39. — SPECTRE DES FORCES MAGNÉTIQUES. — Les forces magnétiques créées par un courant rectiligne I dessinent sur un carton semé de limaille de fer des cercles concentriques M, qui les révèlent.

courant électrique vertical, les forces magnétiques orientent les grains de limaille de façon à dessiner sur le carton des cercles concentriques au fil qui conduit le courant (fig. 39).

Maxwell donne de ces forces magnétiques une explication curieuse. D'après lui, les forces magnétiques ne seraient que les axes autour desquels tournent les corpuscules de l'éther qu'il imagine sphériques. La figure 40 représente un faisceau de ces axes parallèles des forces

magnétiques qui existent entre les deux pôles d'un aimant, par exemple. Bien entendu, le sens de rotation de ces corpuscules sphériques est lié au sens des forces magnétiques : ils tournent dans le sens d'un tire-bouchon qui avancerait dans la direction de ces forces (règle du tire-bouchon de Maxwell), comme on le vérifie faci-

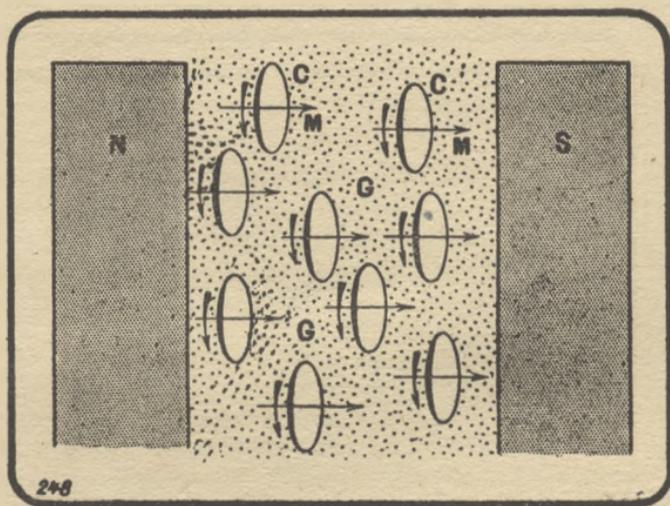


Fig. 40. — REPRÉSENTATION DU FAISCEAU DES FORCES MAGNÉTIQUES ENTRE LES DEUX POLES D'UN AIMANT D'APRÈS LA THÉORIE DE MAXWELL. — Ces forces magnétiques parallèles M sont créées par la rotation dans le même sens des corpuscules C de l'éther. Les grains d'électricité G interposés servent de galets de roulement.

lement en observant l'action d'un courant sur une boussole.

Dans leur mouvement de rotation, ces corpuscules sphériques tendent naturellement à s'aplatir au pôle et à se dilater à l'équateur. On vérifie avec non moins de facilité la conséquence de ces nouvelles hypothèses. L'aplatissement de ces corpuscules tend à raccourcir les forces magnétiques : en effet, chacun sait que les armatures d'un aimant s'attirent ; c'est même la raison

pour laquelle elles attirent simultanément une pièce de fer mobile, qui vient fermer le circuit magnétique.

D'autre part, la dilatation des corpuscules tend à écarter les uns des autres les forces magnétiques, qui se repoussent.

Pour concevoir la transmission de ces mouvements tourbillonnaires, Maxwell dut imaginer l'intervention des grains d'électricité qui feraient en quelque sorte

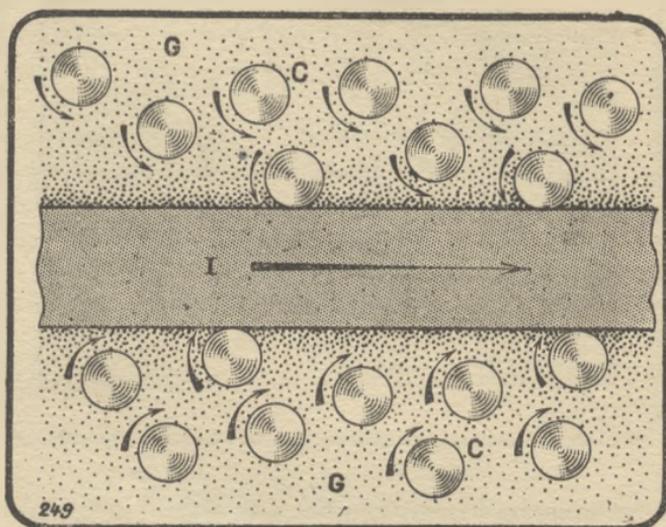


Fig. 41. — FORMATION DES FORCES MAGNÉTIQUES AUTOUR D'UN CONDUCTEUR PARCOURU PAR UN COURANT. — Entraînés par les grains d'électricité G, les corpuscules C de l'éther tournent autour d'axes perpendiculaires au conducteur parcouru par le courant I.

l'office de galets de roulement entre les corpuscules d'éther ; ainsi pouvait-il expliquer que, dans un même faisceau de forces magnétiques, tous les corpuscules tournent dans le même sens.

Après avoir révélé les actions à distance magnétiques et électriques, il restait à relier les deux ordres de phénomènes en expliquant l'action magnétique d'un

courant électrique et l'action électrique des forces magnétiques.

Considérons un fil conducteur parcouru par un courant ; les grains d'électricité qui circulent à sa surface avec la vitesse de la lumière tendent à entraîner dans leur mouvement les grains d'électricité libre qui sont répandus dans l'éther tout autour du fil. Ils n'y parviennent pas, par suite de la résistance énorme qui s'oppose au déplacement de ces grains noyés dans le milieu isolant, comme nous l'avons vu plus haut à propos du condensateur.

Néanmoins, le déplacement infime de ces grains par entraînement produit deux effets : d'abord des forces électriques se développent dans le milieu extérieur, qui se charge comme les armatures du condensateur ; en second lieu, des forces magnétiques prennent naissance, parce que dans leur mouvement les grains d'électricité font tourner les corpuscules d'éther. Comme l'on s'en rend compte sur la figure 41, qui représente le phénomène en coupe, le sens de rotation des corpuscules est tel que leurs axes se répartissent sur des cercles concentriques au fil conducteur. Dans ce cas, les forces magnétiques se présentent précisément sous la forme de cercles concentriques, comme nous l'avait révélé l'expérience du spectre magnétique (fig. 39). En définitive, les tourbillons se groupent en quelque sorte comme des anneaux qui entoureraient le conducteur (fig. 42).

On peut donner une image simplifiée du phénomène, en représentant le fil conducteur par un crayon et le corpuscule d'éther par une gomme de machine à écrire en contact avec le crayon. Lorsque l'on fait glisser le crayon sur lui-même, on fait de ce chef tourner la gomme, que l'on saisit par son centre entre les doigts (fig. 43, 1). Pour rendre compte de ce qui se passe autour du conducteur dans toutes les directions, il suffit, comme on l'a

parfois fait remarquer, de remplacer la gomme de machine par un anneau en caoutchouc épais que l'on tient entre les doigts : lorsque l'on fait glisser le crayon sur lui-même, l'anneau tourbillonne sur place, et son mouvement est exactement celui du tourbillon des corpuscules d'éther (fig. 43, 2).

Il est aussi facile de montrer la réciprocité de ce

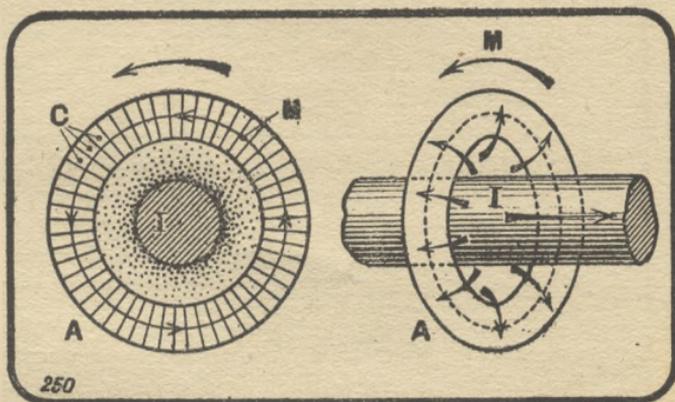


Fig. 42. — FIGURATION DES FORCES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES DÉVELOPPÉES PAR LE PASSAGE D'UN COURANT. — La réunion des corpuscules C de l'éther autour du conducteur I forme des anneaux concentriques A qui tourbillonnent sur place. La ligne médiane de ces anneaux est la force magnétique circulaire M qui en résulte.

phénomène, c'est-à-dire comment les forces magnétiques peuvent donner naissance à des courants. Nous supposons qu'un conducteur en forme de boucle vienne à être traversé par un faisceau de forces magnétiques (fig. 44). Les tourbillons des corpuscules de l'éther tendent à entraîner dans leur mouvement les grains d'électricité libre ; mais, pour la raison que nous avons longuement exposée plus haut, ils ne parviennent qu'à les déplacer légèrement et, par suite, provoquent dans le conducteur un courant très court (courant d'induction).

On voit à quel point sont liés entre eux les phénomènes d'électricité et de magnétisme. Ces deux ordres de phénomènes ne peuvent jamais se manifester l'un sans l'autre. Tout courant de conduction ou de dépla-

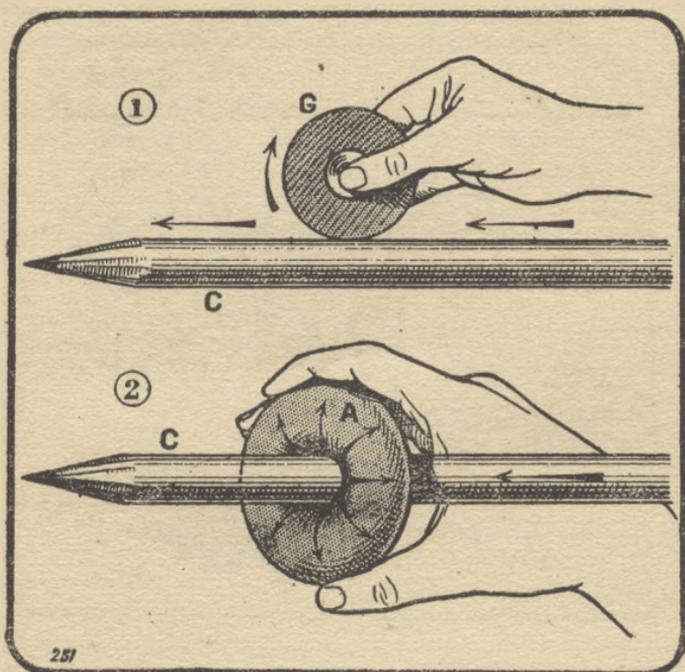


Fig. 43. — ANALOGIES MÉCANIQUES DU MOUVEMENT DES CORPUSCULES D'ÉTHER. — 1. Il est facile de reproduire avec un crayon C et une gomme de machine G le mouvement de rotation des corpuscules de l'éther dans le plan de la figure 41. — 2. On reproduit de même avec un crayon C et un anneau de caoutchouc A le mouvement des corpuscules de l'éther autour d'un conducteur (fig. 42).

cement fait naître des forces électriques et magnétiques ; inversement, toute variation des forces électriques et magnétiques fait apparaître un courant de conduction ou de déplacement.

Nous verrons plus loin comment les phéno-

mènes d'induction en courant alternatif de haute ou de basse fréquence s'expliquent de la même manière. Lorsque l'on inverse le sens du courant, le sens de rotation des corpuscules change ainsi que la direction des forces magnétiques. Si le courant est alternatif, les

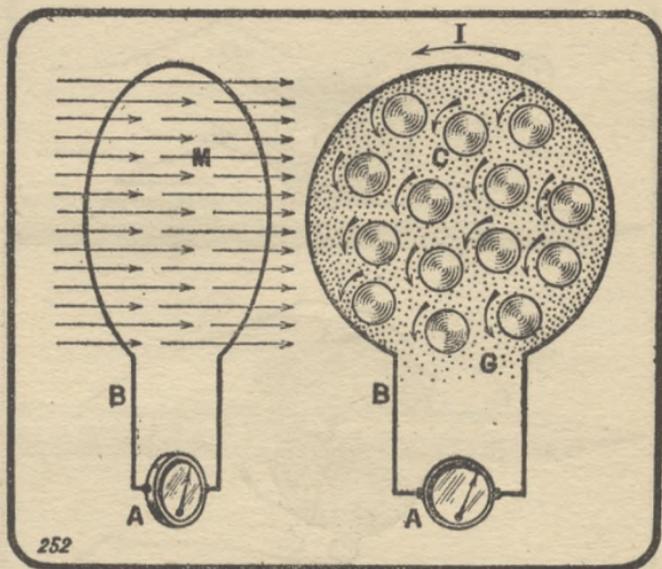


Fig. 44. — MÉCANISME DE L'INDUCTION MAGNÉTIQUE. — Lorsqu'un faisceau de forces magnétiques M s'établit ou disparaît à travers la boucle B d'un conducteur fermé, un courant momentané I prend naissance dans ce conducteur par suite de l'entraînement des grains d'électricité G par les corpuscules de l'éther C en rotation parallèle.

corpuscules tournent alternativement dans l'un et l'autre sens, et les forces magnétiques s'inversent à la fréquence du courant.

Cet aperçu élémentaire suffit à indiquer comment la théorie de Maxwell permet de prévoir une généralisation des phénomènes électriques d'induction et de déduire, par conséquent, des phénomènes localisés qui

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

se produisent aux basses fréquences les phénomènes de propagation par ondes qui caractérisent les mouvements vibratoires aux fréquences élevées.

La suite nous montrera comment l'on peut ramener précisément la vibration des antennes et des cadres ainsi que la propagation des ondes aux phénomènes élémentaires que nous venons de décrire.



CHAPITRE VIII

LES ACTIONS RADIOÉLECTRIQUES

EXTENSION AUX PHÉNOMÈNES RADIOÉLECTRIQUES DE L'INDUCTION. — DIRECTION ET PROPAGATION DANS L'ÉTHER DES FORCES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES.

Il est facile de transposer dans le domaine de la radioélectricité les résultats que nous avons obtenus grâce à la théorie de Maxwell dans le domaine de l'induction électrique.

Par analogie avec les phénomènes électriques et magnétiques et pour faciliter les investigations théoriques, les savants radiotechniciens ont été amenés à dédoubler l'onde qui transmet les forces radioélectriques ou, comme l'on dit plus correctement, l'onde électromagnétique en une onde électrique et en une onde magnétique.

On est conduit tout naturellement à cette idée en considérant une antenne de transmission. Pour plus de simplicité et aussi parce que c'est le cas le plus général à l'heure actuelle, nous imaginerons que cette antenne se compose d'une nappe horizontale, tendue sur quelques pylônes, et d'une descente d'antenne plus ou moins verticale.

Or nous savons que, au cours de la transmission, la descente d'antenne est parcourue par un courant maximum, sous une tension électrique très faible, tandis que la nappe est le siège d'un courant relativement faible sous une tension très élevée par rapport au sol. Il nous est donc facile d'assimiler la nappe d'antenne et la

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

prise de terre à une sorte de gigantesque condensateur, tandis que la descente se comporte comme le courant vertical traversant une nappe horizontale saupoudrée de limaille de fer. Entre la nappe d'antenne et le sol, comme entre les deux armatures du condensateur, existe donc un faisceau de forces électriques ; de même, tout autour de la descente d'antenne, des forces magné-

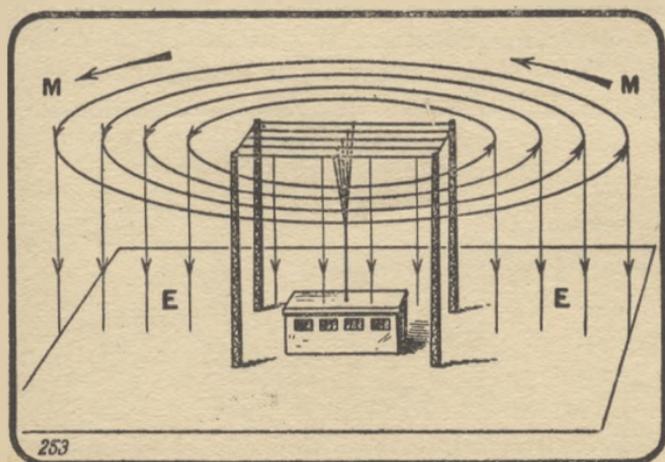


Fig. 45. — RÉPARTITION DES FORCES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES AUTOUR D'UNE ANTENNE D'ÉMISSION. — Autour d'une antenne d'émission prennent naissance des forces électriques E verticales et des forces magnétiques M horizontales concentriques.

tiques concentriques prennent naissance, et l'aspect de ce double phénomène nous apparaît sous la figure 45.

Or le courant et la tension électriques qui sont appliqués à l'antenne ne sont pas continus, mais alternatifs à haute fréquence. Les phénomènes d'induction électriques et magnétiques, localisés au voisinage des bobines et des condensateurs lorsqu'il s'agit de courants à basse fréquence, se propagent au contraire au loin et avec rapidité lorsqu'ils émanent de courants à haute fréquence. Il s'ensuit un rayonnement dans toutes les directions

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

sous forme d'ondes radioélectriques, comme nous l'avons déjà vu.

