

Mihajlo Idvorsky Pupin

Mihajlo (Michael) Idvorski Pupin (1858-1935) est un physicien serbe.

Mihajlo Pupin a parcouru un long chemin depuis ses humbles débuts dans le village d'Idvor, dans ce qui est aujourd'hui la Serbie, jusqu'à ses vacances d'été dans son somptueux domaine à l'ouest de Norfolk, dans le Connecticut - après être devenu un inventeur de renommée mondiale et lauréat du prix Pulitzer de lettres en 1924. Né le 9 octobre 1858 dans une famille de paysans illettrés, Pupin passa ses étés d'enfance dans les pâturages vallonnés des environs d'Idvor, où il était berger, protégeant le bétail des voleurs roumains nocturnes. Durant ses longues nuits passées à surveiller les troupeaux, il observa qu'enfoncer son long couteau à manche de bois dans le sol et l'enfoncer créait des vibrations souterraines qui lui permettaient de localiser de loin le bétail errant. Pupin comprit que les vibrations sonores portaient plus loin sur un sol dur ; c'est ainsi qu'il eut sa première idée fascinante de l'invention qui, vingt-cinq ans plus tard, allait faire sa renommée et sa fortune aux États-Unis.



Bien qu'illettrée, sa mère, Olimpijada, l'envoya dans une école supérieure d'un village voisin. C'est là qu'il découvrit les expériences de Benjamin Franklin avec les cerfs-volants et l'électricité, ce qui éveilla son imagination fertile. Pour échapper aux troubles politiques locaux, son église l'envoya plus tard dans une école à Prague, après deux jours de voyage sur le Danube et un jour en train depuis Budapest.

Alors qu'il était à Prague, le père de Pupin, Constantin, mourut subitement. Pupin voulut rentrer chez lui et s'occuper de sa mère, mais elle refusa d'en entendre parler. Une annonce dans un journal pour une place d'entrepreneur sur le navire Westphalia, reliant Hambourg à New York, poussa Pupin à vendre tous ses biens sur un coup de tête et à acheter un aller simple pour l'Amérique.

Après une traversée de l'Atlantique de deux semaines, mouvementée et mouvementée, il débarqua à Castle Garden, à New York, en 1874. C'était un jeune novice de quinze ans, avec cinq cents en poche et sans aucune connaissance.

À New York, des emplois subalternes étaient accessibles aux immigrants, mais, sur un coup de tête, Pupin s'engagea comme ouvrier agricole dans une ferme du Delaware, où il apprit l'anglais auprès de la fille du fermier. De retour à New York à l'automne, Pupin pelleta du charbon avant de décrocher un emploi à la New England Cracker Company, rue Courtland à Manhattan, où il apposa le nom de l'entreprise sur une multitude de crackers nature. Le soir, il profitait des cours gratuits de la Cooper Union et passait des heures à la bibliothèque à lire les classiques. Il devint alors obsédé par le tableau « Les Hommes du Progrès » de Christian Schussele, accroché au mur, représentant dix-neuf inventeurs américains, tels que Samuel F.B. Morse, Charles Goodyear et Samuel Colt, qui, grâce à leurs inventions, ont considérablement fait progresser la civilisation moderne.

À Columbia, Pupin s'est imposé comme un élève exceptionnel et, dès sa première année, a obtenu des bourses de 100 dollars en grec et en mathématiques. Fort de sa force physique, grâce au pelletage de charbon et à la coupe du foin, il a remporté le championnat de lutte poids lourd de Columbia et a excellé en équipe. En troisième année, il a été élu président de sa promotion.

À l'époque, Columbia était un nid de snobs qui adoraient faire la fête et faire du sport. Pupin gagnait un peu d'argent en donnant des cours particuliers à ces retardataires, aidant ainsi le fils du célèbre astronome Lewis Morris Rutherfurd à terminer ses études universitaires. Rutherford était si reconnaissant qu'il finança la candidature de Pupin à l'université de Cambridge à Londres pour y étudier les mathématiques.

Depuis l'époque où il était berger à Idvor, Pupin était fasciné par la lumière et le son, qu'il considérait comme des « méthodes divines de parole » divines. À l'université, il étudia et imita de brillants scientifiques du XIXe siècle, tels que Michael Faraday et James Clerk Maxwell, qui firent des avancées majeures dans la compréhension et l'exploitation des mystérieuses forces électromagnétiques de l'univers.

Pupin devint citoyen américain en 1883, deux jours avant d'obtenir son diplôme avec mention de Columbia, qui lui offrait une bourse d'études supérieures en sciences et lettres de trois ans, à 500 dollars par an. Il déclina l'offre et préféra Cambridge, où l'école de mathématiques était considérée comme la meilleure au monde.

Pupin fit ses preuves au King's College de Cambridge, mais trouva les méthodes d'enseignement mathématiques standardisées du tripos peu stimulantes. Après avoir écourté son séjour à Cambridge, il s'inscrivit à l'Université de Berlin pour étudier auprès du physicien et inventeur divin Hermann von Helmholtz, l'un des esprits les plus brillants du XIXe siècle, qui révolutionna l'ophtalmologie et découvrit le principe de conservation de l'énergie. Pupin charma Helmholtz par ses récits de son enfance de paysan en Serbie et par son esprit curieux et agile.

