

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur(s)	Drumaux, Paul (1883-1954)
Titre	La téléphonie à grande distance et la téléphonie sans fil
Adresse	Bruxelles : Ramlot frères & soeur ; Paris : H. Dunod & E. Pinat, 1913
Collation	1 vol. (II-64 p.) : ill. ; 24 cm
Nombre de vues	74
Cote	CNAM-BIB 8 Ca 448
Sujet(s)	Téléphone Téléphonie sans fil
Thématique(s)	Technologies de l'information et de la communication
Typologie	Ouvrage
Note	Extrait de la : "Revue universelle des Mines et de la Métallurgie".
Langue	Français
Date de mise en ligne	21/01/2021
Date de génération du PDF	06/01/2025
Notice complète	https://www.sudoc.fr/124550096
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8CA448

LA
TÉLÉPHONIE A GRANDE DISTANCE
ET LA
TÉLÉPHONIE SANS FIL

LA

8° Ca 448

TÉLÉPHONIE A GRANDE DISTANCE

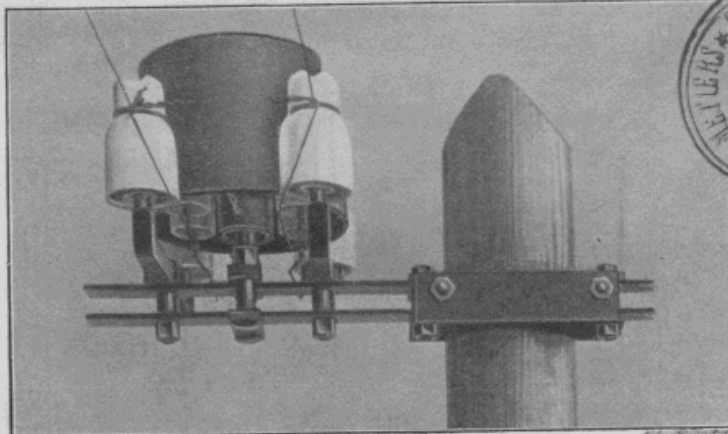
ET LA

TÉLÉPHONIE SANS FIL

PAR

PAUL DRUMAUX

Ingénieur civil des Mines et électricien,
Ingénieur des Télégraphes.



(Extrait de la *Revue Universelle des Mines et de la Métallurgie*)

Avec 6 Figures dans le Texte

RAMLOT FRÈRES & SŒUR
25, Rue Grétry, 25
BRUXELLES

H. DUNOD & E. PINAT
47 et 49, Quai des Grands-Augustins
PARIS

1913

BIBLIOTHEQUE
DU CONSERVATOIRE NATIONAL
des ARTS & METIERS
No du Catalogue 8° Ca 448
Prix ou Estimation 2 frs 40
Entrée, le 30 décembre 1914

AVANT-PROPOS

Nous avons été engagé à mettre cet aperçu en librairie, non seulement en raison de l'importance que la pupinisation ou le système Krarup présentent au point de vue particulier de la téléphonie, mais aussi parce que ces procédés réalisent un mode de transport de l'énergie qui intéresse tous les électriciens.

L'étude de la transmission ou de la propagation des courants téléphoniques le long des lignes aériennes ou sous-câble constitue, en effet, un problème d'un ordre général et primordial qui trouve ses applications dans l'électrotechnique, soit pour l'établissement de transports de force à longue distance, soit pour l'étude des phénomènes de résonance ou de surtension, soit pour la protection des lignes contre les décharges atmosphériques.

Le technicien du courant « fort » aura donc intérêt à prendre connaissance des progrès réalisés dans la technique des lignes téléphoniques où les phénomènes oscillatoires ou ondulatoires sont essentiels, alors qu'ils n'ont, du moins en général, qu'un caractère accidentel ou anormal pour les lignes électriques industrielles.

Comme les conférences que nous avons faites sur ce sujet s'adressaient à un auditoire d'ingénieurs dont la plupart exercent leur activité dans d'autres domaines que celui de la téléphonie, nous avons fait précéder l'examen mathématique de la question d'un exposé préalable qui, tout en ayant un caractère intuitif, soit néanmoins suffisamment précis et rigoureux pour éclaircir les données et les difficultés du problème, tout en facilitant son étude.

Le caractère de cet exposé et le fond même du sujet, qui envisage surtout la transmission ondulatoire de l'énergie, nous a en outre conduit à comprendre la téléphonie sans fil dans le cadre de cette étude, que nous prions le lecteur de considérer, non comme une analyse détaillée, mais bien comme un simple aperçu.

P. D.

DU MÊME AUTEUR :

La Théorie Corpusculaire de l'électricité. — Les Electrons et les ions. — Préface d'ERIC GÉRARD, Directeur de l'Institut électrotechnique Montefiore.

Ouvrage couronné au Concours international de la Fondation George Montefiore.

In-8° (25-16) de 168 pages avec 5 figures. — Gauthier-Villars,
Paris 1911 fr. 3,75

LA
TÉLÉPHONIE A GRANDE DISTANCE
ET
LA TÉLÉPHONIE SANS FIL

PAR
Paul DRUMAUX,
Ingénieur A. I. Lg.



Si l'on demandait à un technicien du « courant fort » de réaliser un transport d'énergie électrique à une distance de 1000 kilomètres et au delà, sous une tension ne dépassant pas quelques volts, il croirait certainement à une plaisanterie. Tel est pourtant le problème que les techniciens du « courant faible » rencontrent dans la téléphonie interurbaine. Et non seulement ils ont à surmonter cette invraisemblable difficulté, de manière à obtenir un rendement convenable en énergie au point de vue quantité, mais il leur faut en outre, comme nous allons le voir, réaliser ce tour de force en assurant un bon rendement au point de vue de la qualité de l'énergie transmise.

Montrons par une comparaison familière les conséquences immédiates des conditions difficiles dans lesquelles le problème se pose. Si l'on devait réaliser

une transmission de force par voie hydrodynamique, par exemple, par l'eau sous pression; si pareille transmission devait se faire à grande distance et, en outre, en comprimant l'eau non pas à des centaines d'atmosphères, mais au contraire à basse pression, il est évident que l'on serait amené à devoir utiliser des conduites de diamètre énorme. De même, une transmission d'énergie électrique à basse tension et à grande distance entraîne l'adoption de conducteurs de cuivre de très gros calibre. Or, tel est le cas dans la téléphonie à grande distance où le diamètre donné aux conducteurs de la ligne est véritablement monstrueux. C'est ainsi que pour les conducteurs de grandes lignes téléphoniques qui ne transportent qu'un courant susceptible de faire vibrer la membrane d'un cornet téléphonique, on adopte des sections comparables à celles d'un fil de trolley qui, lui, doit véhiculer un courant capable de remorquer tout un tramway.

Vous voyez, dès lors, à quelle folle dépense de cuivre la téléphonie à grande distance s'est heurtée. Et non seulement elle a rencontré cet obstacle, mais elle s'est en outre butée à une autre difficulté encore plus grande et dont nous parlerons tantôt, celle-ci d'ordre physique, principalement pour la téléphonie par câble sous-marin ou souterrain.

Le mal étant grand, il a aussi fallu un grand remède, et on a trouvé celui-ci en adoptant un nouveau mode de transmission de l'énergie : la ligne téléphonique, au lieu de servir à transporter la force, a été utilisée à transporter l'énergie elle-même. Cette distinction peut paraître, à première vue, une question de mots, attendu que dans le langage courant, on parle indifféremment de transport de force ou de transport d'énergie, quand on envisage les lignes électriques industrielles d'éclairage ou de force motrice. Cependant, les deux choses sont, comme nous le verrons tantôt, complètement différentes.

Considérons, en effet, une transmission d'énergie hydrodynamique par un liquide sous pression et supposons que ce liquide soit théoriquement incompressible, que le tuyau constituant la conduite soit absolument indéformable et qu'enfin le liquide ait un poids spécifique, c'est-à-dire une densité tellement faible que les effets d'inertie de ce liquide puissent être considérés comme nuls. Imaginons que pareille conduite relie un générateur hydraulique à un récepteur hydraulique, le générateur étant une pompe engendrant la pression utilisée par le récepteur, les deux machines génératrice et réceptrice étant, par exemple, supposées des machines à piston.

Dans ces conditions, la conduite et le liquide qu'elle contient ne serviront que de liaison cinématique entre le moteur et le récepteur, le liquide se comportant comme une véritable bielle d'accouplement.

La conduite hydrodynamique sert uniquement, dans ce cas, à transmettre les efforts du piston moteur au piston récepteur, et elle n'est le siège d'aucune accumulation d'énergie, soit élastique, soit cinétique. Elle constitue, à proprement parler, un transport de force et non un transport d'énergie. On objectera que l'énergie passe néanmoins de l'appareil générateur à l'appareil récepteur, grâce à la conduite hydraulique. Il en est effectivement ainsi, mais le liquide étant supposé dépourvu d'élasticité et d'inertie et la conduite indéformable, tout effort exercé sur le piston moteur est transmis instantanément au piston récepteur et l'énergie dépensée sur le premier piston est instantanément recueillie sur le second, exception faite des pertes par frottement qui ne nous intéressent pas pour le moment. L'énergie passe donc bien du générateur au récepteur sans avoir à aucun instant son siège dans la conduite. Il est donc logique de dire que dans une transmission idéale de ce genre la conduite transporte plutôt la force qu'elle ne véhicule l'énergie.

Cette comparaison, que nous préciserons d'ailleurs tantôt, peut être considérée comme l'image du mécanisme d'une ligne électrique industrielle de transport de force et aussi des lignes télégraphiques et téléphoniques ordinaires. Les électriciens estimeront peut-être que nous forçons un peu cette comparaison, mais nous allons dans quelques instants mettre les choses au point. Ce que nous voulons pour le moment mettre, dès le début, en lumière c'est que dans les lignes téléphoniques du nouveau système le mode de transmission de l'énergie électrique est complètement différent de celui que nous venons d'envisager. Là, comme nous allons le voir, l'énergie est injectée au départ dans la ligne et voyage le long de celle-ci jusqu'à l'arrivée avec une certaine vitesse finie, et pendant le voyage, l'énergie a bien son siège et est bien accumulée dans la ligne, ou plus exactement le long de celle-ci. C'est ce mécanisme nouveau de la transmission de l'énergie, dont le principe est d'un tout autre ordre que celui des transmissions électriques ordinaires qui a permis de réduire notablement la dépense en cuivre des conducteurs des lignes téléphoniques et qui a permis d'accroître considérablement la portée des communications téléphoniques par câble sous-marin ou souterrain.

*
*
*

En télégraphie, la transmission à longue distance ne présente pas de difficultés spéciales à cause de la possibilité d'établir en cours de route des appareils dénommés « relais » qui renforcent le courant circulant dans la ligne. En téléphonie il n'en est plus de même. En effet, tandis qu'en télégraphie, les signaux se composent uniquement d'émissions de courant, longues ou brèves, ou bien d'émissions d'égale durée, mais séparées par des intervalles de temps variables, en téléphonie, au contraire, les courants ont une forme très complexe reproduisant toutes les

modulations sonores de la voix. Alors que le relais télégraphique se réalise en principe par un électro-aimant, dont la bobine est reliée à la première section de la ligne et dont l'armature vient fermer le circuit d'une pile sur la seconde section de la ligne, le relais téléphonique se présente différemment. Le dispositif qui vient le premier à l'idée est d'accoupler un récepteur téléphonique avec un microphone, la plaque vibrante du récepteur ou la pièce en tenant lieu, jouant le rôle de l'armature ci-dessus et transmettant directement ses vibrations aux granules de charbon du microphone. De nombreux systèmes de ce genre ont été brevetés, mais n'ont, pour la plupart, rien donné, parce que l'inertie mécanique des organes à faire entrer en vibration ne leur permet pas de suivre et surtout de reporter dans le microphone toutes les gammes des oscillations de haute fréquence des courants téléphoniques à renforcer, ce qui entraîne une déformation prononcée de la voix. En ces derniers temps, on est toutefois parvenu à des résultats très intéressants, tant au point de vue du renforcement que de la netteté de transmission. Dans certains relais, on a écarté la difficulté provenant de l'inertie en basant le fonctionnement sur une action électrique exercée sur un effluve. Nous avons nous-même obtenu, il y a quelque temps déjà, des résultats assez curieux en agissant sur un arc. Malgré qu'en cette matière, on ait déjà fait de nombreuses recherches, on en est encore dans la phase du début, et les applications sont encore très rares.

En outre des relais, on dispose en télégraphie d'un autre moyen pour franchir les grandes distances : c'est l'accroissement de l'énergie de la source du courant. Mais en téléphonie, on est malheureusement très limité sous ce rapport. On ne peut renforcer l'énergie du microphone sans provoquer un échauffement des granules de charbon et compromettre le fonctionnement. Des appareils téléphoniques spéciaux, de forte puissance, où l'échauffement du

microphone a été combattu par une circulation d'eau ou d'huile ont cependant été établis récemment, mais, comme pour les relais, leur emploi n'est pas encore entré dans la pratique courante de la téléphonie à longue portée.

La seule ressource qui soit donc restée pour atteindre les grandes distances a résidé dans l'amélioration de la ligne, et c'est aussi dans cette direction que les plus beaux résultats ont été obtenus. Il est assez curieux que ce soit la ligne qui ait donné matière aux progrès les plus marquants : c'est un peu comme si dans la traction des chemins de fer on n'avait pu parvenir aux grandes vitesses qu'en améliorant les voies.

C'est cette amélioration de la ligne, ou plus exactement le nouveau mode d'utilisation de celle-ci, le rôle nouveau auquel on l'emploie actuellement dans la transmission de la parole que nous allons étudier ensemble. Nous nous proposons de faire cette étude de manière à nous rendre compte des phénomènes directement sous leur aspect physique par une vue intuitive de leur mécanisme et sans être obligé de nous contenter de les considérer à travers les symboles et les formules du langage mathématique. Les mathématiciens penseront que c'est là compliquer les choses et que pour exprimer en langage ordinaire tout ce qui est contenu dans une équation, on est obligé de tomber dans la prolixité, surtout pour une question aussi complexe que celle que nous abordons.