En réalité, le phénomène de la propagation des ondes électromagnétiques n'est qu'un cas particulier fort intéressant : le cas de la haute fréquence, dans l'étude des phénomènes d'induction. La preuve en est que, en tout point de l'espace soumis au rayonnement des ondes radioélectriques, on retrouve les forces électriques et les forces magnétiques, sous forme d'une onde électrique et d'une onde magnétique. La répartition de ces

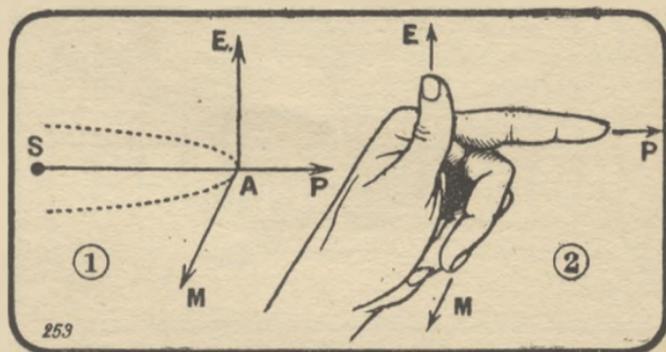


Fig. 46. — ORIENTATION DES FORCES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES. — En tout point A de l'espace, la force électrique verticale E et la force magnétique horizontale M sont perpendiculaires à la direction SAP de la propagation (1); on peut représenter ces directions par les trois premiers doigts de la main (2) (Règle des trois doigts).

forces autour de l'antenne de la figure 45 nous fait prévoir comment elles sont dirigées en un point quelconque de l'espace. La force électrique, qui apparaît verticalement entre l'antenne et la terre, reste évidemment verticale. Quant à la force magnétique, concentrique à l'antenne, elle reste évidemment horizontale et perpendiculaire à la direction de la propagation. Si bien qu'en tout point de l'espace les trois directions : propagation, force électrique et force magnétique sont deux à deux perpendiculaires. Il est facile

de représenter cette disposition à l'aide des trois premiers doigts de la main gauche, comme l'indique la figure 46 : le pouce figurant la force électrique ; l'index, la direction de la propagation et le médium la force magnétique.

Il existe une vérification simple de ce raisonnement, vérification que nous faisons spontanément, sans nous

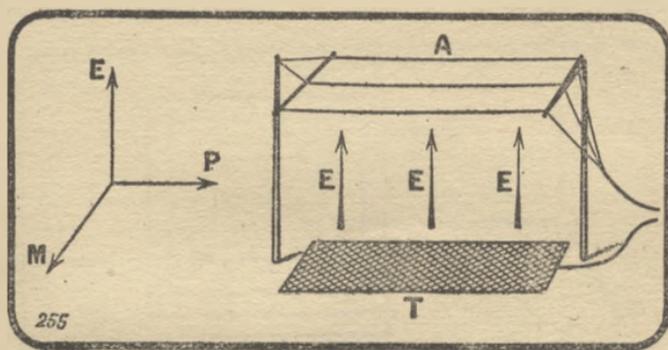


Fig. 47. — ACTION SUR UNE ANTENNE DES FORCES ÉLECTRIQUES. — Les forces électriques verticales E agissent sur les antennes horizontales A qui forment un condensateur avec la prise de terre T .

en apercevoir, à chaque fois que nous recevons les ondes.

On sait qu'une nappe d'antenne de réception est, autant que possible, tendue horizontalement dans la direction du poste émetteur : c'est évidemment pour que les forces électriques verticales agissent au mieux entre les armatures du condensateur formé par la nappe d'antenne par la terre (fig. 47).

On n'ignore pas, d'autre part, qu'un cadre de réception doit être orienté verticalement dans la direction du poste émetteur : c'est évidemment pour que les forces magnétiques horizontales et perpendiculaires à la direction de la propagation pénètrent au mieux à travers les spires du cadre, comme l'armature magnétique

d'un transformateur à travers les bobines de son enroulement (fig. 48).

En réalité, parmi les forces électriques et magnétiques répandues également dans l'espace au passage des ondes, les antennes sélectionnent de préférence les premières et les cadres les secondes.

Autrement dit, si l'on désire ramener le phénomène de la propagation des ondes au cas général des phéno-

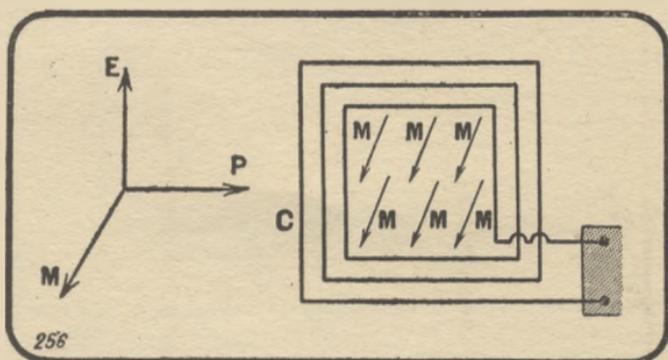


Fig. 48. — ACTION SUR UN CADRE DES FORCES MAGNÉTIQUES. — Les forces magnétiques M horizontales agissent principalement sur les cadres de réception C orientés dans la direction P des ondes.

mènes d'induction, on peut dire que l'antenne de réception est une sorte de condensateur influencé à distance par induction électrostatique, tandis que le cadre est une sorte de circuit secondaire de transformateur, influencé à distance par induction magnétique.

On peut ainsi arriver aux mêmes conclusions en raisonnant sur les trois doigts de la main au lieu de considérer le mouvement des ondes. Toutefois ce second mode de raisonnement est plus délicat et moins tangible ; aussi avons-nous cru bien faire en exposant plutôt le premier pour expliquer la formation d'ondes stationnaires sur une antenne aux chapitres II et V.

Il est extrêmement simple de ramener immédiatement le second au premier, en considérant que la règle des trois doigts n'est qu'une forme légèrement différente de la règle du tire-bouchon, que nous avons appliquée ci-dessus à l'induction magnétique.

En effet, le sens de la propagation est lié à la direction des forces électriques et magnétiques. Lorsque ces deux

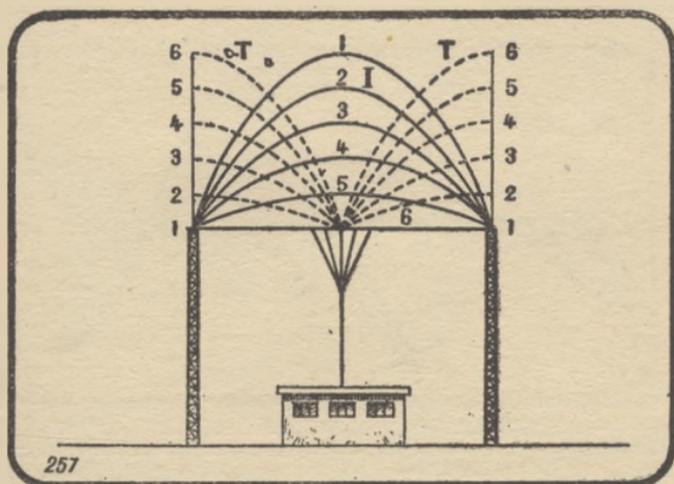


Fig. 49. — VIBRATION DES ONDES STATIONNAIRES SUR UNE ANTENNE. — Aspect de l'onde stationnaire de courant I et de l'onde stationnaire de tension T sur une antenne en nappe horizontale.

forces changent de sens ensemble, comme cela arrive deux fois par période au cours des oscillations, le sens de la propagation n'en est pas altéré. Mais, si l'une de ces forces vient à changer de sens sans l'autre, la propagation a lieu en sens inverse, et l'on dit que l'onde se réfléchit. On représente très simplement ce phénomène en remplaçant dans la figuration des forces les doigts de la main gauche par ceux de la main droite, ou *vice-versa*.

Une onde qui se propage librement peut toujours

être représentée simplement par une force électrique et une force magnétique égales, en supposant connu le sens de la propagation de l'onde.

On sait que la vibration d'une antenne est caractérisée par le phénomène d'ondes stationnaires, c'est-à-dire que le courant est maximum au *moment* où la tension est minimum et inversement ; que le courant

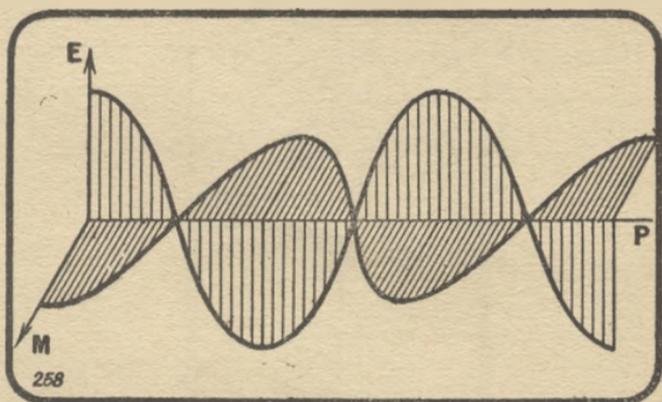


Fig. 50. — ASPECT DES ONDES LIBRES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES. — Les variations des ondes libres électriques E et magnétiques M dans la direction P de la propagation sont simultanées.

est maximum à l'*emplacement* où la tension est minimum et inversement (fig. 49). On pourrait croire qu'il en est de même dans le rayonnement des ondes autour de l'antenne et que les forces électrique et magnétique sont antagonistes dans l'espace et dans le temps. Il n'en est rien, parce que le phénomène des ondes stationnaires est limité à l'antenne, c'est-à-dire à un périmètre de un quart d'onde autour de la station d'émission, comme l'a montré le savant anglais Lodge. Au delà de cette région, on ne rencontre plus que des ondes libres, telles qu'en tout point de l'espace et à tout instant leurs forces électrique et magnétique sont égales et dirigées perpendiculairement l'une à l'autre (fig. 50).

CHAPITRE IX

QU'EST-CE QU'UN COLLECTEUR D'ONDES ?

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LE RAYONNEMENT ET L'ABSORPTION. — COMPARAISON THERMIQUE. — ACTION DES ONDES SUR L'ANTENNE. — RÔLE DE LA HAUTEUR. — PROPRIÉTÉS DE L'ANTENNE ARTIFICIELLE. — ACTION DES ONDES SUR LE CADRE. — EXPLICATION DES PROPRIÉTÉS DIRECTIVES DU CADRE. — IMAGE SCHÉMATIQUE DES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DU CADRE.

Qu'est-ce qu'un collecteur d'ondes et à quelles conditions doit satisfaire un dispositif susceptible de porter ce nom ? Ces questions méritent quelque réflexion, et il n'est certainement pas inutile d'insister ici sur un point qui est, en général, laissé quelque peu dans l'ombre dans la plupart des manuels de T. S. F. à l'usage des amateurs.

Nous ne prétendons pas enseigner ici à nos lecteurs ce qu'est une antenne ou un cadre, mais plutôt dégager de l'ensemble de leurs propriétés l'idée que l'on peut se faire d'un collecteur d'ondes en général. Notons d'abord que les divers systèmes ayant pour objet de capter les ondes sont souvent désignés, à l'exemple des Anglais, par le terme d'*aérien*, qui fait ressortir que les collecteurs d'ondes sont généralement tendus dans l'air ; ajoutons tout de suite que, si les collecteurs d'ondes sont le plus souvent aériens, il en existe toutefois de souterrains et de sous-marins.

Le rôle essentiel des collecteurs d'ondes est d'absorber dans leurs circuits, sous forme de courants de haute

fréquence, l'énergie mise en jeu dans l'éther et, en particulier, dans l'atmosphère, par le passage des ondes.

En fait, les systèmes collecteurs d'ondes (antennes, cadres et combinaisons diverses) ne se distinguent pas des systèmes radiateurs d'ondes, puisque aussi bien l'on peut émettre et recevoir les ondes sur une antenne et sur un cadre. Ainsi les propriétés absorbantes et

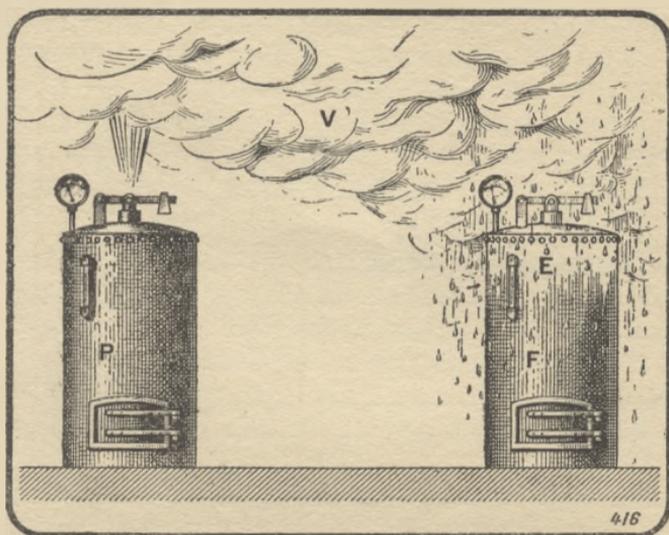


Fig. 51. — ANALOGIE THERMIQUE DU RAYONNEMENT ET DE L'ABSORPTION. — La vapeur V rayonnée par la chaudière sous pression P vient se condenser en eau à la surface de la chaudière froide F.

rayonnantes de ces circuits sont, en quelque sorte, réciproques ; l'absorption n'est, à proprement parler, qu'un rayonnement négatif.

Une comparaison simple fera comprendre aisément ces propriétés. Supposons que deux chaudières soient enfermées dans un même local (fig. 51) ; l'une est sous pression, l'autre seulement remplie d'eau froide. Si l'on ouvre la soupape de la première, de la vapeur en jaillira,

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

dont le nuage se répandra alentour (système rayonnant). En se propageant à travers l'enceinte, les nuages de vapeur rencontreront la paroi de la chaudière emplie d'eau froide, qui les condensera sous forme d'eau (système absorbant). En s'échappant, la vapeur emporte, tout en abaissant la température de la chaudière sous pression, l'énergie calorifique qui y était contenue et la rayonne alentour ; une partie de cette énergie calori-

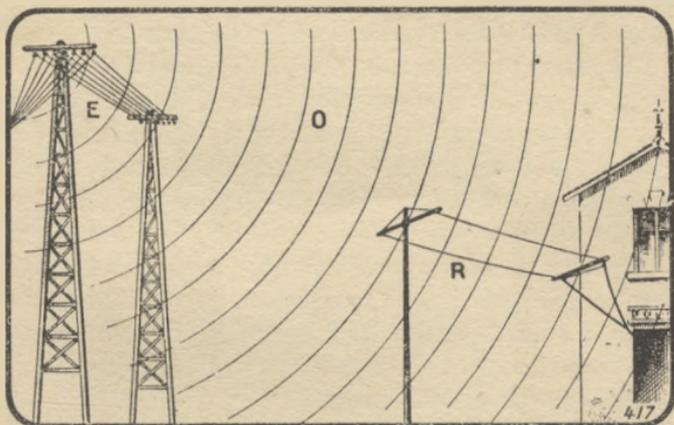


Fig. 52. — RAYONNEMENT ET ABSORPTION DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES. — Les ondes radioélectriques O rayonnées par l'antenne d'émission E sont absorbées par l'antenne de réception R, de même que les nuages de vapeur émise viennent se condenser (Voir fig. 51).

fique, contenue dans la vapeur qui se condense, est restituée à la chaudière froide, au moment où l'eau se dépose et contribue à la réchauffer.

Il est inutile que nous développions longuement une analogie que nos lecteurs ont certainement devinée. La chaudière sous pression correspond à l'antenne d'émission ; la chaudière froide, à l'antenne de réception (fig. 52). La vapeur qui s'échappe de la première pour venir se condenser sur la seconde est représentée par les ondes rayonnées par la première antenne, qui

sont captées par la seconde; l'énergie calorifique est analogue à l'énergie radioélectrique. Le raisonnement que nous venons de faire est absolument indépendant du système de radiateur et de collecteur employé, qui peuvent être indifféremment des cadres ou des antennes.

Dans quelle mesure un collecteur d'ondes possède-t-il cette propriété fondamentale de l'absorption ?

Pour répondre à cette question, il suffit de se figurer comment se présente cette énergie radioélectrique si subtile. Nous l'avons laissé entrevoir dans le précédent chapitre en expliquant les actions radioélectriques. Au passage des ondes en un point de l'espace prennent naissance des forces électriques verticales et des forces magnétiques horizontales perpendiculaires à la direction de la propagation. Or, ce double phénomène se reproduit en tout point de l'espace. Si l'on envisage un volume de l'espace suffisamment petit, par rapport à la longueur d'onde, pour qu'en tout point l'on y puisse considérer comme égales les forces électriques et magnétiques, il est naturel d'admettre que l'énergie radioélectrique développée par le passage de l'onde en cet espace est proportionnelle au volume envisagé.

Il en résulte immédiatement que la quantité d'énergie radioélectrique absorbée par le collecteur d'ondes sera proportionnelle au volume embrassé par ce collecteur.

