

Et la distance fut vaincue. Les lignes et la transmission : la pupinisation

Pierre Arcangeli

Société d'Histoire de La Poste et de France Télécom en Basse-Normandie, ACHDR et ARMORHISTEL

Le téléphone est inventé en février 1876, les premières lignes sont exploitées en octobre 1876, celles-ci sont des lignes télégraphiques, puis des lignes spécifiques dérivées des lignes télégraphiques. Le premier commutateur manuel apparaît en janvier 1878, le commutateur automatique en 1889 [LIBOIS (J.-L.), *Genèse et croissance des télécommunications*, Masson, 1983, pp. 37-39].

L'existence du réseau de télégraphie électrique, qui utilisait déjà les principales techniques qui sont mises en œuvre lors du développement du réseau téléphonique, lignes aériennes en fils nus, câbles souterrains et sous marins, a facilité les premières expérimentations. On peut cependant remarquer l'existence d'une différence de taille : la télégraphie électrique avait très rapidement su trouver des solutions au problème posé par la distance. Un message pouvait être répété, relayé de diverses manières, ce qui n'était pas le cas de la voix. Aussi, vers 1892, avait-t-on atteint la limite de portée commerciale des lignes téléphoniques, c'est-à-dire celles utilisant un circuit dont le coût de construction permettait un coût d'utilisation acceptable, en Europe avec un fil de 5 mm de diamètre et aux États-Unis avec un fil de 4,2 mm de diamètre. La portée maximum théoriquement possible était de l'ordre de 1 500 km. On téléphonait de Paris à Londres et à Bruxelles. Le réseau se développait « à son rythme », et sans doute on se satisfaisait de ce côté de l'Atlantique de la limite de distance, mais de l'autre côté, on ne pouvait joindre que New York à Chicago, et cela n'était pas jugé suffisant.

Pour s'affranchir de la distance, il fallut deux innovations technologiques majeures, la pupinisation puis l'amplification. Nous allons dans cet article étudier l'histoire de la première : la pupinisation.

LA PORTÉE DES COMMUNICATIONS VERS 1892, ÉTAT TECHNIQUE DES LIGNES

En cette fin du XIX^e siècle, pour les longues distances, la limite de portée était de 1 500 km au maximum théorique, dépendant du diamètre des fils utilisés, de l'armement et du climat. Cette portée pouvait être considérée comme suffisante, dès lors que la notion de service universel n'était pas prise en considération : de Paris on téléphonait dans toute la France, à Londres, à Bruxelles, Berlin et Milan. Aux États-Unis (figure 1), New York était relié à Chicago, mais, ici, on voulait atteindre l'autre océan, traverser le continent : 5 500 km, et depuis 1892 cette portée maximale commerciale était atteinte. Deux obstacles techniques étaient sur la route des lignards ; le premier : les perturbations qu'un circuit pouvait apporter à un circuit voisin et le second : l'affaiblissement du signal à transmettre en fonction de la longueur de la ligne.



Fig. 1. — Carte. *Annales des PTT*, juin 1911, p. 103.

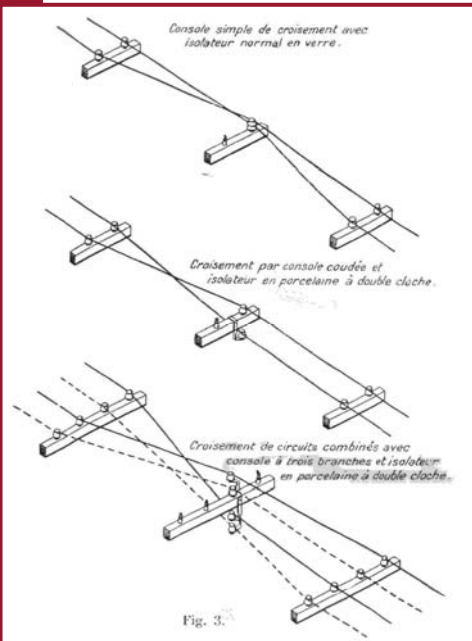


Fig. 2. – Croisement plan aux États-Unis. *Annales des PTT, juin 1911, p. 107.*

Le premier fut rapidement franchi en utilisant le croisement (figure 2) ou la permutation des fils selon que la ligne était construite en plan ou en diagonale (figure 3). Restait à régler la question de la limitation apportée par la distance.

COMMENT S'AFFRANCHIR DE CETTE LIMITE

Lorsque le téléphone naissant se développe, de nombreuses questions sont à traiter : produire des postes téléphoniques, pouvoir raccorder des postes situés dans des bâtiments différents, relier entre elles des localités distantes, etc., le tout le plus économiquement possible.

Ces questions n'étaient pas vraiment nouvelles, elles se sont déjà posées *mutatis mutandis* lors du développement du réseau de télégraphie électrique terrestre.

Transmettre une dépêche à distance nécessite des moyens techniques : c'est la ligne télégraphique. Au départ deux fils, mais très vite elle se réduit à un fil avec retour par la terre (sur la ligne Paris – Rouen construite en 1845 avec deux fils en fer, un essai concluant est réalisé entre Paris et Mantes). Elles sont construites en fer puis en cuivre avec un diamètre maximum de 5 mm.

Il était naturel d'utiliser les lignes télégraphiques existantes pour les premiers essais de téléphonie à distance : ce fut fait dès le 19 octobre 1876 entre Boston et Cambridge Port sur 2 milles.

Mais très vite, les lignes téléphoniques suivirent l'exemple inverse des lignes télégraphiques passant d'un fil à deux fils. En effet, le retour par la terre, s'il était économique, avait le fâcheux effet, dès que deux lignes parallèles étaient utilisées simultanément, de provoquer un mélange des conversations,

phénomène appelé plus tard diaphonie. Comme indiqué plus haut ce phénomène affectait aussi les lignes doubles.

La première ligne interurbaine à deux fils est mise en service le 27 mars 1884 entre New York et Boston sur 235 milles. En France, la première ligne interurbaine est mise en service le 16 janvier 1885 entre Rouen et Le Havre.

Afin de choisir le diamètre des fils à utiliser pour construire un circuit d'une longueur donnée, avant 1887, et même encore après – car on la rencontre encore dans le manuel technique des PTT édition de 1898 page 273 –, on utilise la formule dite de Preece $CR < 15\ 000$, dans laquelle C est la capacité totale en microfarads, et R la résistance totale en ohms. 15 000 est la limite d'un produit dont il est souhaitable qu'il soit inférieur à 12 000.

Dans les débuts, il faut bien constater un certain empirisme. Ce n'était pas par manque de rigueur, car l'équation des télégraphistes était connue et une variante simplifiée avait été résolue. On savait qu'outre par la résistance et la capacité, les performances d'une ligne étaient régies par son isolement, ou plutôt son manque d'isolement et par sa self induction. Ces deux derniers paramètres étaient considérés comme nuisibles au bon fonctionnement de la ligne.