Il est de fait que le problème de la propagation des courants téléphoniques le long d'une ligne est un des plus difficiles de l'électrotechnique. Il a fallu de longues années pour le résoudre et ce qu'il y a de plus remarquable, c'est que les méthodes mathématiques ont finalement revêtu un caractère d'extraordinaire simplicité, malgré la complexité du sujet. Il a suffi pour cela d'adopter un langage ou un vocabulaire mathématique convenable, d'utiliser une écriture, ou plutôt une notation mathématique adéquate aux données du problème pour que

bientôt la complication apparente se dissipe. Le mathématicien ressemble souvent au chimiste opérant en vase clos les mélanges et les réactions, les éliminations et les précipitations pour aboutir au produit final. Cela n'est vrai que tant que les méthodes de calcul ne sont pas à la hauteur du problème à résoudre. Mais lorsque dans l'immense arsenal des sciences mathématiques, l'outil approprié a été trouvé ou au besoin fabriqué, le mathématicien ou l'électrotechnicien voit son travail considérablement facilité et simplifié, il opère en quelque sorte à découvert et en pleine lumière.

Nous faisons allusion ici à la méthode de calcul de Steinmetz des courants alternatifs par les imaginaires. Cette méthode appliquée au problème d'apparence si complexe que nous allons étudier, le résout d'une façon remarquable. Les données du problème sont à peine posées que déjà les grandes inconnues de la question jaillissent d'elles-mêmes hors des équations, qu'elles se déterminent immédiatement au point que ce n'est plus en quelque sorte du calcul, c'est de la vision directe des phénomènes.

Nous ne nous engagerons néanmoins pas dans le domaine du calcul pour le moment, nous réservant d'envisager la question, à ce point de vue, à la fin de cette causerie. Il nous paraît préférable d'exposer d'abord le problème, non d'une manière abstraite, mais en l'envisageant exclusivement sous son aspect physique.

* * *

Reprenons, à cette fin, la comparaison hydrodynamique à laquelle nous avons eu recours tout à l'heure. Les analogies hydrodynamiques de l'électricité ont souvent été mises à profit dans les traités élémentaires d'électricité, mais elles sont, en général, mal comprises par les auteurs. En voulant vulgariser la science, ils l'amoin-

drissent, et cela a contribué à discréditer l'assimilation d'un courant électrique à un courant hydraulique. Or, pareille comparaison, si elle est convenablement conçue, loin de rétrécir nos idées, va au contraire les élargir. Nous allons voir ainsi que la mécanique du fluide matériel n'est, en somme, qu'un cas particulier de la mécanique du fluide électrique, et que cette dernière a un caractère beaucoup plus général et aussi plus simple. C'est ainsi que nous rencontrerons incidemment les raisons premières pour lesquelles l'électricité est si féconde dans ses applications. Nous verrons qu'au lieu d'étudier d'abord la mécanique ordinaire et puis l'électricité, il serait plus logique d'étudier d'abord les lois de l'électricité pour revenir ensuite aux phénomènes mécaniques et que la barrière qui semble les séparer réside plutôt dans le langage et dans les notations qui, comme en mathématiques, ont souvent une importance énorme.

Notre ligne téléphonique à étudier n'est qu'un cas spécial d'un circuit électrique comportant un fil d'aller et un fil de retour. Comparons ce circuit à une transmission hydraulique comportant une conduite d'aller et une conduite de retour. On aura, dans ce cas, à considérer les grandeurs suivantes : le débit dans la conduite, la différence de pression entre deux points de la conduite et particulièrement cette différence entre la conduite d'aller et celle de retour à un même endroit, les frottements du liquide, sa masse et son élasticité combinée avec celle des tuyaux. Nous allons voir que dans le circuit électrique, on a affaire aux mêmes grandeurs, mais dans le langage électrique on les dénomme respectivement l'intensité du courant I , la différence de potentiel E , la résistance R , la self induction L , et la capacité C .

Dans la causerie que nous avons eu l'honneur de faire devant vous l'an passé sur la théorie des électrons (1),

(1) *La théorie corpusculaire de l'électricité. Les Electrons et les Ions.* — Paris, Gauthier-Villars, 1911.

nous vous avons montré que l'électricité était un véritable fluide, possédant une existence propre et ayant une constitution atomique. Comme l'a fait remarquer J. J. Thomson, ce fluide nous est beaucoup mieux connu que les fluides matériels, étant mieux documentés à son sujet que sur les gaz et les liquides. Nous vous avons notamment montré que ce fluide se mouvait à travers les corps conducteurs à la manière dont un gaz parfait circulerait à travers un corps poreux. L'intensité I d'un courant électrique étant la quantité d'électricité passant par un conducteur en l'unité de temps, il est donc parfaitement légitime de l'assimiler au débit d'une conduite hydraulique. A ce propos, nous vous avons même montré que la vitesse du déplacement du fluide électrique à travers un fil métallique est extraordinairement petite, mais que la quantité de fluide contenue par unité de volume du conducteur est colossale, si bien que dans notre comparaison hydraulique, il faut supposer que la vitesse du liquide est toujours relativement faible, mais que le diamètre de la conduite est énorme. Les pertes de charge en électricité sont donc incomparablement plus petites qu'en hydraulique et nous touchons ici une des premières raisons fondamentales pour lesquelles l'électricité s'est admirablement prêtée au transport de la force à grande distance. Ceci montre également que dans une transmission d'énergie électrique, le facteur vitesse du fluide est très petit, tandis que le facteur force est très grand, et cela même pour une pression de grandeur normale, car dans notre image hydraulique, une pression par unité de surface relativement faible réalise, dans le cas d'une conduite de très grand diamètre, un effort total considérable, si l'on considère toute la section de la conduite. C'est ainsi que pour une ligne électrique industrielle, transmettant 100 kw, la force transmise est de plus de 1000 tonnes.

Mais ne nous attardons pas sur ce point, et passons à la notion de différence de potentiel E que nous assimilons à

une différence de pression dans un fluide matériel. Cette assimilation ne nécessite aucune justification tant elle est naturelle. Dans un gaz, la pression résulte de la vitesse d'agitation des molécules, dans un liquide de la répulsion des molécules, lorsqu'on tend à les rapprocher, tandis que pour le fluide électrique, la pression provient de ce qu'il est régi par la loi de Coulomb. D'une part, l'existence de cette loi, et d'autre part, la manière dont la théorie des électrons envisage la conductibilité électrique et calorifique des métaux entraînent bien certaines particularités remarquables, mais celles-ci ne nous intéressent pas pour le moment.

Tout comme la différence de potentiel, la notion de résistance électrique s'identifie directement avec les frottements du liquide dans notre conduite hydrodynamique.

Dans un conducteur métallique, la résistance R résulte du frottement des électrons contre les atomes du métal ou, plus exactement, de leurs collisions avec les atomes. De l'ensemble de ces chocs résulte une perte de charge, une différence de potentiel le long du conducteur rigoureusement proportionnelle au débit, c'est-à-dire à l'intensité du courant. Cette loi est ici beaucoup plus simple que pour les fluides matériels pour lesquelles intervient leur viscosité interne et, en outre, les frottements contre les parois de la conduite.

Parlons maintenant de la self-induction L , que nous comparons à la masse du liquide de notre conduite. La self-induction serait donc la masse ou l'inertie du fluide électrique. L'électricité possède, en effet, de la masse, tout comme un corps matériel et il viendra même peut-être un temps où l'on dira que c'est la matière qui possède de la self-induction. Mais cette masse de l'électricité a ceci de remarquable qu'au lieu d'être localisée dans le fluide, elle est répandue dans tout le milieu ambiant.

La notion de masse entraîne celle de force vive, et tandis que la force vive d'un corps est généralement considérée comme résidant en celui-ci, la force vive de l'électricité a son siège dans le milieu qui entoure le conducteur. Elle correspond à une énergie cinétique accumulée dans ce milieu à laquelle nous donnons le nom d'énergie magnétique ou, selon l'expression de Maxwell, d'énergie électro-cinétique.

La forme physique de cette énergie à laquelle certains attribuent une nature tourbillonnaire nous est inconnue. Mais si nous ignorons la nature de l'état d'aimantation d'un milieu, nous connaissons fort bien la loi de répartition de l'énergie magnétique dans l'espace environnant un conducteur. L'accumulation de cette énergie dépend d'abord de la nature du milieu et est notamment accrue des centaines de fois lorsque ce milieu est du fer.

D'autre part, la répartition de cette énergie dans le milieu dépend de la configuration du circuit électrique.

Si celui-ci comporte un fil d'aller et un fil de retour très voisins l'un de l'autre, comme c'est le cas pour un circuit téléphonique souterrain, les courants égaux et de sens opposé circulant dans ces fils tendent à aimanter le milieu en des sens inverses, de sorte que leurs actions s'annulent. Le milieu reste passif, et n'accumule pas de force vive. L'électricité perd son inertie, il n'y a plus de self-induction.

Si, au contraire, le circuit a une forme telle que ses diverses parties ont des actions concourantes au point de vue de l'accumulation de la force vive dans le milieu, l'inertie, c'est-à-dire la self-induction, devient maximum. Tel est le cas d'un circuit enroulé en hélice sous forme de bobine et l'effet d'inertie sera encore centuplé si la bobine est pourvue d'un noyau et d'une cuirasse en fer.

Si une telle bobine dite de « self » est insérée dans une ligne électrique elle correspondra dans notre comparaison hydrodynamique à un tronçon de la conduite où l'on

aurait remplacé l'eau par un liquide beaucoup plus lourd. De même, si un circuit téléphonique est établi à l'aide de fils de fer au lieu de fils de cuivre, ou bien, si le fil de cuivre utilisé est entouré d'une couche de fer obtenue, par exemple, en enroulant autour de lui un mince fil de fer en spires jointives, et cela sur toute la longueur, on obtiendra de cette manière, à cause de la faculté que le fer possède d'accumuler la force vive électrique, les mêmes effets que si la densité de l'eau de notre conduite hydrodynamique était uniformément sur toute la longueur de celle-ci accrue dans une certaine proportion.

On voit combien le fait que l'inertie de l'électricité réside dans le milieu ambiant est riche en conséquences ; puisqu'il nous permet de varier à notre gré une grandeur dont on est généralement esclave dans la mécanique des fluides matériels. Et nous rencontrons ici une autre raison première pour laquelle l'électricité a trouvé de si importantes applications. Pour ne pas abuser de votre attention, nous n'insisterons pas sur ce point. Mais vous devinez combien de dispositifs nouveaux on pourrait réaliser en mécanique, s'il était possible de supprimer l'inertie d'une pièce pour la reporter à l'extérieur de celle-ci. De cette extériorisation de l'inertie électrique résulte aussi que, si deux ou plusieurs circuits sont disposés convenablement à proximité l'un de l'autre, l'inertie et la force vive électrique de chacun d'eux est localisée dans la même portion du milieu ambiant, si bien que l'on réalise alors cette chose bizarre d'une inertie commune que nous appelons l'inertie mutuelle ou plutôt l'induction mutuelle. C'est le transformateur d'un emploi universel, notamment en téléphonie et aussi en télégraphie sans fil. Nous pourrions utiliser notre comparaison hydrodynamique à vous montrer une image fidèle de cet appareil, mais vous n'auriez aucune peine à le faire vous-mêmes, n'ayant que l'embarras du choix

des dispositifs. Tous les facteurs électriques d'un transformateur dont l'étude est assez complexe apparaissent alors naturellement : pertes dans le cuivre, pertes dans le fer, fuites magnétiques, décalages des tensions et des courants, etc. On peut même aller plus loin. Cette extériorisation de l'inertie électrique a, en effet, pour autre conséquence logique l'induction électrodynamique qui est à la base de toutes nos machines électriques.

Mais ne nous attardons pas dans ce domaine et passons à l'explication de ce que les électriciens appellent la capacité. Ici notre comparaison hydrodynamique va se compléter au point de révéler un caractère de profonde analogie.

Quand on comprime un gaz dans un récipient, l'énergie élastique ainsi accumulée a son siège dans le gaz même. Si l'on accumule du fluide électrique dans un conducteur, on développe de même de l'énergie élastique, toutefois, celle-ci ne s'emmagasine plus dans le conducteur, mais bien dans le milieu ambiant. C'est celui-ci qui se dilate ou se comprime, ou qui peut-être se tord, car nous ignorons la nature de sa déformation, et c'est lui qui est le réceptacle de l'énergie développée que nous appelons l'énergie électrostatique. Il se fait de plus, grâce à la forme de la loi de répulsion ou d'attraction mutuelle des particules du fluide électrique, que l'électricité que l'on accumule dans un conducteur se répand exclusivement sur sa surface extérieure. De l'ensemble de ces deux faits, il résulte que tout se passe comme si l'électricité était un fluide incompressible renfermé dans un récipient à parois élastiques, ou plus exactement comme si un corps conducteur était une cavité creusée dans un milieu indéfini déformable et rempli d'un liquide incompressible. Pour avoir l'analogie complète, il suffit de donner au milieu une élasticité telle que l'accroissement de volume de la cavité soit proportionnel à la pression du liquide.

Imaginons maintenant deux cavités voisines l'une de l'autre, de manière que la cloison élastique qui les sépare devienne relativement mince, donc très déformable, et supposons-les toutes deux à l'état normal remplies de liquide incompressible. A l'aide d'une pompe, retirons une certaine quantité de liquide de la première cavité, pour l'introduire dans l'autre. La cloison élastique va se déformer de manière à accroître le volume de la seconde cavité et à réduire celui de la première d'une quantité égale. Cela étant, on appelle « capacité » des deux cavités c'est-à-dire des deux conducteurs, la quantité de liquide que l'on peut faire passer de l'une dans l'autre pour une différence de pression égale à l'unité.

On voit que la capacité dépendra de l'élasticité du milieu, du rapprochement des deux cavités, c'est-à-dire de l'épaisseur de la cloison et de la forme des cavités. Si, par exemple, celles-ci s'étendent surtout en surface et que la cloison se réduise à une pellicule élastique, la capacité sera maximum : c'est le cas d'un condensateur.