Or, pour absorber l'énergie radioélectrique, nous ne disposons que de deux types originaux de collecteurs, l'antenne et le cadre, qui se prêtent d'ailleurs à diverses combinaisons. Nous allons étudier successivement les propriétés générales de l'antenne et du cadre en ce qui concerne l'absorption des ondes.

On sait que l'antenne est constituée par un réseau de fils, qui se réduit parfois à un fil unique. Elle se résume globalement à une sorte de nappe, qui peut prendre les formes les plus variées (nappe horizontale

ou oblique de fils parallèles ou convergents, nappe pyramidale, nappe de treillage métallique). Cette nappe agit comme l'une des armatures d'un condensateur, dont l'autre armature serait la terre ou un autre réseau métallique (réseau de fils conducteurs, de tuyaux d'eau

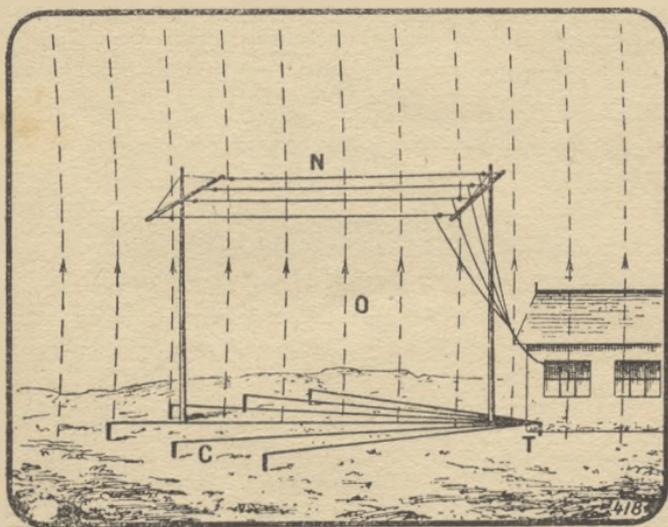


Fig. 53. — VOLUME D'ABSORPTION D'UNE ANTENNE. — L'antenne embrasse dans l'espace un certain volume d'ondes O, limité par sa hauteur moyenne, d'une part, et, d'autre part, par les surfaces de sa nappe N et de sa prise de terre T (ou de son contrepois électrique C).

ou de gaz, de charpentes métalliques) formant contrepois électrique.

Finalement, on peut dire que l'antenne embrasse un certain volume limité généralement à la partie supérieure par la nappe d'antenne et à la partie inférieure par la terre ou le contrepois (fig. 53). Il arrive, d'ailleurs, que les positions soient inversées, comme c'est le cas pour les dirigeables et les avions, dont les antennes pendantes sont situées au-dessous du contrepois constitué par la masse métallique de l'appareil (fig. 54).

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

Dans le volume ainsi déterminé, les forces électriques verticales développées par le passage de l'onde agissent entre l'antenne et la terre exactement comme entre les armatures d'un condensateur. Notons toutefois que le mode d'action est inverse : dans le condensateur, c'est

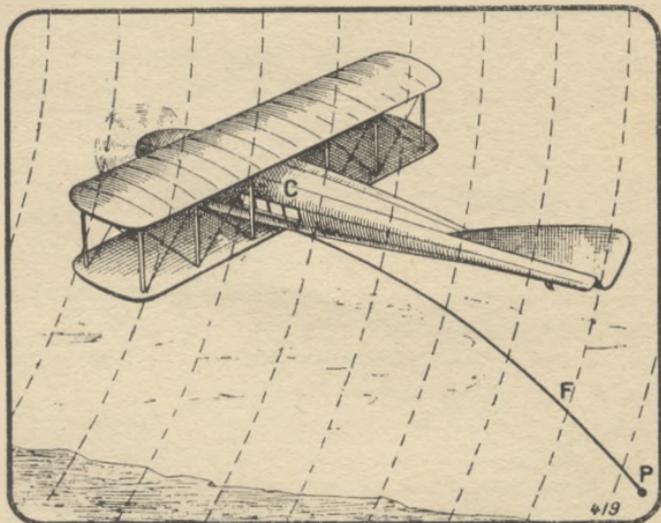


Fig. 54. — COLLECTEUR D'ONDES D'UN AVION. — A bord d'un avion, le système collecteur d'ondes est constitué par le fil d'antenne F, tendu par un poids P, et par le contre poids C, remplaçant la terre absente et formé par la masse métallique de l'appareil (haubans, moteurs, etc.).

en appliquant un courant de haute fréquence que l'on fait naître des forces électriques entre les armatures, tandis que ce sont les forces électriques qui développent entre l'antenne et la terre des courants de haute fréquence ; nous avons déjà vu antérieurement, au chapitre VII, pourquoi il en était ainsi et comment Maxwell se représentait la réversibilité de ces phénomènes.

Ce mode d'action des ondes sur l'antenne fait prévoir que ses propriétés directives sont très peu marquées. En effet, pourvu que le volume embrassé par l'antenne

reste le même, il est indifférent que la nappe soit orientée dans telle ou telle direction horizontale : les forces électriques verticales s'exercent toujours de la même façon entre l'antenne et la terre, parce que la surface des armatures et leur distance restent les mêmes et que la capacité du condensateur ainsi formé reste constante (fig. 55).

Ainsi, ce qui caractérise la propriété d'absorption du système antenne-terre, c'est principalement la capacité du condensateur ainsi formé et le volume qu'il offre au passage des ondes. Cette dernière restriction est essentielle, et la fonction absorbante d'une antenne ne croît avec sa capacité électrique que dans la mesure où s'accroît également le volume des ondes qu'elle embrasse.

Une antenne étendue directement sur le sol n'aurait qu'un pouvoir absorbant infime, bien que sa capacité soit considérable, parce que, la distance entre l'antenne et la terre étant extrêmement réduite, les ondes ne pourraient pas, pratiquement, pénétrer à l'intérieur du condensateur ainsi formé. C'est la raison pour laquelle les radiotechniciens introduisent, outre la notion capacité, cette autre notion de *hauteur effective* d'une antenne, qui correspond à la distance entre la nappe et la terre.

Une antenne a donc un pouvoir absorbant — ou rayonnant — d'autant plus grand que sa nappe est plus développée et que sa hauteur moyenne est plus grande. C'est pourquoi la grande antenne de Sainte-Assise a un pouvoir rayonnant beaucoup plus considérable que celle de la Tour Eiffel ; la surface de sa nappe est, en effet, beaucoup plus étendue, tandis que sa hauteur moyenne (250 mètres) est notablement plus élevée que celle de l'antenne de la Tour Eiffel (150 mètres environ), bien que le sommet de cette nappe soit à 300 mètres au-dessus du sol.

L'analyse que nous venons de faire du pouvoir

absorbant des antennes nous permet de pénétrer plus avant dans la recherche de leurs propriétés, de concevoir les propriétés essentielles de l'antenne type et d'en donner une image simple. L'antenne-type, qui se résume en un condensateur aérien de grandes dimensions, peut être synthétisée sous la forme d'une nappe de fils horizontaux ou, plus simplement, d'un simple fil. Si modeste qu'il soit, ce simple fil horizontal est cependant doué de propriétés remarquables ; associé à la terre, dont il ne faut jamais le séparer au cours d'un raisonnement, il constitue un circuit oscillant extrêmement original. Il possède toutes les propriétés électriques requises pour osciller, savoir la self-induction et la capacité, voire même une faible résistance qui amortit l'oscillation, sans toutefois la supprimer entièrement.

Parmi les positions que peut prendre un fil conducteur, la position horizontale est assurément celle pour laquelle il présente, — toutes choses égales d'ailleurs, — la plus grande capacité par rapport au sol, condition essentiellement favorable au fonctionnement de l'antenne. Dans ce cas, le fil tendu horizontal présente le moins de self-induction.

Il est possible de donner une image électrique simple d'une telle antenne. En réalité, comme les propriétés électriques de l'antenne sont réparties sur un grand espace et non concentrées en un volume restreint, on est obligé de faire appel, pour cette représentation, non pas à un seul circuit oscillant, mais à une série de ces circuits qui se suivent les uns les autres comme les maillons d'une chaîne. C'est ce que l'on nomme une *antenne artificielle* ou un *câble artificiel*. On les constitue en réunissant à un fil de terre, au moyen de petits condensateurs identiques, des prises équidistantes pratiquées sur une bobine. La self-induction de la bobine est égale à celle de l'antenne ; la somme des capacités

des condensateurs est égale à la capacité totale de l'antenne par rapport au sol (fig. 56).

Ce qu'il y a de remarquable dans ces antennes arti-

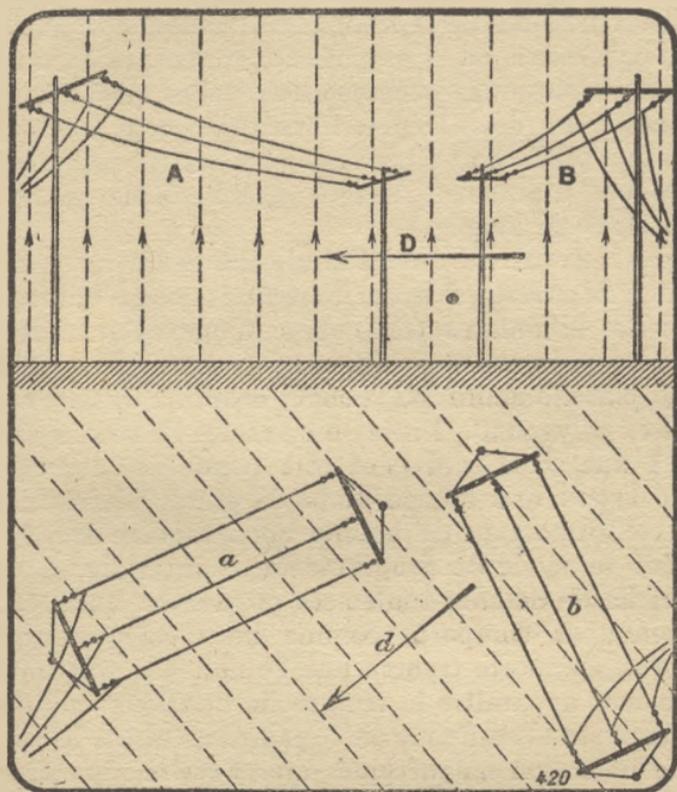


Fig. 55. — LE VOLUME D'ONDES EMBRASSÉ PAR UNE ANTENNE EST PRATIQUEMENT INDÉPENDANT DE SA DIRECTION. — Les antennes identiques A, a et B, b, représentées ci-dessus en élévation et en plan, embrassent le même volume d'ondes parce qu'elles ont la même hauteur et la même surface. Malgré leurs directions perpendiculaires, elles reçoivent les ondes provenant d'une direction quelconque D, d.

ficielles, si toutefois le nombre de leurs chaînons est assez considérable, c'est qu'elles reproduisent exactement les propriétés électriques des antennes correspon-

dantes, à l'exception toutefois du pouvoir rayonnant ou absorbant, qui reste la caractéristique des antennes véritables, ayant une hauteur réelle.

Entre autres observations intéressantes, indiquons qu'il est possible de reproduire sur antenne artificielle les phénomènes de la propagation et de la réflexion des ondes, ainsi que les phénomènes d'ondes stationnaires. Ces antennes, dont la plus importante peut être logée dans une petite boîte, peuvent ainsi rendre compte des propriétés d'antennes réelles, ayant même plusieurs kilomètres de longueur.

Nous retrouvons dans l'étude du cadre un certain nombre d'analogies avec l'antenne ; nous observons aussi des différences très nettes. Comme l'antenne, le cadre se présente sous des aspects très variés (cadre spiral plat circulaire, polygonal ; cadre en tambour circulaire, polygonal). Toutes ces formes se réduisent en fait à une seule, qui peut être considérée comme le cadre type : une bobine plate de grand diamètre.

Cette forme type de bobine nous suggère immédiatement le mode de fonctionnement du cadre, d'où il est facile de déduire toutes ses propriétés. Tandis que l'antenne se comporte comme un condensateur, le cadre se comporte comme une bobine. On voit immédiatement apparaître la réciprocité des deux ordres de phénomènes : l'antenne est principalement le siège d'une induction magnétique. Les effets se répartissent entre eux comme entre le condensateur et la bobine d'un circuit oscillant. Nous ne reviendrons pas ici sur le mode d'action de l'induction magnétique, que nous avons indiqué en détail d'après Maxwell au chapitre VII. Rappelons seulement que, au passage des ondes, des forces magnétiques prennent naissance perpendiculairement à la direction de propagation. Ce sont ces forces qui agissent sur le cadre à la façon d'un aimant,

d'un électroaimant ou d'une autre bobine voisine, qui serait parcourue par un courant à haute fréquence.

Les effets magnétiques, qui, avec les courants alternatifs industriels, sont localisés en un espace réduit souvent à quelques millimètres, — les entrefers des

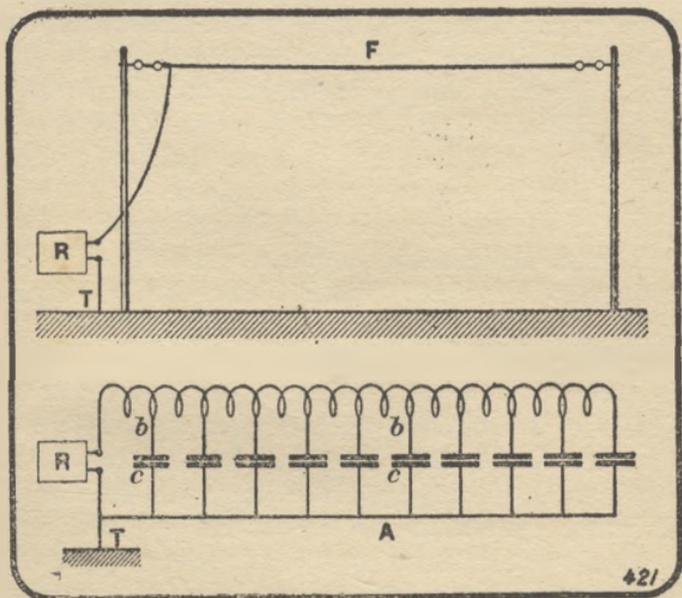


Fig. 56. — REPRÉSENTATION ÉLECTRIQUE D'UNE ANTENNE. — L'antenne type, réduite à un simple fil tendu isolé et relié à la terre T par l'intermédiaire du récepteur R, peut être représentée électriquement par une chaîne A, dont les maillons sont constitués par des bobines et des condensateurs élémentaires, *b*, *c*, associés comme ci-dessus.

alternateurs, des dynamos et des moteurs électriques sont de cet ordre de grandeur, — se produisent à des distances considérables avec les courants à haute fréquence, grâce à la transmission des ondes. Nous avons vu qu'il en était de même avec les antennes pour les effets électriques à distance.

La différence entre les modes d'action des forces magnétiques et des forces électriques fait apparaître pour le cadre, à l'inverse de ce qui se passe pour l'antenne, des propriétés directives marquées. Comme l'antenne, le cadre embrasse un certain volume d'ondes, constitué par toutes celles qui traversent sa surface. En théorie, ce volume est limité par la surface du cadre et par son épaisseur ; en pratique, le cadre a toujours la forme d'une bobine plate, et son épaisseur n'intervient sensiblement pas. Il s'agit donc toujours d'un volume d'ondes à capter, volume qui se présente ici sous une forme extrêmement aplatie.

Cette forme est imposée par la nature des forces magnétiques horizontales agissant sur le cadre ; le plan de son enroulement doit donc être vertical et offrir aux ondes la plus large surface possible.

La différence des propriétés directives de l'antenne et du cadre tient à ce fait que les actions électriques verticales et les actions magnétiques horizontales ne sont pas exactement réciproques. Nous venons de voir que l'orientation d'une antenne était à peu près indifférente, parce qu'une nappe horizontale quelconque est toujours perpendiculaire aux forces électriques verticales. Il n'en est pas de même avec le cadre, parce qu'il n'existe qu'un seul plan vertical qui soit perpendiculaire à la direction des forces magnétiques horizontales et qui, pour cette raison, offre aux ondes qui le traversent la plus large surface possible. Lorsque le cadre s'écarte de cette position privilégiée, tout en restant vertical, la surface offerte au passage des ondes diminue ainsi que le pouvoir absorbant du cadre. C'est pourquoi, lorsque l'on reçoit sur cadre, l'intensité de l'émission perçue est maximum dans la direction des ondes, nulle dans la direction perpendiculaire et varie graduellement entre ces deux positions. Ainsi s'explique très

simplement cette propriété directive extrêmement prononcée du cadre et l'application qui en est faite à l'émission et à la réception dirigées (fig. 57).

