

NOTICE

SUR LA

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL;

PAR M. H. POINCARÉ.

Principe de la Télégraphie sans fil. — On sait depuis Faraday que si un circuit métallique est placé dans le voisinage d'un courant intermittent, alternatif, ou variable, il se produit dans ce circuit des courants secondaires appelés *courants induits*. Cette action se fait sentir à distance, aussi bien à travers un isolant ou à travers l'air qu'à travers un conducteur. Il y a là, théoriquement au moins, un moyen d'envoyer des signaux à distance sans intermédiaire d'aucun fil.

Mais cette idée a longtemps paru chimérique. Avec les ressources dont on disposait autrefois, les effets d'induction ne pouvaient être sensibles qu'à de très petites distances, beaucoup trop petites pour qu'on pût songer à en tirer parti.

Ce sont les expériences de Hertz en 1888 qui ont fait entrer la question dans une nou-

A.2

velle phase. J'ai déjà rendu compte des principes et des résultats de ces expériences dans une Notice de l'*Annuaire de* 1894. Je me bornerai donc ici à quelques indications rapides.

Hertz produit des courants dont l'alternance est très rapide, puisqu'ils changent de sens de 100 millions à 1 milliard de fois par seconde de telle façon que leur période est $2 \cdot 10^{-8}$ à $2 \cdot 10^{-9}$ secondes. Il se sert pour cela d'un appareil appelé *excitateur*, qui se compose simplement de deux conducteurs placés près l'un de l'autre; chacun de ces conducteurs se termine par une petite boule, et entre ces deux boules peut éclater une étincelle quand la différence de potentiel est assez grande. Ces deux conducteurs sont mis en communication avec les deux pôles du secondaire d'une bobine de Ruhmkorff.

Le temps que les courants secondaires de cette bobine mettent à naître et à disparaître est extrêmement court, si on le compare aux durées que nous sommes accoutumés à considérer. Il est très long au contraire, si on le compare aux durées dont je viens de parler et qui sont de l'ordre d'un cinquante-millionième de seconde. A ce point de vue, je puis donc dire que la bobine de Ruhmkorff chargera *très lentement* les deux conducteurs. Quand la différence de potentiel sera assez grande l'étincelle éclatera et les conducteurs se déchargeront *brusquement*. Mais cette décharge ne sera pas simple, elle se

A.3

iera par une série d'oscillations. C'est ainsi qu'un pendule, écarté de sa position d'équilibre, n'y revient qu'après avoir oscillé quelque temps. Suivant les dimensions de l'appareil, la période de ces oscillations varie, comme je l'ai dit, de $2 \cdot 10^{-8}$ à $2 \cdot 10^{-9}$.

Les effets d'induction, étant dus aux variations du courant primaire, sont d'autant plus intenses que ces variations sont plus rapides. Il est donc naturel que Hertz, avec de pareilles fréquences, ait pu observer ces effets à plusieurs mètres.

Il a démontré qu'ils ne se propagent pas instantanément comme on l'avait longtemps cru, mais avec la vitesse de la lumière; que de plus, lorsqu'ils se répètent périodiquement et avec une alternance rapide, ils reproduisent toutes les propriétés de la lumière. Hertz avait donc fait une véritable synthèse de la lumière; ainsi se trouvait confirmée l'idée de Maxwell, d'après laquelle la lumière est due à des phénomènes électriques alternatifs de période très courte.

Les différences apparentes ne sont dues qu'à la durée de la période, ou à ce qu'on appelle la *longueur d'onde*, c'est-à-dire le chemin parcouru par la lumière pendant une période. Si cette longueur est de quelques dix-millièmes de millimètre on a les radiations visibles, si elle est de quelques centimètres ou de quelques mètres on a les radiations hertziennes; de sorte qu'en passant des ondes les plus courtes aux ondes plus longues, on rencontre successi-

vement les rayons chimiques ultraviolets invisibles, les rayons violets, bleus, verts, jaunes, rouges, les rayons calorifiques invisibles et enfin les rayons hertziens, de sorte qu'il n'y a pas d'autre différence entre ceux-ci et la lumière visible qu'entre la lumière verte et la lumière rouge.

Mais alors, si la lumière ordinaire permet d'envoyer au loin des signaux par la télégraphie optique, pourquoi la lumière hertzienne, si je puis m'exprimer ainsi, ne donnerait-elle pas aussi une solution du problème de la télégraphie sans fil?

La télégraphie optique dispose, il est vrai, d'une ressource qui fait défaut à la télégraphie hertzienne; elle concentre la lumière par le moyen de lentilles et de miroirs, transforme les rayons divergents, émanés d'une source, en un faisceau de rayons parallèles et les envoie dans une seule direction. Avec des radiations hertziennes, c'est-à-dire avec des ondes de grande longueur, cela n'est plus possible.

On dit communément que la lumière se propage en ligne droite, mais cela n'est qu'à peu près vrai; sur les bords d'un faisceau lumineux, les rayons s'écartent plus ou moins de leur trajectoire rectiligne et ce phénomène qu'on appelle *diffraction* est d'autant plus accentué que la longueur d'onde est plus grande. Si la lumière visible se propage sensiblement en ligne droite et suit les lois connues de la réflexion et de la réfraction,

c'est parce que sa longueur d'onde est plus petite qu'un millième de millimètre, extrêmement petite, par conséquent, par rapport aux dimensions des obstacles qu'elle rencontre, des lentilles qu'elle traverse, des miroirs qui la réfléchissent.

Pour concentrer les ondes hertziennes, il faudrait donc des lentilles énormément plus grandes que la longueur de ces ondes; sans cela, le phénomène de diffraction deviendra prépondérant et la réfraction ne se fera plus régulièrement. Avec des ondes de quelques mètres, il faudrait donner aux lentilles un diamètre de plusieurs kilomètres; avec des ondes de quelques centimètres, il faudrait encore de très grandes lentilles.

Il y a d'ailleurs une autre raison qui empêche de songer à employer ces ondes courtes.

Righi a bien pu obtenir des ondes très courtes, mais avec de très petits excitateurs de capacité très petite, où l'on ne peut, par conséquent, accumuler que très peu d'électricité, c'est-à-dire très peu d'énergie. Les effets deviennent alors trop faibles pour pouvoir être utilisés en télégraphie.

Donc, pas de concentration possible. On comprendra combien la difficulté est grande si l'on se rend compte de la faiblesse de l'énergie produite dans un excitateur et c'est ce qu'on pourra faire à l'aide de la comparaison suivante. A chaque décharge, une certaine quantité d'énergie est accumulée dans l'excitateur. C'est

elle qui produit les oscillations et ces oscillations se poursuivraient indéfiniment si cette énergie ne se dissipait pas. Mais elle se dissipe de deux manières : d'abord par rayonnement, elle se communique à l'éther ambiant sous forme d'ondes hertziennes ; c'est cette partie de l'énergie qui est utilisable. Ensuite par la résistance des conducteurs, qui agit sur les oscillations électriques comme le frottement agirait sur un pendule, de sorte que, les conducteurs s'échauffant, une partie de l'énergie est transformée en chaleur, et définitivement perdue. C'est le petit espace où l'étincelle éclate qui est de beaucoup le plus résistant, de sorte que presque toute cette énergie perdue est employée à produire la lumière et la chaleur de l'étincelle.