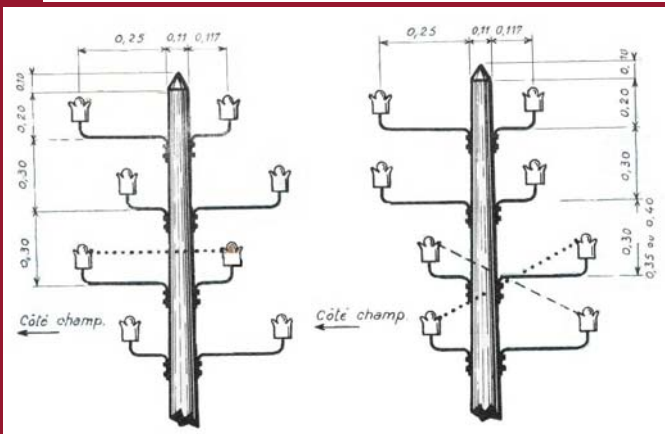


Fig. 3. – Armement en plan (à droite) et en diagonale (à gauche) en France. *Câble et construction de ligne, p. 31.*

L'équation complète qu'Aimé Vichy a qualifiée de terrible équation (figure 4) aux dérivées partielles dans une lettre à son condisciple Aimé Barbarat, résista aux mathématiciens jusqu'en 1887, année où indépendamment et sans doute simultanément Oliver Heaviside et Aimé Vaschy donnèrent sa solution.

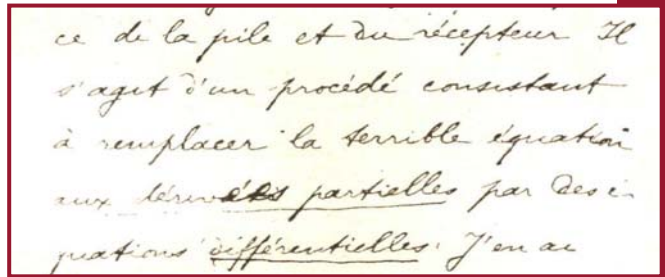


FIG. 4. — *Annales des PTT*, 1917, p. 178.

Mais avant cela, dans les *Annales télégraphiques* de juillet-août 1886,

A. Vaschy signale que « l'effet de la self-induction est essentiellement utile » ; c'est la première fois qu'on formule un avis contraire à la doxa des lignards télégraphistes !

La solution pour le rapport des tensions V_0 et V_n est donnée ci-dessous. G est appelée constante de propagation. C'est un nombre complexe dont l'expression développée est :

$$\frac{V_0}{V_n} = e^{\gamma t} \cdot \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \cdot$$

L'exploitation de cette expression en vue d'en tirer des conclusions pratiques n'est pas évidente, pas plus que son interprétation physique.

La partie réelle donne l'affaiblissement du signal (ramené à l'unité de longueur on le trouve sous le nom d'affaiblissement linéique), et la partie imaginaire la rotation de phase, les deux dépendant de la fréquence. La séparation en partie réelle et partie imaginaire n'est pas simple, mais on peut noter un premier résultat, c'est la réponse à la question : existe-t-il une relation entre les quatre paramètres primaires, telle que l'affaiblissement soit indépendant de la fréquence ? Cela se produit si les deux termes sous la racine sont égaux à une constante multiplicative près. Cela conduit à ce qui est appelé la condition de Heaviside : $R/G=L/C$.

Dans ce cas, l'affaiblissement de la ligne est $\beta=R\cdot\sqrt{L/C}$. Et, il est indépendant de la fréquence (approximativement).

Considérons une ligne formée de fils de 5 mm de diamètre, armée en carré de 40 cm, c'est le cas « le plus favorable » rencontré dans le réseau.

Les valeurs kilométriques à 800 Hz des paramètres primaires sont alors (*Annales des PTT*, 1916, p. 321) :

$$\begin{aligned} \text{Résistance } R &= 1.791 \Omega, \text{ pertance } G = 1 \cdot 10^{-6}, \text{ rapport } R/G = 1.791 \cdot 10^{+6} \\ \text{Self } L &= 0.00227 \text{ Henri, capacité } C = 0.00512 \cdot 10^{-6}, \text{ rapport } L/C = 0.4434 \cdot 10^{+6} \end{aligned}$$

Le rapport R/G est quatre fois plus élevé que le rapport L/C . Pour les égaux, il faut soit baisser la résistance donc augmenter le diamètre, donc le coût, soit améliorer l'isolement de la ligne ou baisser la valeur de la capacité en éloignant les fils les uns des autres. On ne peut pas facilement améliorer l'isolement des lignes, et abaisser la résistance ou la capacité ne peut se faire qu'au prix d'une augmentation des coûts insupportables. Reste l'augmentation de la self, mais comment ? Cette conclusion ne fait pas l'objet d'une mise en œuvre dans les années qui suivent la résolution de l'équation des télégraphistes. Le rôle « essentiellement positif de la self » n'est pas accepté en fait par les praticiens.

Enfin, cette relation n'est qu'approchée, car les paramètres primaires ne sont pas constants (pour mémoire, ils étaient primitivement appelés constantes primaires, nom qui a été abandonné), l'effet de peau, ou effet pelliculaire, sensible dès les fréquences hautes de la bande téléphonique, a pour conséquence d'augmenter la résistance avec la fréquence.

On sait donc dès la fin des années 1880 que pour réduire l'affaiblissement des lignes et donc augmenter la portée commerciale des communications téléphoniques, il faut accroître la self des lignes.

Pour cela, les ingénieurs avaient deux moyens possibles : augmenter la self répartie, en entourant chaque fil par des fils ou un ruban de fer recuit ou de fer doux. Il est connu sous le nom de Système Krarupt, il ne sera pas étudié ici. Le second est l'adjonction de self localisée, c'est l'objet de cette communication.

PUPINISATION AVANT PUPIN !

Parler de pupinisation avant Mickael Pupin peut sembler paradoxal. Si la pupinisation, dans son acception courante consiste à augmenter la self d'une ligne en insérant des selfs additionnelles localisées dans une ligne homogène, alors il n'est pas interdit de rechercher si des expériences de ce type n'ont pas été menées ici ou là, avant la publication des travaux de M. Pupin, et c'est le cas.

En 1891, Aimé Barbarat, ingénieur des télégraphes et ami d'A. Vaschy, utilise ses travaux pour tester des lignes à self répartie augmentée, et même pour installer des selfs localisées sur le câble entre Paris – Bordeaux, résultat peu satisfaisant (*Annales PTT*, 1932, p. 64 et suivantes). En 1896, nouvel essai sur le câble de Marseille à Toulon (*Annales PTT*, 1917, p. 174), tout d'abord bobines en un seul point, échec complet. En mars 1897, il a été proposé de placer les bobines espacées de 10 ou 20 km, expérience semble-t-il refusée par le comité technique.