Il est possible de concevoir d'une façon très simple

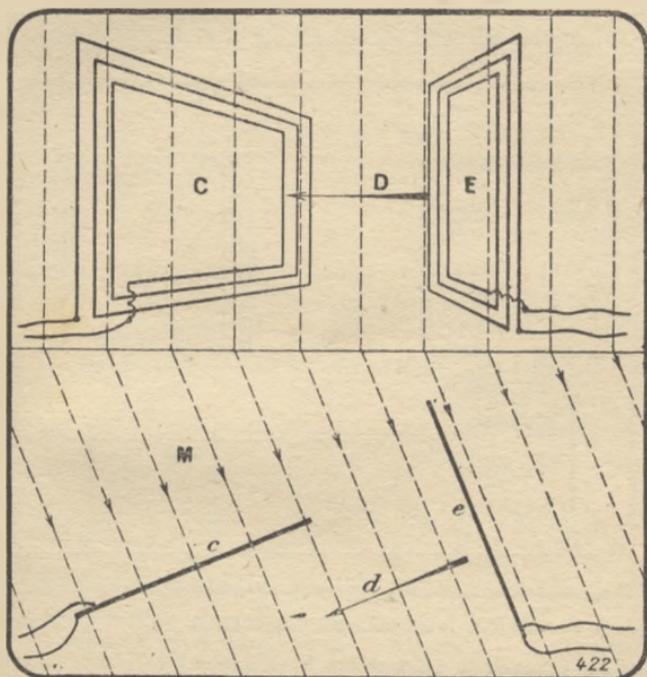


Fig. 57. — VOLUME D'ABSORPTION D'UN CADRE. — Le volume d'ondes embrassé par un cadre dépend de la surface qu'il offre aux forces magnétiques M des ondes qui le traversent. Ce volume est maximum lorsque le cadre Cc est parallèle à la direction Dd des ondes. Il est nul lorsque le cadre Ee est perpendiculaire à la direction des ondes.

les propriétés du cadre en résumant les résultats que nous venons d'obtenir. Les explications que nous proposons ne préjugent en rien du type d'émetteur utilisé ; nous pouvons donc imaginer qu'il s'agit d'un émetteur à cadre. Examinons alors attentivement la figure

obtenue en représentant l'action à distance de l'émetteur sur le récepteur par l'intermédiaire des ondes : cette figure est semblable à celle qui représente l'effet d'induction d'une bobine sur une autre, ou bien encore d'un aimant ou d'un électroaimant sur une bobine. Les ondes ne servent donc en ce cas que de véhicule

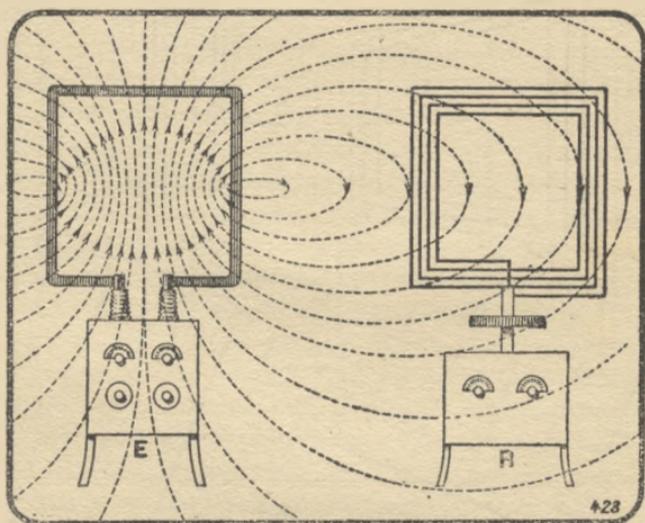


Fig. 58. — ACTION D'UN CADRE ÉMETTEUR SUR UN CADRE RÉCEPTEUR. — L'action d'un cadre émetteur E sur un cadre R est analogue à l'action du primaire sur le secondaire d'un transformateur.

aux phénomènes magnétiques qui se reproduisent, à distance en haute fréquence, analogues à ce qu'ils sont en basse fréquence avec les courants industriels. Le cadre d'émission et le cadre de réception ne sont pas différents de deux enroulements d'un transformateur, le primaire et le secondaire, qui sont transversés par le même faisceau de forces magnétiques (fig. 58).

Comme pour l'antenne, on peut donner du cadre

une image électrique simple. L'antenne et le cadre sont en effet les deux termes extrêmes de l'oscillateur constitué par un simple fil. L'antenne, qui correspond au cas du fil tendu, agit comme un condensateur parce qu'elle présente peu de self-inductance et beaucoup de capacité. Le cadre, qui correspond au cas du fil enroulé,

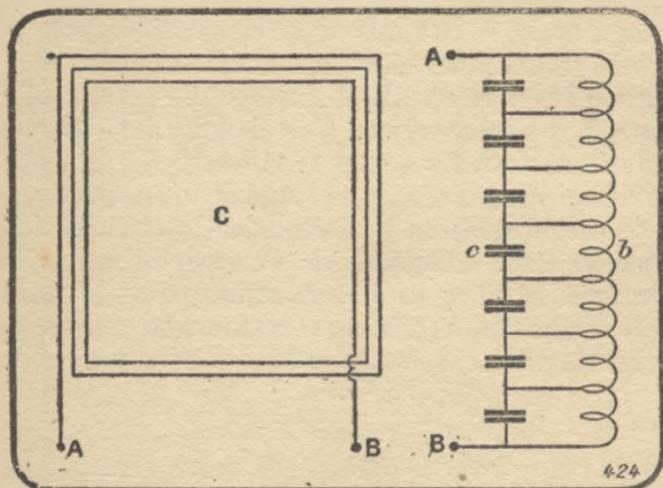


Fig. 59. — REPRÉSENTATION ÉLECTRIQUE D'UN CADRE. — Le cadre C est représenté par une chaîne dont les maillons sont constitués par des bobines et des condensateurs élémentaires en série *b*, *c*.

agit comme une bobine, parce qu'il présente peu de capacité et beaucoup de self-inductance. On peut le représenter, d'une manière analogue à l'antenne, par une chaîne dont les maillons comportent des bobines et des condensateurs élémentaires figurant la capacité entre spires ; mais, à l'inverse de l'antenne, ces condensateurs sont associés en série et non en dérivation, comme l'indique la figure 59.

Cette figuration met en évidence les propriétés du cadre ; pour qu'elles se rapprochent autant que possible

de celles d'une bobine, il est indispensable que les capacités élémentaires soient réduites au minimum, ce que l'on réalise en écartant suffisamment les spires les unes des autres. On obtient ainsi deux résultats particulièrement appréciables, sur les longueurs d'onde courtes : diminution des pertes d'énergie recueillie et réduction de la longueur d'onde propre du cadre. En résumé, nous constatons que la considération des pouvoirs absorbants des collecteurs d'ondes nous a permis d'analyser en détail les diverses propriétés des antennes et des cadres et d'en déduire les caractères généraux de tous les genres d'aériens.

Nous constatons ainsi que les phénomènes nouveaux qui se manifestent en radioélectricité présentent avec les phénomènes classiques de l'électricité industrielle la parenté la plus étroite. Il suffit, pour en donner l'explication, de substituer l'action des ondes aux actions locales.



CHAPITRE X

LES RADIOCOMMUNICATIONS

ÉMISSION ET RÉCEPTION DES ONDES. — EXPÉRIENCES FONDAMENTALES DE RADIOCOMMUNICATION. — ANTENNE ET CADRE. — DÉTECTEUR ET TÉLÉPHONE. — MODULATION ET LONGUEUR D'ONDE. — CIRCONSTANCES ATMOSPHÉRIQUES ET GÉOGRAPHIQUES. — ZONES D'ABSORPTION. — RENFORCEMENT AUX ANTIPODES. — COMMUNICATIONS PAR ONDES LE LONG DES LIGNES MÉTALLIQUES. — MULTICOMMUNICATIONS TÉLÉPHONIQUES SIMULTANÉES SUR LES RÉSEAUX.

Tout le mystère s'est éclairci depuis que nous avons pénétré la nature des ondes radioélectriques, et les mécanismes utilisés pour les mettre en œuvre vont nous apparaître dans leur réelle simplicité.

Les radiocommunications, réalisées au moyen des ondes électriques, nécessitent évidemment l'installation d'appareils d'émission et de réception. Comme nous l'avons vu plus haut, les appareils d'émission sont des organes susceptibles de produire dans l'antenne des courants électriques alternatifs de haute fréquence. Les physiciens, s'inspirant de l'exemple donné par la foudre, ont eu recours d'abord à l'étincelle électrique pour engendrer ces oscillations : l'émetteur comporte, en principe, une génératrice de courant électrique chargeant un condensateur connecté à ses bornes ; le condensateur se décharge périodiquement dans un éclateur, et les courants de haute fréquence ainsi créés alimentent

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

l'antenne d'émission, qui rayonne des ondes amorties. Les émetteurs modernes, convertisseurs, tubes à vide, ou alternateurs à haute fréquence, engendrent dans l'antenne des ondes entretenues.

Ainsi que nous venons de le voir, une station d'émission est essentiellement constituée par un générateur de courants à haute fréquence et par une antenne qui rayonne les ondes. En réalité, l'antenne n'est pas le seul facteur qui intervient dans le rayonnement des ondes. Elle est complétée par un dispositif non moins important, que l'on nomme prise de terre. En fait, il ne s'agit pas seulement de connecter à la terre un point du réseau de transmission ; la prise de terre, en radio-électricité, est un organe destiné à rendre conductrice une large surface du sol qui s'étend sous l'antenne.

Cette disposition est généralement obtenue en *métallisant* le sol, au moyen d'un réseau constitué par des plaques métalliques, des grillages ou des fils soudés entre eux et rayonnant sous l'antenne à une faible profondeur dans la terre. Le sol ainsi métallisé se comporte comme un véritable miroir vis-à-vis de l'antenne et des ondes qu'elle émet, si bien que tout se passe comme si le système rayonnant était composé de deux antennes symétriques l'une de l'autre par rapport à la surface du sol.

Les propriétés de l'antenne sont réciproques, comme nous l'avons vu. L'antenne de réception est donc conçue comme l'antenne d'émission, avec cette différence que, destinée à collecter une quantité d'énergie infime, ses dimensions sont plus modestes et son installation plus sommaire.

Ajoutons que l'antenne de réception peut être remplacée par un cadre, sorte de grande bobine ou de spirale plate, qui reçoit au mieux les transmissions radioélectriques lorsqu'elle est orientée dans la direc-

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

tion du poste émetteur et ne les reçoit pas lorsqu'elle est perpendiculaire à cette direction : on comprend facilement ce phénomène en constatant que, dans le premier cas, les ondes coupent le cadre, tandis que,

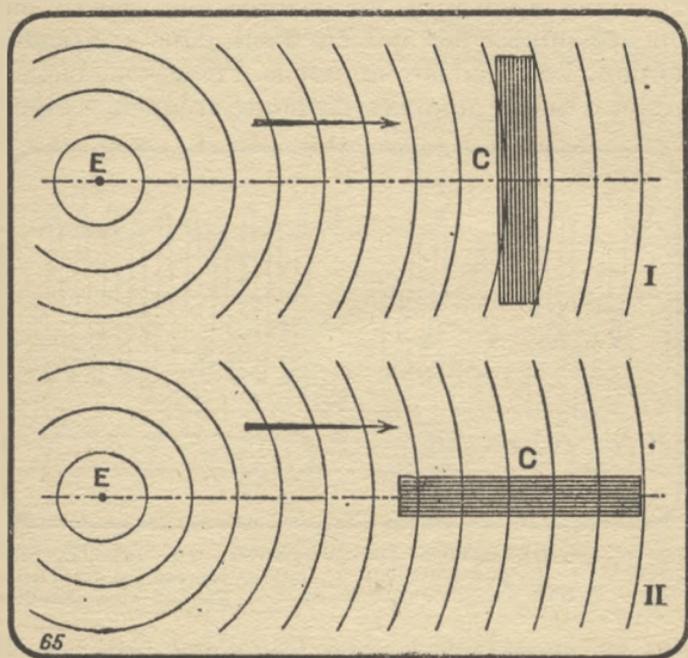


Fig. 60. — COMMENT RECEVOIR LES ONDES ÉLECTRIQUES SUR UN CADRE. — I. Le cadre C, placé perpendiculairement à la direction des ondes émises en E, n'oscille pas sous leur impulsion. — II. Le cadre C orienté dans la direction des ondes oscille sous leur impulsion.

dans le second cas, elles sont parallèles à son plan (fig. 60). Tel un canot, placé perpendiculairement aux lames, est beaucoup plus agité que s'il navigue parallèlement à leurs crêtes.

Il nous reste à expliquer comment l'on peut mettre en évidence l'énergie radioélectrique recueillie dans l'antenne de réception. Ce n'est pas très simple, et

l'invention des dispositifs correspondants a mis à contribution le talent des chercheurs.

Les appareils usuels, qui servent à déceler les courants alternatifs industriels, sont trop peu sensibles ou trop inertes pour accuser la présence des courants de haute fréquence minuscules qui circulent dans l'antenne de réception. Les premiers appareils d'émission, basés sur l'emploi d'ondes amorties de haute fréquence dont les

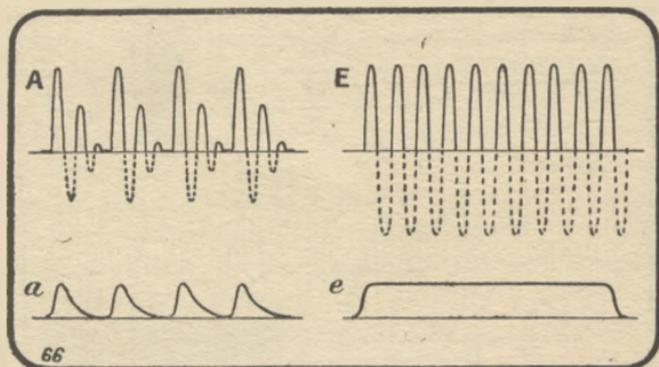


Fig. 61. — DÉTECTION DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE. — A, train d'oscillations amorties ; a, courant après détection. — E, train d'oscillations entretenues ; e, courant après détection.

trains se succèdent à une fréquence musicale, ont donné l'idée de déceler les ondes reçues au moyen d'un téléphone, appareil très sensible aux faibles courants. Toutefois le téléphone ne peut être impressionné directement par les courants de haute fréquence, parce que son inertie l'empêche de vibrer aussi vite qu'eux. C'est alors que l'on a imaginé de supprimer dans les courants recueillis toutes les alternances d'un même sens ; les alternances de l'autre sens seules subsistent, et leurs effets se totalisent pendant toute la durée du train d'ondes, si bien que le téléphone vibre, en définitive, sur la note des trains d'ondes (fig. 61).

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

L'organe qui réalise cette sélection est le *détecteur*. Sans entrer dans le détail de cet appareil, notons que l'un des détecteurs les plus anciens et les plus simples comporte un cristal de galène, mais qu'à l'heure actuelle il est presque universellement abandonné, ainsi que les détecteurs électrolytiques et magnétiques, pour le détecteur à lampe.

Enfin, lorsqu'il s'agit de recevoir des ondes entretenues, le détecteur doit être accompagné d'un dispositif qui rende ces ondes musicales, tel qu'un vibrateur

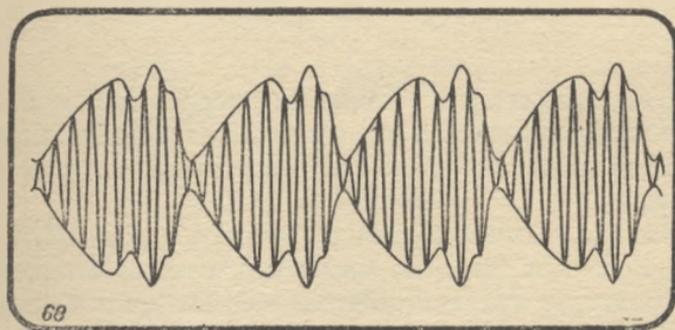


Fig. 62. — ASPECT D'UN TRAIN D'ONDES ENTRETENUES MODULÉ PAR LE SON DE LA VOIX AU MOYEN DU MICROPHONE.

qui découpe artificiellement des trains d'ondes musicaux, ou l'hétérodyne, qui arrive au même résultat en les modulant. Il va sans dire que les ondes de téléphonie sans fil, déjà modulées au départ sur des notes musicales ou par les articulations de la voix, sont reçues sur simple détecteur.

Parmi les applications des ondes radioélectriques, nous devons une mention spéciale à la radiophonie. Ce que nous avons exposé jusqu'à présent s'applique en effet aussi bien à la télégraphie qu'à la téléphonie sans fil.

Une station radiophonique de transmission est équi-

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

pée au moyen d'un poste à lampes émettant des ondes entretenues. La salle où parle le speaker et où s'exécutent les chants et la musique comporte un microphone, qui transforme les ondes sonores en courants électriques susceptibles de moduler les ondes radioélectriques émises par le poste (fig. 62). Le récepteur radiophonique ne comporte aucun organe spécialement différent de ceux du récepteur radiotélégraphique, si ce n'est parfois un téléphone haut-parleur, qui reproduit à haute voix les sons émis devant le microphone.

*
* *
*

Il ne nous est pas possible d'entrer ici dans le détail du fonctionnement des communications radioélectriques, dont nous venons d'indiquer le principe en quelques mots.