Que devient maintenant notre transmission hydrodynamique ? Elle se transforme en deux galeries ou deux canaux creusés parallèlement dans un milieu élastique et remplis d'un liquide incompressible. Plus ces canaux seront voisins l'un de l'autre et plus les phénomènes d'élasticité du milieu, c'est-à-dire de capacité, seront accusés. C'est précisément le cas des circuits téléphoniques sous câble souterrain et sous-marin où le rapprochement des fils d'aller et de retour sont extrêmes, où donc la cloison élastique les séparant n'est plus qu'une mince pellicule. Pour les câbles sous-marins, l'effet s'accroît encore parce que le milieu, en l'espèce la gutta-percha, est doué d'une élasticité électrique notablement plus grande que l'air, qui constitue l'isolant dans les autres câbles et qui est, électriquement parlant, plus rigide.

Vous avez peut-être pensé, Messieurs, que ces préliminaires étaient un peu longs et s'écartaient sensiblement de notre sujet. Nous avons préféré remonter aux sources et non pas faire appel à une comparaison étroite et boiteuse, mais user d'une analogie établie sur des bases suffisamment larges et d'après les idées modernes, depuis celles de Maxwell, déjà anciennes, mais toujours neuves, jusqu'à celles plus récentes de la théorie des électrons. Nous allons d'ailleurs maintenant regagner largement le temps perdu.

Considérons notre ligne téléphonique à double fil et relierons un appareil téléphonique transmetteur au départ et un appareil téléphonique récepteur à l'arrivée. La combinaison du microphone et de la bobine d'induction de l'appareil transmetteur crée au départ, entre le fil d'aller et le fil de retour, une différence de potentiel alternative, qui présente des variations de même forme que celles des vibrations de la voix. Cette différence de potentiel engendre un courant alternatif dans la ligne et dans l'appareil récepteur où ce courant fait vibrer la plaque du cornet téléphonique de manière qu'elle reproduise la voix.

Dès lors, pour que la voix ne soit ni trop altérée dans son timbre, ni trop affaiblie dans son intensité, il importe que la ligne soit telle que les oscillations du courant à l'arrivée soient de même forme que celles de la différence de potentiel au départ et que les amplitudes de ces oscillations du courant d'arrivée ne soient pas trop affaiblies par rapport à celles du courant de départ. La ligne doit donc avoir ce que l'on appelle une faible « distorsion » et un faible « amortissement ».

Or, ce qui rend le problème difficile, c'est que la différence de potentiel au départ a une forme très complexe, correspondant à la complexité des sons de la voix humaine.

Ceux-ci ne sont pas constitués de vibrations simples, c'est-à-dire sinusoïdales, mais d'une superposition d'un grand nombre de vibrations sinusoïdales de fréquence croissante.

La voyelle qui constitue la partie sonore la plus importante et la plus régulière de la syllabe correspond à l'accord que l'on obtiendrait sur le clavier d'un instrument de musique, par exemple d'un orgue, en produisant simultanément une série de notes, toutes à l'octave l'une de l'autre et en donnant à chacune de ces notes une amplitude relative convenable.

La différence de potentiel agissant au départ est donc constituée d'une superposition de différences de potentiel de fréquences croissantes et il en est de même de la différence de potentiel et du courant le long de la ligne et à l'arrivée.

Cela étant, la ligne doit être telle qu'elle véhicule avec un affaiblissement minimum les courants de diverses fréquences et, qu'en outre, l'affaiblissement de chacun d'eux soit sensiblement égal. Nous allons voir que le grand obstacle à la réalisation de cette double condition, c'est la capacité.

Pour cela reprenons notre comparaison hydrodynamique. Telle que nous l'avons établie, elle pourrait servir à nous faire voir directement les phénomènes présentés par les courants continus et les courants alternatifs. Mais pour ne pas nous écarter de notre sujet, nous nous bornerons à l'appliquer au problème qui nous occupe et qui est un des plus complexes de l'électrotechnique.

Pour fixer les idées, imaginons que la différence de pression au départ entre la conduite d'aller et celle de retour soit réalisée, par exemple, par un piston se déplaçant dans un cylindre, la conduite d'aller et celle de retour débouchant chacune dans un des fonds du cylindre. La différence de potentiel devient donc la force alternative

appliquée au piston et qui tend à lui donner un mouvement de va-et-vient dans le cylindre, ou plus exactement un mouvement vibratoire complexe, résultat de la superposition de vibrations à des fréquences différentes.

Si la ligne téléphonique ne présentait que de la résistance, sans self-induction ni capacité, nous serions dans le cas où le liquide incompressible de notre conduite n'aurait pas de masse et où les parois auraient une rigidité absolue, les frottements étant seuls en jeu. En ce cas, le liquide aurait, à chaque instant, au bout de la conduite, la même vitesse qu'au commencement de celle-ci et ses vibrations seraient exactement de même forme que celles de la force appliquée au piston moteur. Une telle ligne téléphonique serait sans distorsion.

Mais attribuons à la ligne, en outre de la résistance, une certaine self-induction, ce qui revient à supposer que le liquide de notre conduite n'est plus dépourvu d'inertie. En ce cas, le courant à l'arrivée sera encore à chaque instant le même qu'au départ, mais la forme des vibrations du courant ne sera plus la même que celle de la différence de potentiel, car parmi les vibrations de la force appliquée au piston, celles à haute fréquence causeront des oscillations du liquide moindres que celles à basse fréquence à cause de l'inertie. Une telle ligne amortira donc la partie à haute fréquence de la différence de potentiel, c'est-à-dire qu'elle assourdira la voix.

Considérons de même le cas où la ligne aurait de la résistance et de la capacité, à l'exclusion de la self-induction. C'est supposer que les parois de notre conduite hydrodynamique sont élastiques, le liquide étant sans inertie. Dans ce cas-ci, les amplitudes des oscillations du liquide ne seront plus les mêmes à l'arrivée qu'au départ, car l'effort alternatif appliqué au piston va avoir pour effet de dilater une des conduites en contractant l'autre et cela d'une manière alternative.

Les oscillations de liquide au départ correspondront en partie aux variations de volume des canaux d'aller et de retour, c'est-à-dire aux charges et décharges correspondant à ces variations de volume et le mouvement de va-et-vient du liquide pourra être beaucoup plus faible dans l'appareil récepteur placé au bout de la conduite que dans le cylindre moteur au départ. Nous sommes ici dans le cas des circuits téléphoniques souterrains ou sous-marins où la self-induction est faible et la capacité grande. La cloison élastique séparant les deux canaux et dont nous avons parlé plus haut est très mince. C'est ainsi que pour le câble téléphonique anglo-belge non « pupinisé », le courant à l'arrivée n'est que le dixième du courant au départ.

Mais en outre de l'affaiblissement de courant, il y a également distorsion, parce que l'effet de remplissage et de vidange, c'est-à-dire de charge et de décharge des conduites, est d'autant plus prononcé que les pulsations sont plus rapides. Les vibrations à haute fréquence de courant sont donc plus amorties que les vibrations lentes et il en résulte que la voix est déformée et assourdie.

Mais, si nous considérons les deux derniers cas que nous venons d'envisager, nous remarquerons que dans chacun d'eux, la pression du liquide et son mouvement se transmettent instantanément d'un bout à l'autre de la conduite, parce que dans le premier cas, il n'y a pas d'élasticité, et que dans le second, il n'y a pas d'inertie.

Les choses vont se passer d'une manière toute différente, si nous considérons maintenant une ligne téléphonique présentant à la fois de la résistance, de la capacité et de la self-induction. Notre conduite est donc supposée à parois élastiques et le liquide a une certaine masse ou densité. Appliquons un effort au piston moteur. La pression en résultant ne va plus se transmettre instantanément tout le long de la conduite, mais se propager avec

une certaine vitesse à cause de la coexistence de l'inertie du liquide et de l'élasticité des parois.

Le fait est assez difficile à expliquer méthodiquement d'une manière intuitive, parce que le secours du calcul différentiel est ici nécessaire, attendu qu'on a affaire à un phénomène de continuité où la considération des infiniments petits est inévitable.

Le cas de la transmission du son dans l'air et, en général, de la propagation d'une perturbation dans un milieu quelconque présentant à la fois de l'inertie et de l'élasticité, est le même que celui qui nous occupe. Un diapason vibrant dans l'air engendre dans son voisinage immédiat des compressions et des dilatations, avec oscillations de la masse gazeuse, qui se propagent de proche en proche avec une vitesse déterminée, cette propagation se faisant sous forme d'ondes. On dit que les ondes voyagent dans l'air voulant exprimer par là que l'état de pression et l'état de mouvement se déplacent. Mais avec eux se déplacent aussi l'énergie élastique et cinétique correspondant respectivement à l'état de pression et à l'état de mouvement, le diapason faisant office de radiateur d'énergie et l'air étant traversé par un flux d'énergie émanant du diapason qui en est la source.

Dans notre analogie hydrodynamique, un effort alternatif appliqué au piston va également dilater et contracter de proche en proche les parois de la conduite et faire osciller le liquide contenu dans celle-ci. On pourrait ainsi voir les ondes sous forme de renflements séparés par des étranglements, voyager le long de la conduite, la longueur d'onde étant la distance séparant deux renflements ou deux étranglements consécutifs. Une onde qui se compose d'un renflement et d'un étranglement consécutifs est pour ainsi dire sortie du cylindre moteur pendant une oscillation complète du piston et renferme l'énergie dépensée par celui-ci pendant cet intervalle de temps. Cette énergie

voyage avec l'onde le long de la conduite jusqu'à ce qu'elle soit reçue à l'arrivée par l'appareil récepteur.

Le mode de transmission réalisé par notre ligne téléphonique devient donc ici tout autre que dans les cas envisagés plus haut. Dans les deux cas précédents, la ligne ne constituait qu'une liaison cinématique entre les appareils transmetteur et récepteur, une espèce de bielle fluide, ou bien rigide mais lourde, ou bien élastique mais sans poids. Elle ne jouait que le rôle de transmission de force. Maintenant, au contraire, elle reçoit l'énergie, l'accumule et la véhicule, et cela précisément en mettant à profit l'effet précédemment si néfaste de l'élasticité, pour renvoyer l'énergie tantôt sous forme cinétique, tantôt sous forme élastique jusqu'à destination.

A première vue, ceci semble vrai pour une ligne téléphonique quelconque, car l'on se trouve toujours en présence d'une certaine self et d'une certaine capacité. Mais la self-induction des lignes téléphoniques est généralement faible vis-à-vis de la capacité, surtout pour les lignes sous câble. Or, il importe, pour que le phénomène de transport de l'énergie par réaction réciproque et mutuelle de l'élasticité sur l'inertie ait tout son épanouissement, que ces deux grandeurs soient convenablement ajustées l'une à l'autre. La chose est facile à comprendre. Considérons une onde engendrée au départ de notre conduite hydrodynamique à sa sortie du cylindre moteur. La longueur de cette onde est évidemment égale à sa vitesse de cheminement, multipliée par la durée d'une oscillation complète de l'effort appliqué au piston. Pour une valeur donnée de cette durée, c'est-à-dire pour une fréquence ou une périodicité déterminée de la force agissante, cette longueur sera donc proportionnelle à la vitesse de propagation. Or, celle-ci dépend de l'élasticité de la conduite et de la densité du liquide, tout comme la vitesse du son dans un gaz dépend de son

élasticité et de sa densité. Pour une fréquence donnée, l'onde sera d'autant plus longue que le liquide est moins dense. Si alors nous considérons, par exemple, le cas extrême d'un liquide très léger, de manière que la vitesse de propagation des ondes et donc leur longueur dépasse notablement la longueur de la conduite, le caractère ondulatoire de la transmission devient d'ordre secondaire, l'inertie ne réagit plus que partiellement sur l'élasticité, l'onde ne peut plus recevoir son développement et l'on rentre plus ou moins complètement dans le cas de la transmission quasi-directe des efforts, sans que la conduite ne véhicule complètement de l'énergie. Tel est aussi généralement le cas des lignes électriques à courant fort, où la fréquence utilisée est, en outre, beaucoup plus basse qu'en téléphonie, ce qui accroît la longueur d'onde. Toutefois, dans de nombreuses circonstances, il arrive que la propagation ondulatoire se manifeste pleinement pour celle-ci, non seulement dans l'état de régime permanent, mais aussi dans les périodes transitoires de passage d'un régime à un autre ou dans les cas accidentels de décharges atmosphériques, les phénomènes ondulatoires pouvant en outre se produire à l'intervention des générateurs et des récepteurs. C'est ainsi que les résonances et les surtensions dans les réseaux ne sont souvent que des coups de béliers d'un caractère oscillatoire.

La self-induction naturelle des lignes téléphoniques étant insuffisante pour réaliser le mode de transmission de l'énergie que nous envisageons, on a été amené à l'accroître artificiellement. On a ainsi été conduit à environ la décupler pour les lignes aériennes et à plusieurs fois la centupler pour les lignes sous câble.

Dans ses célèbres conférences faites à l'Institut américain des Ingénieurs électriciens, en 1899 et 1900, le Professeur Pupin avait donné aux lignes, dont la self-induction a été ainsi fortement accrue, la dénomination

de « conducteurs d'ondes ». Les explications, auxquelles nous nous sommes un peu attardés, nous permettent maintenant de bien comprendre cette appellation. On pourrait même dire qu'une ligne « pupinisée » transmet l'énergie par le même procédé que celui utilisé en téléphonie sans fil, avec cette particularité que les ondes sont, dans ce cas, dirigées par le fil conducteur.

Et maintenant, où est l'avantage de ces lignes à forte self-induction ou à vitesse de propagation lente, ou, si l'on veut, à emmagasinement et transport réel de l'énergie ?

D'abord, pour les lignes sous câble, l'avantage est manifeste, puisque pour celles-ci la forte capacité, en l'absence de self-induction, entraînait une forte réduction du courant tout le long de la ligne, en constituant une espèce de dérivation, de by-pass ou de shunt, entre le fil d'aller et celui de retour. Il ne pouvait primitivement être pallié, d'ailleurs que partiellement, à ce défaut, qu'en réduisant les frottements, c'est-à-dire en augmentant le diamètre des conducteurs, de manière à obtenir quand même un courant suffisant à l'arrivée. L'accroissement de la self-induction, en mettant à profit la capacité pour l'utiliser à la propagation de l'énergie et du courant, a donc renversé le rôle de la capacité et supprimé, par conséquent, la nécessité de réduire les frottements, c'est-à-dire d'accroître le poids de cuivre des conducteurs.