A première vue, et en nous contentant d'une évaluation grossière, nous pouvons admettre que l'énergie ainsi perdue est le dixième de l'énergie totale. Mais toute cette énergie perdue ne se retrouve pas sous forme de lumière visible ; la plus grande partie prend la forme de chaleur obscure. Toutefois, comme la température de l'étincelle est énorme, et par conséquent le rendement lumineux très bon, on peut admettre qu'un dixième de l'énergie de l'étincelle est de la lumière visible. A ce compte, l'énergie de la lumière de l'étincelle serait le centième de celle des ondes hertziennes ; toutes choses égales d'ailleurs, elle devrait donc pénétrer dix fois moins loin. (Je dis dix fois, à cause

de la loi du carré des distances.) Si donc la rétine humaine avait la même sensibilité que les appareils qui décèlent les ondes hertziennes à 300^{km} , nous devrions voir l'étincelle à 30^{km} et cela sans le secours d'aucun système de concentration. Nous sommes loin de compte, et nous devons conclure que la télégraphie sans fil n'aurait jamais pu fonctionner, si l'on n'avait inventé un appareil beaucoup plus sensible que notre rétine qui, cependant, est déjà un instrument d'une merveilleuse délicatesse.

Description succincte des appareils. — Cet appareil, d'une exquisite sensibilité sans laquelle la télégraphie sans fil serait toujours restée une chimère, a reçu le nom de *cohéreur*. Il se compose simplement d'un tube de verre rempli de limaille métallique; aux deux extrémités de ce tube se trouvent deux électrodes qui sont mises en communication avec les deux pôles d'une pile. Ordinairement le cohéreur est isolant parce que les contacts des grains de limaille entre eux sont mauvais; et le courant de la pile ne passe pas. Mais, si le cohéreur est frappé par une onde hertzienne, il devient conducteur, et le courant passe. Il suffit ensuite d'un choc léger pour lui faire perdre sa conductibilité et pour faire cesser le courant.

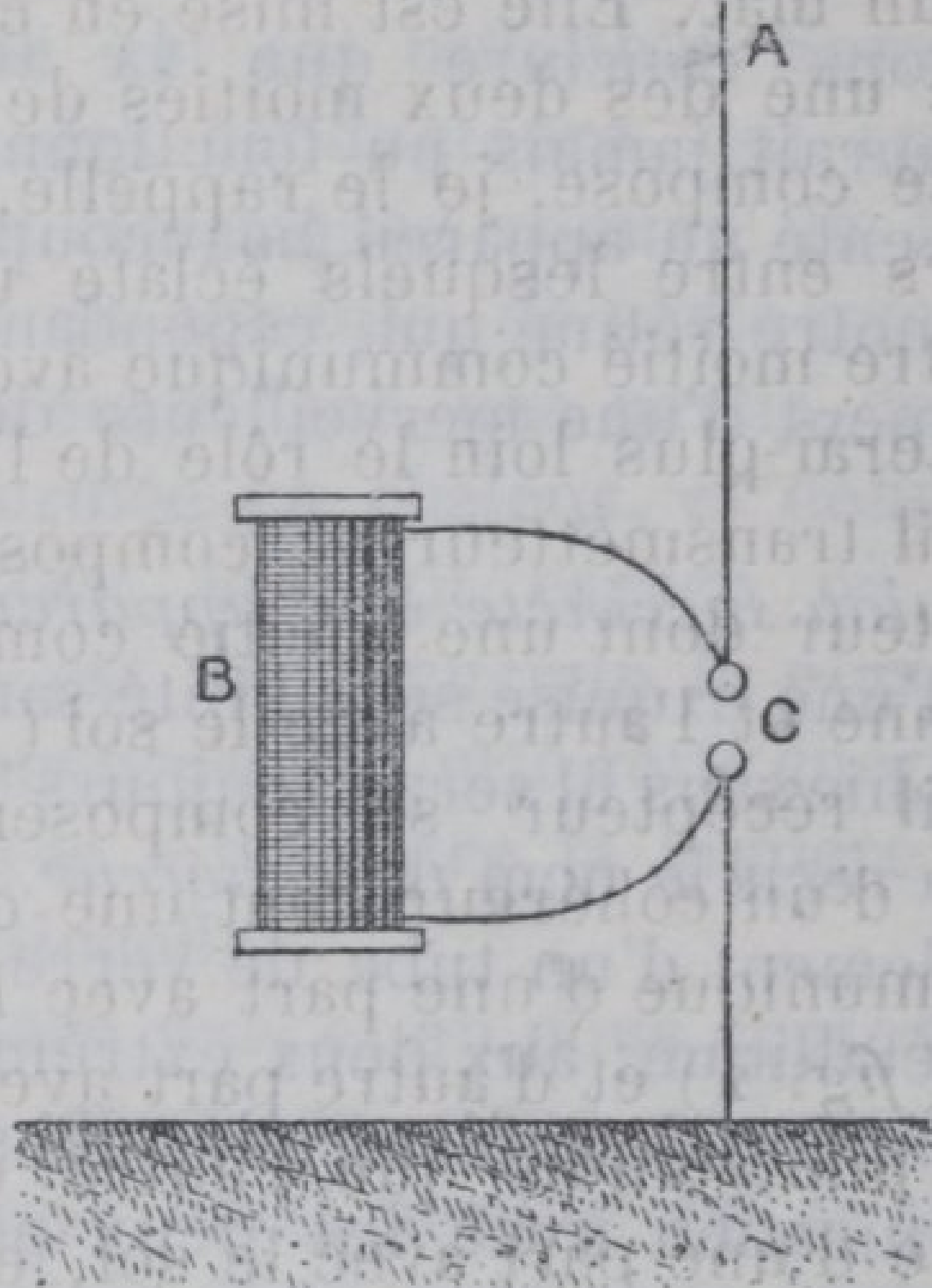
Ainsi, une onde très faible *déclenche*, pour ainsi dire, le courant de la pile, et rien n'empêche de prendre cette pile assez forte pour faire marcher un appareil Morse, soit directe-

A.8

ment, soit par l'intermédiaire d'un relais; le courant de la pile décèlera ainsi la présence des ondes.

Je reviendrai plus loin sur l'explication du

Fig. 1.



Cette figure représente l'appareil transmetteur, elle est schématique; elle n'est pas à l'échelle, pas même grossièrement; il est clair, en effet, que, l'antenne ayant 50^m, les autres parties de l'appareil n'auraient pu être représentées si les proportions avaient été conservées. Cette observation s'applique à toutes les figures suivantes.

A, antenne.

C, intervalle où éclate l'étincelle.

B, bobine de Ruhmkorff.

phénomène; je dirai seulement qu'il a été

A.9

découvert indépendamment par M. Branly en France, puis par M. Lodge en Angleterre.

Un autre organe essentiel de la Télégraphie sans fil est *l'antenne*, c'est une longue tige métallique verticale de 10^m à 50^m, soutenue par un mât. Elle est mise en communication avec une des deux moitiés de l'excitateur (qui se compose, je le rappelle, de deux conducteurs entre lesquels éclate une étincelle); l'autre moitié communique avec le sol.

Je discuterai plus loin le rôle de l'antenne.

L'appareil transmetteur se composera donc d'un excitateur dont une moitié communique avec l'antenne et l'autre avec le sol (*fig. 1*).