Nous précisons seulement l'emploi le plus judicieux que l'on peut faire des ondes des diverses longueurs. Le point de vue est différent suivant qu'il s'agit de télégraphie ou de téléphonie.

Des expériences effectuées au début de la radiotélégraphie ont montré que, pour les ondes dont la longueur varie de 1 000 à 20 000 mètres environ, la portée moyenne d'une station d'émission, en tenant compte des diverses circonstances cosmographiques, est proportionnelle à la longueur d'onde. Ce résultat a conduit à utiliser pour les communications transcontinentales des ondes longues de plusieurs dizaines de milliers de mètres.

Ces transmissions, rayonnées à l'entour de la station, affectent tout l'éther avoisinant, mais sur la seule onde qui transmet les signaux. Dans l'intervalle de ces signaux, l'éther reste au repos, sauf dans le cas de certaines transmissions par arc, où la station continue à

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

émettre sur une onde de longueur légèrement différente de la première, appelée onde de compensation.

Il n'en est pas de même pour l'émission radiophonique. Nous avons vu que cette transmission consistait essentiellement à superposer les modulations de la voix ou de la musique à l'onde radioélectrique entretenue émise par le poste et appelée *onde porteuse*, eu égard à sa fonction de véhicule des ondes sonores.

A la différence de l'émission radiotélégraphique, l'émission radiophonique occupe constamment l'éther, qu'elle soit modulée ou non. Lorsqu'elle n'est pas modulée, c'est-à-dire lorsqu'elle ne transmet rien, cette onde n'occupe l'éther que sur sa propre longueur, ce qui se traduit par une sorte de souffle puissant du récepteur téléphonique lorsqu'on l'accorde sur cette onde.

Mais le phénomène se complique lorsque l'onde porteuse est modulée par la voix ou par la parole. Tout se passe, — le calcul et l'expérience en donnent la confirmation, — comme si la station émettait non plus sur une seule longueur d'onde, mais sur toute une gamme de longueurs d'onde, réparties de part et d'autre de l'onde porteuse.

On comprend aisément pourquoi il en est ainsi. La voix humaine couvre, en effet, depuis celle de la basse la plus profonde jusqu'à celle du soprano le plus élevé, un espace sonore que l'on peut évaluer à 3 000 périodes par seconde environ, si l'on tient compte de tous les harmoniques qui donnent à la voix son timbre caractéristique. D'autre part, l'espace sonore couvert par les instruments de musique dépasse largement, vers la « haute » et vers la « basse », tous les registres de la voix. La modulation a pour effet d'ajouter ces fréquences sonores à la haute fréquence des ondes émises par la station — ou de les retrancher, suivant les cas — si bien qu'une transmission radiophonique occupe, dans

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

l'échelle des fréquences de vibration, une frange de 6 000 périodes par seconde environ. Autrement dit, la voix humaine, qui module une émission d'ondes entretenues, en fait varier la fréquence, en plus ou en moins, d'une quantité qui peut atteindre 3 000 périodes par

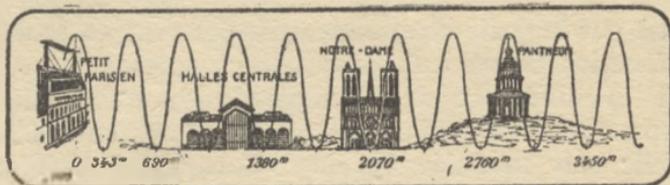


Fig. 63. — L'ONDE DE LA STATION DU « PETIT PARISIEN ».

seconde, comme nous venons de le voir plus haut.

Cette gamme d'ondes simultanées est relativement restreinte pour les émissions à très haute fréquence, c'est-à-dire sur ondes courtes.

Quelques chiffres permettent d'en juger facilement.

La transmission du *Petit Parisien*, sur 345 mètres, correspond à 870 000 périodes par seconde ou, comme

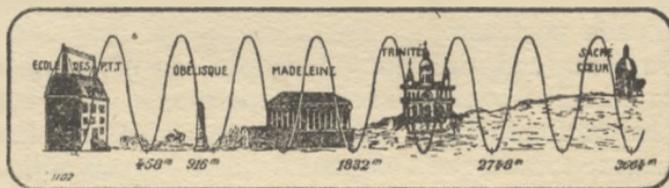


Fig. 64. — L'ONDE DE LA STATION DE L'ÉCOLE DES P. T. T.

l'on dit à présent, à 870 *kilocycles* (un *cycle* étant la fréquence correspondant à une période par seconde). Pendant la modulation, la fréquence oscille entre 867 et 873 kilocycles, d'après ce que nous venons de voir, soit une variation de 0,7 pour 100 sur la longueur d'onde (fig. 63).

Pour la station des P. T. T., sur 458 mètres (655 kilo-

cycles), la variation est de 652 à 658, soit environ 0,9 pour 100 (fig. 64).

Pour l'émission de Radio-Paris sur 1 780 mètres (168,5 kilocycles), la variation est de 165,5 à 171,5, soit 3,5 pour 100 (fig. 65).



Fig. 65. — L'ONDE DE LA STATION DE RADIO-PARIS.

Enfin, pour la Tour Eiffel, sur 2 600 mètres (115 kilocycles), la variation est de 112 à 118, soit plus de 5 pour 100 (fig. 66).

L'étendue de la gamme de longueurs d'onde qui mesure l'encombrement de l'éther lorsque transmet une station radiophonique est donc en raison directe de la longueur de l'onde porteuse.

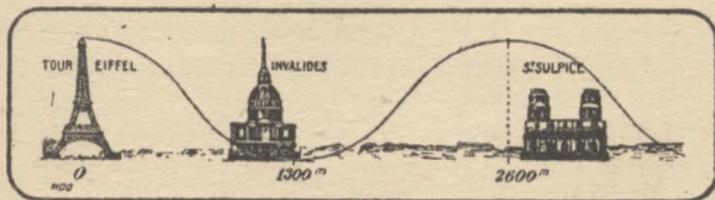


Fig. 66. — L'ONDE DE LA STATION DE LA TOUR EIFFEL.

On conçoit donc que, indépendamment de la limite de la portée, les communications radiophoniques sont encore restreintes en nombre dans la gamme des longueurs d'onde, alors que les communications radio-télégraphiques peuvent exister en quantité théoriquement illimitée, parce qu'elles n'encombrent l'éther qu'au minimum, c'est-à-dire sur une seule longueur d'onde.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

Une conséquence de ce fait est que l'accord du récepteur sur une communication radiophonique est d'autant plus aigu que la transmission est effectuée sur une onde plus courte.

Imaginons un certain nombre d'émissions radiophoniques fonctionnant simultanément. Pour obtenir que toutes ces émissions soient reçues indépendamment les unes des autres sans se gêner, on devra les répartir sur la gamme des longueurs d'onde de telle sorte que leur densité soit proportionnelle à la fréquence. On calcule de cette manière que l'on pourrait établir en radiophonie, pour chaque gamme de longueurs d'onde, un nombre de communications distinctes et indépendantes indiqué dans le tableau ci-dessous et représenté sur les courbes de la figure 67.

GAMME DE LONGUEURS D'ONDE en mètres.	GAMME DE FRÉQUENCES en kilocycles.	NOMBRE DE COMMUNI- CATIONS.
0,1 à 1	2700 000	450 000
1 à 10	270 000	45 000
10 à 100	27 000	4 500
100 à 1 000	2 700	450
1 000 à 10 000	270	45
10 000 à 100 000	27	4

Ainsi, sur les grandes longueurs d'onde utilisées en radiotélégraphie, c'est à peine si l'on pourrait réaliser quatre communications radiophoniques simultanées à grande puissance.

La radiophonie apparaît donc particulièrement avantageuse si l'on emploie de faibles longueurs d'onde. Toutefois, il importe de faire de la longueur d'onde un

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

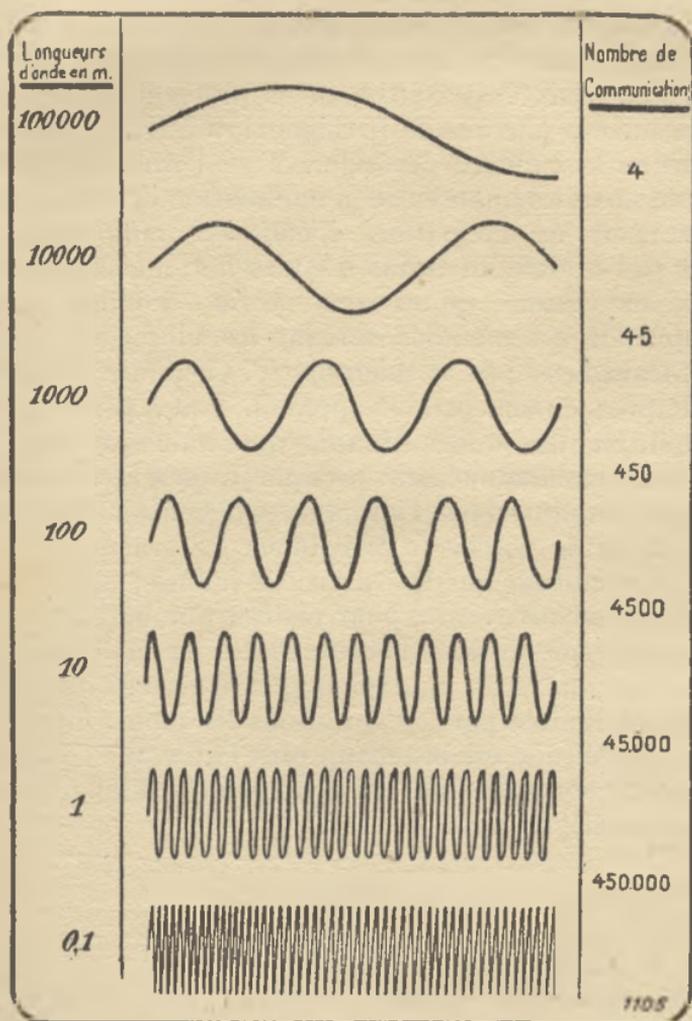


Fig. 67. — TABLEAU INDIQUANT LE NOMBRE DE COMMUNICATIONS RADIOPHONIQUES INDÉPENDANTES QU'IL EST POSSIBLE DE RÉALISER SUR LES DIFFÉRENTES GAMMES DE LONGUEURS D'ONDE DE 0,1 A 100000 MÈTRES.

choix judicieux, en tenant compte de la portée moyenne que doit atteindre la station. On sait que la portée

d'une station radiotélégraphique est, à puissance émise égale, plusieurs fois plus grande que celle d'une station radiophonique. Cette circonstance provient de ce qu'il est beaucoup plus aisé de distinguer la présence, l'absence et même la cadence des signaux de l'alphabet Morse que de saisir les nuances de la modulation de la musique et surtout de la parole. L'émission radiophonique n'est pas divisée en trains d'ondes nettement séparés. Elle ne forme qu'un seul train d'ondes dont l'amplitude est modulée suivant les vibrations de la voix transmises par le microphone. Certaines syllabes, qui impressionnent peu cet appareil, font à peine varier l'amplitude des ondes, tandis que d'autres syllabes réduisent momentanément presque jusqu'à zéro l'intensité du courant dans l'antenne. On conçoit qu'il est plus facile de percevoir à distance les grandes variations d'amplitude que les variations faibles ; cependant, comme il est nécessaire, pour réaliser une bonne réception, de percevoir avec netteté toutes les modulations, la portée du poste radiophonique émetteur est évidemment limitée par les variations les moins intenses, dont l'amplitude est beaucoup plus faible que celle des variations correspondant au passage des trains d'ondes en radiotélégraphie.

*
* *

Pour assurer la diffusion radiophonique avec une sécurité suffisante, quelles que soient les circonstances (nuit ou jour, hiver ou été, conditions météorologiques, géographiques, orographiques quelconques), il est indiqué de transmettre sur une longueur d'onde assez grande, supérieure à 1 000 mètres par exemple.

Cette manière de voir est confirmée par l'expérience d'une façon très nette, et les essais méthodiquement

entrepris montrent assez l'influence prépondérante des circonstances naturelles sur la propagation des petites ondes.

Les circonstances atmosphériques ont une action non négligeable. Les conditions de la transmission des ondes varient notamment avec l'humidité et la densité de l'air. On comprend facilement que la variation des agents atmosphériques entraîne une répartition changeante, instable et bizarre de la conductibilité et de la perméabilité de l'air en ce qui concerne le passage des ondes.

En somme, le problème de la conduction des ondes dans l'air est étroitement lié à celui des prévisions météorologiques. Le degré hygrométrique, la température, la pression de l'air, qui sont à peu près sans action sur la propagation des ondes de grande longueur, influent sur l'intensité et sur la direction des ondes courtes, dont les vibrations sont de faible longueur par rapport à celle des météores.

Par temps de brouillard, des phénomènes de réfraction curieux se produisent sur les bancs de brume, particulièrement au voisinage du littoral, phénomènes dont l'effet est de changer l'orientation des ondes, comme l'on peut s'en rendre compte au moyen d'un cadre récepteur orientable. Les navigateurs connaissent bien ce phénomène assez fréquent sur certaines gammes de longueurs d'onde.

Les conditions géographiques ne sont pas sans action sur la propagation des ondes. Des expériences incontestables ont montré qu'à distance égale on reçoit toujours avec plus d'intensité les émissions d'une station dont les ondes suivent un trajet maritime. L'affaiblissement des ondes est beaucoup plus considérable lorsqu'elles sont assujetties à suivre un trajet continental.

C'est pour cette raison que l'on obtient les meilleurs

résultats avec les stations réceptrices situées au bord de la mer. Un même poste récepteur, monté dans les mêmes conditions, avec des antennes identiques, permet d'entendre les émissions britanniques avec une grande netteté sur la côte méridionale de la Bretagne, tandis qu'on les reçoit beaucoup plus difficilement en Beauce, à moindre distance du centre émetteur.

Au centre des continents, la répartition des éléments géographiques influe également sur la propagation et l'orientation des ondes, surtout des ondes courtes. Les essais tentés sur des appareils récepteurs installés dans le wagon d'un train en marche ont donné à ce sujet d'utiles enseignements. La réception est meilleure lorsque la voie est en remblai ; elle s'affaiblit lorsque le train passe dans une tranchée, dans un tunnel ou encore lorsqu'il traverse une forêt ; un renforcement appréciable se produit lorsque la voie longe un cours d'eau ou un lac. On sait, d'autre part, que les montagnes constituent des écrans très importants au parcours des ondes, à cause de l'absorption produite par leurs masses. Ainsi s'établissent à la surface de la terre des zones de silence et des zones de renforcement.

A l'intérieur des villes, les zones d'absorption sont encore plus nombreuses et plus fréquentes, à cause du grand nombre de charpentes métalliques, de tuyauteries, de canalisations, de toitures, de balcons, bref de tous les réseaux conducteurs qu'elles contiennent. A cet égard, certains matériaux de construction, le ciment surtout, agissent comme de véritables conducteurs et affaiblissent l'intensité des ondes qui pénètrent à l'intérieur des habitations.

A cet égard, il est curieux de constater expérimentalement la répartition de l'intensité des ondes qui traversent un centre urbain important. Des ingénieurs américains ont eu cette curiosité et ont dressé en quelque

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

sorte le *plan radioélectrique* de New-York pour les émissions de l'une des stations de radiodiffusion les plus importantes de la cité (fig. 68).

Les ondes issues de cette station américaine ne s'affaiblissent pas, au voisinage de l'émetteur, en zones successives circulaires et concentriques, comme on serait logiquement tenté de le croire. La répartition



Fig. 68. — PLAN RADIOÉLECTRIQUE DE LA VILLE DE NEW-YORK, RELEVÉ POUR LES ÉMISSIONS DE LA STATION WEAF. — Les courbes tracées indiquent l'intensité relative des ondes aux différents points de la ville. Ce ne sont pas des cercles concentriques. Les ondes sont moins absorbées au-dessus des cours d'eau qu'au-dessus de la cité. Remarquer notamment l'absorption qui se produit à la pointe de la cité, en raison du nombre des énormes gratte-ciel en ciment. Deux curieux centres d'absorption urbains sont à observer au fond vers la gauche du cliché.

de leur intensité, qui est au contraire assez bizarre et fort imprévue, ne peut être expliquée qu'en tenant compte des phénomènes géographiques dont nous parlions plus haut.

A l'entour de la station, les courbes indiquant de 100 à 0 la décroissance de l'intensité sont des sortes d'ovales, allongées dans le sens des deux bras de rivières

et rétrécies dans le sens de l'agglomération. Cette disposition prouve que les ondes sont peu absorbées par les cours d'eau, mais absorbées au maximum par les constructions de la ville. Ces mêmes raisons expliquent la distribution en éventail des courbes d'affaiblissement des ondes de part et d'autre de la pointe de la cité.

Il en est de même à l'autre extrémité de la ville, où la décroissance de l'intensité des ondes est beaucoup plus rapide que dans la banlieue environnante. Enfin, on remarque deux îlots curieux, qui correspondent à une absorption locale très considérable, due vraisemblablement à la nature du terrain ou des constructions, ou bien au relief du sol à cet endroit. La détermination de l'étendue des zones d'absorption et de l'intensité de leurs manifestations apporterait un appoint très utile à l'étude physique de la propagation des ondes. Les navigateurs et les explorateurs ont pu localiser, au cours de leurs voyages, des régions dites « de silence », où les ondes ne pénètrent que fort mal. On en cite notamment alentour de Trébizonde, sur la mer Noire, dans le Maroc septentrional, en Asie Mineure et particulièrement en Arabie.