Mais, d'une manière générale, l'avantage des lignes à forte self-induction peut être mis en évidence comme suit, en nous reportant à notre illustration hydrodynamique. Si l'on considère la transmission de l'énergie dans celle-ci, par suite du jeu de l'énergie élastique et de la force vive, un accroissement de la masse, c'est-à-dire de la self, entraînera, à égalité de force vive, une réduction dans la vitesse du liquide et, par suite, une diminution des frottements, c'est-à-dire, une possibilité de réduction

du diamètre des conduites se chiffrant par une notable économie de cuivre. Or, comme nous l'avons dit au début, les lignes téléphoniques comparées aux lignes électriques industrielles nécessitent des dépenses de cuivre extraordinaires. On comprend, dès lors, l'importance d'un progrès permettant une réduction de celles-ci.

Avant d'étudier de plus près la détermination de l'accroissement à donner à la self-induction, voyons sous quelles formes cet accroissement a été réalisé dans la pratique. On a, comme toujours en pareil cas, rencontré de grandes difficultés pour passer de l'idée première théorique à l'exécution industrielle. Il y a, en effet, déjà vingt ans que l'attention des ingénieurs avait été vivement attirée en Amérique sur le rôle que la self-induction était capable de jouer à l'égard de la capacité et les promoteurs de cette idée annonçaient la possibilité de réaliser ainsi la téléphonie transatlantique. Les idées incomplètes et imprécises que l'on avait alors sur la question ne permettaient pas de prévoir les conditions particulières auxquelles l'effet utile de la self-induction était subordonné. Ce fut le Professeur Pupin qui, par une étude mathématique approfondie du problème, mit les choses au point.

Si nous nous reportons à notre illustration mécanique, deux procédés d'augmentation de la masse du liquide se présentent à l'idée : ou bien l'accroissement uniforme tout le long de la conduite, ou bien l'alourdissement de distance en distance sur des tronçons de la conduite. Le premier moyen correspond au système Krarup, réalisé en entourant le fil de cuivre d'une gaine de fer doux, obtenue en enroulant un ou plusieurs fils minces de fer doux en spires jointives autour du conducteur de cuivre. Mais ce procédé qui n'est applicable qu'aux lignes sous câbles ne permet pas dans la plupart des cas d'augmenter suffisamment la self-induction, ainsi que nous allons le voir.

Le second moyen correspond au système Pupin, réalisé en intercalant de distance en distance, dans chacun des deux fils de ligne, une bobine de self.

Les essais d'insertion de bobines de self en série avec les conducteurs, qui furent fait avant Pupin, donnèrent des résultats infructueux, parce que la distance à observer dans l'écartement des bobines a une importance primordiale. Dans notre exemple, une bobine de self correspond, en effet, à un tronçon de la conduite dont le liquide a été fortement alourdi. Considérons le cas extrême où l'on concentrerait toute la self additionnelle dans une seule bobine insérée en un certain endroit de la ligne, c'est-à-dire qu'en un point de la conduite, le liquide serait sur un certain tronçon fortement alourdi. Il est clair que les ondes arrivant en cet endroit vont se heurter contre une masse considérable concentrée sur une faible longueur, de manière à faire bloc et à constituer une barrière ou plutôt un miroir pour celles-ci, qui subiront de ce chef une réflexion tout comme le son se réfléchit à la surface de l'eau. On prévoit donc qu'il est nécessaire de répartir la self additionnelle tout le long de la ligne en échelonnant les bobines à des distances suffisamment courtes et l'on devine que c'est de la longueur d'onde que dépendra l'écartement minimum à admettre pour que la ligne « pupinisée » se comporte comme une ligne dont la self serait uniformément répartie. En exposant sa théorie, Pupin avait illustré ce fait d'un exemple très simple. Si l'on considère une corde flexible en vibration et si on l'alourdit en y attachant un poids unique en un point donné, les ondulations de la corde ne se propageront que dans une très faible mesure au delà de ce point, les vibrations venant se réfléchir contre la masse additionnelle. Mais si l'on subdivise la surcharge en un nombre suffisant de petits poids égaux échelonnés le long du fil flexible, ceux-ci ne s'opposeront plus à la propagation des ondes.

Cela étant, la règle fondamentale que Pupin a établie et qui a permis de réaliser des lignes téléphoniques à forte self-induction, est la suivante :

Imaginons une circonférence dont la longueur soit égale à la longueur d'onde et considérons un arc d'une longueur égale à la demi-distance de deux bobines consécutives. Il faut que cet arc soit assez petit pour que son

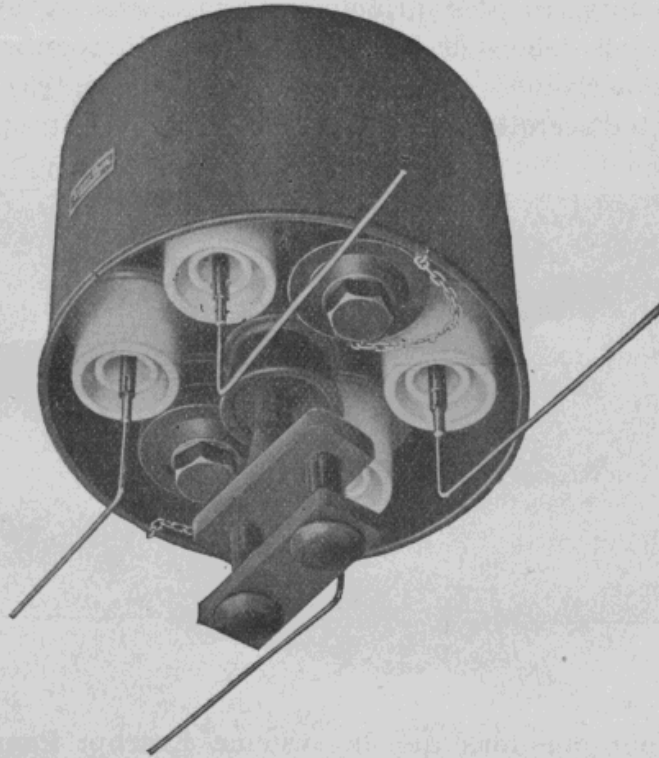


Fig. 1. — Appareil Pupin pour lignes aériennes (vue de dessous).

sinus se confonde sensiblement avec lui, le degré d'équivalence entre la ligne à self échelonnée et une ligne à self uniformément répartie étant le même qu'entre le sinus défini ci-dessus et son arc.

Ainsi pour 9 bobines par longueur d'onde, l'équivalence est déjà de 98 % et pour 14 bobines elle devient supérieure à 99 %.

Dans le cas des lignes aériennes où la longueur d'onde,

pour la fréquence moyenne 800 des courants téléphoniques, atteint 120 à 140 kilomètres, la distance entre les bobines sera de 10 kilomètres. Pour les lignes sous câble, la longueur d'onde et la distance entre les bobines sont notablement plus petites, par exemple cinq fois moindres, et varient selon que l'on pupinise plus ou moins fortement.

Dès lors, un des principaux avantages du système Pupin, en dehors de son application indifféremment aux lignes aériennes et aux lignes sous câble, c'est qu'il permet d'accroître la self-induction dans une proportion

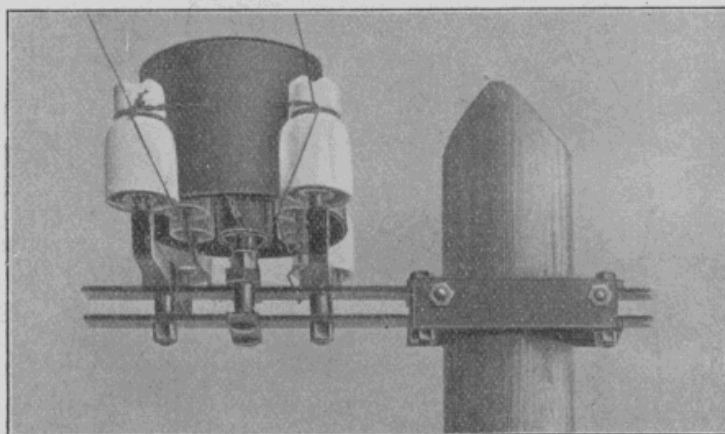


Fig. 2.

beaucoup plus forte que le système Krarup. Pour nous en rendre compte, il suffit de nous rappeler que nous avons vu que l'enroulement d'un conducteur sous forme de bobine se prêtait le mieux à l'accroissement de la self.

La figure 1 représente une bobine Pupin pour circuit aérien (vue de dessous), et dans la figure 2, on la voit fixée sur un poteau supportant les lignes téléphoniques.

Nous n'entrerons pas dans des détails au sujet de la construction de ces bobines, nous bornant à dire que la firme Siemens et Halske les établit de manière

à réduire les pertes d'énergie dans le fer au minimum. Celles dans le cuivre ne jouent pas grand rôle et peuvent être négligées. Les bobines sont doubles, c'est-à-dire qu'un seul noyau de fer reçoit l'enroulement du fil d'aller et celui du fil de retour, ceci pour éviter que dans le cas d'un noyau distinct pour chaque enroulement une différence dans l'état d'aimantation rémanente des deux noyaux ne provoque un déséquilibre de la self des deux conducteurs de la ligne, ce qui est très important en téléphonie au point de vue des effets d'induction, c'est-à-dire des bruits parasites provoqués par les circuits téléphoniques voisins et en général les lignes électriques situées à proximité.

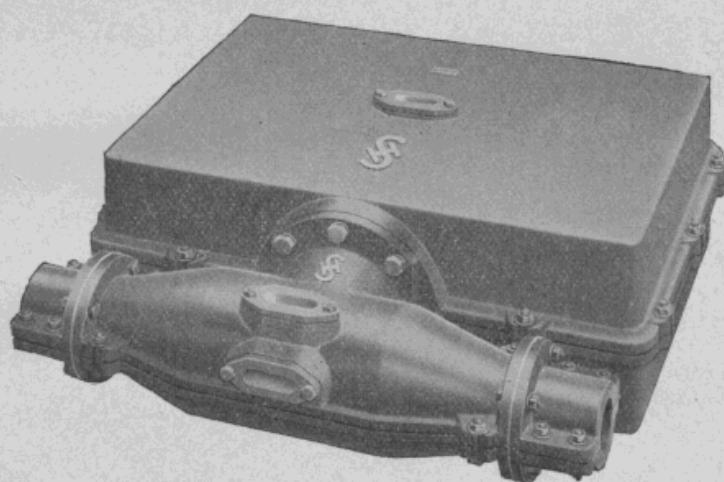


Fig. 3. — Boîte à bobines Pupin.

Chacun des enroulements des bobines aériennes est protégé par un parafoudre à vide. La firme Siemens et Halske établit en outre les bobines avec ajustage particulier des deux enroulements pour que les circuits pupinisés puissent être utilisés pour réaliser, par leur combinaison et sans pose de conducteurs nouveaux, des circuits supplémentaires dits « fantômes ».

Pour les câbles souterrains, les bobines sont placées dans des boîtes étanches en dehors du câble (fig. 3 et 4),

tandis que dans le cas des câbles sous-marins, elles sont logées dans le câble même sous la gaine de plomb, de sorte que le câble présente extérieurement un simple renflement à l'endroit des bobines.

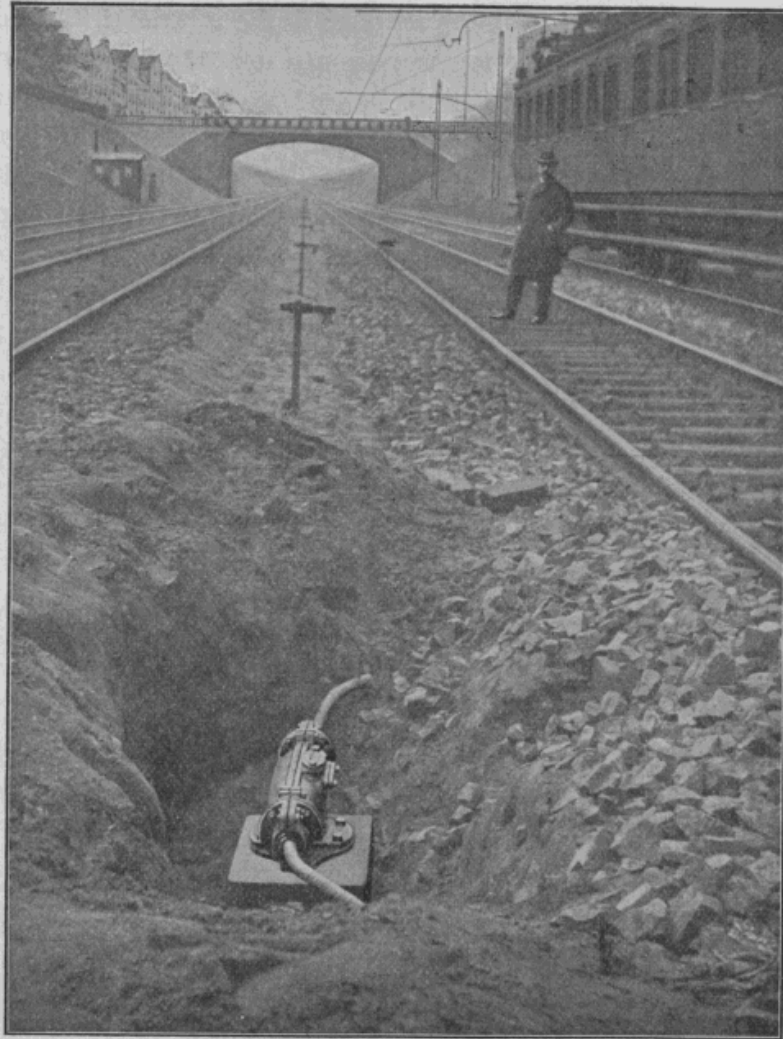


Fig. 4. — Manchon à bobines Pupin.