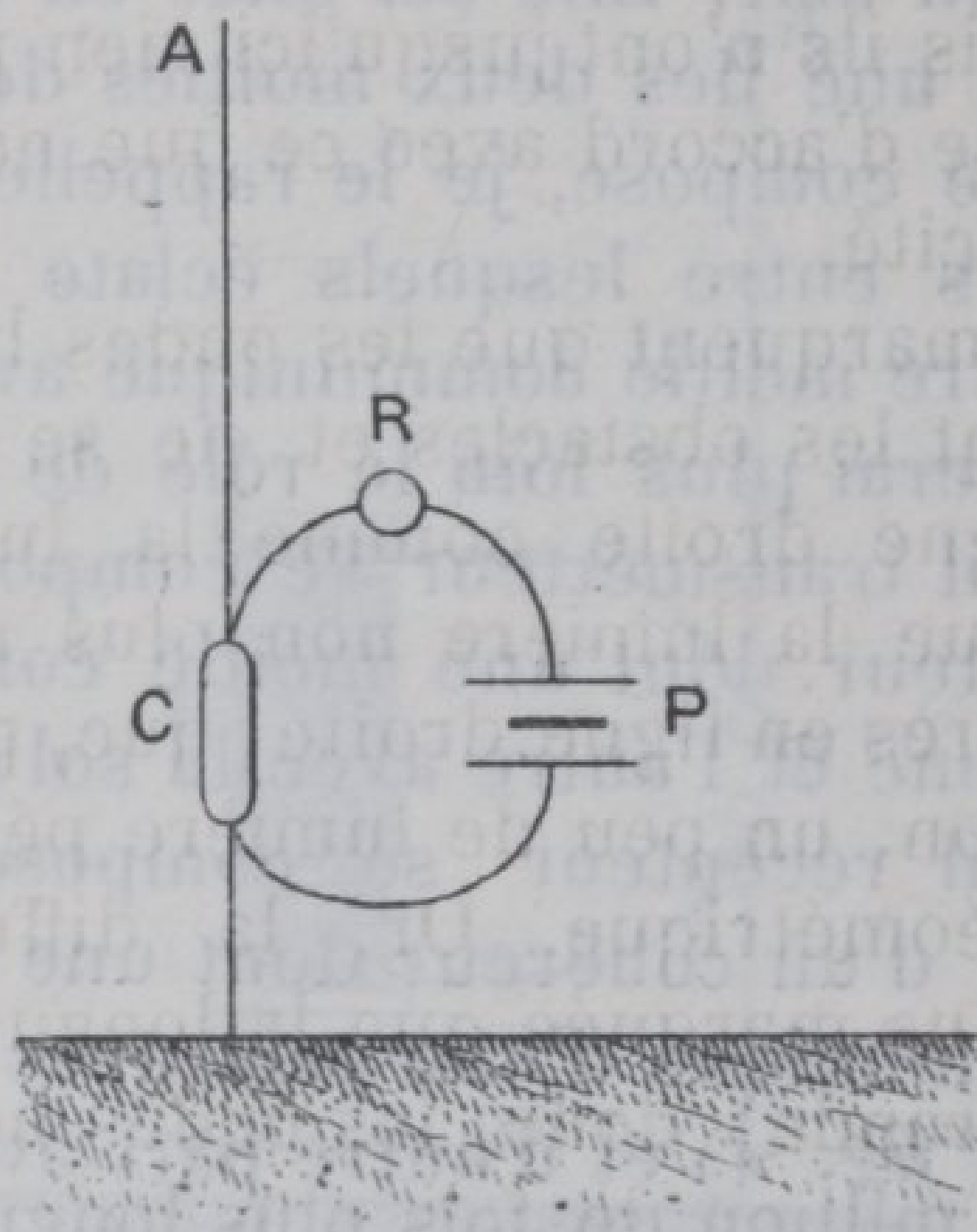
L'appareil récepteur se composera d'une antenne et d'un cohéreur dont une des électrodes communique d'une part avec l'antenne réceptrice (*fig. 2*) et d'autre part avec un des pôles d'une pile, tandis que l'autre électrode communique d'une part avec le sol, et d'autre part avec l'autre pôle de la pile.

Quand, à la station de transmission, on fera fonctionner la bobine de Ruhmkorff, des oscillations électriques se produiront dans le système formé par l'excitateur et l'antenne; l'énergie de ces oscillations rayonnera au dehors sous forme d'ondulations hertziennes; elle atteindra l'antenne réceptrice; des courants induits oscillatoires se produiront alors de l'antenne au sol à travers le cohéreur; ces courants seront excessivement faibles, mais ils suffiront pour impressionner le cohéreur qui

A. 10

deviendra conducteur. Le courant de la pile passera alors et actionnera un appareil Morse. Un petit marteau trembleur, en frappant périodiquement le cohéreur, lui fera perdre sa con-

Fig. 2.



Appareil récepteur.

A, antenne.

R, relais faisant fonctionner le Morse.

P, pile locale.

C, cohéreur.

ductibilité et le rendra ainsi capable de recevoir un nouveau signal.

Explications théoriques. — Certains savants répugnent à admettre l'explication classique de la Télégraphie sans fil, ils invoquent divers arguments que nous allons examiner :

A. 11

1° Ils s'étonnent que l'effet puisse être sensible à des centaines de kilomètres, s'il diminue, avec la distance, suivant la même loi que la lumière; et ils en concluent que la propagation s'effectue par quelque processus différent, tel que la décroissance avec la distance soit moins rapide. Mais ils n'ont jusqu'ici rien pu trouver qui paraisse d'accord avec ce que nous savons de l'électricité.

2° Ils remarquent que les ondes hertziennes contournent les obstacles et ne se propagent pas en ligne droite comme la lumière. Ils oublient que la lumière non plus ne marche qu'à peu près en ligne droite; que, par suite de la diffraction, un peu de lumière pénètre dans l'ombre géométrique. Or, la diffraction est d'autant plus marquée que la longueur d'onde est plus grande; donc, les ondes hertziennes, qui sont 1 million de fois plus longues que les ondes lumineuses, pénétreront beaucoup plus facilement dans l'ombre géométrique et contourneront ainsi des obstacles qui nous paraissent énormes, tels que de petites collines, ou la convexité du globe terrestre qui, pour des distances de plusieurs centaines de kilomètres, représente un obstacle de plusieurs centaines de mètres de hauteur.

3° Ils font observer que la propagation est beaucoup plus facile sur mer que sur terre; c'est en effet ce que toutes les expériences confirment; ils en concluent que la conductibilité du sol joue un rôle prépondérant. Mais

le fait tient-il à la conductibilité de l'eau de mer, qui est d'ailleurs très faible pour des courants de haute fréquence, ou s'explique-t-il par l'absence d'obstacles géométriques? C'est ce qu'il est encore difficile de dire.

D'ailleurs une expérience directe a montré qu'un cohéreur fonctionnait s'il était placé au fond d'un trou creusé dans la terre, *sans être recouvert*, mais qu'il restait inactif s'il était enterré : ce qui prouve bien que les ondes ne passent pas à travers la terre par conduction, que par conséquent elles ne traversent pas les obstacles, mais qu'elles les contournent par diffraction.

Il est vrai, d'autre part, que la portée est considérablement augmentée quand l'excitateur communique avec le sol; nous verrons tout à l'heure pourquoi; mais quand on supprime cette communication la portée en est seulement amoindrie, tandis que la transmission devrait cesser complètement si elle se faisait par la terre.