En dehors de ces régions inhospitalières aux ondes en raison de leur relief ou de leur conformation géographique ou géologique, il existe, relativement à chaque station d'émission, des zones où les ondes sont moins bien reçues que ne paraît l'indiquer leur distance du centre émetteur. Ces phénomènes sont d'autant plus précis qu'ils portent sur des ondes plus courtes. Lorsque la longueur d'onde de la station de Bruxelles a été abaissée à 225 mètres, les observations ont montré que, malgré la constance de la puissance, la réception était devenue beaucoup plus difficile dans un rayon d'une centaine de kilomètres autour de la ville. Cet échec ne pouvait être imputé à l'affaiblissement normal des

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

ondes en raison de la distance, puisque les émissions de Bruxelles étaient reçues fortement à Paris et que leur portée s'étendait à l'Afrique du Nord, où elles n'avaient pu être reçues jusqu'alors. Ces zones d'évanescence, où la réception des émissions est délicate et instable, semblent dues aux phénomènes de réfraction des ondes courtes dans les couches de l'atmosphère, analogues aux phénomènes lumineux qui donnent naissance aux mirages.

En dernier lieu, signalons un phénomène de renfor-

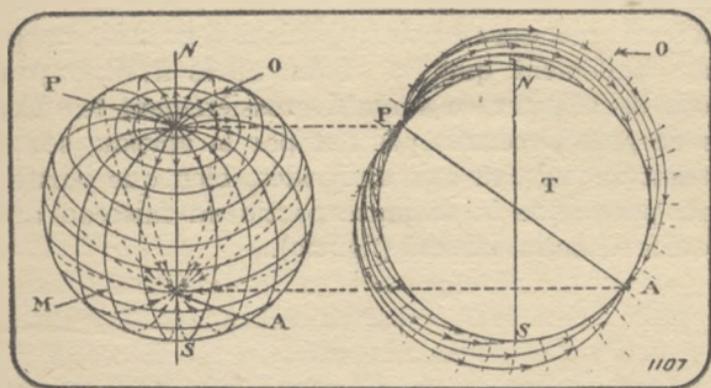


Fig. 69. — IMAGE DU RENFORCEMENT DES ONDES AUX ANTIPODES. — Les ondes émanant de la station P rayonnent alentour concentriquement sur la surface de la Terre en suivant la direction des arcs de grands cercles qui passent par la station. Une partie des ondes est absorbée en chemin; ce qui reste de chaque faisceau concourt à l'antipode A, où l'on observe un renforcement considérable des ondes émanant de P.

cement des ondes unique en son genre et assez curieux. C'est celui que l'on observe aux antipodes d'une station émettrice. La mission radiotélégraphique du navire *Aldébaran* de la Marine française, entreprise en 1920 sous la direction du capitaine de corvette Guierre, mit parfaitement en évidence ce renforcement de la réception des ondes aux antipodes, que l'on avait d'ailleurs pu prévoir *a priori*. En fait, ce renforcement est assez considérable pour qu'il soit possible de recevoir aux

antipodes les émissions d'une assez puissante station, telle que celle de Nantes ou de Lyon, en utilisant une antenne de 50 mètres et une seule lampe détectrice. Mais ce phénomène est strictement localisé au voisinage immédiat de l'antipode, à quelques centaines de kilomètres près ; dans ces conditions, la réception des émissions françaises est aussi forte qu'en Méditerranée.

Le renforcement provient-il de la superposition normale des ondes arrivant de toutes les directions à la fois ou bien des ondes stationnaires produites par les interférences de ces diverses ondes entre elles : il est difficile de préciser ce point. Quoi qu'il en soit, on comprend facilement que les ondes, après avoir rayonné autour de la Terre en suivant grossièrement les divers arcs de grands cercles passant par la station, se concentrent à nouveau aux antipodes, bien que partiellement, parce que la majeure partie du faisceau a été absorbée chemin faisant (fig. 69).

*
* *

Les considérations naturelles accessoires sur lesquelles nous venons d'insister rendent extrêmement délicate l'utilisation des ondes courtes. Mais un simple coup d'œil jeté sur le tableau que nous avons donné plus haut suffit à nous prouver l'intérêt considérable que présente l'emploi de ces ondes pour la téléphonie, en raison de leur aptitude à transmettre sur les longueurs d'onde très rapprochées de multiples communications distinctes.

Or, on sait que les ondes de haute fréquence, si elles rayonnent facilement dans l'éther alentour de leur centre d'émission, se propagent avec un rendement bien meilleur et un affaiblissement beaucoup moindre le long de conducteurs métalliques.

On objectera peut-être que, si l'utilisation des ondes radioélectriques constitue un progrès, c'est parce qu'elles ont permis de se passer de fil. N'est-ce pas revenir en arrière que de proposer de conduire les ondes par des fils ?

Nous ne le pensons pas pour deux raisons essentielles.

En premier lieu, nous n'envisageons pas la construction de nouvelles lignes spéciales pour conduire les ondes. Celles qui existent suffisent, — qu'elles s'appellent lignes téléphoniques, télégraphiques ou réseaux de transmission d'énergie, — et nous n'entrevoions pas à bref délai la transmission de l'énergie à grande distance sans fil.

En second lieu, il y aurait un réel progrès à utiliser la propagation des ondes le long des lignes si l'on pouvait à ce prix augmenter intensément le rendement des réseaux téléphoniques, ce dont nous sommes convaincus.

L'utilisation des ondes très courtes paraît avoir suggéré la solution la meilleure du problème de la téléphonie multiplex à haute fréquence. Dès 1898, M. Albert Turpain signalait la possibilité d'assurer au moyen d'un seul fil de ligne l'intercommunication de plusieurs stations réparties le long de la ligne. A cet âge héroïque de la radioélectricité, on ne savait produire facilement que les ondes amorties, impropres aux liaisons téléphoniques. D'importants travaux sur les communications multiples, effectués en 1907 et 1908 par MM. Mercadier et Magunna, ont abouti à la réalisation de diapasons entretenus électriquement pour produire les ondes nécessaires à la transmission.

Depuis cette date, la solution du problème des multicommutations téléphoniques a été singulièrement facilitée par la découverte de la lampe triode, qui permet d'émettre et de recevoir très aisément et avec une grande sélectivité des ondes très pures sur une

gamme pratiquement illimitée de longueurs d'onde.

On sait que les ondes à haute fréquence se propagent mieux que dans l'air, le long des conducteurs métalliques. Au moment où l'électrification de la France aura recouvert notre sol d'un réseau de lignes métalliques aériennes, les diverses localités du pays seront réunies les unes avec les autres par ce réseau serré, qui, outre une énergie électrique considérable, pourra transmettre une infinité de courants téléphoniques à haute

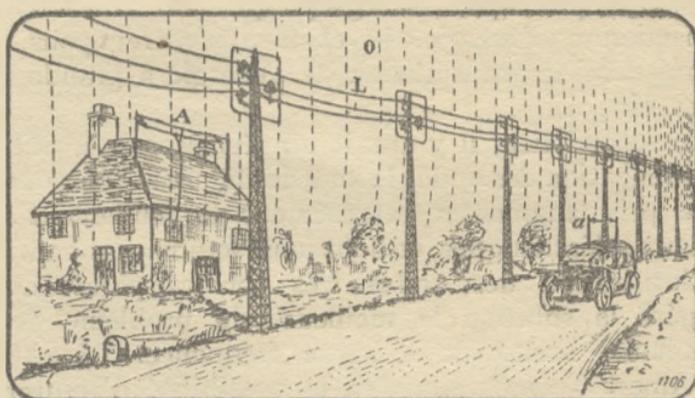


Fig. 70. — MULTICOMMUNICATIONS A HAUTE FRÉQUENCE LE LONG DES RÉSEAUX MÉTALLIQUES. — Les ondes O émises par l'antenne A sont captées par la ligne conductrice le long de laquelle elles se propagent ; un poste récepteur fixe ou mobile peut les capter. Ce procédé est susceptible d'assurer l'intercommunication de deux postes quelconques, même de postes mobiles, par l'emploi d'ondes très courtes.

fréquence. Suivant les idées de M. Turpain, chaque abonné au téléphone serait caractérisé non par son « numéro », mais par sa « longueur d'onde ». Chaque poste téléphonique, installé en cage de Faraday, comprendrait un petit émetteur à lampes, susceptible de transmettre sur toute la gamme des longueurs d'onde utilisées, et un récepteur accordé une fois pour toutes sur la longueur d'onde *unique* caractérisant le poste de l'abonné. Tout correspondant qui désirerait téléphoner

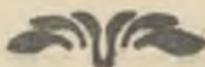
à un abonné réglerait son poste d'émission sur sa longueur d'onde particulière.

Les émetteurs et les récepteurs seraient reliés par induction au réseau des fils au moyen de petites antennes parallèles aux lignes. Cette dernière disposition permet d'utiliser, pour conduire les ondes, un réseau métallique aérien quelconque, si bien que l'on peut envisager la substitution entière du réseau de lumière et d'énergie électriques aux réseaux téléphoniques, dont l'un des fils au moins deviendrait superflu (fig. 70).

En outre, il serait possible, au moyen d'une petite antenne portative, de mettre un poste mobile quelconque, notamment un poste automobile, en relation avec le réseau, c'est-à-dire avec n'importe quel abonné.

Ce rapide exposé permet d'entrevoir l'importance des applications futures des ondes courtes à la téléphonie.

La radiophonie, telle qu'elle est utilisée en ce moment pour la radiodiffusion, ne fait qu'ouvrir une ère de multiples applications nouvelles.



CHAPITRE XI

LES FAISCEAUX D'ONDES DIRIGÉES

INTÉRÊT DU PROBLÈME : SECRET, ÉCONOMIE DE L'ÉTHER, ÉCONOMIE DE PUISSANCE. — NOTION DE FAISCEAU D'ONDES DIRIGÉES. — CONCENTRATION DES ONDES. — RÉFLECTEUR PARABOLIQUE. — RÉFLECTEURS, PLANS. — RÉSULTATS ACQUIS JUSQU'A CE JOUR.

Le problème qui consiste à concentrer les ondes radioélectriques en des faisceaux analogues aux rayons lumineux des projecteurs s'est présenté à l'idée de tous les radiotechniciens dès l'origine de la télégraphie sans fil. Il n'a pu recevoir dès le début de solution satisfaisante, en raison de la précarité des moyens dont on disposait alors, et l'on commence seulement à entrevoir depuis ces dernières années la possibilité d'une réalisation pratique.

Toutes les transmissions radioélectriques effectuées jusqu'à ces derniers mois utilisent le rayonnement à peu près uniforme des ondes autour de l'antenne de la station d'émission. Cette particularité caractéristique des stations de T. S. F. actuelles est précieuse lorsque la communication s'adresse à un grand nombre de correspondants ; c'est précisément le cas pour la diffusion radiophonique, qui n'a pu être instituée que le jour où il a été possible d'utiliser le rayonnement des ondes à la transmission de la modulation de la parole, du chant ou de la musique.

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

En dehors des applications de la radiodiffusion téléphonique ou télégraphique, l'utilité du rayonnement des ondes disparaît, et l'on constate que l'on aurait, au contraire, de grands avantages à utiliser des faisceaux d'ondes dirigées.

Il est évident que deux stations radiotélégraphiques qui correspondent l'une avec l'autre n'ont aucun intérêt à ce que leur correspondance soit rayonnée sur toute la surface du globe en dehors de leur direction commune. De même, le jour où les communications radiophoniques privées seraient d'usage courant, les deux correspondants ne tiendraient certainement pas à ce que leur conversation puisse être interceptée par des tiers, circonstance qui se présenterait si les ondes émises étaient rayonnées dans toutes les directions. Dans l'un et l'autre de ces cas, la direction des ondes permettrait d'obtenir le secret de la correspondance télégraphique ou téléphonique, en principe au moins, car tout dépend de la divergence du faisceau.

L'emploi des ondes dirigées donnerait à ces communications le caractère particulier de la télégraphie optique, dont la station d'émission est constituée par un projecteur produisant un faisceau lumineux et la station de réception par une lunette qui vise ce faisceau. Une telle transmission resté étrangère à toute personne qui n'est pas située sur le trajet du faisceau.

Les transmissions dirigées ont encore d'autres avantages. Beaucoup d'amateurs de radiophonie ont déjà fait à leurs dépens cette amère constatation que l'éther est « encombré » d'émissions multiples, dont la présence occasionne souvent des brouillages désagréables avec l'audition qu'ils désirent entendre. Que penseront-ils lorsque les progrès de la radiodiffusion auront revêtu la surface de notre pays — à l'instar de l'Amérique — d'un réseau serré de stations d'émissions ! Il n'existe

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

qu'un moyen de réduire au minimum cet encombrement de l'éther, c'est d'employer les ondes dirigées pour toute communication étrangère à la radiodiffusion.

Une comparaison « lumineuse » fera bien comprendre ce point de vue. Transposée dans le domaine de l'optique, la multitude des stations rayonnant leurs ondes dans toutes les directions serait analogue à la place de la Concorde, hérissée d'une légion de becs de gaz, qui provoquent la nuit sur notre œil une sensation d'éblouissement essentiellement comparable à l'impression de brouillage qu'éprouve notre oreille dans la réception radiophonique. L'emploi des ondes dirigées reviendrait à remplacer tous les becs de gaz en question par des lanternes qui ne laisseraient échapper chacune qu'un pinceau de rayons dans la direction choisie. On conçoit que la sensation d'éblouissement disparaîtrait complètement et, par suite, le brouillage des ondes.

C'est, en somme, une *économie* d'éther très importante que l'on réalise, et ce genre d'économie ne saurait être trop recommandé, puisqu'il est bien évident que nous ne sommes qu'au début des applications radio-électriques.

Un autre intérêt de l'emploi des ondes dirigées réside dans l'économie de la puissance mise en jeu pour réaliser une portée donnée. La suppression du rayonnement doit, en effet, avoir pour conséquence logique la concentration de la puissance dans la direction du faisceau. En principe, si la totalité de la puissance émise est concentrée par un appareil réflecteur dans un faisceau de 30° d'ouverture, l'effet obtenu doit correspondre à celui d'une puissance rayonnée 12 fois plus forte. Autrement dit, on devrait pouvoir réduire la puissance de l'émetteur à une valeur 12 fois plus faible pour obtenir la même portée. En fait, la puissance n'est pas concentrée uniformément dans le faisceau ; pour les

points situés sur l'axe, la concentration peut atteindre près de 200 fois la valeur de l'énergie rayonnée.

L'économie de puissance n'est cependant pas bien considérable eu égard aux autres facteurs de l'exploitation. D'ailleurs, le rayonnement d'une puissance atteignant 20 à 30 kilowatts présente, sur les petites longueurs d'onde, de sérieuses difficultés, et le problème se complique lorsque l'on utilise des réflecteurs.

L'émission du faisceau semble donc limitée en haut et en bas de la gamme des longueurs d'onde : la limite supérieure est imposée par la difficulté de réfléchir et de concentrer les ondes longues ; la limite inférieure est imputable à la difficulté de mettre en jeu une puissance suffisante.

On peut également faire valoir que l'emploi des ondes dirigées permettrait d'augmenter la vitesse de transmission des communications télégraphiques, parce que l'on opérerait sur une puissance plus réduite que dans le cas des ondes rayonnées. L'influence des parasites serait assez faible, en raison de l'emploi d'ondes courtes.

Ces considérations sur l'utilisation des ondes dirigées sont fort séduisantes, mais il ne faut pas oublier que ces faisceaux possèdent malheureusement tous les défauts des ondes courtes. Nous avons vu que ces ondes sont très sensibles à l'affaiblissement diurne. Leur absorption est considérable ; elle provoque des évanescences subites et prolongées, appelées *fading* par les amateurs et techniciens d'Angleterre et d'Amérique. En outre, on observe, comme nous l'avons remarqué plus haut, des fluctuations singulières dans la direction apparente des ondes courtes, à cause des réfractions dont elles sont l'objet. Néanmoins, les communications échangées à grande distance par les amateurs au cours de l'hiver ont montré qu'à cette époque de l'année il est facile d'effectuer ces liaisons au moyen d'une énergie

rayonnée très faible. Il semble donc qu'*a fortiori* on doive obtenir des résultats meilleurs en utilisant des réflecteurs. La concentration du faisceau est facile sur les ondes courtes, telles que l'onde de 10 mètres ; mais il est encore prématuré de se prononcer sur les portées réalisables au moyen d'ondes aussi petites.