Peut être d'autres ingénieurs ont-ils expérimenté des charges additionnelles, mais tous ont échoué, faute de disposer de la théorie qu'il revenait à Pupin d'établir.

Pupin, à deux occasions au moins, a rendu hommage à A. Vaschy, une première fois en 1917, à l'occasion d'un prix qui lui a été décerné par l'Académie des sciences et en février 1921, lorsqu'on lui a attribué la médaille d'or Edison. Par la suite, le rôle de Vaschy a été peu à peu oublié, sans doute parce que sa mort prématurée à 42 ans en 1899, a interrompu sa production scientifique. On trouve une référence, dans le cours de transmission de G. Valensi de 1933, où on lit page 113, « *l'augmentation artificielle de l'inductance L... a été signalé tout d'abord par Heaviside et Vaschy [...]* ». Et page 61, une petite restriction : « *Mais c'est Heaviside qui semble avoir été le premier à expliquer et à calculer les phénomènes de la propagation des ondes électromagnétiques [...]* ». Dans le cours de transmission de P.-M. Prache et H. Jannes de 1948 et celui plus récent de l'université de Lausanne, plus personne n'est cité.

Quant au rôle de Barbarat, il n'est pas évoqué, ni d'ailleurs celui d'ingénieurs anglais qui ont eu des idées semblables, et ont même déposé des brevets dès 1890.

Quittons maintenant les querelles d'antériorités, et place à celui qui a ouvert la voie qui allait permettre les télécommunications à grandes distances !

LES TRAVAUX THÉORIQUES DE MICKAEL PUPIN⁽¹⁾

Il n'est pas ici question de procéder à un résumé exhaustif de ce mémoire et de ces articles. Pour le lecteur intéressé, ils ont été traduits et publiés dans les *Annales des PTT* de mars 1911. Nous nous limiterons à examiner les quelques éléments intéressant la compréhension de la pupinisation qui ont été extraits de ces quelques 186 pages ; ils sont donnés ci-dessous. Les questions mathématiques, qui forment l'essentiel de ce mémoire et de ces articles, ne seront pratiquement pas abordées.

La question que M. Pupin se posait était de réaliser les expériences d'Hertz pour les ondes longues de plusieurs centaines de kilomètres correspondant à celles employées en téléphonie, télégraphie et transmission de force électrique. Ces expériences étaient le pendant de celles réalisées par Hertz en 1888 pour les ondes à très hautes fréquences et donc à courte longueur d'onde. Avec une différence, car les expériences d'Hertz portaient sur des oscillations libres alors qu'en téléphonie, on avait à faire à des oscillations forcées. Les ondes proviennent généralement d'un appareil à forte impédance et à l'autre bout de la ligne sont absorbées dans un récepteur à forte impédance. La question à laquelle on doit répondre est : quelle fraction de l'énergie émise est reçue à l'autre extrémité ?

Dans l'expérience d'Hertz, une longueur d'onde tenait dans un laboratoire, il semblait que pour les grandes longueurs d'onde, ce soit impossible. Pour une onde, la vitesse de propagation est égale au produit de la fréquence par la longueur d'onde. Pour les ondes hertziennes, cette vitesse est celle de la lumière. Pour les ondes téléphoniques se propageant dans un conducteur métallique, elle est moindre mais encore considérable (de l'ordre de 225 000 km/s sur une ligne aérienne en fil de 4,2 mm).

(1) Mémoires présentés par Mickael Pupin le 22 mars 1899, le 19 mai 1900, article de M. Pupin (*electrical Word*) du 1^{er} mars 1902, article de M. Campbell dans le *Philosophical magazine* de mars 1903.

L'idée de M. Pupin est que, si l'on peut ralentir la vitesse de propagation, cela aura pour conséquence, à fréquence égale, de réduire la longueur d'onde. Cela passe par l'utilisation d'un dispositif qui emmagasine l'énergie d'une façon plus considérable que le conducteur ou le vide ; si le rapport est de un million, la vitesse de propagation est un million de fois plus petite.

Il va réaliser cette expérience : la bobine représentée (figure 5) a la même capacité (0,1 microfarad), le même coefficient de self induction (50 millihenrys) et la même résistance (10 ohms) que 10 milles de fil téléphonique de 4,2 mm de diamètre. La distance entre les deux joues de la bobine est de 76 mm. Cette bobine est capable d'emmagasiner autant d'énergie d'une onde électrique qu'un fil téléphonique de 10 milles de longueur.

Si on place une telle bobine dans le trajet d'une onde électrique donnée, l'onde avancera sur l'espace de 76 mm dans le même temps qu'elle mettrait à parcourir 16,52 km.

Il a relié ensemble 24 bobines identiques représentant donc 240 milles.

Or une fréquence de 1 000 Hz correspond à 140 milles environ (fil de 4,2 mm), soit 14 bobines.

L'onde suit une trajectoire en spirale dans la bobine, l'axe de la spirale est égale à la longueur de 14 bobines soit 106 cm, la vitesse rectiligne de l'onde a donc été réduite de plus de 200 000 fois ! Le système tient dans un laboratoire et fournit 25 points de mesures. Ce premier dispositif expérimental était disponible dans le laboratoire de M. Pupin. Cependant ses résultats ont été décevants et il a fallu construire un autre modèle de conducteur à propagation lente qui reçut le nom de « conducteur pupinisé ».

Il y a, dans le nouveau dispositif, 400 sections, chaque section ayant la même capacité, la même self induction et la même résistance qu'un fil téléphonique de 4,2 mm d'une longueur de 2,5 milles. Il est donc équivalent, pour les fréquences allant jusqu'à plus de 1 000 Hz à un circuit téléphonique de 1 000 milles, soit 1 609 km.

Cette nouvelle bobine (figure 6) est essentiellement une self induction de caractéristique $L=12,5$ millihenrys, $R=2,5$ ohms.

M. Pupin se pose et répond à deux questions théoriques :

- « *Quelle variation subit l'énergie ondulatoire durant sa propagation de l'appareil transmetteur à l'appareil récepteur ?* » ;
- « *Quels sont les moyens que la théorie suggère pour mesurer la longueur d'onde et la vitesse de propagation des ondes électriques longues qui accompagnent les oscillations électriques forcées ?* »

Il se pose aussi des questions pratiques :

- « *Réduire cette absorption [d'énergie par la ligne] à un minimum sans accroître le coût de la ligne au-delà de limites prohibitives est le but dernier de la transmission électrique à longue distance ?* »

Et aussi la question suivante, qui est « *de savoir à quelles conditions un conducteur pupinisé... équivaut approximativement à un fil homogène* ».