Dans ce qui précède, nous avons envisagé la propagation de l'énergie le long de la ligne, mais nous n'avons

pas parlé de sa dissipation partielle en cours de route. Cette dissipation est due aux frottements dont nous n'avons pas tenu compte jusqu'à présent pour éviter les complications. Or, ces frottements sont doubles : il y a, d'une part, ceux du fluide correspondant à la résistance ohmique du conducteur et, d'autre part, ceux du milieu élastique. Dans les déformations correspondant aux dilations et aux compressions des parois de notre conduite, ce milieu absorbe en effet de l'énergie par friction interne. Il en absorbe d'ailleurs aussi par défaut d'étanchéité. En effet, pour les fuites de liquide d'une conduite vers l'autre à travers ce milieu, la différence de pression est intégralement consommée en pertes de charge par frottement à travers l'isolant. Les deux catégories de pertes par frottement causées par le milieu sont difficilement séparables et communément confondues. On peut, au point de vue de leurs effets assimiler, la première à la seconde et considérer leur ensemble comme dû au défaut d'étanchéité.

Pour l'étude complète de la question, nous aurons donc, en dehors de la self-induction L et de la capacité C , à tenir compte de la résistance R et de ce que l'on appelle la « perte » A , qui représente les fuites par défaut d'étanchéité ou plus exactement d'isolement entre les deux fils pour une différence de pression unitaire entre ceux-ci, la dissipation d'énergie correspondant à cette perte A représentant l'énergie absorbée par le milieu isolant. Les grandeurs L , C , R et A sont rapportées généralement à une longueur du circuit double de 1 km comportant le fil d'aller et de retour.

Le calcul est indispensable pour établir l'influence mutuelle de ces divers facteurs sur l'efficacité de transmission de la ligne. Mais nous nous bornerons, pour le moment, à définir les deux grandeurs essentielles qui caractérisent une ligne téléphonique, pupinisée ou non, au point de vue de la technique de son exploitation, nous réservant d'entrer ensuite dans les détails du calcul.

Par suite des dissipations d'énergie dont nous venons de parler, les ondes, en se propageant le long de la ligne, s'affaiblissent graduellement, l'amortissement affectant donc à la fois l'intensité du courant et la différence de potentiel entre les deux fils de ligne. Considérons une section du circuit égale à 1 km. Au bout de cette section, le courant sera plus faible qu'au début et appelons r le rapport du courant final au courant initial. Pour une section de 2 km, ce rapport deviendra évidemment r^2 , et pour l km, il deviendra r^l . On pourrait donc définir le degré d'efficacité de la ligne ou son rendement par le nombre r se rapportant au kilomètre, mais on voit que le calcul du rendement pour une longueur donnée nécessite alors l'élévation de ce nombre à une puissance correspondante à la longueur, ce qui est peu commode. C'est pourquoi on a préféré, au lieu de manipuler les rapports des courants, n'avoir affaire qu'aux logarithmes de ces rapports. Au lieu de considérer le nombre r , on envisage son logarithme népérien désigné par β et appelé le *coefficient d'affaiblissement* et de même pour une ligne de longueur l , on évalue l'affaiblissement par le logarithme du rapport r^l , c'est-à-dire βl .

On obtient ainsi des nombres proportionnels aux longueurs qui sont aussi expressifs que les rapports des courants. Par exemple, étant donné qu'une ligne téléphonique ne peut, pour son exploitation commerciale, avoir un βl supérieur à 3, on voit immédiatement qu'un câble dont le β vaut 0,03 permettra d'aller jusqu'à 100 km.

Nous verrons d'ailleurs tantôt que la grandeur β se présente naturellement dans le calcul. Ci-dessous l'expression générale de sa valeur :

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(R^2 + \omega^2 L^2) (\Lambda^2 + \omega^2 C^2) + (RA - \omega^2 CL) \right]} \quad (1)$$

où $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence moyenne des courants téléphoniques, soit 800 périodes à la seconde,

Pour une ligne pupinisée, elle peut se simplifier et prendre la forme :

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{A}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

qui peut généralement, en raison de la faible valeur de A , se réduire approximativement à :

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3)$$

On voit ici nettement l'influence favorable de l'accroissement de L .

En outre du coefficient d'affaiblissement β , une seconde grandeur caractérise les lignes téléphoniques à savoir *l'impédance* ou *caractéristique*.

La définition de cette grandeur est très intéressante, parce qu'elle va mieux nous montrer combien l'aspect de la transmission ondulatoire des courants est différent de celui de la transmission ordinaire.

Considérons notre ligne téléphonique aux extrémités de laquelle sont reliés un appareil transmetteur et un appareil récepteur. L'ensemble de la bobine d'induction et du téléphone de chacun d'eux constituent un enroulement possédant de la résistance et surtout une assez forte self-induction et cette self est comme concentrée à chaque extrémité de la ligne. En somme, nos appareils sont comparables aux pistons, moteur et récepteur, envisagés précédemment, en supposant ces pistons assez lourds, de manière qu'ils jouent le rôle d'une masse concentrée aux deux extrémités de la conduite hydrodynamique.

Mettons maintenant le piston moteur en vibration continue. Il va émettre un train continu d'ondes qui va voyager avec un certain affaiblissement progressif jusqu'au bout de la ligne, où il va venir se heurter contre

le piston récepteur formant masse en mettant celui-ci en vibration, mais en subissant aussi une réflexion, de sorte que le train d'ondes va revenir en arrière vers le piston moteur.

Au train d'ondes d'aller ou, pour abréger le langage, à l'onde d'aller, va donc se superposer une onde de retour affaiblie, qui, à son tour, va se réfléchir contre le piston moteur pour reformer une deuxième onde d'aller donnant naissance à une deuxième onde de retour et ainsi de suite.

Dans l'état de régime, nous allons donc avoir une infinité d'ondes directes superposées à une infinité d'ondes rétrogrades, avec affaiblissement progressif, d'après la longueur de la ligne et le nombre de réflexions successives. On considère généralement la superposition de l'infinité d'ondes directes comme constituant une seule onde unique d'aller et l'ensemble des ondes rétrogrades comme une onde unique de retour. D'ailleurs, dans le calcul pour lequel on se place dans l'état de régime, ce sont ces ondes résultantes qui apparaissent seules dans les équations, mais en fait, elles cachent l'infinité d'ondes particulières que nous venons de montrer. On voit ici combien les phénomènes téléphoniques sont complexes quand on considère notamment les états de transition, lorsque la périodicité du piston moteur change brusquement, par exemple, lors de l'articulation des consonnes.

Mais si nous supposons maintenant la ligne infiniment longue, les choses vont se simplifier, car il ne subsistera plus que l'onde primitive d'aller qui se propagera indéfiniment le long de la ligne en s'affaiblissant graduellement. Dans ces conditions, on appelle *impédance* ou *caractéristique* Z de la ligne, le rapport entre la différence de potentiel et le courant considérés tous deux à l'origine de la ligne. On voit que cette grandeur, contrairement à ce qu'on appelle l'impédance dans la tech-

nique des courants alternatifs industriels, est indépendante de la longueur de la ligne et n'est déterminée que par les constantes kilométriques de celle-ci, c'est-à-dire par ses facteurs spécifiques, en l'espèce R, L, C et A.

L'impédance ou caractéristique Z, étant le rapport entre la différence de potentiel et le courant à l'origine d'une ligne, supposée indéfinie pour que seule elle entre en jeu à l'exclusion des appareils extrêmes, peut être considérée comme l'expression de l'inverse de la mobilité du fluide électrique dans la ligne. Le mot « impédance » est d'ailleurs, par son sens propre, on ne peut mieux choisi.

Cette impédance est de tout autre nature que la constante d'affaiblissement β . Cette dernière pourrait s'appeler la transparence de la ligne, tandis que l'impédance s'appellerait sa réfringence. Elle est importante à connaître dans la pratique, parce que, à la jonction de deux lignes d'impédances différentes, se produisent des réflexions nuisibles tout comme au passage de la lumière dans des milieux de réfringences différentes.

Une ligne pupinisée n'est autre chose qu'une ligne très réfringente, mais aussi très transparente.

Nous parlerons tantôt de l'expression mathématique de l'impédance Z qui, par suite du caractère sinusoïdal de la différence de potentiel, est une grandeur binaire, c'est-à-dire imaginaire ou encore vectorielle, nous bornant pour le moment à donner l'expression de son module :

$$\text{mod. } Z = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{A^2 + \omega^2 C^2}} \quad (4)$$

On voit que, contrairement à l'affaiblissement β , l'impédance Z croît avec la self-induction.

Pour une ligne pupinisée, elle est égale à environ 2000 ohms ; tandis que pour une ligne ordinaire, elle est d'environ 600 ohms.

La formule ci-dessus montre d'ailleurs bien que l'impédance Z exprime le degré de non-mobilité du fluide électrique dans la ligne puisque Z croît avec les frottements R , la masse L , l'étanchéité $\frac{1}{A}$ et la rigidité $\frac{1}{C}$.

En dehors de l'affaiblissement β et de l'impédance ou caractéristique Z , qui sont les deux paramètres d'importance pratique, on considère dans les études scientifiques des lignes divers autres facteurs dont nous dirons quelques mots.

C'est d'abord la « distorsion » qui exprime la variation de l'affaiblissement β pour les fréquences minimum et maximum des courants téléphoniques. Il importe que cet affaiblissement varie peu avec la fréquence, c'est-à-dire que la ligne doit être également transparente pour les courants de diverses fréquences, autrement dit de diverses couleurs, sinon la voix sort distordue tout comme la lumière blanche sort colorée d'un milieu inégalement transparent pour les lumières simples de diverses couleurs.

C'est ensuite la « constante de longueur d'onde » z qui se présente naturellement dans les calculs et qui dépend directement de la longueur d'onde λ que nous avons défini plus haut. Cette dépendance est donnée par la relation

$$\lambda = \frac{2 \pi}{z} \quad (5)$$

d'où l'on déduit λ connaissant z . Dans cette formule, r représente la mesure d'un angle de 180° .

La constante z peut être considérée comme un angle défini comme suit. Si l'on se place en un point de la ligne, la différence de potentiel ou le courant — tenons-nous en, par exemple, au courant — y varient d'une manière sinusoïdale, ces grandeurs étant alternatives, oscillantes, vibratoires. Si nous considérons de même un second

point de la ligne, par exemple plus éloigné de l'origine, il y aura entre les oscillations du courant en ces deux points un certain retard, une différence de phase qui peut s'exprimer par un angle, tout comme dans un moteur polycylindrique, il y a un retard de phase entre les divers cylindres, déterminé par les angles de calage des manivelles.

Dès lors, l'angle z est le décalage correspondant à une distance entre les deux points égale à 1. Pour une distance égale à la longueur d'onde λ , le décalage devient $z\lambda$ qui doit être évidemment égal à 360° , comme la formule ci-dessus permet de le vérifier.

La constante z est, dans le cas général, donnée par la formule :

$$z = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(A^2 + \omega^2 C^2)} - (RA - \omega^2 LC) \right]} \quad (6)$$

Le calcul de cette constante z permet, en donnant la longueur d'onde, de déterminer la distance d'écartement des bobines Pupin.

La vitesse v de propagation des ondes est également intéressante à considérer. Elle se déduit aussi directement de z .

On sait, en effet, que la longueur d'onde λ est égale à cette vitesse v multipliée par la durée T d'une oscillation complète :

$$\lambda = v T \quad (7)$$

On en déduit immédiatement :

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{2\pi f}{z} = \frac{\omega}{z}. \quad (8)$$

Au point de vue de la distorsion, il importe non seulement que l'affaiblissement β soit le même pour les diverses fréquences, mais aussi que la vitesse v ne varie

guère avec celles-ci, ce qui nécessite que z soit proportionnel à ω .

Quelle est maintenant la self L à donner à la ligne pour que celle-ci soit la meilleure? Nous verrons tantôt que cette valeur de L est déterminée par la relation :

$$L A = C R. \quad (9)$$

Quant cette relation est satisfaite l'expression (1) de β devient minimum. Et il se produit alors ce fait remarquable, que c'est lorsque la ligne présente ainsi le maximum de transparence qu'elle est aussi achromatique, c'est-à-dire sans distorsion.

Les expressions des diverses grandeurs rencontrées plus haut se réduisent alors à une forme très simple :

On a ainsi :

$$\beta = R \sqrt{\frac{C}{L}} = \sqrt{R A} \quad (10)$$

$$z = \omega \sqrt{L C} \quad (11)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L C}} \quad (12)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (13)$$

On voit que β et v sont alors indépendants de ω , c'est-à-dire que la ligne est sans distorsion.

La self-induction compense dans ce cas intégralement la capacité, et tout se passe comme si l'impédance de la ligne n'était due qu'à une résistance ohmique.

La ligne se rapproche alors d'une ligne idéale qui n'aurait aucune perte et pour laquelle R et A seraient nuls. Pour une telle ligne z , v et Z ont en effet les mêmes valeurs que ci-dessus.

Dans la pratique, on ne pousse pas la pupinisation

jusqu'à satisfaire à l'équation (9). On peut se tenir notablement en dessous de la valeur

$$L = \frac{C R}{A} \quad (14)$$

β variant relativement peu au voisinage de son minimum.

La self kilométrique additionnelle étant calculée, on la répartit entre les bobines dont la distance maximum D est déterminée par la formule pratique :

$$D = \frac{1}{10000 \sqrt{C L}} \quad (15)$$

correspondant à environ 12 bobines par longueur d'onde.

*
* *

Les résultats obtenus par l'accroissement de la self-induction des lignes sont doubles : d'une part, économie considérable de cuivre, et d'autre part, accroissement de la portée des lignes.

Là où l'on posait précédemment des lignes aériennes en fil de 5, de 4 ou de 3 mm de diamètre, on emploie des lignes pupinisées en fil respectivement de 4, 3 et 2 mm.

C'est ainsi qu'une ligne pupinisée Berlin-Francfort de 580 km en fil de 2,5 mm se montre supérieure à une ligne existante ordinaire en fil de 4 mm. La portée limite des lignes aériennes en Europe qui était de 1500 km (ligne Paris-Rome) en utilisant du fil de 5 mm, va se trouver portée à 2000 km pour la ligne Berlin-Rome en fil de 4,5 mm pupinisé.

De nombreux milliers de kilomètres de lignes aériennes pupinisées sont actuellement en service en Europe et en Amérique. Parmi les principales lignes en service, en construction ou en projet, citons : Berlin-Budapest

(950 km), Batavia-Soerabaja (856 km), Vienne-Innsbrück (574 km), Paris-Bruxelles (320 km), Anvers-Paris (370 km), Saint-Petersbourg-Moscou (650 km).