En 1886, Pupin obtint son doctorat en philosophie de von Helmholtz, avec une thèse intitulée « Pression osmotique et énergie libre »

Pupin s'est vu offrir un poste de professeur de physique mathématique à Columbia dans le nouveau département de génie électrique à 2 500 \$ par an, poste qu'il a accepté avec enthousiasme.

Au début de ses études, il épousa Sarah Katherine Jackson, la sœur d'un camarade de classe, à la cathédrale grecque orthodoxe de Londres.

De retour à New York, Pupin se consacra à son travail de professeur tout en travaillant de longues heures la nuit dans un laboratoire rudimentaire de Columbia, expérimentant sur les rayons X, phénomène scientifique du milieu des années 1890. En décembre 1895, Wilhelm Roentgen développa les premiers rayons X en Allemagne. Seulement deux semaines plus tard, un avocat new-yorkais qui s'était accidentellement tiré une balle dans la main fut amené dans le laboratoire de Pupin. Grâce à des papiers phosphorescents offerts par son ami Thomas Edison,

Pupin a réalisé une radiographie de la main de l'homme en quelques secondes seulement, accélérant le processus de Roentgen de plusieurs heures. Pupin était devenu un nom dans le monde scientifique.

Deux mois plus tard, Pupin traversait Central Park pour se rendre à l'Université Columbia, plein de joie et d'optimisme. Au milieu de son premier cours, il s'effondra, probablement à cause de la fatigue et de l'exposition au radium, et tomba dans le coma, victime d'une grave pneumonie. Après plusieurs jours de délire mortel, il sortit du coma pour apprendre que sa femme, qui le soignait, était décédée cinq jours plus tôt des suites de la pneumonie qu'il lui avait transmise.

Paralysé par le désespoir, Pupin souffrit d'une grave dépression nerveuse. Un ami médecin lui recommanda Norfolk, dans le Connecticut, où l'atmosphère rustique et le climat vivifiant pourraient apaiser sa profonde dépression. Pupin loua une maison face au mont Haystack et passa des semaines à contempler la vue apaisante depuis sa place. Mais sa dépression ne parvint pas à se dissiper.

Originaire de Norfolk, le Dr Frederic Dennis, un collègue de Columbia, tenta de remonter le moral de Pupin par des discours d'encouragement, en vain. Un jour, sur un coup de tête, le Dr Dennis se présenta à sa porte dans un rond-point jaune tiré par deux chevaux Cobb de son haras de Dennis Hill. Il lui confia les chevaux et lui dit qu'ils avaient besoin d'être dressés.

Ce fut le remède idéal. Pupin s'attacha immédiatement aux chevaux et se consacra à leur entraînement, une distraction bienvenue à son chagrin accablant. Peu après, les chevaux, Comet et Princess Rose, conduits par Pupin, remportèrent le premier prix au concours hippique du Madison Square Garden. Dix-huit mois après la mort de sa femme, se sentant suffisamment remis de son découragement, et pour le bien de sa fille unique, Varvara (Barbara), Pupin retourna à ses cours et à son laboratoire à Columbia.

Incapable de travailler avec les rayons X, qui, selon lui, avaient contribué à l'apparition de sa pneumonie, Pupin retourna à ses expériences électriques et à son travail acharné en laboratoire.

Il est décédé le 12 mars 1935 à New York.

La bobine de Pupin

Au début du XX^e siècle, la transmission téléphonique était possible jusqu'à une distance d'environ 30 km par câble et d'environ 2 000 km par lignes aériennes. Pour les transmissions téléphoniques sur de plus grandes distances, la capacité entre deux fils d'un câble ou d'une ligne aérienne devait être compensée par une inductance supplémentaire. À cette fin, la deuxième invention majeure pour la transmission par ligne, après le relais de Wheatstone, est due à Michael Idvorsky Pupin

Une bobine de charge, self d'adaptation ou bobine (d'induction) de Pupin est une bobine qui est insérée dans un circuit électronique pour augmenter son inductance. Le terme est apparu au XIX^e siècle pour désigner les bobines utilisées pour éviter la distorsion du signal dans les câbles de transmission télégraphique à longue distance. Le terme est également utilisé pour les bobines dans les antennes radio, ou entre l'antenne et sa ligne d'alimentation, pour rendre résonante une antenne trop courte électriquement à sa fréquence de fonctionnement.

Le concept de bobines de charge a été découvert par Oliver Heaviside en étudiant le problème de la lenteur de la vitesse de signalisation du premier câble télégraphique transatlantique dans les années 1860. Il en a conclu qu'une inductance supplémentaire était nécessaire pour éviter la distorsion de l'amplitude et du délai du signal transmis. La condition mathématique pour une transmission sans distorsion est connue sous le nom de condition de Heaviside (en). Les lignes télégraphiques précédentes étaient terrestres ou plus courtes et induisaient donc moins de retard, et le besoin d'une inductance supplémentaire n'était pas aussi important. Les câbles de communication sous-marins sont particulièrement sujets à ce problème, mais les installations du début du XX^e siècle utilisant des lignes symétriques étaient souvent chargées en continu avec du fil ou du ruban de fer plutôt que discrètement avec des bobines de chargement, ce qui permettait d'éviter les problèmes d'étanchéité.