La réponse mérite d'être un peu plus détaillée. Les études de M. Pupin ont conduit à la mise au point du conducteur pupinisé, c'est-à-dire disposant avec des charges localisées d'un conducteur avec une self importante. Le traitement mathématique des dispositifs expérimentaux utilisés, qui n'a ici absolument pas été abordé, donne une solution approchée, avec les notations habituelles, sauf A qu'on nomme b et S qui représente l'isolement habituellement notée G comme dans la formule tirée du cours de transmission de Prache et Jannes, et qui, pour les câbles souterrains se réduisait à :

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \left(1 + \frac{SL}{CR} \right)$$

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Ces éléments connus avant Pupin permettent de calculer la charge additionnelle nécessaire à l'obtention d'un affaiblissement donné avec une ligne homogène donnée.

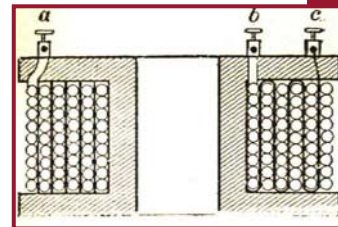


Fig. 5. — *Annales des PTT, juin 1911, supplément, p. 53.*

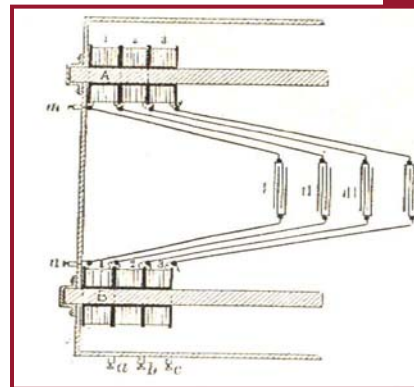


Fig. 6. — *Annales des PTT, juin 1911, supplément, p. 60.*

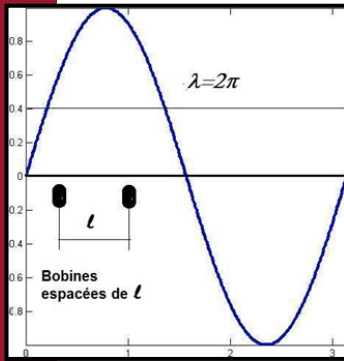


Fig. 7. – Dessin P. Arcangeli.

Mais ces résultats sont valables pour un conducteur homogène à paramètres répartis, ce que n'est pas un conducteur pupinisé. Il considère un signal de fréquence f et de longueur d'onde λ , cette longueur d'onde correspond à une distance angulaire égale à 2π (figure 7). Les bobines additionnelles, dites bobines Pupin, sont réparties régulièrement le long de la ligne homogène à une distance fixe égale à L .

À cette distance correspond un angle φ selon la formule suivante $\varphi/2\pi = L/\lambda$. φ est appelé la distance angulaire entre les points d'inductance. La loi s'exprime alors : un conducteur non homogène est sensiblement équivalent au conducteur homogène correspondant comme $\sin(\varphi/2)$ l'est à $\varphi/2$. Cette formule théorique, une fois traduite en termes pratiques, permet de construire des lignes à charge inductive augmentée, qui dans un domaine donné de fréquence, se comporte comme un conducteur homogène, c'est-à-dire dont on suppose la charge localisée répartie tout au long de la ligne, en plus de la self

normale. Les selfs ponctuelles vont introduire une fréquence de coupure au delà de laquelle le signal sera totalement atténué.

Il fut estimé que ce rapport pourrait être de 1,05. Une fois le brevet déposé par M. Pupin, puis rapidement vendu à la Bell, il fallait passer de la théorie à la pratique ; cela va prendre près de 10 ans !

Charge Pupin, câbles chargés

Dans le langage courant des transmetteurs, on rencontre souvent la notion de charge. Elle vient de M. Pupin lui-même, pourquoi ? On peut risquer une explication : Pupin indique que ses travaux ont été inspirés par ceux de Lagrange sur les cordes de masse nulle mise en vibration par un diapason, sur lesquelles on dispose à intervalles réguliers de petites masses. Les deux dessins ci-dessous toujours extraits des mémoires de M. Pupin sont explicites (figures 8 et 9).

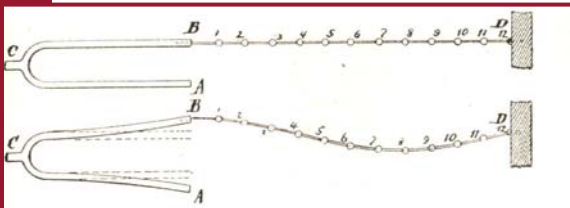


Fig. 8. – Ligne sans charges.
Annales des PTT, juin 1911, supplément, p. 70.

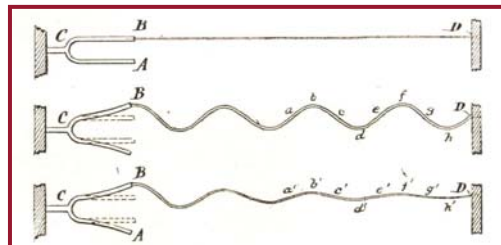


Fig. 9. – Ligne chargée.
Annales des PTT, juin 1911, supplément, p. 71.

PREMIÈRES MISES EN ŒUVRE

La mise en œuvre en Europe se fait lentement, mais on commence avant 1910 à relier des villes dont la distance peut aller jusqu'à 100 km avec des câbles souterrains.

Outre l'augmentation de la portée des communications, c'est l'économie de cuivre et donc du coût de construction des lignes qui est mise en avant.

On a vu qu'avec des fils de 5 mm, on peut téléphoner à 1 500 km environ, cela couvre les besoins internes des pays européens, voire même à partir de Paris pour communiquer avec Bruxelles, Londres, Rome ou Berlin.

On estime (en 1910) qu'on pourrait obtenir avec du fil de 2,5 mm pupinisé la même portée qu'avec du fil de 4,5, moyennant un surcoût dû aux pupins de 25 % du prix du cuivre, économie considérable.

Des inconvénients sont tout de même mis en avant, en particulier, l'isolement des fils a plus d'influence sur les lignes pupinisées que non. Cette influence se fait d'autant plus sentir que le diamètre des fils grossit. La limite d'intérêt, pour une ligne ayant un isolement kilométrique de 1 mégohm, semble être 5 mm, avec un gain de 28 % sur l'affaiblissement, ce qui est faible.

Pour les États-Unis, les données fournies pour la ligne de Chicago semblent indiquer un isolement moyen supérieur à 1 mégohm. De fait, les sources donnent que dans la partie nord des États-Unis, l'isolement atteint 16 mégohms par km.