La Belgique n'est pas restée en retard. Elle a, il y a déjà plusieurs années, fait l'essai de la pupinisation des lignes aériennes sur un circuit Bruxelles-Libramont, et en présence des résultats favorables obtenus, nombre de nouveaux circuits interurbains ont été posés avec un fil de diamètre réduit, en raison de leur pupinisation ultérieure.

En Amérique, on est allé jusqu'à une portée de 3200 km, entre New-York et Denver via Chicago et Omaha en fils de 4,2 mm pupinisé avec combinaison de plusieurs circuits en circuits « fantômes ».

On se rendra compte de l'avantage financier résultant de la pupinisation, si l'on considère que l'économie en cuivre pour une ligne de 1000 km réalisée en réduisant le diamètre de 5 mm à 4 mm, se chiffre par environ 300.000 francs.

Pour les lignes souterraines ou sous-marines, ce n'est que grâce à l'accroissement de la self-induction que les longues portées ont été rendues possibles, car avec les câbles ordinaires, on ne peut pas dépasser 100 km et encore faut-il que la ligne sous-câble ne soit pas prolongée par un tronçon de ligne aérienne.

Le procédé Krarup et surtout la pupinisation ont notablement accru cette limite en rendant en outre la transmission beaucoup plus claire.

Par exemple, pour le premier câble anglo-belge, qui était un des plus longs câbles téléphoniques sous-marins (88 km) la voix était faible et assourdie, tandis que pour le nouveau câble pupinisé de même longueur et comportant le même poids de cuivre, la transmission est claire et d'intensité normale.

Le βl , qui vaut 2,37 pour l'ancien câble, a été réduit par la pupinisation à environ 0,9 pour le nouveau. Le

rapport entre le courant à l'arrivée et le courant au départ a été ainsi rendu environ 5 fois plus grand.

Des câbles téléphoniques interurbains de grande longueur sont actuellement en construction.

En Allemagne, le câble Berlin-Magdebourg de 150 km constitue le premier tronçon d'un câble pupinisé devant relier directement Berlin à Cologne soit 620 km. Il contient 24 circuits en fil de 3 mm pour les communications directes sur la longueur totale et 28 circuits de fil de 2 mm pour les communications entre les villes intermédiaires et le câblage des fils est fait de manière à permettre la réalisation des circuits combinés ou « fantômes », ce qui donnera au total 78 circuits à l'aide des 52 lignes à double fil. La pupinisation a été également prévue pour les circuits fantômes.

L'affaiblissement βl des conducteurs de 3 mm pour la section Berlin-Cologne sera probablement un peu inférieur à 2.

En Amérique, un câble pupinisé de 745 km est en construction entre Washington et Boston via New-York comportant 14 circuits de 2,58 mm de diamètre et 40 circuits de 1,82 mm indépendamment des circuits fantômes.

En permettant la réalisation de longs câbles téléphoniques, la pupinisation inaugure une ère nouvelle de la téléphonie interurbaine en rendant possible l'établissement d'un grand nombre de circuits téléphoniques entre les grandes villes même fort éloignées. Cette étape correspond à celle que nous avons déjà parcourue pour la téléphonie locale ou urbaine par la suppression progressive, et sur le point d'être complète, des lignes aériennes dans les villes.

La mise sous câble souterrain des lignes téléphoniques interurbaines a le grand avantage de placer les circuits complètement à l'abri des dérangements dus aux intempéries et de les protéger contre toutes les autres causes de perturbations.

Les frais d'entretien et de renouvellement, toujours onéreux pour les lignes aériennes, sont à vrai dire annulés.

Le trafic téléphonique peut, en outre, prendre un vif essor en raison du nombre de circuits dont on dispose et de la qualité des communications. Celles-ci restent d'abord invariables en toute saison. De plus, les circuits sous câble étant à l'abri de toutes les causes d'inductions téléphoniques, télégraphiques et autres, auxquelles les lignes aériennes sont exposées, ne sont pas bruyants ou fritureux, mais silencieux, ce qui donne plus de clarté et de netteté à la communication.

* *

Passons enfin maintenant à l'analyse mathématique du problème de la pupinisation, ou autrement dit de la propagation du courant le long d'une ligne téléphonique ou, en général, d'une ligne présentant à la fois de la résistance, de la self, de la capacité et des pertes.

On est parvenu, grâce à l'emploi de notations appropriées, à simplifier beaucoup cette analyse et nous allons voir que les diverses grandeurs que nous avons définies précédemment apparaissent naturellement dans les calculs et se déduisent d'emblée des équations fondamentales exprimant les conditions premières du problème.

Désignons comme précédemment par R , L , C et A , la résistance, la self, la capacité et les pertes de la ligne pour une longueur unitaire de celle-ci, comportant fil d'aller et de retour. Soit, à un instant t , en un point donné distant d'une longueur x de l'origine de la ligne, e la différence de potentiel entre les deux fils et i le courant dans l'un de ceux-ci, le courant dans l'autre lui étant égal et de sens contraire.

Si nous considérons un tronçon de longueur infiniment petite dx de la ligne en ce point, nous pourrions, en nous

reportant à notre analogie hydrodynamique, écrire directement les deux équations fondamentales :

$$-de = R dx i + L dx \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-di = A dx e + C dx \frac{\partial e}{\partial t}$$

La première exprime que la force motrice appliquée au liquide du tronçon élémentaire de la conduite est équilibrée par les frottements et la réaction d'inertie, tandis que la seconde exprime que la diminution du débit au passage du liquide à travers le tronçon est égale aux fuites par défaut d'étanchéité et à l'accumulation de liquide due à la dilatation des parois.

Ces équations peuvent s'écrire :

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (16)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Ae + C \frac{\partial e}{\partial t} \quad (17)$$

Il suffit maintenant d'intégrer ces relations fondamentales qui contiennent le problème dans toute sa généralité et de déterminer ensuite les constantes d'intégration, d'après les conditions particulières envisagées : loi de variation de la différence de potentiel au départ, caractéristiques des appareils reliés à la ligne au départ et à l'arrivée. Nous obtiendrons alors la valeur de e et de i en tout point de la ligne et à tout instant.

Cette intégration va être considérablement facilitée par suite du caractère alternatif des variables e et i , résultant du caractère alternatif de la différence de potentiel motrice appliquée à l'origine de la ligne. Nous supposons que cette dernière est simplement sinusoïdale et d'une fréquence correspondant à la fréquence moyenne des vibrations de la voix. D'après les résultats ainsi obtenus, nous

passerons facilement au cas réel de la superposition des fréquences différentes.

Or, si la différence de potentiel appliquée à l'origine de la ligne varie sinusoïdalement avec le temps, on peut admettre *a priori*, ce que, d'ailleurs, le calcul confirme, qu'il en est de même pour les variables e et i en un point donné quelconque de la ligne.

Dès lors, il devient possible d'utiliser des notations qui simplifient considérablement le calcul et les écritures.

Une grandeur sinusoïdale se représente en effet géométriquement d'une manière simple par un vecteur tournant dans un plan et d'autre part, les grandeurs vectorielles dans un plan se traduisent analytiquement par des expressions binaires à termes irréductibles, c'est-à-dire par les grandeurs complexes ou imaginaires, dont le module représente l'amplitude du vecteur ou de la sinusoïde, et l'argument l'orientation du vecteur ou la phase de la sinusoïde.

Au lieu de conserver dans les calculs les valeurs instantanément e et i , nous envisageons donc les valeurs imaginaires $\mathcal{E}$ et $\mathcal{I}$.

En posant :

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= E (\cos \varphi + j \sin \varphi) \\ \mathcal{I} &= I (\cos \varphi' + j \sin \varphi')\end{aligned}$$

les modules E et I étant les amplitudes ou les valeurs efficaces de e et de i , les arguments φ et φ' étant respectivement les phases de e et de i , et j représentant $\sqrt{-1}$.

E et I sont des fonctions de x et φ et φ' des fonctions de t et de x ayant la forme :

$$\begin{aligned}\varphi &= \omega t + \psi \\ \varphi' &= \omega t + \psi'\end{aligned}$$

où $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence et où ψ et ψ' dépendent de x .

De ces notations, il résulte directement que :

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = j \omega \xi$$

$$\frac{\partial \mathfrak{I}}{t} = j \omega \mathfrak{I}.$$

En remplaçant, dans les équations fondamentales (16) et (17), les grandeurs instantanées par leur expression imaginaire et en tenant compte des deux relations ci-dessus, ces équations prennent la forme :

$$- \frac{\partial \xi}{\partial x} = (R + j \omega L) \mathfrak{I} \quad (18)$$

$$- \frac{\partial \mathfrak{I}}{\partial x} = (A + j \omega C) \xi \quad (19)$$

En dérivant la première par rapport à x et en remplaçant ensuite dans son second membre $\frac{\partial \mathfrak{I}}{\partial x}$ par sa valeur tirée de la seconde, on a :

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = a^2 \xi \quad (20)$$

en posant :

$$a = \sqrt{(R + j \omega L) (A + j \omega C)} \quad (21)$$

L'équation (20) étant une équation homogène, s'intègre alors directement :

$$\xi = P e^{ax} + Q e^{-ax} \quad (22)$$

P et Q étant à déterminer dans chaque cas particulier et e étant la base des logarithmes népériens.

L'équation (18) donne alors :

$$\mathfrak{I} = - \frac{1}{Z} (P e^{ax} - Q e^{-ax}) \quad (23)$$

en posant

$$Z = \sqrt{\frac{R + j \omega L}{A + j \omega C}} \quad (24)$$

Pour nous rendre immédiatement compte de la signification des diverses grandeurs, considérons le cas d'une ligne de longueur infinie. Pour une telle ligne, il faut évidemment que les expressions (22) et (23) de ξ et de $\mathfrak{I}$ tendent vers zéro, quand x augmente. Cela exige que dans ce cas P soit nul.

Ces expressions deviennent donc :

$$\xi = Qe^{-ax} \quad (25)$$

$$\mathfrak{I} = \frac{Q}{Z} e^{-ax} \quad (26)$$

En tout point de la ligne, on a donc :

$$\mathfrak{I} = \frac{\xi}{Z} \quad (27)$$

On voit donc que Z est une impédance, et rentre bien dans la définition que nous en avons donnée plus haut, car la relation (27) devient à l'origine de la ligne :

$$\mathfrak{I}_0 = \frac{\xi_0}{Z} \quad (28)$$

ξ_0 et $\mathfrak{I}_0$ étant les valeurs de ξ et $\mathfrak{I}$ au point de départ.

Comme le montre l'expression (24), l'« impédance » ou « caractéristique » Z de la ligne est une expression imaginaire. Son module est le rapport des amplitudes ou des valeurs efficaces de la tension et du courant, et son argument δ , le déphasage entre la tension et le courant.

Le calcul du module et de l'argument tiré de l'expression (24) donne :

$$\text{mod } Z = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{A^2 + \omega^2 C^2}} \quad (29)$$

$$\delta = \arg Z = \arctg \frac{\omega (LA - CR)}{AR + \omega^2 CL + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(A^2 + \omega^2 C^2)}} \quad (30)$$

Si une ligne infinie se comporte au point de vue du rapport entre la différence de potentiel et le courant à son origine, ou même en un quelconque de ses points comme une impédance ordinaire, telle qu'on la considère dans l'étude des courants alternatifs, il y a cependant lieu de remarquer que l'impédance Z de la ligne n'est fonction que de la valeur de ses caractéristiques par unité de longueur à savoir R , L , A et C , et est indépendante de la longueur de la ligne ou des valeurs totales de la résistance, de la self, de la capacité ou des pertes.

Il est intéressant de remarquer qu'une ligne de longueur quelconque reliée à son extrémité à un récepteur d'impédance égale à l'impédance propre de la ligne se comportera comme si elle était indéfinie. Ceci résulte directement de la relation (27), qui montre que l'impédance du récepteur, tient alors lieu du prolongement indéfini de la ligne.

À l'origine de la ligne, c'est-à-dire pour $x = 0$, l'équation (25) donne :

$$\xi_0 = Q \quad (29)$$

c'est-à-dire que Q représente la tension ξ_0 au départ.

Les équations (25) et (26) deviennent donc :

$$\xi = \xi_0 e^{-ax} \quad (30)$$

$$\mathfrak{I} = \frac{\xi_0}{Z} e^{-ax} \quad (31)$$

Or, comme le montre l'expression (21), a est une imaginaire que nous pouvons donc mettre sous la forme :

$$a = \beta + \alpha j,$$

β et α étant des grandeurs réelles.

On sait d'autre part, que l'exponentielle e^{-ax} peut s'écrire :

$$e^{-ax} = e^{-(\beta + \alpha j)x} = e^{-\beta x} [\cos(-\alpha x) + j \sin(-\alpha x)]$$

$e^{-\beta x}$ étant son module et $-\alpha x$ son argument.

De même, l'expression imaginaire $\mathcal{E}_0$ de la tension au départ peut se mettre sous la forme :

$$\mathcal{E}_0 = E_0 (\cos \omega t + j \sin \omega t)$$

E_0 étant l'amplitude ou la valeur efficace et ωt la phase.

Dès lors, on obtient pour la valeur de $\mathcal{E}$:

$$\mathcal{E} = E_0 e^{-\beta x} (\cos \omega t + j \sin \omega t) [\cos (-zx) + j \sin (-zx)]$$

ou

$$\mathcal{E} = E_0 e^{-\beta x} [\cos (\omega t - zx) + j \sin (\omega t - zx)]$$

La valeur instantanée ε de $\mathcal{E}$ étant donnée par le coefficient du terme imaginaire, on a :

$$\varepsilon = E_0 e^{-\beta x} \sin (\omega t - zx) \quad (32)$$

On voit que ε en un point distant d'une longueur x est une sinusoïde d'amplitude $E_0 e^{-\beta x}$ et que cette amplitude décroît lorsque x augmente.

Cette décroissance dépend de la valeur de β qui est le coefficient d'affaiblissement dont nous avons parlé antérieurement. Sa valeur, donnée plus haut par l'équation (1), se tire directement de l'expression (21) de a dont elle est la partie réelle.

On voit aussi qu'à un instant donné t , la phase de ε varie avec x , le décalage étant égal à z par unité de longueur.