En résumé, aucun de ces arguments n'a paru convaincant à la majorité des physiciens. Mais une autre question se pose : l'excitateur se compose de deux petites boules entre lesquelles éclate l'étincelle; les ondes ont-elles même période que si ces deux boules étaient isolées; ou bien le système de l'antenne, des deux boules et du sol fonctionne-t-il comme un grand excitateur, qui émettrait alors des

ondes bien plus longues? Dans la première hypothèse, à laquelle on a cru longtemps, l'antenne ne jouerait que le rôle d'un fil conducteur, qui amènerait les ondes émises par les deux petites boules jusqu'à son extrémité supérieure et les transmettrait ensuite à l'éther ambiant.

Aucune de ces deux hypothèses n'est absurde; l'appareil pourrait émettre soit des ondes courtes, soit des ondes longues, de même qu'une corde vibrante peut donner plusieurs sons harmoniques. Mais l'expérience a décidé en faveur de la seconde. M. le lieutenant de vaisseau Tissot a mesuré directement la période par le moyen d'un miroir tournant; il l'a trouvée $0,06$ à $1,8 \cdot 10^{-6}$ seconde. Les ondes sont donc cent à mille fois plus longues que celles obtenues par Hertz, dix à cent mille fois plus longues que celles de Righi, un milliard de fois plus longues que les ondes lumineuses. C'est même grâce à cette circonstance que la mesure a été possible: les vibrations réalisées par Hertz auraient été trop rapides et le miroir tournant n'aurait pas pu décomposer l'étincelle. C'est là en même temps une vérification du caractère périodique du phénomène.

Il resterait, pour achever de contrôler la théorie, à mesurer la vitesse de propagation. Le problème ne paraît pas inabordable; il semble qu'un même ébranlement parti de l'excitateur pourrait être transmis à une

même station par deux chemins : par un fil et à travers l'air. Deux étincelles éclateraient à la station d'arrivée et un miroir tournant permettrait d'apprécier l'intervalle de temps qui les sépare. On pourrait donc comparer la vitesse des ondes hertziennes à travers l'air et dans un fil ; quant à cette dernière, elle a été déterminée par l'expérience de Blondlot.

Il serait aussi intéressant de savoir quelle est la quantité d'énergie rayonnée dans les directions obliques ; mais cela ne pourrait se faire que par des expériences en ballon.

Je terminerai ces considérations théoriques en parlant du rôle de l'antenne. L'expérience a montré que la longueur des antennes doit être proportionnelle à la racine carrée de la distance à franchir. Pourquoi ? Est-ce pour que la droite qui joint les extrémités des deux antennes ne rencontre pas la terre ? Non, il faudrait pour cela des antennes beaucoup plus grandes. C'est plutôt parce qu'en augmentant leurs dimensions on augmente la longueur d'onde et par conséquent le phénomène de diffraction par lequel peut être contourné l'obstacle dû à la rotondité du globe.

Si l'on a avantage à relier l'excitateur au sol, c'est parce que la capacité de la seconde partie de l'excitateur devient ainsi pratiquement infinie. La longueur d'onde est alors doublée.

Pourquoi maintenant l'antenne doit-elle être verticale ? Les sources de lumière naturelle

donnent des vibrations dont la direction change constamment; par conséquent, l'énergie est rayonnée également dans tous les sens. Avec une antenne verticale au contraire, la vibration est rectiligne et toujours verticale; elle est *naturellement polarisée*. Il en résulte qu'il y a plus d'énergie rayonnée dans le plan horizontal, c'est-à-dire dans les directions utiles, que dans les directions verticale ou oblique. On peut calculer qu'il y a une fois et demie plus d'énergie rayonnée dans le plan horizontal que si l'émission se faisait comme celle de la lumière naturelle et trois fois plus d'énergie utilisable, parce que l'antenne réceptrice utilise toute la vibration qu'elle reçoit et qui est verticale comme elle. Au contraire, dans le cas d'une radiation comparable à la lumière naturelle, un appareil récepteur quelconque ne pourrait utiliser que la moitié de l'énergie qu'elle recevrait, à savoir celle des vibrations qui auraient même direction que lui.

Mais on ne se ferait ainsi qu'une idée insuffisante de la supériorité des excitateurs rectilignes. Un excitateur courbé, formé par exemple d'un fil presque fermé réunissant les deux armatures d'un condensateur, ne serait nullement comparable à une source de lumière naturelle. Nous aurions une sorte de circuit fermé, et par conséquent un fil d'aller et un fil de retour dont les actions de sens contraire se feraient sentir à peu près simultanément, surtout si les dimensions de l'appareil

reil étaient petites par rapport à la longueur d'onde. *Ces actions se compenseraient alors presque complètement.* Au contraire, avec un excitateur rectiligne, toutes les actions s'ajoutent ⁽¹⁾; avec une source de lumière naturelle, les vibrations de sens opposé ne sont pas simultanées, mais elles se succèdent et comme cette succession est irrégulière, il n'y a pas de raison pour que la compensation se fasse.

Les lois du rayonnement émané d'un excitateur rectiligne sont donc les mêmes que celles des radiations lumineuses; l'amplitude des vibrations varie en raison inverse des distances et l'énergie qui est proportionnelle au carré de cette amplitude en raison inverse du carré des distances. Au contraire, dans le cas d'une compensation complète, l'amplitude varierait en raison inverse du carré de la distance, et l'énergie en raison inverse de la quatrième puissance. Avec un excitateur presque fermé, la compensation serait presque complète et l'on se rapprocherait de cette dernière loi.

J'ai dit que c'est pour augmenter la longueur d'onde qu'on augmente la hauteur des an-

(¹) Cependant la transmission ne se ferait pas si les deux antennes étaient rectilignes, horizontales toutes deux et parallèles; parce que, dans ces conditions, la vibration directe interférerait avec la vibration réfléchie sur le sol ou sur la mer.

tennes. Mais il ne faudrait pas croire qu'on obtiendrait les mêmes résultats en augmentant la longueur d'onde par d'autres moyens, c'est-à-dire en augmentant d'une manière quelconque la capacité ⁽¹⁾ ou la self-induction, la longueur d'onde étant, comme on sait, à un facteur constant près, moyenne proportionnelle entre ces deux quantités. D'après ce qui précède, la forme de l'excitateur est au contraire très importante, et nous venons de voir que l'excitateur ne saurait s'éloigner beaucoup de la forme rectiligne sans devenir incapable de rayonner.

Cependant M. Marconi semble avoir entrepris des expériences pour remplacer l'antenne par un cylindre large et court, mais les résultats en sont encore tenus secrets.