Il y a donc un diamètre pour lequel il n'est plus utile d'augmenter par la pupinisation de la ligne, il varie d'ailleurs avec l'isolement. La pupinisation des lignes aériennes sera donc en général partielle ; c'est-à-dire d'une valeur inférieure à celle qui donnerait l'affaiblissement minimum.

Reste à examiner l'influence de l'isolement sur une ligne en fil de cuivre de 4 mm, sans bobine pupin par des mesures et avec par le calcul. On obtient :

Isolement mégohms	Sans pupins en millineper	Avec pupins tous les 10 km millineper	Gain de la pupinisation
10	2,19	1,18	- 46 %
5	2,32	1,47	- 37 %
1	2,49	1,84	- 26 %
0,670	2,65	2,21	- 17 %
0,5	2,82	2,58	-9 %

Dès que l'isolement baisse, les gains de la pupinisation disparaissent. Or les lignes aériennes en Europe ont souvent un mauvais isolement.

▪ **EN ANGLETERRE**

Évaluation d'un gain de 310 % pour l'affaiblissement des câbles souterrains, et on a construit une liaison entre Manchester et Liverpool 54 km en câble souterrain (*Annales des PTT*, 1922, pp. 114-149).

▪ **EN SUÈDE**

Liaison Stockholm – Uppsala, 70 km.

▪ **AUX ÉTATS-UNIS**

Les laboratoires Bell travaillent sur les câbles souterrains et, un câble New York – Washington est en cours de construction en 1910, et un New York – Boston 300 km est à l'étude.

Ils travaillent aussi sur les lignes aériennes, il faut joindre New York à San Francisco et, en 1911, Denver est atteinte (figure 10).



FIG. 10. – *Annales des PTT*, juin 1911, p. 103.

▪ **EN ALLEMAGNE**

Premier essai fait avant 1909 entre Berlin et Magdebourg, sur 150 km (ligne aérienne).

Nouveaux essais entre Berlin et Francfort sur 580 km. Nous possédons un compte rendu des mesures faites lors de ces essais réalisés début 1909. Mais, tout d'abord, il faut faire un point sur les systèmes de bobines de charges (figures 11 et 12).

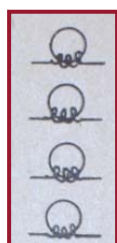


FIG. 11. – *Cours de LSGD*, 1948, p. 117.

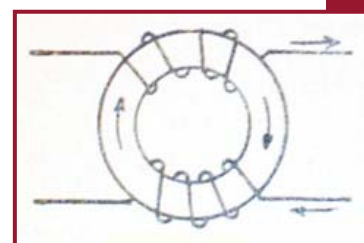


FIG. 12. – *Système à une bobine. Cours de LSGD*, 1948, p. 117.

Le premier système de charge consiste à placer une bobine de même inductance L sur chacun des fils de ligne. L'inductance additionnelle sera de $2L$ sur les réels et L sur le fantôme. L'inconvénient de ce système est double, d'une part la pupinisation des fantômes n'est pas optimum, ce point sera explicité plus loin, d'autre part, les variations de l'inductance avec le temps ne seront pas les mêmes pour chaque charge et cela introduit une dissymétrie du circuit, donc un risque de diaphonie. Ce système n'a que peu été utilisé. Il a été remplacé par un système dit à bobine double, qui assurait mieux la tenue dans le temps des caractéristiques des lignes, mais ne permettait pas toujours d'exploiter les fantômes.

Les trois croquis ci-dessous (figures 13, 14 et 15 extraites de *La Nature*, 1911, p. 244) illustrent : une bobine simple, le montage d'une bobine double et la constitution d'une boîte pour un groupe avec deux bobines doubles et quatre parafoudres.

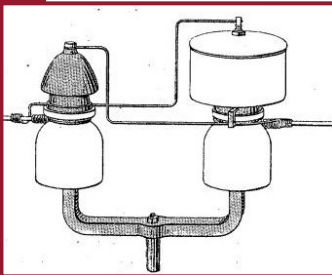


FIG. 13. — Équipement à bobine simple (ligne Berlin – Stralsund).

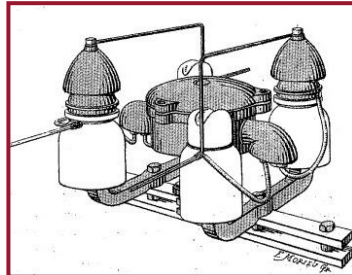


FIG. 14. — Appareillage à bobines doubles et parafoudres séparés (ligne Berlin – Magdebourg).

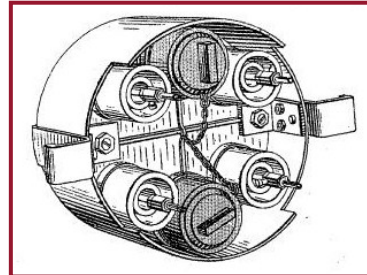


FIG. 15. — Appareillage à bobines doubles avec parafoudres ; l'ensemble ne protège pas le chapeau métallique.

La comparaison porte sur trois circuits :

- un circuit en fils de bronze de 2,5 mm pupinisé, mais des mesures seront faites sans les pupins ;
- un circuit en fils de bronze de 4 mm ;
- un circuit en fils de bronze de 5 mm d'une longueur de 540 km, sans doute par un autre itinéraire.

Les bobines de 110 millihenrys sont montées tous les 5 km et ont une résistance de 8,7 ohms.

Lignes	Résistance de boucle par km en ohms	Self en millihenrys par km	Affaiblissement par km en millinepers	Affaiblissement total des circuits en nepers
Bronze 5 mm	1,92 Ω	1,86	1,76	0,95
Bronze 4 mm	3 Ω	1,94	2,62	1,52
Bronze 2,5 mm	7,7 Ω	2,14	5,91	3,43
Bronze 2,5 mm pup	11,18 Ω	46,1	1,93	1,12

La ligne pupinisée de 2,5 mm a le même coefficient d'affaiblissement qu'une ligne non pupinisée de 4,7 mm, l'économie de cuivre est considérable. Compte tenu des raccordements à une ligne urbaine pour joindre le bureau, la ligne pupinisée de 2,5 mm est toujours au moins équivalente à la ligne ordinaire de 4 mm. À cette occasion, les contenants abritant les bobines pupins furent améliorés, en étanchéité et en protection contre la foudre : essais de contenant cylindrique d'une capacité de 56 bobines. L'économie est considérable, si on compare en coût de la ligne de 3 mm qui, compte tenu des réflexions est toujours équivalente à la ligne de 4,5 mm, le coût moyen du bronze étant de 2,15 F le kg (en 1910), le km de fil de 4,5 mm est alors de 625 F, celui de la ligne de 3 mm est de 275 F, les bobines coûtent 65 F par km, la ligne pupinisée coûte donc, 340 F le km, l'économie est de 285 F.