Pour une longueur λ de x telle que $z\lambda = 2\pi$, le décalage est de 360° , c'est-à-dire que ε repasse simultanément par la même phase pour des points distants entre eux de la longueur λ .

z est la constante de longueur d'onde et λ cette longueur que nous avons déjà définie. La valeur de z donnée plus haut en (6) se tire comme β de l'expression (21) de a , où elle est le coefficient du terme imaginaire.

L'équation (32) montre donc bien la propagation ondulatoire de la tension et son amortissement.

Pour la valeur instantanée du courant, l'équation (31) donne de même :

$$i = \frac{E_0 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \alpha x - \delta)}{\text{mod. } Z} \quad (33)$$

δ et mod. Z étant l'argument et le module de l'impédance de la ligne.

Si I_0 et I_l sont les amplitudes du courant à l'origine de la ligne et à une distance l de celle-ci, on aura :

$$I_l = \frac{I_0}{e^{\delta l}} \quad (34)$$

On voit que le courant i est de même forme que la tension ε , mais que son amplitude $\frac{E_0 e^{-\alpha x}}{\text{mod. } Z}$ est égale à celle de la tension divisée par le module de l'impédance Z et que sa phase est décalée par rapport à celle de la tension d'un angle δ égal à l'argument de l'impédance.

Considérons maintenant une ligne de longueur finie l raccordée à son extrémité à un appareil d'impédance Z_r .

Voyons ce que deviennent alors les équations générales (22) et (23).

Pour cela, déterminons les constantes d'intégration P et Q d'après les conditions aux limites.

Appliquées à l'extrémité de la ligne, ces équations donnent :

$$\varepsilon_l = Qe^{-\alpha l} + Pe^{\alpha l} \quad (35)$$

$$\mathfrak{I}_l = \frac{Qe^{-\alpha l} - Pe^{\alpha l}}{Z} \quad (36)$$

Or, à l'extrémité, on a évidemment :

$$\frac{\varepsilon_l}{\mathfrak{I}_l} = Z_r$$

D'où, en divisant (35) par (36)

$$\frac{Qe^{-at} + Pe^{at}}{Qe^{-at} - Pe^{at}} = \frac{Z_r}{Z}$$

ou

$$P = K Q e^{-2at}$$

en posant

$$K = \frac{Z_r - Z}{Z_r + Z} \quad (37)$$

ce qui donne pour (22) et (23) en y remplaçant P par sa valeur ci-dessus :

$$\xi = Q [e^{-ax} + K e^{-a(2l-x)}] \quad (38)$$

$$\mathfrak{J} = \frac{Q}{Z} [e^{-ax} - K e^{-a(2l-x)}] \quad (39)$$

En appliquant enfin (38) à l'origine de la ligne pour laquelle $x = 0$, on trouve pour déterminer Q la relation :

$$\xi_0 = Q (1 + K e^{-2al}),$$

ce qui permet de mettre (38) et (39) sous la forme :

$$\xi = \frac{\xi_0}{1 + K e^{-2al}} [e^{-ax} + K e^{-a(2l-x)}] \quad (40)$$

$$\mathfrak{J} = \frac{\xi_0}{Z(1 + K e^{-2al})} [e^{-ax} - K e^{-a(2l-x)}] \quad (41)$$

On voit maintenant que la tension se compose de deux ondes, l'une d'aller :

$$\frac{\xi_0}{1 + K e^{-2al}} e^{-ax}$$

dont l'amplitude a subi un affaiblissement correspondant au trajet x , et l'autre de retour :

$$\frac{\xi_0}{1 + K e^{-2al}} K e^{-a(2l-x)}$$

ayant subi un affaiblissement correspondant au parcours $2l - x$.

Il en est de même pour le courant.

En fait, l'onde directe et l'onde rétrograde sont respectivement la résultante d'une infinité d'ondes d'aller et d'une infinité d'ondes de retour par suite de réflexions successives aux deux bouts de la ligne. Il suffirait pour s'en rendre compte de développer chacun des deux termes de $\mathcal{E}$ ou de $\mathcal{J}$ en série.

Le coefficient K joue donc le rôle d'un coefficient de réflexion. S'il est nul, ce qui est le cas lorsque $Z_r = Z$, il ne subsiste plus que la première onde directe, comme si la ligne était indéfinie.

On remarquera que K est une imaginaire et a donc pour effet de modifier l'amplitude de l'onde à sa réflexion en lui faisant en outre subir un décalage. L'angle correspondant à ce décalage est appelé « angle de choc ».

Il sera facile maintenant de nous rendre compte des effets de réflexion à la jonction de deux lignes d'impédance différente. Pour cela, il nous suffira de substituer à l'impédance réceptrice Z_r , une ligne supposée indéfinie placée à la suite de la première, l'impédance Z' de la seconde ligne étant égale à l'impédance Z_r supposée précédemment concentrée au bout de la première ligne. La ligne indéfinie jouera alors par rapport à la première ligne le même rôle que l'impédance réceptrice, de sorte que les équations (10) et (11) resteront applicables à la première ligne, le coefficient de réflexion K étant maintenant égal à

$$\frac{Z' - Z}{Z' + Z}$$

Ceci montre l'intérêt qu'il y a à ne pas relier entre elles des lignes d'impédance trop différente.

De même, dans une ligne pupinisée, il se produit des réflexions des ondes entre les bobines de self consécutives, mais le système Pupin consiste précisément dans la répartition et dans l'écartement convenable de ces bobines de manière à annuler, pour ainsi dire, ces réflexions nuisibles

de façon que la ligne pupinisée se comporte comme une ligne homogène à self uniformément répartie.

Les équations générales (22) et (23) permettent d'étudier les divers problèmes que l'on peut avoir à se poser : influence de l'impédance des appareils transmetteurs et récepteurs, lignes composées de divers tronçons aériens et souterrains, construction de câbles, étalons artificiels, etc.

Nous n'entrerons pas dans des détails à ce sujet. Bornons-nous à signaler que pour ces calculs, il est commode de mettre ces équations sous la forme extraordinairement simple :

$$\mathcal{E} = A \mathcal{E}_0 - \mathfrak{B} \mathfrak{I}_0$$

$$\mathfrak{I} = A \mathfrak{I}_0 - C \mathcal{E}_0$$

où

$$A = \cos \text{hyp } ax$$

$$\mathfrak{B} = Z \sin \text{hyp } ax$$

$$C = \frac{1}{Z} \sin \text{hyp } ax$$

Il suffit pour cela d'exprimer dans les équations (22) et (23) P et Q en fonction de la tension $\mathcal{E}_0$ et du courant $\mathfrak{I}_0$ à l'origine.

En faisant $x = 0$ dans ces équations, on a :

$$P + Q = \mathcal{E}_0$$

$$P - Q = -\mathfrak{I}_0 Z$$

D'où

$$P = \frac{\mathcal{E}_0 - \mathfrak{I}_0 Z}{2}$$

$$Q = \frac{\mathcal{E}_0 + \mathfrak{I}_0 Z}{2}$$

En remplaçant alors P et Q par ces valeurs dans (22) et (23), on obtient :

$$\begin{aligned}\xi &= \xi_0 \frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} - \mathfrak{J}_0 Z \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} = \xi_0 \cos \text{hyp } ax - \mathfrak{J}_0 Z \sin \text{hyp } ax \\ \mathfrak{J} &= \mathfrak{J}_0 \frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} - \xi_0 \frac{1}{Z} \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} = \mathfrak{J}_0 \cos \text{hyp } ax - \xi_0 \frac{1}{Z} \sin \text{hyp } ax\end{aligned}$$

Si l'on applique, par exemple, ces relations au cas d'une ligne de longueur l aux deux extrémités de laquelle sont reliés des appareils téléphoniques de même impédance Z , on trouve pour le courant $\mathfrak{J}_0$ dans l'appareil transmetteur et pour le courant $\mathfrak{J}$ dans l'appareil récepteur, V étant la force électromotrice développée dans le premier appareil :

$$\begin{aligned}\mathfrak{J}_0 &= V \frac{Z + Z' \operatorname{tg} \text{hyp } al}{2 ZZ' + (Z^2 + Z'^2) \operatorname{tg} \text{hyp } al} \\ \mathfrak{J} &= V \frac{Z}{\left[2 ZZ' + (Z^2 + Z'^2) \operatorname{tg} \text{hyp } al \right] \cos \text{hyp } al}\end{aligned}$$

Pour une ligne suffisamment longue, c'est-à-dire lorsque al devient supérieur à environ 2,

$$\cos \text{hyp } al = \frac{e^{al}}{2} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \text{hyp } al = 1$$

ce qui réduit la dernière relation à :

$$\mathfrak{J} = \frac{2V}{e^{al}} \frac{Z}{(Z + Z')^2}$$

On peut d'après ce qui précède, vérifier ce que nous avons dit de la ligne pupinisée à affaiblissement minimum, réalisée lorsque :

$$AL = CR$$

Cette condition réduit les expressions de β , z et Z à :

$$\begin{aligned}\beta &= R \sqrt{\frac{C}{L}} = \sqrt{RA} \\ z &= \omega \sqrt{LC} \\ Z &= \sqrt{\frac{L}{C}}\end{aligned}$$

Z se réduit, comme on voit, à une simple résistance ; son argument δ est nul et le courant est en phase avec la tension.

Dans la pratique et pour les lignes non pupinisées, Z se ramène à une résistance mise en série avec une capacité.

*
* *

Pour terminer cette première partie de notre aperçu, disons comment on procède pour déterminer expérimentalement l'affaiblissement β et l'impédance Z , ainsi que les autres facteurs définissant la valeur et les caractéristiques d'un circuit téléphonique.

Il suffit pour cela d'appliquer à l'une des extrémités du circuit une différence de potentiel sinusoïdale de même périodicité que la fréquence moyenne des courants téléphoniques, à l'aide d'une petite génératrice de courant à haute fréquence, et de mesurer le rapport de la tension appliquée et du courant entrant dans la ligne, d'une part, en isolant les deux fils de ligne à l'autre extrémité du circuit et, d'autre part, en les bouclant en court-circuit.

Désignons respectivement par Z_i et Z_c les valeurs trouvées pour ce rapport $\frac{\xi_0}{\mathfrak{I}_0}$ dans les deux cas.

Comme dans le premier cas, le courant est nul au bout de la ligne supposé isolé, la relation précédente

$$\mathfrak{I} = A \mathfrak{I}_0 - C \xi_0$$

appliquée à l'extrémité isolée devient :

$$o = \cdot A \mathfrak{D}_0 - C \mathfrak{E}_0$$

ce qui donne :

$$Z_i = \frac{\mathfrak{E}_0}{\mathfrak{D}_0} = \frac{\cdot A}{C} = Z \cotg. \text{ hyp. al.}$$

en faisant $x = l$ dans les valeurs de $\cdot A$ et C , l étant la longueur de la ligne.

De même, dans le second cas, comme la tension est nulle à l'extrémité mise en court-circuit, la relation

$$\mathfrak{E} = \cdot A \mathfrak{E}_0 - \mathfrak{B} \mathfrak{D}_0$$

donne :

$$o = \cdot A \mathfrak{E}_0 - \mathfrak{B} \mathfrak{D}_0$$

d'où :

$$Z_c = \frac{\mathfrak{E}_0}{\mathfrak{D}_0} = \frac{\mathfrak{B}}{\cdot A} = Z \operatorname{tg.} \text{ hyp. al.}$$

En multipliant et en divisant les valeurs de Z_i et Z_c , on aura :

$$Z = \sqrt{Z_i Z_c}$$

ce qui détermine complètement l'impédance Z , et

$$\operatorname{tg.} \text{ hyp. al.} = \sqrt{\frac{Z_c}{Z_i}}$$

ou bien

$$a = \frac{1}{l} \operatorname{arc} \operatorname{tg.} \text{ hyp.} \sqrt{\frac{Z_c}{Z_i}}$$

ce qui devient, en passant des lignes hyperboliques inverses aux logarithmes,

$$a = \frac{1}{2l} \log. \text{ nép.} \frac{1 + \sqrt{\frac{Z_c}{Z_i}}}{1 - \sqrt{\frac{Z_c}{Z_i}}}$$

ce qui détermine l'affaiblissement β qui est égal à la partie réelle de a .

En outre, connaissant a et Z , on en déduira les divers facteurs R , L , C et A par les relations :

$$R + j\omega L = aZ$$

et

$$A + j\omega C = \frac{a}{Z}$$

qui résultent directement des équations (21) et (24).

LA TÉLÉPHONIE SANS FIL.



Il semble, au premier abord, que la téléphonie sans fil ne soit qu'en relation assez lointaine avec le problème de la téléphonie à longue distance, dont nous venons de vous entretenir. Mais en fait, étant donné le caractère ondulatoire de la propagation des courants le long d'une ligne téléphonique pupinisée, il y a, entre la transmission des ondes le long d'un fil et le mécanisme de la téléphonie sans fil par ondes herziennes, une telle analogie, qu'il nous semblerait regrettable de ne pas mettre à profit les explications qui précèdent pour donner brièvement un aperçu général des principes de la radiotéléphonie.

Cet exposé sera d'autant plus rapide et aisé que nous allons pouvoir mettre largement à contribution l'image hydrodynamique dont nous avons usé tantôt. Nous y avons comparé le fluide électrique à un fluide incompressible doué d'inertie et les fils conducteurs à des canaux creusés dans un milieu élastique. De plus, la masse du fluide incompressible a été extériorisée dans le milieu entourant le fil conducteur, si bien que ce milieu est à la fois le siège de l'élasticité et de l'inertie électriques, correspondant respectivement à la capacité et à self-induction des conducteurs. Nous avons vu que par suite du jeu mutuel de la capacité et de la self, la propagation des courants oscillants le long des fils conducteurs se faisait sous forme ondulatoire.