Théorie du cohéreur. — Le cohéreur a reçu bien des formes différentes. D'abord on a employé diverses limailles ou divers mélanges de limailles. Une condition qui semble essentielle, c'est que les métaux employés soient

(¹) Remarquons que la « capacité dynamique » qui intervient dans le calcul de la longueur d'onde n'est pas égale à la capacité mesurée par des procédés statiques, attendu que la distribution électrique pendant les oscillations diffère beaucoup de celle qui correspondrait à l'équilibre électrostatique. J'insiste sur ce point, parce qu'avec certaines antennes la capacité dynamique peut être dix ou quinze fois plus grande que la capacité statique.

légèrement oxydables; il est probable que les grains se recouvrent d'une mince couche d'oxyde qui s'oppose au passage du courant. Des limailles de métaux inoxydables le laisseraient toujours passer. Toutefois la couche d'oxyde ne doit pas être trop épaisse, sans quoi le tube resterait isolant même en présence des oscillations hertziennes. C'est pour quoi M. Lodge conseille de sceller le tube et d'y faire le vide quand les métaux ont atteint un degré convenable d'oxydation. On peut obtenir aussi de bons résultats avec de la limaille d'argent, légèrement sulfurée à la surface, la couche de sulfure jouant alors le même rôle que la couche d'oxyde.

On a construit également des cohéreurs à limaille inoxydable, mais en prenant pour les électrodes des métaux oxydables. Il est probable alors que la résistance a lieu au contact de la limaille et des électrodes.

C'est par tâtonnement qu'on est arrivé au mélange le plus avantageux; celui qu'emploie Marconi comprend 96 pour 100 de limaille de nickel et 4 pour 100 de limaille d'argent.

Les contacts multiples entre des grains de limaille ne sont pas indispensables; on a pu réaliser des cohéreurs où il n'y a qu'un contact unique ou un petit nombre de contacts entre des pièces métalliques de dimensions sensibles, par exemple de petites billes ou de petits ressorts d'acier appuyés l'un sur l'autre.

On a construit d'autre part des cohéreurs

où le contact sensible a lieu entre charbon et métal, ou entre charbon et charbon (comme dans les microphones). Ces cohéreurs jouissent d'une propriété importante : ils sont *autodécohérents*; c'est-à-dire qu'après le passage de l'onde ils reprennent d'eux-mêmes leur résistance primitive, sans qu'il soit nécessaire de leur faire subir un choc. On conçoit que cette propriété puisse devenir précieuse pour les applications téléphoniques, car, en téléphonie, les signaux à transmettre sont les vibrations sonores, qui, pour les sons aigus, se succèdent très rapidement. Il serait donc impossible, par des moyens mécaniques, de rendre au cohéreur, après chaque vibration, sa résistance perdue.

Mentionnons pour terminer des appareils que l'on a appelés *décohéreurs* et dont la résistance augmente, au lieu de diminuer, sous l'influence des ondes hertziennes. Ces appareils ont reçu diverses formes. La plus remarquable est composée de plaques métalliques superposées. Le contact des deux plaques présente une certaine résistance qui diminue quand les plaques sont mouillées; mais la résistance primitive reparait quand les plaques mouillées sont soumises aux ondes électriques. Les décohéreurs n'ont pas toutefois jusqu'ici reçu d'applications pratiques.

Tels sont les faits à expliquer. Les deux inventeurs du tube à limaille lui ont donné deux noms différents : Lodge l'a appelé *cohéreur* et Branly

radioconducteur. Ces deux dénominations correspondent à des idées théoriques très différentes. Branly suppose que les radiations hertziennes modifient le diélectrique qui sépare les grains de limaille. Lodge pense qu'entre ces grains les ondes hertziennes font éclater des étincelles qui percent les couches isolantes d'oxyde, arrachent des particules des grains de limaille et de ces particules forment des ponts qui soudent pour ainsi dire ces grains l'un à l'autre. Ces ponts, une fois formés, subsisteraient jusqu'à ce qu'un choc les force à s'écrouler; dans les appareils autodécohérents ils seraient plus fragiles encore et disparaîtraient dès que les radiations cesseraient de passer.

La plupart des physiciens ont adopté l'opinion de Lodge; car plusieurs expérimentateurs ont pu observer directement sous le microscope la production des étincelles et la formation des ponts. Ils ne s'étaient pas placés, il est vrai, dans des conditions tout à fait identiques à celles de la télégraphie pratique.

Ce qui est plus difficile à expliquer, dans cette manière de voir, c'est le fonctionnement des cohérents où les grains de limaille sont noyés dans un diélectrique solide, tel que la paraffine. On suppose que les étincelles creusent dans la paraffine de petits canaux dont les parois se revêtent de poussière métallique. Dans les décohérents, elles agiraient en volatilissant de petits ponts métalliques pro-

existants, ou en réduisant partiellement en vapeur l'eau qui mouille les plaques. Mais tout cela reste très hypothétique.

Le cohéreur doit être réglé; pour cela on rapproche plus ou moins les deux électrodes pour faire varier la pression mutuelle des grains de limaille; si cette pression est trop grande le courant passe toujours; si elle est trop faible, les ondes hertziennes ne suffisent plus pour lui ouvrir le passage; mais entre certaines limites la résistance qui est de l'ordre du mégohm devient subitement un million de fois plus petite sous l'influence des radiations et tombe à l'ordre de l'ohm.

Si l'on réfléchit à l'explication de Lodge, l'extrême sensibilité du cohéreur paraîtra moins extraordinaire. Pour qu'il fonctionne, il suffit que l'étincelle éclate et pour cela qu'à un moment quelconque la différence de potentiel atteigne une certaine limite (limite d'ailleurs très faible puisque les intervalles des grains de limaille sont microscopiques); tout dépend donc de l'ébranlement *maximum*. Or celui-ci peut être considérable bien que l'énergie totale soit très faible parce que la durée de la perturbation est très courte.

Peu importe que ce maximum ne soit atteint que pendant un instant, car dès que l'étincelle a jailli, les ponts sont formés et livrent passage au courant de la pile locale. L'effet de l'onde persiste donc jusqu'à ce qu'un choc le fasse cesser. Il y a là quelque chose d'analogue

à cette « persistance des impressions » à laquelle notre rétine doit en partie sa sensibilité.

L'énergie accumulée dans l'excitateur se dissipe par le rayonnement; l'amplitude des oscillations décroît donc rapidement : c'est ce qu'on appelle l'*amortissement*. Il est clair que, plus cet amortissement sera grand, plus courte sera la durée totale de l'ébranlement; plus par conséquent l'ébranlement maximum sera grand pour une même quantité d'énergie accumulée.

D'après ce que nous venons de dire, nous devons donc nous attendre à ce qu'un fort amortissement soit favorable aux transmissions lointaines. C'est en effet ce qu'ont démontré les expériences de M. Tissot. Et même quelques-unes de ces expériences semblent prouver que si la mise au sol de l'excitateur favorise la transmission, ce n'est pas seulement parce qu'elle augmente la longueur d'onde et par là la diffraction, ni parce qu'elle augmente la capacité et par là l'énergie totale accumulée, mais surtout parce qu'elle augmente l'amortissement.

Avantages et inconvénients de la Télégraphie sans fil. — La télégraphie hertzienne est comparable, comme nous l'avons dit, à la télégraphie optique. Il y a cependant d'assez grandes dissemblances provenant toutes de la différence des longueurs d'onde. La longueur d'onde étant

plus grande, la diffraction devient notable ;
 où la possibilité de contourner les obstacles.
 L'obstacle le plus important est celui qui est
 dû à la rotondité même du globe ; la lumière
 ordinaire ne peut ni le traverser, ni le tourner ;
 en télégraphie optique on ne pourra donc
 communiquer à de grandes distances qu'à la
 condition d'avoir des postes très élevés. Avec
 les ondes longues, la diffraction est assez
 grande pour qu'il soit possible de contourner
 la convexité terrestre : on peut donc commu-
 niquer entre des points qui ne se voient pas.
 Ainsi a disparu la principale difficulté qui
 limitait la distance franchissable. Ainsi, avec la
 télégraphie optique on allait à 40^{km} ou 50^{km}
 en choisissant des postes favorables ; avec la
 télégraphie sans fil on ira à 300^{km} .