Pour les lignes allemandes, voici les affaiblissements kilométriques obtenus.

Diamètre	lignes non pupinisées	lignes pupinisées	gain
3 mm	0,00465	0,00207	- 55 %
4 mm	0,00300	0,00159	- 47 %
4,5 mm	0,00245	0,00143	- 42 %
5 mm	0,00219	0,00132	- 40 %

▪ EN AUTRICHE

Les essais portent sur l'amélioration mécanique des contenants de bobines pupins. En particulier, ils sont remplis d'une substance isolante. Sur des améliorations électriques, utilisation de bobines doubles enroulées sur un même noyau, au lieu de bobines simples, celles-ci ayant été trouvées très perturbées par les lignes de transport d'énergie. On constate alors un gain même si les lignes n'ont que 90 km.

La ligne Vienne – Innsbruck longue de 549,3 km a un fil de 3 mm en bronze ; celle de Vienne – Lemberg longue de 774 km a un fil de 4 mm en bronze. La caractéristique de la pupinisation est d'un pas de 8 km pour la première ligne et de 10 km pour l'autre avec des pupins de 100 millihenrys.

La ligne Vienne – Innsbruck est équivalente à une ligne de bronze de 5 mm. Cependant cette ligne n'est pas homogène. On trouve sur son itinéraire 24,7 km de câble avec des fils de 0,8 mm dont 8,7 km non pupinisés. L'autre ligne est entièrement aérienne et les communications y sont meilleures. Cependant cette ligne est un peu moins bonne que la ligne aérienne en fils de 5 mm qui n'est interrompue que par une seule station intermédiaire (Krakau). Des essais d'aboutement de ces deux lignes ont été faits : Innsbruck – Krakau, 1 000 km à peine faisable, Innsbruck – Lemberg 1 353, impossible.

Si l'isolement de la ligne baisse jusque 100 Kohms, l'affaiblissement kilométrique augmente un peu de 0,180 centineper à 0,188 centineper.

Mais M. Lorain dans un rapport de visite en Allemagne et en Autriche, publié dans les *Annales des PTT* de septembre 1913, rapporte que « *le circuit de 3,5 mm pupinisé entre Vienne et Innsbruck a dû être remplacé par un circuit en fils de 5 mm !* »

▪ CÂBLE SOUS-MARIN ANGLETERRE – FRANCE

En 1910, un câble sous-marin pupinisé est posé entre l'Angleterre et la France. Il mesure 21 milles nautiques, les pupins de 100 millihenrys sont espacés de 1 852 m.

▪ EN FRANCE

En 1910, essais de lignes souterraines pupinisées dans les cas suivants :

1) Lignes interurbaines de grande banlieue

Entre autres, Versailles et Saint-Germain-en-Laye sont reliés à Paris par des lignes aériennes et des câbles sous papier avec des fils de 1 mm.

2) Lignes auxiliaires interurbaines

Les lignes auxiliaires sont les liaisons entre les bureaux interurbains et urbains, qui peuvent avoir 8 km de long constituées de fils de 1 mm. Si les câbles amorces des lignes aériennes sont pupinisés, il faudra aussi pupiniser les lignes aériennes pour maintenir une audition correcte.

Un câble pupinisé est prévu entre Paris et Versailles d'une capacité de 56 paires dont 28 paires 1 mm pour les circuits de Versailles et proche banlieue et 28 paires combinables moitié 1 mm moitié 1,5 mm. L'utilisation de ces dernières paires est pour les prolongements des lignes vers Brest, les plus forts diamètres étant réservés aux lignes les plus longues. Un premier câble pupinisé à grande distance est projeté entre Paris et Lille, mais nous sommes en 1914.

L'APPLICATION AUX CÂBLES SOUTERRAINS

Nous allons nous intéresser exclusivement à la France.

En Europe, la première guerre mondiale va ralentir le développement des télécommunications civiles et leur développement en France a pâti des destructions massives que l'armée allemande a causées dans les zones occupées. Priorité à la reconstruction : le développement du réseau commence à partir de 1925. Auparavant, le président de la société britannique des ingénieurs électriciens, M. Franck Gill, dans un discours (*Annales des PTT*, 1923, p. 62), constate que l'inorganisation en Europe des télécommunications à grande distance empêche le développement du service international. Il préconise : 1. de fonder une organisation de téléphonie à grande distance qui exploiterait avec l'autorisation des gouvernements, toutes les lignes téléphoniques à longue distance en Europe – 2. de confier la direction du service téléphonique européen à une Commission dont les membres seraient nommés par les gouvernements intéressés –

3. de fonder une association qui grouperait toutes les autorités exploitant des téléphones en Europe ; celles-ci discuteraient le problème qui vient d'être posé, et beaucoup d'autres exigeant pour la plupart une parfaite unité d'action.

Du 12 au 20 mars 1923, se réunit à Paris un comité technique préliminaire pour la téléphonie à grande distance en Europe, avec six pays : Belgique, Espagne, France, Grande-Bretagne, Italie et Suisse (*Annales des PTT*, 1923, pp. 1016-1061).

Il rend de multiples avis, dont j'en extrais trois :

- que les lignes téléphoniques aériennes munies de relais amplificateurs et affectées aux relations internationales ne soient pas pupinisées ;
- que l'on obtiendrait des résultats satisfaisants en utilisant pour les communications en câble à grande distance, des circuits à 4 fils chargés, bobines de 44 millihenrys placées tous les 1 830 mètres ;
- que l'on obtiendrait des résultats satisfaisants pour les communications téléphoniques à une distance égale ou inférieure à 500 km, en utilisant des circuits à 2 fils chargés, bobines de 176 millihenrys placées tous les 1 830 mètres.

Les premières réalisations en France (certaines sous licence et fournitures américaines) sont conformes à ces préconisations.

On se lance dans l'aventure alors que la question de la pupinisation du circuit combiné aura été réglée tout d'abord avec des pupins à quatre bobines puis avec des pupins à trois bobines (figures 16 et 17). Ces dernières restent utilisées jusqu'à l'obsolescence de la technique. La technique de la combinaison des circuits permet, avec un circuit à quatre fils, d'acheminer trois conversations simultanées, deux circuits combinants appelés parfois réels, et un circuit combiné appelé parfois fantôme, selon le schéma figure 18.