Il est nécessaire de définir avec précision ce que l'on entend par un *faisceau* d'ondes radioélectriques. Un faisceau est caractérisé par la concentration relative des ondes et par son angle d'ouverture, qui indique sa divergence. Pour la commodité du langage, les techniciens anglais ont proposé d'appeler faisceau l'ensemble des ondes dirigées contenues dans un angle d'ouverture de 30° au plus et à l'extérieur duquel ne doit pas être irradié plus de 5 p. 100 de l'énergie totale rayonnée par l'émetteur. De l'ouverture minimum du faisceau dépendent, en effet, toutes les qualités des ondes dirigées, aux points de vue tant du secret que de l'économie de puissance et d'éther. Si la divergence du faisceau est de 30°, le front total de l'onde dirigée parvenant à la station réceptrice transocéanique atteint parfois plusieurs milliers de kilomètres ; mais le front de l'onde utile, concentrée au centre du faisceau, est heureusement beaucoup plus limité.

*
* *

Comment produire des faisceaux d'ondes dirigées ? Les procédés à mettre en œuvre sont évidemment les mêmes que pour la concentration des rayons lumineux. Toutefois l'écart énorme entre l'ordre de grandeur des ondes lumineuses et hertziennes oblige à modifier notre conception des miroirs et des lentilles. On a d'abord songé, par comparaison avec l'optique, à utiliser des miroirs paraboliques analogues à ceux qui entrent dans

la composition des télescopes et des projecteurs. A cette fin, on a proposé de placer une antenne verticale au foyer d'un cylindre parabolique, constitué par un rideau d'antennes verticales soutenu au moyen de mâts (fig. 71). Le pouvoir réflecteur d'un tel miroir est évidemment d'autant plus grand que les ondes sont plus courtes et que le rideau d'antennes verticales est plus serré.

Rappelons que les rayons — lumineux ou radio-

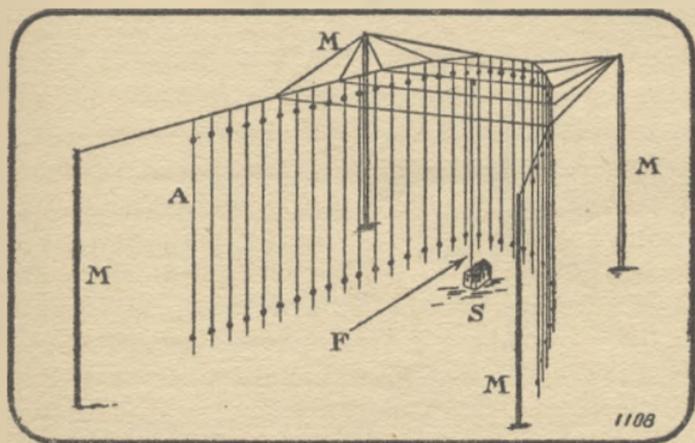


Fig. 71. — RÉFLECTEUR D'ONDES CONSTITUÉ PAR UN RIDEAU D'ANTENNES FORMANT UN CYLINDRE PARABOLIQUE. — A, antennes verticales paraboliques ; F, antenne verticale située au foyer du cylindre parabolique ; M, mâts supportant le rideau de l'antenne.

électriques — issus du foyer F se réfléchissent sur le miroir parabolique en prenant la direction d'un faisceau parallèle à l'axe d'ouverture du miroir. C'est ce que représente la figure 72, qui indique au moyen de flèches la direction des rayons. On sait que les distances au foyer F des différentes antennes A du réflecteur sont égales à leurs distances, indiquées en pointillé, à une certaine ligne droite B, symétrique du foyer par rapport au sommet de la parabole. Tout se passe donc

comme si les ondes, au lieu de rayonner du foyer et d'être concentrées par le miroir, partaient toutes en même temps de la ligne B dans la direction D. On conçoit que leurs effets s'ajoutent dans cette direction (fig. 73).

On arrive au même résultat avec un meilleur rende-

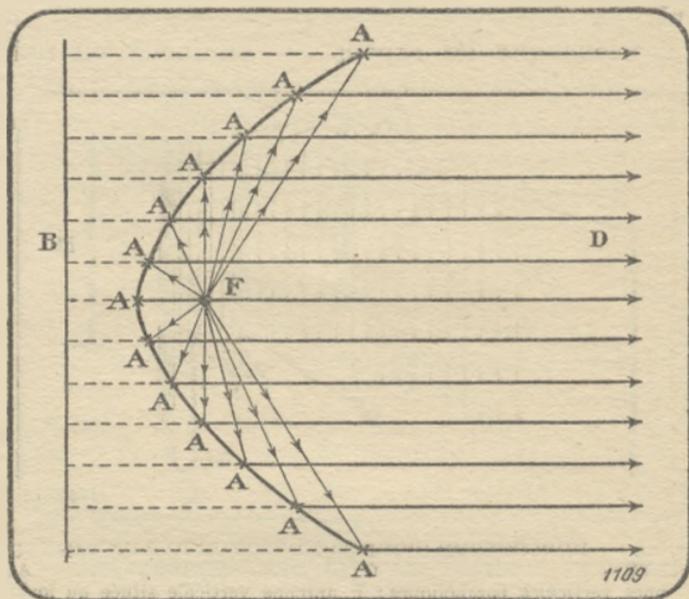


Fig. 72. — RÉFLEXION DE LA DIRECTION DES ONDES SUR UN CYLINDRE PARABOLIQUE. — A, pied des antennes verticales; F, émetteur situé au foyer; B, directrice de la parabole, d'où semble provenir le faisceau des ondes réfléchies dans la direction D de l'axe du miroir.

ment en reliant directement aux antennes A le poste émetteur, supposé placé au foyer. Au lieu d'être réfléchies par les antennes, les ondes sont émises *directement* par ces antennes dans la direction du faisceau. Dans toutes les autres directions, les rayonnements des antennes s'annulent à peu près.

La largeur du miroir, autrement dit son ouverture, a une grande importance sur la concentration des ondes. On obtient de bons résultats en construisant un réflecteur dont la distance focale est égale à un quart de longueur d'onde et dont l'ouverture mesure 8 à 10 longueurs d'onde.

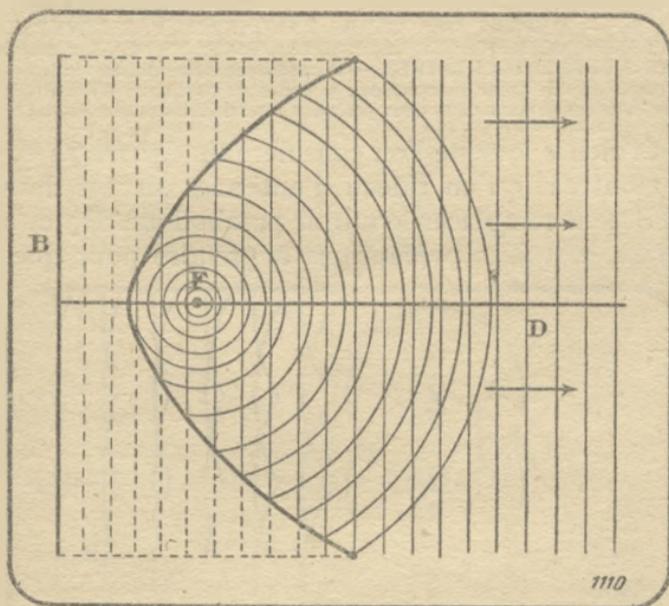


Fig. 73. — RÉFLEXION DU RAYONNEMENT DES ONDES SUR UN CYLINDRE PARABOLIQUE. — F, émetteur situé au foyer ; B, directrice de la parabole, d'où semble provenir le faisceau des ondes réfléchies.

La complexité de réalisation de tels miroirs paraboliques a incité les techniciens à les remplacer par des dispositifs plus élémentaires. Comme l'a montré un ingénieur français, M. H. Chireix, au cours de travaux récents, on peut remplacer les réflecteurs paraboliques par de simples rideaux plans d'antennes verticales alimentées convenablement. Cette remarque est à peu

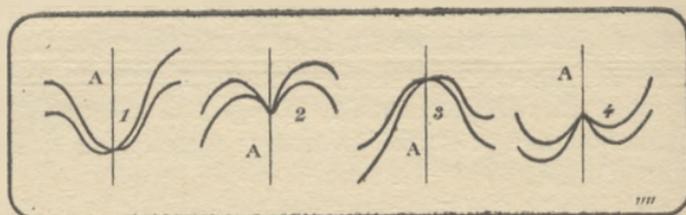


Fig. 74. — DÉPART DES ONDES RAYONNÉES PAR DIVERSES ANTENNES VERTICALES ÉLÉMENTAIRES DANS DEUX DIRECTIONS PERPENDICULAIRES. — A, antennes élémentaires verticales; 1, ondes au minimum d'amplitude; 3, ondes au maximum d'amplitude; 2 et 4, ondes partant dans deux positions intermédiaires des précédentes.

près évidente lorsque l'on considère les figures 72 et 73, qui montrent qu'un rideau d'antennes situées dans le plan B peut remplacer le miroir parabolique. Il y a, bien entendu, certaines précautions à prendre pour que les

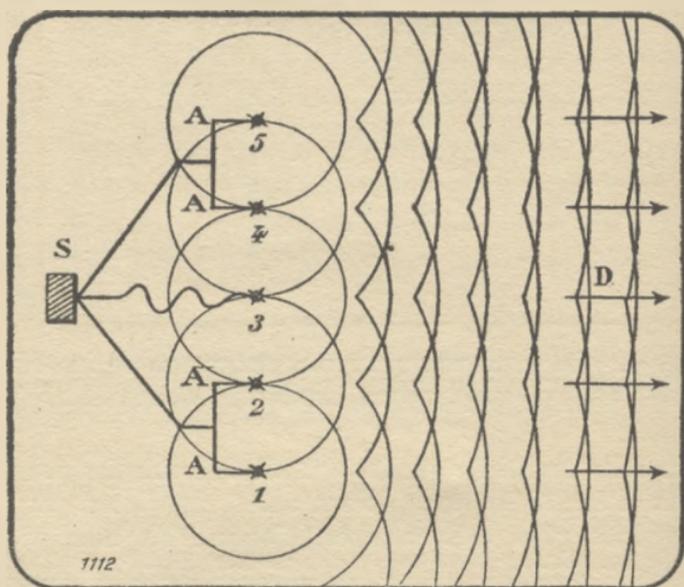


Fig. 75. — ÉMISSION D'UN FAISCEAU D'ONDES DIRIGÉES PAR UN RÉFLECTEUR PLAN DU PREMIER TYPE. — 1, 2, 3, 4, 5, pied des antennes verticales; S, station d'émission reliée aux antennes par des lignes d'égal longueur; D, direction du faisceau des ondes réfléchies.

ondes s'ajoutent toutes dans la direction du faisceau et s'annulent les unes les autres dans la direction perpendiculaire. La figure 74 indique le départ des ondes des antennes A dans deux directions perpendiculaires, étant entendu qu'elles rayonnent de la même façon dans les autres directions. En 1, l'onde est à son minimum ; en 3, à son maximum ; en 2 et 4, dans les deux positions intermédiaires.

Pour plus de facilité, nous supposerons que les

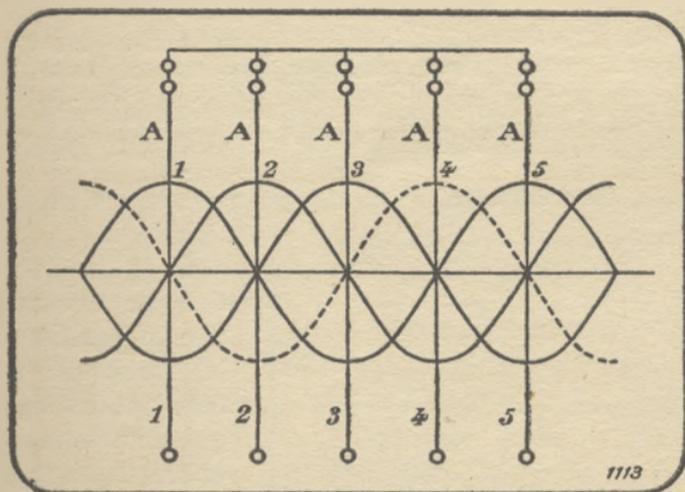


Fig. 76. — VUE DE FACE D'UN RÉFLECTEUR PLAN DU PREMIER TYPE. — Les ondes identiques émises simultanément par les cinq antennes verticales se détruisent mutuellement dans le plan du réflecteur.

antennes 1, 2, 3, 4, 5 constituant le rideau sont écartées les unes des autres d'une distance égale au quart de la longueur de l'onde émise (fig. 75). La station S alimente ces antennes au moyen de lignes d'égale longueur, afin que les courants de haute fréquence y parviennent *en même temps*. A un moment donné, les ondes qui s'échappent des cinq antennes ont donc la même forme, par exemple celle de la figure 74 (3).

On se rend compte aisément que toutes ces ondes s'ajoutent dans la direction D du faisceau et s'annulent

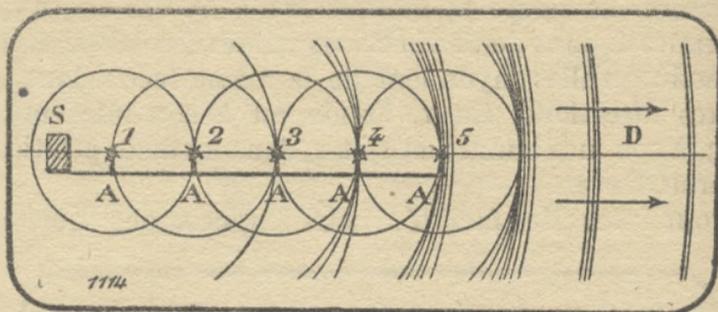


Fig. 77. — ÉMISSION D'UN FAISCEAU D'ONDES DIRIGÉES PAR UN RÉFLECTEUR PLAN DU DEUXIÈME TYPE. — 1, 2, 3, 4, 5, pied des antennes verticales A ; S, station d'émission reliée aux antennes par des lignes dont les longueurs diffèrent entre elles d'un quart d'onde ; D, direction du faisceau des ondes réfléchies, parallèle au plan du miroir.

dans la direction perpendiculaire, comme l'indique la figure 76.

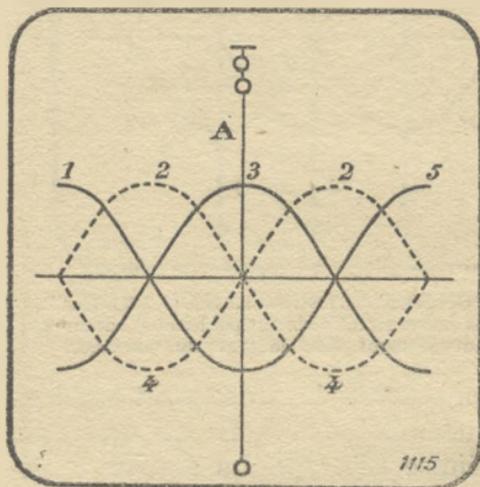


Fig. 78. — VUE DE PROFIL D'UN RÉFLECTEUR PLAN DU DEUXIÈME TYPE. — Les ondes émises simultanément par les cinq antennes sont chacune à des phases différentes correspondant aux écartements mutuels des antennes, s'ajoutent dans la direction du réflecteur et s'annulent les unes les autres dans la direction perpendiculaire.

On peut imaginer, au contraire, que la position de la station S soit telle que les lignes qui alimentent les antennes aient des longueurs différant les unes des autres de un quart d'onde, comme le montre la figure 77. Dans ces conditions, les courants de haute fréquence, qui parviennent à un moment donné aux diverses an-

LES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

tennes, diffèrent les uns des autres de un quart de période dans le temps, et les ondes qui s'en échappent

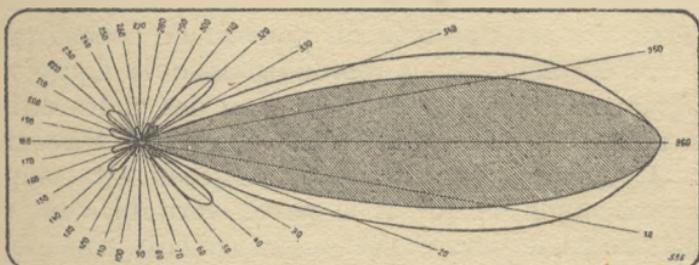


Fig. 79. — DIAGRAMME DES INTENSITÉS DU FAISCEAU DES ONDES DIRIGÉES PAR UN SYSTÈME RÉFLECTEUR COMPORTANT 15 ANTENNES EN PLANS VERTICAUX, D'APRÈS M. H. CHIREIX.

prennent respectivement les cinq formes représentées par la figure 74. On se rend compte aisément que toutes

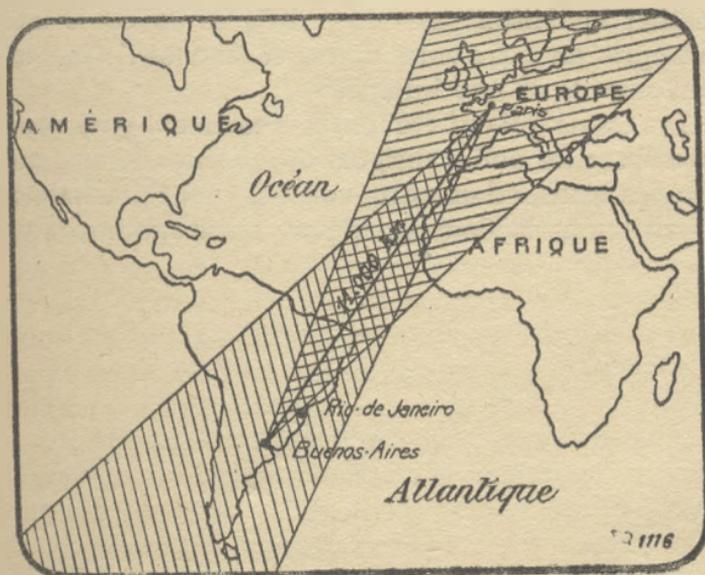


Fig. 80. — PLANISPHÈRE INDIQUANT LA LIAISON PAR ONDES DIRIGÉES RÉALISÉE ENTRE PARIS ET BUENOS-AYRES.