D'autre part, la lumière visible est arrêtée
 par le brouillard, il n'en est pas de même de
 la lumière hertzienne ? Pourquoi ? Si la
 lumière est arrêtée, ce n'est pas précisément
 qu'elle soit absorbée, car elle traverserait sans
 peine la même quantité d'eau à l'état de liquide
 homogène ; elle est dissipée par les réflexions
 multiples qu'elle subit à la surface des innom-
 brables vésicules du brouillard. C'est pour la
 même raison que le verre compact est trans-
 parent tandis que le verre pilé est opaque.
 Mais pour que ces réflexions se produisent il
 faut que les dimensions de ces vésicules soient
 grandes par rapport à une longueur d'onde.
 Une observation vulgaire le fera comprendre.

On voit souvent sur les bulles de savon, au milieu des plages colorées, des taches entièrement noires; ce sont les places où l'épaisseur de la bulle est non pas nulle (elle ne l'est nulle part, puisque la bulle n'est pas crevée) mais notablement plus petite qu'une longueur d'onde. Dans ces conditions la surface de la bulle ne réfléchit plus de lumière et c'est pour cela qu'elle paraît noire.

Or, les dimensions des vésicules sont très grandes par rapport aux longueurs d'onde lumineuses, très petites au contraire par rapport aux longueurs d'ondes hertziennes. C'est ce qui explique pourquoi elles se comportent si différemment dans les deux cas.

Cette transmission facile de la lumière hertzienne à travers le brouillard est une propriété précieuse, et l'on a proposé de s'en servir pour éviter les collisions en mer.

Nous avons vu que l'on doit renoncer à concentrer les ondes hertziennes dans une seule direction comme on le fait en télégraphie optique. Mais cet inconvénient emporte avec lui un avantage. Si les radiations sont concentrées dans une seule direction, il faut régler cette direction; ce réglage est long et délicat de sorte qu'on ne peut guère communiquer qu'entre des postes fixes. Au contraire, les ondes hertziennes étant envoyées indifféremment dans toutes les directions, permettront de communiquer avec un poste mobile quand même la position n'en serait pas connue. D'où

l'importance du nouveau système pour la marine.

Voici maintenant les inconvénients. La télégraphie optique et la télégraphie hertziennne ont sur la télégraphie ordinaire un avantage commun : c'est qu'en temps de guerre l'ennemi ne peut pas interrompre les communications en coupant les fils. Mais avec la télégraphie optique, le secret est assuré à moins que l'ennemi ne puisse se placer sur la trajectoire du mince filet lumineux envoyé d'une station à l'autre, et qui passe le plus souvent à une grande hauteur. Les ondes hertziennes sont, au contraire, envoyées dans toutes les directions; elles peuvent donc impressionner les cohéreurs ennemis aussi bien que les cohéreurs amis et, pour le secret, on ne peut plus se fier qu'à son chiffre. De plus, l'ennemi peut troubler les communications en envoyant des signaux incohérents qui viendront se confondre avec les signaux émis par la station amie. Même en temps de paix, il importerait d'assurer le secret des correspondances et, d'autre part, on peut prévoir un moment où, les appareils se multipliant, les signaux émis par plusieurs stations voisines se superposeront de façon à engendrer une confusion inextricable. On se souvient qu'Édison avait menacé ses concurrents européens, s'ils voulaient expérimenter en Amérique, de troubler leurs expériences de cette manière.

Perfectionnements récents. — Tels sont les

inconvenients que les inventeurs ont cherché à atténuer. Bien des procédés ont été proposés, mais je ne parlerai que de ceux que l'on a commencé à soumettre à des essais pratiques et qui sont tous fondés sur le principe de la « syntonisation », c'est-à-dire qui cherchent tous à imiter le phénomène acoustique de la résonance. On sait qu'un corps sonore, placé dans le voisinage d'un autre corps vibrant, entrera lui-même en vibration, mais que ces vibrations, très fortes si les sons propres des deux corps sont à l'unisson, seront presque insensibles pour peu que l'on s'écarte de cet unisson.

Si l'on pouvait obtenir les mêmes résultats avec des vibrations électriques, le problème serait résolu. Des signaux de période différente pourraient se superposer sans dommage, chaque récepteur démêlerait celui pour lequel il serait accordé. D'ailleurs nous n'aurions plus à craindre que l'ennemi intercepte nos télégrammes, puisqu'il ne sait pas quelle est la période de notre excitateur.

Malheureusement il y a de grandes difficultés. Sans doute un récepteur vibre mieux s'il est à l'unisson de l'excitateur; mais si l'on s'écarte de cet unisson, l'amplitude des vibrations, au lieu de devenir presque brusquement insensible, comme en acoustique, décroît avec une certaine lenteur. Il y a donc résonance, mais une résonance imparfaite.

Et encore, cette résonance, nous la con-

aissons par les anciennes expériences de Hertz qui n'employait pas le cohéreur. Nous ignorerions peut-être encore si l'on s'était toujours servi du tube à limaille. Le cohéreur, en effet, à cause de sa sensibilité même, ne pourrait distinguer ces différences. Il est impressionné par des excitations très faibles et comme il n'est qu'un appareil de déclenchement, il ne répond pas mieux aux excitations fortes qu'aux excitations faibles, pourvu que celles-ci dépassent la limite de sa sensibilité. C'est pourquoi la période peut varier de 1 à 30, comme pour deux sons distants de cinq octaves, sans qu'on constate de différence appréciable dans la qualité de la réception.