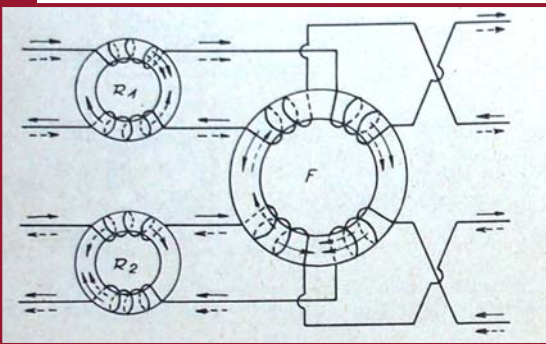


FIG. 16. - Système à trois bobines.
CROZE (R.) et SIMON (L.), *Transmission téléphonique.*
Théorie des lignes, Eyrolles, 1956, p. 163.

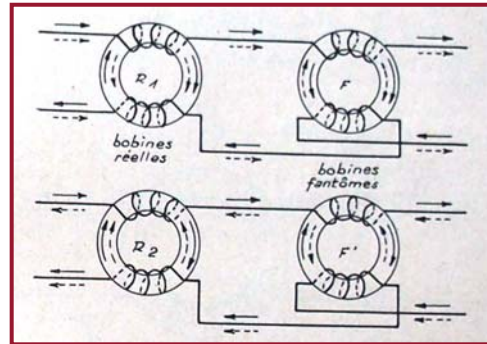


FIG. 17. - Système à quatre bobines : en traits pleins, courants et flux des circuits réels ; en traits pointillés, courants et flux du circuit fantôme.
CROZE (R.) et SIMON (L.), *Transmission téléphonique.*
Théorie des lignes, Eyrolles, 1956, p. 164.

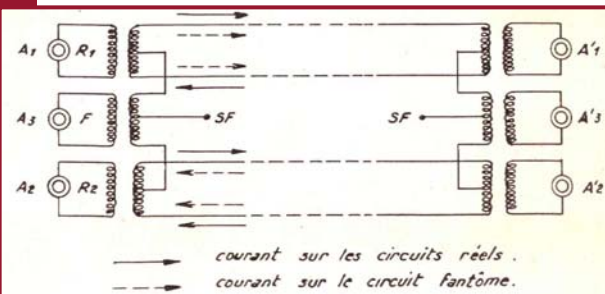


FIG. 18. Formation du circuit fantôme.
CROZE (R.) et SIMON (L.), *Transmission téléphonique.*
Théorie des lignes, Eyrolles, 1956, p. 28.

En mars 1925, un câble Lyon - Saint-Étienne est posé, il comporte 19 quarts en fil de 1 mm.

Quinze quarts sont pupinisés avec des pupins de type quatre bobines, 176/106, quatre quarts avec des bobines unifilaires de 88 mh (voire 5). Le câble Paris - Strasbourg est mis en service en avril 1936 (historiquement, il porte le numéro 1, sa pose a débuté en mars 1924). Il est équipé de deux types de pupins à quatre bobines : la charge H177/107 (appelée charge moyenne), la charge H44/25 (charge

légère), H signifiant « pas » (distance entre deux points de pupinisation) de 1 830 mètres, on utilisera plus tard un pas noté B de 930 mètres. Si on compare une ligne H177 et une ligne B88 de même longueur et de même diamètre de fils, on constate que la self additionnelle totale étant la même dans les deux cas, l'affaiblissement sera le même. Mais, la ligne B, avec deux fois plus de points de charge que la ligne H, sera un peu plus proche de la ligne homogène, cela se traduira par une bande passante meilleure d'un facteur $\sqrt{2}$ (voir le deuxième tableau qui suit).

LES ÉVOLUTIONS ULTÉRIEURES

Les charges H177/107 et H44/25 étaient adaptées au contexte américain. La technologie des pupins à quatre ou trois bobines est telle que la valeur de la charge du circuit combiné peut être quelconque ou presque. Un réel 0,9 mm chargé H 177 a un affaiblissement kilométrique de 0,17 dB pour une fréquence de coupure de 2 850 Hz ; pour un fantôme H107, c'est 0,136 dB et 2 870 Hz. Ces caractéristiques sont bien adaptées pour une exploitation où le critère distance est primordial, en effet, le circuit fantôme a la même bande passante que le circuit réel, mais un affaiblissement 20 % plus faible, donc une portée 20 % plus élevée. Pour profiter de ces meilleures performances, il faut amplifier les circuits fantômes dans des bâtiments différents des circuits réels, ce qui implique un surcoût qui n'est justifié que pour les liaisons importantes. On remarque sur le tableau que la vitesse de propagation est de 16 400 km/sec sur les réels ; un conducteur pupinisé est bien un conducteur à propagation lente.

Dès 1927-1928, en France, on fait un autre choix et on adopte la charge H177/63 qui donne le même affaiblissement (0,175dB) pour le fantôme et pour les réels. On passe de même de la charge H44/25 à la charge H44/18.

Mais la bande passante (environ 70 % de la fréquence de coupure) de ces premiers câbles, dès la fin des années 1920, est apparue trop faible. Pour obtenir des circuits de meilleure qualité, il fallait l'augmenter jusqu'à 4 000 Hz. Ce qui est fait avec la charge H88/36, son affaiblissement était un peu plus élevé (0,208 dB) mais la maîtrise atteinte de l'amplification permettait de traiter ce petit inconvénient. De même, on a adopté la charge H22/9 au lieu de H44/18 pour des questions de vitesse de propagation, cette valeur permettant de construire des circuits de 1 000 km de long sans que l'écho ne gêne la communication.

La figure 19 montre une unité H88/36 K9A provenant du câble Le Mans – Rennes.

Les deux tableaux suivants donnent pour le premier l'évolution physique des unités sur un peu plus de 20 ans. Le suivant donne les caractéristiques électriques pour les câbles de construction française du réseau français (on pourrait donner un autre tableau pour les câbles posés par les Allemands durant la seconde guerre mondiale).



FIG. 19.
Photo P. Arcangeli.

Années	1925	1927	1928	1931	1942	Interméd. non utilisé	1948
Nombre de bobines de l'unité	4 (Capots individuels)	4 (Capots individuels)	3 (Capots individuels)	3 (Capots individuels)	3 (Capots individuels)	3 (Capot commun)	3 (Capot commun)
Type du noyau L. T. T.	K7	K14 A et B	K14C	K9A	K21	K19E (P. T. T. 0 1 ^o)	K103bis
Type du mélange L. T. T.	P30 (ancien)	P30 (ancien)	P30 (ancien)	P40 P49, P19	P46 P49, P21	P49 P31	P49 P31
Φ_u (mm)	145	122	122	110	98	75,5	67
H_u (mm) ¹⁾	248	264	198	180	159	107	106
V_u (cm ³)	4100	3100	2300	1820	1250	500	394
V_{u1} (cm ³) ²⁾	5200	3950	2450	2180	1530	610	475
Poids (kg) ^z	13,5	9,0 (K14A) 7,4 (K14B)	7,5	5,6	4,1	1,74	1,37

1) Φ_u (mm) est le diamètre du cercle circonscrit, égal au côté du carré inscrit, H_u (mm) est la hauteur totale de l'unité.
2) V_{u1} (cm³) est le volume du parallépipède circonscrit.