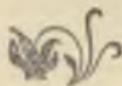
ces ondes s'ajoutent dans la direction D pour donner un faisceau parallèle au rideau et s'annulent dans la

direction perpendiculaire, comme l'indique la figure 78. En combinant les deux types de rideaux des figures 75 et 77, on parvient à réaliser des réflecteurs très efficaces.

Pour donner une idée du pouvoir de concentration de ces réflecteurs, nous reproduisons sur la figure 79 le diagramme des intensités du faisceau des ondes dirigées par un système de 15 antennes, d'après les travaux de M. H. Chireix. La totalité du faisceau est comprise dans un angle de 40° et la partie véritablement utile dans un angle de 20° . Les rayonnements dans toutes les autres directions sont absolument négligeables. Enfin, ces systèmes d'antennes donnent la possibilité d'incliner plus ou moins par rapport au sol le faisceau des ondes et d'influer ainsi sur la portée de la station.

La carte de la figure 80 indique comment l'on a pu réaliser la liaison par ondes dirigées au cours d'essais entrepris en 1924 entre Paris et Buenos-Ayres, sur un parcours de 11 000 kilomètres.

Les essais qui ont été tentés récemment pour produire et utiliser les ondes dirigées autorisent à croire que les progrès réalisés dans cette voie ouvriront prochainement à ces ondes le domaine des applications pratiques.



CONCLUSION

CE QUE NOUS RÉVÈLE LA RADIOÉLECTRICITÉ,
SON AVENIR.

Quel enseignement peut-on retenir des phénomènes que la science radioélectrique vient d'imposer à notre attention, un peu sommairement peut-être ?

Au point de vue de la science pure, un grand pas vient d'être fait dans le champ des phénomènes naturels, qui élargit considérablement le domaine de la physique.

Les théories élaborées antérieurement sont confirmées par la science nouvelle, qui nous les présente sous un jour nouveau ; l'énergie également, cette manifestation éternelle de l'activité cosmique, s'est rajeunie pour nous apparaître sous la parure inédite des ondes radioélectriques.

Au point de vue de la science appliquée, c'est un champ immense qui s'ouvre à l'activité humaine. Depuis trente ans à peine que l'homme s'intéresse aux ondes radioélectriques, la télégraphie et la téléphonie sans fil ont pris naissance, ainsi que leurs applications immédiates : la radiogoniométrie, la téléphonie à haute fréquence, la diffusion radiophonique, la télé mécanique. L'ère de la radioélectricité n'est pas close : la télé mécanique a bien des progrès à accomplir ; la télévision est encore au berceau ; la technique de la transmission de l'énergie à haute fréquence est encore à créer. Mais nous n'avons pas renoncé à voir fonctionner bientôt les véhicules radioélectriques prédits par M. Maurice Leblanc, non plus que les lampes d'éclairage sans fil et tous autres objets destinés à asservir les nouvelles ondes aux usages industriels et domestiques.

TABLE DES MATIÈRES



PRÉFACE	3
INTRODUCTION	5

CHAPITRE PREMIER

<i>Généralités sur les ondes.</i> — Les vibrations et les ondes. L'échelle des fréquences. Les transmissions sans fil. Qu'est-ce que l'éther? Un mode de transmission à grande portée. La nature des ondes. Éléments caractéristiques des ondes. Iréquence et longueur d'onde.....	7
--	---

CHAPITRE II

<i>Propagation des ondes.</i> — L'hélice. Propriétés d'un tire-bouchon à hélice. Représentation d'un train d'ondes entretenues dans le temps et dans l'espace. Image de la propagation d'un train d'ondes. Applications concrètes. Mécanisme de la transmission des ondes.....	26
--	----

CHAPITRE III

<i>Vibrations de la matière.</i> — Oscillations du pendule. Ressort et balancier. Ondes élastiques et ondes sonores. Transformations de l'énergie mécanique	36
---	----

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE IV

- L'électricité à haute fréquence ou radioélectricité.* —
Le circuit oscillant. Les transformations de
l'énergie électrique. Les phénomènes radio-
électriques naturels. Conception élémentaire
de l'éther. Rôle de l'antenne. Transformations
de l'énergie radioélectrique..... 47

CHAPITRE V

- Vibration des antennes.* — Longueur d'onde propre
d'une antenne. Excitation d'une antenne sous
le choc d'un train d'ondes. Propagation des
ondes de tension. Propagation des ondes de cour-
rant. Les ondes stationnaires et leur image... 58

CHAPITRE VI

- À propos de la capacité des condensateurs.* — Conden-
sateurs à armatures évidées. Répartition de
l'électricité sur les armatures évidées. Applica-
tion aux antennes en nappe..... 71

CHAPITRE VII

- Actions électriques et magnétiques à distance.* —
Rôle de l'éther dans les actions à distance. Les
hypothèses de Maxwell. Courants électriques
dans les conducteurs et dans les isolants. Corpus-
cules de l'éther et grains d'électricité. Les forces
électriques et les forces magnétiques. Récipro-
cité de leurs actions..... 79

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE VIII

Actions radioélectriques. — Extension de l'induction à distance aux phénomènes radioélectriques. Direction et propagation dans l'éther des forces électriques et magnétiques..... 94

CHAPITRE IX

Qu'est-ce qu'un collecteur d'ondes ? — Considérations générales sur le rayonnement et l'absorption. Comparaison thermique. Action des ondes sur l'antenne. Rôle de la hauteur. Propriétés de l'antenne artificielle. Action des ondes sur le cadre. Explication des propriétés directives du cadre. Image électrique du cadre..... 101

CHAPITRE X

Les radiocommunications. — Émission et réception. Expériences fondamentales. Antenne et cadre. Détecteur et téléphone. Modulation et longueur d'onde. Circonstances atmosphériques et géographiques. Zones d'absorption. Renforcement aux antipodes. Communications par ondes le long des lignes métalliques. Multicomunications simultanées sur les réseaux..... 117

CHAPITRE XI

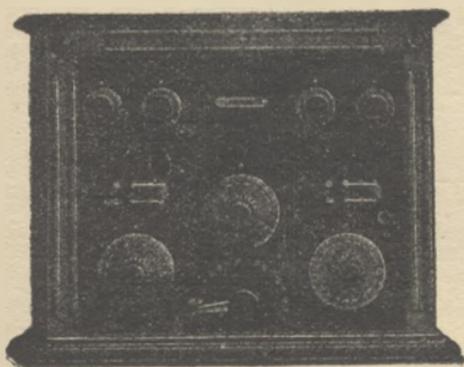
Faisceaux d'ondes dirigées. — Intérêt du problème : secret des communications, économie d'éther, économie de puissance. Notion de faisceau d'ondes dirigées. Concentration des ondes. Réflecteur parabolique. Réflecteurs plans. Résultats.. 138

CONCLUSION 151

RADIOMUSE

MONTAGE A RÉSONANCE

Ondes de 120 à 4 500 mètres



SÉLECTION

PUISSANCE

NETTETÉ

Facilité de réglage

Portée : 6 000 kilomètres

40, Rue Denfert-Rochereau, PARIS (V^e)

Téléphone : Gobelins 41-79.

MICHEL ADAM

Ingénieur E. S. E.

ZINCITE ET CRISTADYNE

L'ouvrage le plus pratique et le plus complet sur l'intéressant cristal et sur son utilisation. — Prix : **3 francs.**

BIBLIOTHÈQUE DE « RADIOÉLECTRICITÉ »
63, rue Beaubourg. - PARIS (3^e)

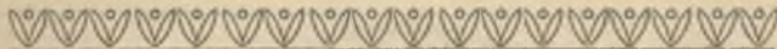
PARIS - RADIO

Maison de Gros : **2, rue Manuel, PARIS (IX^e)**

TOUT CE QUI CONCERNE LA T. S. F. :

Postes de tous modèles à lampes et à galène. — Haut rendement. — Sélection parfaite. — Haut-parleurs 4000 ohms P. R., pureté et puissance garanties. — Tous accessoires : Lampes, Casques, Accumulateurs, etc. — Piles « France ». — Galène naturelle extra marque « Cristal A » et « Diamant ».

ZINCITE DE CHOIX



RADIO- -MICRO



LA
RADIOTECHNIQUE

12 Rue la Boétie . Paris . Téléph : Elysées 47-12 & 13 Aortél : Raditechnar



AUDIOS

TOUT
CE QUI CONCERNE
L'ÉMISSION
ET LA
RÉCEPTION
DE

T.S.F.

se trouve

AU PIGEON VOYAGEUR

211, BOUL⁹ ST GERMAIN .

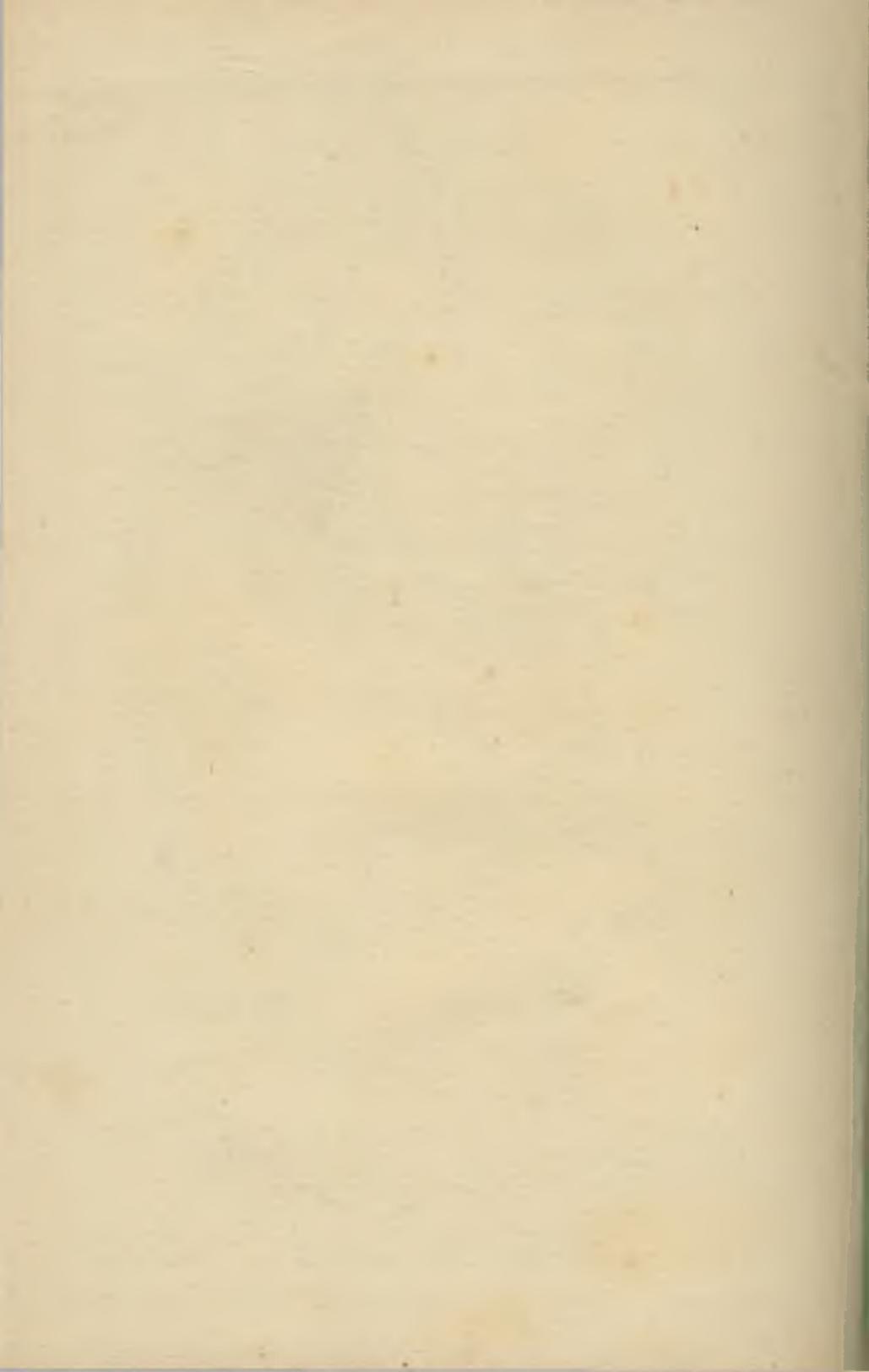
PARIS (VIII^e Arr^{ndt})

TEL: FLEURUS 02-71
REG. COM⁹ 70-71

PUBL. "LA BONNE IDÉE"

ENVOI DU NOUVEAU CATALOGUE ILLUSTRÉ
SUR DEMANDE CONTRE 1 FR. 25.

CORBEIL. — IMPRIMERIE CRÈTE



RAZAUD

A. B. C. de l'Automobile

Prix : 2 fr. 40 ; *franco* : 2 fr. 80

A. GROSSELIN

L'Automobile et son moteur

Prix : 6 francs ; *franco* : 6 fr. 60

M. PERCHERON

Manuel pratique pour la conduite et l'entretien des moteurs à explosion

Prix : 9 francs ; *franco* : 9 fr. 90

M. PERCHERON

Aide-mémoire pour la recherche des pannes

Prix : 1 fr. 80 ; *franco* : 2 fr. 20

R. LAMY

Les Carburateurs et la Carburation

Prix : 18 francs ; *franco* : 19 fr. 50

R. BARDIN

L'Automobile Ford

Prix : 5 fr. 40 ; *franco* : 6 francs.

P. JACQUES

Manuel pratique du Motocycliste

Prix : 7 fr. 20 ; *franco* : 8 francs.

Etienne CHIRON, éditeur, 40, rue de Seine, PARIS (6^e)

LES MEILLEURS OUVRAGES DE T.S.F.

La T. S. F. expliquée , par Vallier.	3.60
Le Poste de l'Amateur de T. S. F. , par Hémardinquer	20. »
Les montages modernes en Radiophonie , par Hémardinquer	24. »
Les lampes à plusieurs électrodes et leurs applications , par G. Teyssier.	40. »
Les lampes à deux grilles et leur application , par Hémardinquer	6. »
Le Superhétérodyne et la Superréaction , par Hémardinquer	21.60
Le Superhétérodyne . Principe, invention, évolution, par De Bellescize	15. »
L'Alimentation des postes de T. S. F. par le secteur , par M. Chauvierre.	9. »
Nouveau Manuel pratique de Téléphonie sans fil , par Branger	9. »
Tous les montages de T. S. F. , par A. Boursin.	9. »
La Réception sur galène des radio-concerts . Instruction pratique pour construire soi-même un poste à galène	2.40
La Téléphonie sans fil en haut-parleur , par le Dr P. Husnot. Construction simplifiée d'un poste à lampe spécialement adapté à la réception des Radio-concerts.	3.60
La T. S. F. en 30 leçons . Cours professé au Conservatoire National des Arts et Métiers au prix de	43.20
Ces cours sont vendus, soit en un seul volume, soit par fascicules séparés :	
Tome I, 9 fr.; Tome II, 9 fr.; Tome III, 7.20;	
Tome IV, 7.20; Tome V, 9 fr.	
La meilleure initiation à la T. S. F. :	
La T. S. F. pour tous , Tome I, relié.	25. »
La T. S. F. pour tous , Tome II, relié.	30. »
Théorie et pratique de la T. S. F. , par Bérard.	30. »
Formulaire de la T. S. F. , par Malgorn.	30. »
La construction des appareils de Télégraphie sans fil , par L. Michel	3.60
Les ondes courtes , par Clavier.	7.20
La zincite et les montages crystadines , par Pierre Lafond.	1.80
Liste des émissions des radiogrammes météorologiques	4.80
Radiogrammes météorologiques de l'Hémisphère Boréal	14.40
Annuaire de la T. S. F. pour 1927	42. »
La mémoire instantanée des signaux Morse , par Hauser.	5.40
<i>Pour être au courant de toutes les nouveautés; il faut lire chaque mois :</i>	
L'Onde électrique . Le Numéro, 3 fr.; Abonnement d'un an.	30. »
La Radio . Le Numéro, 3 fr.; Abonnement d'un an.	30. »
La T. S. F. pour tous . Le Numéro, 3 fr.; Abonnement	36. »

Étienne CHIRON, Éditeur, 40, Rue de Seine - PARIS (6^e)