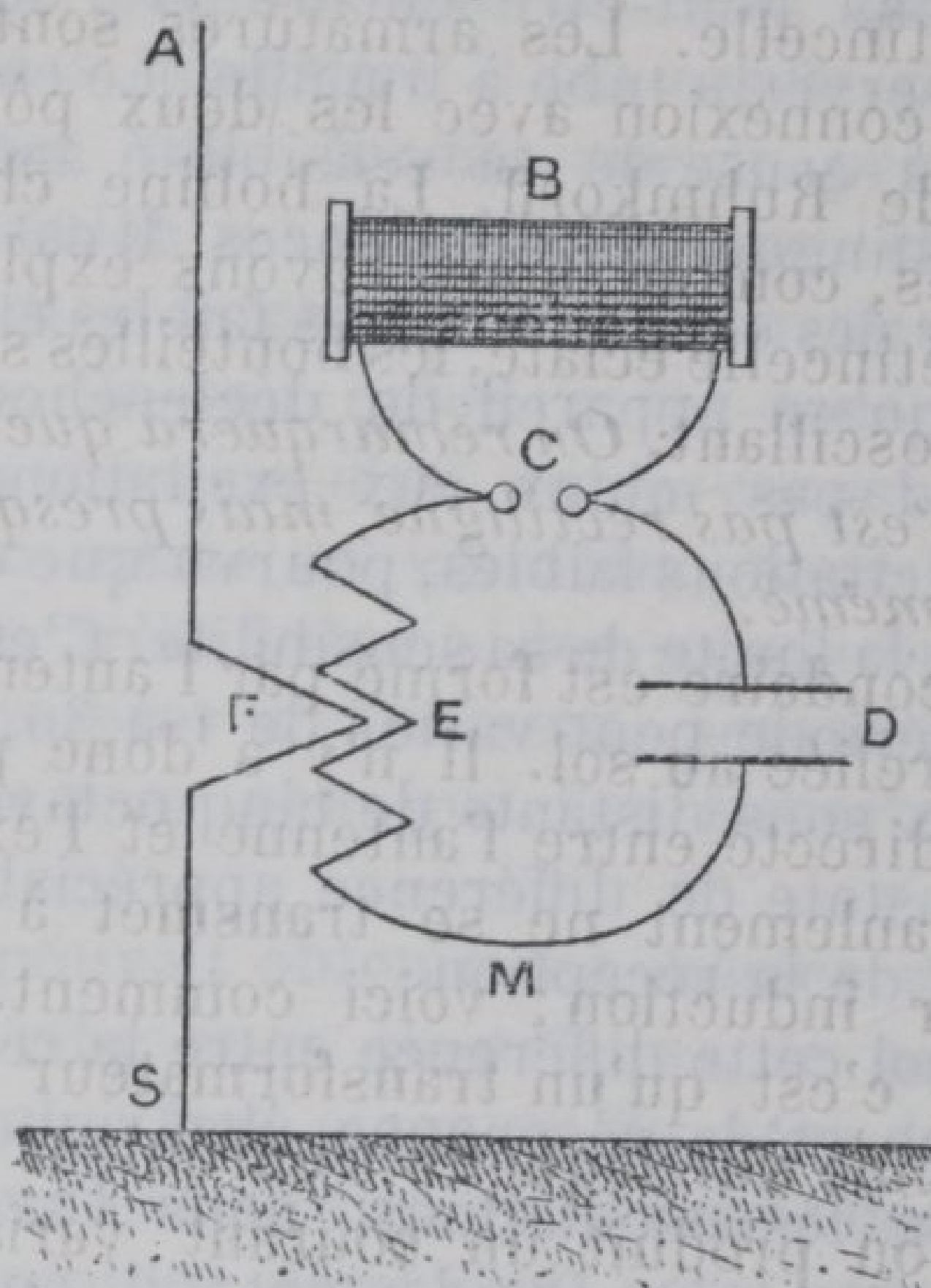
Pourquoi cette différence entre la résonance acoustique et la résonance électrique? C'est parce que les oscillations, nous l'avons vu, s'amortissent très rapidement; il en résulte que les vibrations électriques sont plutôt comparables à un bruit qu'à un son musical pur.

M. Slaby a imaginé, pour triompher de ces difficultés, un artifice fondé sur un principe fort ingénieux, mais sur lequel les détails nous manquent. Je m'étendrai donc seulement sur les procédés qui ont servi à M. Marconi pour communiquer de Wimereux à Douvres par-dessus le Pas-de-Calais, et d'Antibes en Corse par-dessus la Méditerranée.

Le nouveau transmetteur Marconi (*fig. 3*) se compose d'un excitateur primaire et d'un appa-

reil secondaire. L'excitateur primaire est formé

Fig. 3.



Transmetteur Marconi.

B, bobine de Ruhmkorff.

CDME, excitateur primaire.

C, intervalle où éclate l'étincelle.

D, bouteilles de Leyde.

E, enroulement primaire du transformateur.

AFS, secondaire.

A, antenne.

F, enroulement secondaire du transformateur.

S, sol.

Les bouteilles de Leyde D et le transformateur EF sont représentés schématiquement suivant l'usage des électriciens.

de treize bouteilles de Leyde, associées en

quantité, dont les armatures sont réunies par un fil; ce fil est interrompu sur quelques millimètres et c'est dans cette interruption que jaillit l'étincelle. Les armatures sont d'autre part en connexion avec les deux pôles de la bobine de Ruhmkorff. La bobine charge les bouteilles, comme nous l'avons expliqué, et, quand l'étincelle éclate, les bouteilles se déchargent en oscillant. *On remarquera que cet excitateur n'est pas rectiligne, mais presque fermé sur lui-même.*

Le secondaire est formé par l'antenne directement reliée au sol. Il n'y a donc plus connexion directe entre l'antenne et l'excitateur; et l'ébranlement ne se transmet à l'antenne que par induction; voici comment. On sait ce que c'est qu'un transformateur ⁽¹⁾: c'est une bobine sur laquelle s'enroulent deux fils; quand on produit un courant variable dans l'un des fils il naît un courant induit dans l'autre fil. C'est un appareil analogue qui transmet ici l'ébranlement; autour d'un cadre de bois plongé dans l'huile s'enroulent, d'une part, quelques spires du fil primaire de l'excitateur et, d'autre part, une spire du fil secondaire qui relie l'antenne au sol.

On peut prévoir que ce dispositif réduira l'amortissement de sorte que l'oscillation électrique se rapprochera un peu du son musical

(¹) Voir la Notice de M. Cornu dans l'*Annuaire* de 1901, p. A. 54.

pur. J'ai dit plus haut qu'un excitateur presque fermé rayonne très mal; c'est justement pour cela qu'il conserve son énergie et qu'il s'amortit lentement. Il la conserverait bien plus longtemps encore si, par le transformateur, il n'en transmettait une partie au secondaire et à l'antenne. Celle-ci rayonne rapidement ce qu'elle a reçu, et cependant l'amplitude de ses vibrations se maintient quelque temps, parce qu'à mesure qu'elle perd de l'énergie par rayonnement elle en reçoit du transformateur jusqu'à ce que la provision accumulée dans le primaire soit épuisée.