Nous n'avons pas, jusqu'à présent, envisagé d'une manière particulière ce qui se passe dans le milieu, mais

si nous considérons que ce milieu est doué d'élasticité et d'inertie, il donnera lieu, comme tous les milieux matériels à la fois déformables et inertes, à une propagation ondulatoire et rayonnante des perturbations auxquelles il est soumis en un endroit donné. Or, lorsqu'un fil conducteur est le siège d'un courant électrique alternatif, le milieu avoisinant le conducteur entre lui-même en oscillation, l'état de déformation et de force vive du milieu épousant respectivement les variations de la tension électrique et de l'intensité du courant dans le conducteur. En effet, dans notre comparaison hydrodynamique, le milieu élastique, dans lequel sont creusés les canaux contenant le liquide en pulsation, subit dans le voisinage de ceux-ci des tensions et des compressions alternatives et, en outre, accumule et restitue successivement de la force vive. Mais ces déformations et oscillations, au lieu de rester localisées à proximité des canaux, vont en raison de l'élasticité et de l'inertie dont le milieu est doué, se transmettre au loin de proche en proche à travers celui-ci et dans toutes les directions. Cette propagation va se produire sous forme d'ondes, le fil conducteur devenant ainsi la source d'un rayonnement en tous sens dans l'espace. En fait, le milieu que nous envisageons ici est l'éther, son état de déformation en un point donné correspond à l'état de tension électrique, c'est-à-dire au champ électrique en ce point, et son état de mouvement ou cinétique représente son aimantation, c'est-à-dire le champ magnétique, les ondes en question étant les ondes électromagnétiques ou hertziennes.

Dans l'étude de la téléphonie à longue distance, nous n'avons eu à considérer une propagation ondulatoire de la tension et du courant que le long des conducteurs du circuit, sans tenir compte de l'émission rayonnante d'ondes électromagnétiques. Cela provient de ce que nous avons implicitement supposé que les phénomènes d'élasticité et

d'inertie du milieu étaient concentrés dans la portion de l'espace environnant ou séparant les conducteurs. Nous n'avons considéré que les liaisons ou réactions mutuelles du fluide électrique avec cette partie du milieu prise dans son ensemble, sans tenir compte de ce que les perturbations du milieu étaient susceptibles de s'éloigner des conducteurs en se propageant au loin. En réalité, ce dernier phénomène est complètement négligeable et il ne prend de l'importance que dans certaines circonstances dont nous allons nous occuper.

Voyons donc quelles sont les conditions à remplir pour donner toute son ampleur à ce phénomène de rayonnement.

Il importe en premier lieu de faire circuler dans le conducteur, auquel on veut faire émettre des ondes, des courants électriques à très haute fréquence, disons d'au moins 100.000 périodes à la seconde. L'énergie communiquée au milieu dépendra, en effet, du nombre d'impulsions ou d'oscillations qui lui seront imprimées en l'unité de temps et l'on comprendra, qu'à égalité d'énergie véhiculée par une oscillation, il y ait intérêt à en accroître la fréquence.

En second lieu, il faut que le conducteur ou circuit rayonnant ait, en quelque sorte, un grand pouvoir émissif. On a beaucoup discuté cette question, mais si nous nous reportons à notre comparaison, par laquelle les fils conducteurs sont comme des canaux creusés dans l'éther élastique, nous voyons qu'il importe que le circuit rayonnant prenne largement contact avec l'éther, c'est-à-dire que les canaux soient ramifiés et étendus, afin de mettre en oscillation le plus grand volume d'éther possible. C'est la raison d'être de l'antenne qui réalise un circuit largement ouvert et épanoui au maximum, capable de constituer pour l'éther un centre d'ébranlement étendu.

En pratique, l'antenne constitue, avec la surface du sol les deux armatures d'un vaste condensateur, entre lesquelles la source d'énergie réalise une différence de potentiel alternative. Celle-ci, par ses effets de charge et de décharge, imprime au volume d'éther compris entre l'antenne et le sol des ébranlements qui rayonnent au loin sous forme d'ondes. Pour favoriser le rayonnement, il importe de développer les fils de l'antenne et surtout de les écarter du sol. On verrait aisément, d'après notre comparaison, que pour un condensateur, dont les armatures sont très rapprochées l'une de l'autre, même si elles sont très étendues, l'énergie, développée dans l'espace séparant les armatures, rentre dans le circuit sans pouvoir s'échapper au dehors.

Considérons maintenant le mécanisme général de la transmission des ondes sans fil.

Supposons une antenne transmettrice parcourue par des courants oscillatoires à haute fréquence et voyons l'effet que les ondes émises vont produire sur l'antenne d'un poste récepteur. Ces ondes ou déformations de l'éther vont, en passant sur l'antenne réceptrice qui leur offre une large prise, contracter et dilater les canaux sous l'aspect desquels nous nous figurons les fils conducteurs de l'antenne.

Les pulsations en résultant produiront la mise en oscillation du fluide incompressible remplissant ces canaux, c'est-à-dire que l'antenne réceptrice sera le siège de courants de même fréquence que l'antenne émettrice.

Disons en passant que notre comparaison expliquerait de même la propagation des ondes à la surface du sol, qui a fait l'objet de remarquables travaux en ces derniers temps.

Voyons comment pareille transmission d'ondes peut alors être utilisée à la téléphonie.

Il est indispensable pour cela que, d'une part, les

courants induits par les ondes dans l'antenne réceptrice puissent être rendus indirectement capables d'influencer un récepteur téléphonique et que, d'autre part, les ondes émises par l'antenne transmettrice soient modulées suivant les sons de la voix.

Considérons donc les ondes émises par l'antenne de transmission. Dans la télégraphie sans fil, ces ondes sont généralement engendrées par la décharge oscillante d'un condensateur dont le circuit est relié par induction à celui de l'antenne. A chaque décharge, il se produit alors dans l'antenne une série d'oscillations de haute fréquence, mais dont le nombre se limite à environ une vingtaine par suite du décroissement rapide de leur amplitude causé par les pertes d'énergie par rayonnement et par l'amortissement dans l'antenne et dans le circuit du condensateur. En supposant que la fréquence des oscillations soit de 500.000 à la seconde, la série d'oscillations ou le train d'ondes correspondant à une décharge n'aura qu'une durée de $\frac{1}{25000}$ de seconde. Or, si les décharges du condensateur se succèdent même très rapidement, disons à raison d'un millier par seconde comme dans les étincelles dites « musicales », on voit que la durée d'un train d'ondes est beaucoup plus courte que l'intervalle séparant deux décharges successives et que pendant la majeure partie de celui-ci l'antenne est inactive. Si une émission saccadée de cette nature convient parfaitement à la télégraphie où il suffit de transmettre des signaux longs ou brefs et où l'effet des ondes peut être simplement cumulatif, il n'en est plus de même en téléphonie où il faut rendre les modulations de la voix qui correspond à des vibrations dont la fréquence atteint 4 à 5000 cycles à la seconde. Il importe donc de multiplier les décharges pour que leur fréquence soit supérieure à cette dernière et encore doit-elle être notablement plus grande et atteindre environ 7000 pour que le son propre résultant de la succession régulière des

décharges, c'est-à-dire des trains d'ondes, soit assez aigu pour ne plus être perceptible à l'oreille et ne pas venir gêner la transmission. Ce mode de production des ondes caractérise le système de radiotéléphonie dit « par étincelles ».

Mais la solution directe allant au devant des difficultés que nous venons de signaler consistera évidemment dans la production d'une série d'ondes ininterrompue au lieu de l'émission de trains d'ondes successifs et isolés. Pour cela, le circuit de l'antenne devra être mis en vibration permanente, de sorte que les ondes se succéderont sans interruption et garderont une même amplitude, l'antenne étant excitée d'une manière continue. Au lieu d'avoir affaire à des coups de bélier oscillatoires espacés dont les vibrations décroissent par amortissement, nous serons en présence de vibrations sans cesse et régulièrement excitées. Ce système de radiotéléphonie est dénommé par ondes « entretenues » ou « non amorties ».

Au lieu d'être produites par la décharge d'un condensateur, les oscillations dans l'antenne sont alors engendrées soit par un arc chantant, soit par un alternateur à haute fréquence. Dans le procédé par l'arc, les oscillations résultent encore une fois du jeu réciproque de l'élasticité et de l'inertie électriques, c'est-à-dire de la résonance d'un condensateur avec une self disposés en série et raccordés en dérivation aux bornes de l'arc, qui provoque automatiquement et entretient en permanence les vibrations. Quant aux alternateurs, ils constituent une solution extrême du problème par la génération directe électromécanique des courants de haute périodicité.

Le problème de la production des ondes susceptibles d'être utilisées à la radiotéléphonie étant résolu, il reste à moduler ces ondes au départ suivant les sons et inflexions de la voix et à leur faire traduire la parole à l'arrivée.

Pour la transmission, il suffira en principe d'influencer

par un microphone l'amplitude des ondes ou leur fréquence ou ces deux facteurs simultanément. Les dispositifs se présentent ici assez nombreux et varient non seulement d'après les systèmes de production des ondes, mais encore pour chacun d'eux. On peut, par exemple, intercaler le microphone dans le circuit même de l'antenne ou dans un circuit qui lui est dérivé ou accouplé, ou faire agir le microphone sur le circuit oscillant, ou sur le circuit d'alimentation de l'arc, ou sur l'excitation de l'alternateur à haute fréquence, etc.

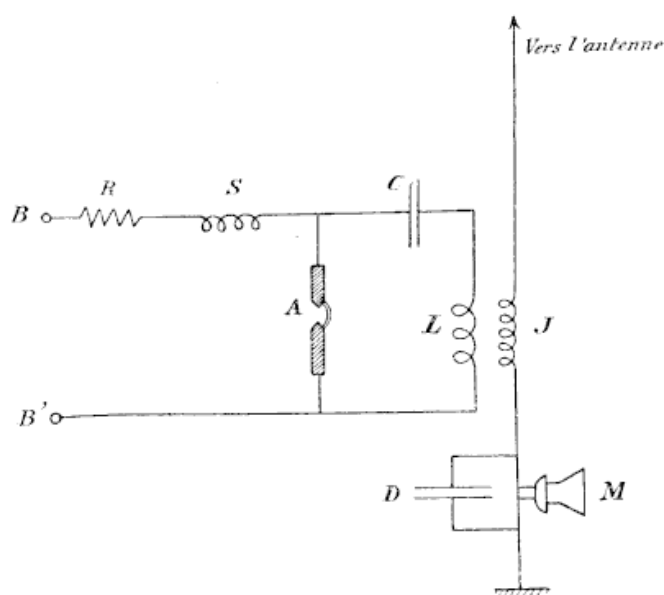


Fig. 5.

A titre d'exemple, la fig. 5 représente une disposition dans le système par arc où le microphone M est relié au circuit de l'antenne. Le circuit d'alimentation de l'arc aboutissant aux bornes B et B' comporte en outre du rhéostat R, une self S destinée à éviter que les oscillations de l'arc ne se reportent sur ce circuit. Le condensateur C et l'enroulement L constituent avec l'arc le circuit d'oscil-

lations entretenues, lesquelles sont reportées dans l'antenne par le transformateur J. Les variations de résistance du microphome M, relié en dérivation sur le condensateur D, influencent à la fois la fréquence et l'amplitude des ondes en modifiant les constantes du circuit de l'antenne.

Quant à la réception, les courants à haute fréquence, suscités dans l'antenne par le passage des ondes, agiront, comme dans la télégraphie sans fil, sur un détecteur qui, dans le cas présent, devra être sensible non seulement à

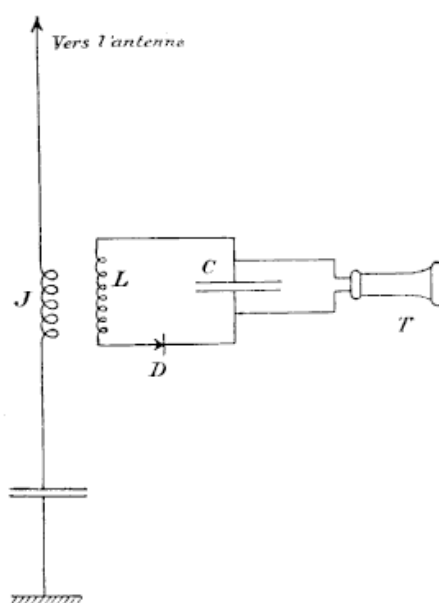


Fig. 6.

l'amplitude, mais à la fréquence des courants. Tels seront les détecteurs électrolytiques, thermiques ou à conductibilité asymétrique. Le détecteur relié au circuit d'un téléphone provoquera dans celui-ci des variations de courant qui seront conformes à celles des ondes et reproduiront ainsi la voix.

La fig. 6 indique un montage de réception. Les courants

oscillants de l'antenne sont reportées par induction dans le circuit L, C, D, comprenant l'enroulement L, le condensateur C et le thermo-détecteur D. Supposons, pour plus de simplicité que celui-ci fonctionne comme une soupape ne laissant passer que les demi-ondes de courant de même sens. Il en résultera une charge du condensateur C qui, d'autre part, se déchargera d'une manière continue à travers le téléphone T. Ce courant continu de décharge variera d'après l'amplitude et la fréquence des courants oscillants, c'est-à-dire suivant les sons de la voix.

Tel est, en résumé, le principe de la radiotéléphonie. Les portées qui ont été atteintes dépassent 400 km (système Majorana). Ce qu'il y a de remarquable, c'est que la distorsion, dont nous avons parlé pour la téléphonie avec fil, ne se manifeste pas, le timbre de la voix étant rendu avec grande netteté. Les ondes à haute fréquence subissent donc en radiotéléphonie un égal amortissement β .

Au point de vue des perfectionnements futurs, signalons que des progrès marquants ont été réalisés en ces dernières années dans les alternateurs à haute fréquence et qu'il semble que ce soit la génération directe des ondes qui présente le plus d'avenir.

* * *

Nous avons, au cours de ces deux aperçus, voulu montrer brièvement et, autant que possible, intuitivement le rôle de la propagation ondulatoire de l'énergie en téléphonie. Nous avons été tentés de faire cet exposé en le mettant à la portée de ceux qui ne sont pas spécialisés en cette matière, parce que la réalisation d'une telle propagation sur les lignes téléphoniques par la pupinisation constitue une des questions les plus attrayantes de l'électricité et les plus approfondies mathématiquement

et expérimentalement. « Je ne connais, dit M. Bancroft » Gherardi (1), en conclusion d'une étude sur l'application » du système Pupin en Amérique, dans la science et dans » la technique électrique aucun problème qui ait exigé » plus d'adresse, plus de capacités techniques et plus » d'assiduité de la part de ceux qui se sont attachés à sa » solution, que celui de l'élaboration et de l'application » de la pupinisation. »

(1) *The Electrician*, vol. LXVII, p. 771.