Fig. 16. — Série d'unités de charge montrant la réduction de l'encombrement au cours du temps.

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES CIRCUITS TELEPHONIQUES EN CABLES PUPINISES DU RESEAU FRANCAIS													
TYPE DE CHARGE	Nature du circuit	Inductance des Bobines m.H.	Impédance caractéristique		Fréquence de coupure mesurée Hz	Vitesse de propagation à 800 Hz calculée Km/s	Affaiblissement Kilométrique en décibel (valeurs moyennes mesurées) pour conducteurs de diamètre(en mm)						OBSERVATIONS
			Valeurs calculées de \sqrt{LC} Ω	Valeurs moyennes mesurées à 800 Hz Ω			0,9 Cu	1,1 Cu	1,2 Cu	1,3 Cu	1,4 Cu	1,8 Cu	
H 177 (si-forte)	réal	177	1590	1680-j100	2850	16.400	0,170	0,120	0,104	0,092			
	fantôme	107	970	970-j 40	2870	15.500	0,136			0,078			
	fantôme	63	740	800-j 70	3700	21.300	0,175	0,122	0,108	0,091			
H 110	réal	110	1250		3800	21.900	0,208			0,113			PARIS-LILLE
	fantôme	44	620		4800	27.400	0,208			0,113			
H 88 (allégée)	réal	88	1120	1160-j100	4050	23.300	0,217		0,132	0,111			H.9 : Radio occasionnel
	fantôme	36	560	600-j 80	4900	28.200	0,214		0,130	0,108			
	fantôme	9	280	330-j150	9800	56.400	0,363		0,231				
H.44 (légers)	réal	44	790	830-j170	5700	32.800	0,299	0,205	0,173	0,155			Circuits à 2 voies
	fantôme	25	470	480-j 90	5900	34.000	0,241						
	fantôme	18	400	420-j100	6800	39.100	0,287	0,196	0,168	0,151			
H.22 (extra légère)	réal	22	560	620-j220	8000	46.000	0,379						Circuits à 4 voies
	fantôme	9	280	330-j150	9800	56.400	0,405		0,233				
H. 2,8 (câblage en paires)	réal	2,8	200	250-j100	21800	125.000					0,309	0,227	Circuits à 4 voies
											0,355	0,247	
											0,388	0,267	
											0,406	0,290	
											0,417	0,306	
											0,427	0,323	
B 88	réal	88	1580	1600-j100	5700	16.400	0,178						
	fantôme	36	750	800-j 80	6800	19.500	0,171						

Nota : Les valeurs d'affaiblissement correspondent dans l'ordre, de haut en bas, à 800-2000-4000-8000-10000-12000-14000-16000 Hz

Source : Aide-mémoire des lignes, DTRN, mai 1972.

La fin des années 1930 marque la pleine maîtrise de cette technique qui va accompagner et permettre le service universel.

Mis au point dans les années 1930, les câbles coaxiaux vont bouleverser le panorama de la transmission à grande distance avant l'arrivée des faisceaux hertziens dans les années 50, puis celle de la fibre optique dans les années 80. Mais cela ne conduit pas immédiatement à l'obsolescence de la technique, et même pendant des années (jusque dans les années 70), on construit des câbles mêlant des paires coaxiales et des paires pupinisées.

À partir de 1933 environ, la mise en œuvre du plan Ferrié s'accompagne de l'utilisation de la charge B22 voire B9 pour la constitution de circuits de radiodiffusion pour alimenter les émetteurs régionaux. On obtient alors des circuits ayant une fréquence de coupure de 11 200 Hz pour B22 et 17 600 Hz pour B9 ; les fils utilisés avaient des diamètres allant de 1,3 à 1,8 mm.

L'automatisation du réseau s'accompagne de la suppression progressive des artères aériennes en fils nus, remplacées par des câbles autoportés, mais aussi le plus souvent souterrains. On utilisa, pour ces circuits relativement courts, cette technique destinée initialement aux circuits longs, par la pose de dérivations plus ou moins longues, par le passage en coupure dans des petits commutateurs de câbles délestés de tout ou partie de leurs circuits interurbains. On pupinisa aussi des câbles de réseaux urbains de diamètre 0,8 mm, avec des charges H44 puis H57. Ensuite, on dépupinisa les câbles pour les numériser. Le pas de pupinisation était une contrainte pour le débit numérique utilisable et pour le lieu d'implantation des pots contenant les répéteurs numériques. Aujourd'hui restent encore, ici ou là, des câbles en exploitation, pour combien de temps encore ?

CONCLUSION

Le travail théorique de M. Pupin, qui a été rapidement mis en pratique, a permis de dépasser la limite de portée des communications sur les artères en fils nus tout d'abord, sur câbles souterrains ensuite, permettant de lever un blocage qui dura 20 ans.

« La contribution de Pupin ne tient pas dans la reconnaissance du rôle essentiellement positif de la self, on a vu que d'autres l'avaient compris avant lui, mais dans la façon de placer ces selfs sur les lignes. »

Les mauvaises performances de l'isolement des fils nus, mais surtout la grande variabilité de cet isolement a rapidement conduit à l'abandon de la technique pour les lignes amplifiées.

En revanche, les progrès technologiques ont permis de l'appliquer aux câbles souterrains de grande capacité.

Cependant la pupinisation, si elle est un progrès décisif, n'est pas suffisante. Deux autres innovations dont les développements sont contemporains mais qui ont en fait une origine antérieure : l'amplification et les systèmes à courant ont été nécessaires pour que la distance soit définitivement vaincue et que soit envisagé un véritable service universel. Mais c'est une autre histoire.

Bibliographie et illustrations

- *Les Annales des PTT* de 1910 à 1939 contiennent environ 80 articles sur la pupinisation. Ainsi que la traduction in extenso des mémoires de M. Pupin et Campbell.
- À partir de 1947, *Câbles et transmissions* est la *Revue du transmetteur*, en particulier l'année 1949 avec un article sur 25 ans de téléphonie à grande distance.
- Les cours de Transmissions de L'ENST contiennent tous les développements théoriques de la technique, développements très peu utilisés dans cette communication. Je citerai ceux de M. Croze, P.-M. Prache, H. Jannes, M. Troublé, G. Clavaux.
- *Genèse et croissance des télécommunications* de L.-J. Libois fournit des éléments historiques intéressants.
- La revue *La Nature*, année 1911.
- *L'aide-mémoire des lignes* de la DTRN, mai 1972.