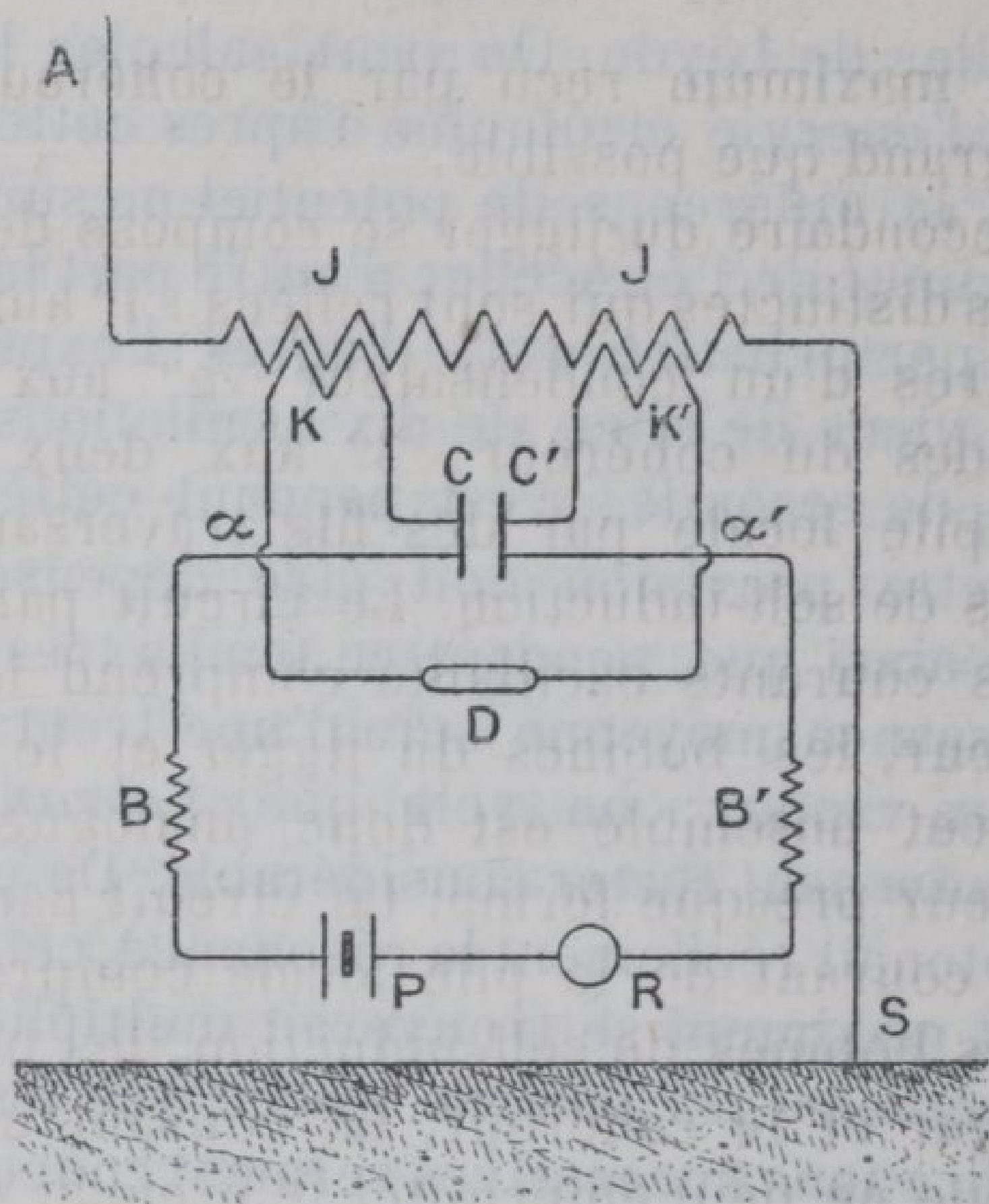
Ainsi l'amortissement doit être plus faible qu'avec les appareils ordinaires; et il serait plus faible encore si l'antenne rayonnante n'était pas reliée au secondaire. C'est ce que confirment les expériences de M. Tissot. Ce savant officier, observant avec un miroir tournant l'étincelle de l'appareil ordinaire, obtenait au plus trois images de cette étincelle : ce qui veut dire qu'au bout de trois vibrations les oscillations étaient devenues insensibles; avec un dispositif analogue à celui de Marconi, il en obtenait dix; il en avait bien davantage quand l'antenne n'était pas reliée au secondaire.

J'ai dit qu'un fort amortissement était favorable aux transmissions lointaines. Ici l'amortissement est diminué sans que la portée soit amoindrie; car l'énergie totale accumulée est plus grande à cause de la grande capacité des

bouteilles de Leyde. On peut calculer la provision d'énergie accumulée d'après cette capacité et la différence de potentiel mesurée par la longueur de l'étincelle; d'autre part la durée de la perturbation est, d'après l'expérience que je viens de citer, de dix oscillations ou de $\frac{1}{100000}$ de seconde; c'est pendant cette durée que cette provision doit être dépensée; on trouve ainsi que, pendant ce temps très court, la puissance moyenne sera d'une trentaine de chevaux-vapeur; on voit que l'ébranlement *maximum* peut rester considérable. De plus, si l'on obtenait réellement la résonance, cet ébranlement maximum se trouverait multiplié *pour les récepteurs à l'unisson*, parce que les effets des vibrations successives seraient concordants et s'ajouteraient les uns aux autres. Comme résultat final la portée serait augmentée pour les récepteurs à l'unisson et diminuée pour les autres.

Dans le récepteur, comme dans le transmetteur, l'antenne est directement reliée au sol (*fig. 4*). L'ébranlement reçu par cette antenne est transmis par induction au circuit du cohéreur, par le moyen d'un transformateur particulier appelé *jigger*. Ce transformateur diffère beaucoup de celui du transmetteur; il ne s'agit plus en effet de faire passer l'énergie du primaire (qui est ici l'antenne) au secondaire (qui est ici le circuit du cohéreur), *peu à peu*, afin d'obtenir un faible amortissement, mais au contraire *très rapidement* pour que l'ébran-

Fig. 4.



Récepteur Marconi.

AJS, primaire.

A, antenne.

J, enroulement primaire du jigger.

S, sol.

CKDK'C', circuit où se produisent les oscillations secondaires.

CC', armatures du condensateur.

KK', bobines secondaires du jigger.

D, cohéreur.

PRB'C'K'DKCBP, circuit de la pile locale.

P, pile locale.

R, relais actionnant le Morse.

BB', bobines de self-induction.

Sur la figure, les deux circuits se croisent en α et en α' , mais les fils passent l'un au-dessus de l'autre sans être en connexion.

A. 33

ement maximum reçu par le cohéreur soit aussi grand que possible.

Le secondaire du jigger se compose de deux bobines distinctes qui sont reliées : 1° aux deux armatures d'un condensateur; 2° aux deux électrodes du cohéreur; 3° aux deux pôles d'une pile locale par des fils traversant des bobines de self-induction. Le circuit parcouru par les courants oscillants comprend le condensateur, les bobines du jigger et le cohéreur; cet ensemble est donc analogue à un excitateur presque fermé. Le circuit parcouru par le courant de la pile locale comprend la pile, les bobines de self-induction, les bobines du jigger et le cohéreur. Le courant continu de la pile ne peut emprunter le premier circuit puisqu'il ne peut passer à travers le condensateur; il ne passera donc que quand le cohéreur sera rendu conducteur par les oscillations hertziennes.

D'un autre côté les bobines de self-induction opposent, comme on sait ⁽¹⁾, aucune résistance aux courants continus, tandis qu'elles arrêtent les courants alternatifs rapides; elles ne gêneront donc pas le courant de la pile, tandis qu'elles arrêteront les oscillations hertziennes et les empêcheront d'aller se perdre dans le circuit de la pile locale.

Il paraît qu'avec ces dispositifs on peut, par

(¹) Voir ci-après la Notice de M. Cornu, p. B. 29, *Bobines de réaction*.

un réglage convenable, obtenir une sorte de résonance. Est-ce parce que l'amortissement est plus faible ? C'est possible, mais nous n'en savons pas assez pour que nous puissions l'affirmer.

Mais il ne faut pas se faire d'illusions sur la perfection de cette résonance. Un même récepteur sera indifféremment impressionné par des ondes de longueur assez différente; telle une oreille qui distinguerait l'octave, mais ne pourrait discerner les intervalles plus petits.

Le secret des correspondances n'est donc pas assuré; supposons que la transmission doive se faire à 50^{km} , les récepteurs placés à cette distance ne fonctionneront que s'ils sont *à peu près* à l'unisson du transmetteur; mais dans un rayon de 5^{km} , par exemple, tous les cohérents, accordés ou non, seront également impressionnés. Et même à grande distance, ne faudra pas de longs tâtonnements pour obtenir un unisson suffisant.

En revanche les nouveaux procédés suffiront peut-être pour éviter la confusion des signaux émanés d'un certain nombre d'antennes voisines.