Historiquement, les bobines de charge sont également connues sous le nom de bobines Pupin en référence à Michael Idvorsky Pupin, en particulier lorsqu'elles sont utilisées pour la condition de Heaviside, et le processus d'insertion de ces bobines est parfois appelé **pupinisation**

En 1899, devantant de justesse plusieurs scientifiques travaillant sur le même défi, il publia une étude intitulée « Propagation des ondes électriques longues » dans laquelle il proposait d'améliorer les lignes télégraphiques pour la transmission téléphonique par l'introduction de bobines à intervalles réguliers.

Pupin déposa un brevet pour une bobine d'induction qui, placée à intervalles précis sous terre (faisant écho à ses observations au couteau d'enfance), augmenta exponentiellement la portée des appels téléphoniques longue distance.

George **Ashley Campbell** était un ingénieur américain. Pionnier dans le développement et l'application de méthodes mathématiques quantitatives aux problèmes de la télégraphie et de la téléphonie longue distance, il a notamment contribué à la théorie et à la mise en œuvre de l'utilisation de bobines de charge et des premiers filtres d'ondes conçus selon la méthode qui allait devenir la méthode des images. Ces travaux ont permis à l'American Telephone and Telegraph Company (AT&T) de réaliser d'importants bénéfices économiques.

En 1897, Campbell entra au service d'AT&T à Boston. Il mit au point une méthode de transmission téléphonique analogique sur des distances bien plus importantes qu'auparavant, grâce à l'insertion de bobines de charge dans la ligne à intervalles soigneusement calculés afin d'augmenter l'inductance.

Mais **Pupin** breveta également un système similaire et AT&T lui versa une somme considérable pour ses brevets, permettant ainsi la poursuite du développement sans litige.

En réalité, ni Campbell ni Pupin ne furent les premiers à suggérer l'idée des bobines de charge ; cet honneur revient à **Oliver Heaviside** dans un article de 1887. Heaviside, cependant, ne breveta jamais cette idée ; il ne tira d'ailleurs aucun profit commercial de ses travaux brillants. Malgré les débats juridiques parfois complexes qui entourent cette affaire, il est incontestable que Campbell fut le premier à construire un circuit téléphonique utilisant des bobines de charge.

Une application courante des bobines de charge consiste à améliorer les caractéristiques de réponse d'amplitude sur le spectre sonore de la voix des paires torsadées symétriques dans un câble téléphonique. La paire torsadée étant un format symétrique, la moitié de la bobine de charge doit être insérée dans chaque branche de la paire pour maintenir l'équilibre. Il est courant que ces deux enroulements soient formés sur le même noyau. Cela augmente les liens de flux, sans lesquels le nombre de tours de la bobine devrait être augmenté. Malgré l'utilisation de noyaux communs, ces bobines de charge ne constituent pas des transformateurs, car elles n'assurent pas de couplage avec d'autres circuits. Les bobines de charge insérées périodiquement en série avec une paire de fils réduisent l'atténuation aux fréquences vocales les plus élevées jusqu'à la fréquence de coupure du filtre passe-bas formé par l'inductance des bobines (plus l'inductance répartie des fils) et la capacité répartie entre les fils. Au-dessus de la fréquence de coupure, l'atténuation augmente rapidement. Plus la distance entre les bobines est courte, plus la fréquence de coupure est élevée. L'effet de coupure est un artefact de l'utilisation de bobines à éléments groupés. Avec les méthodes de charge utilisant une inductance continue distribuée, il n'y a pas de coupure.

Sans bobine de charge, la réponse de la ligne est dominée par la résistance et la capacité de la ligne, l'atténuation augmentant doucement avec la fréquence. Avec des bobines de charge ayant exactement la bonne inductance, ni la capacité ni l'inductance ne dominent : la réponse est plate, les formes d'onde ne sont pas déformées et l'impédance caractéristique de la ligne est résistive jusqu'à la fréquence de coupure. La formation coïncidente d'un filtre passe-bas laissant passer les fréquences audio (en) est également bénéfique dans la mesure où le bruit est réduit.

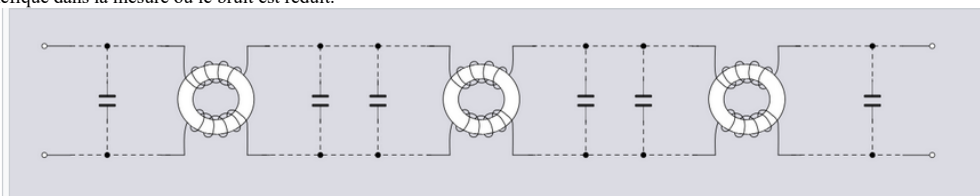
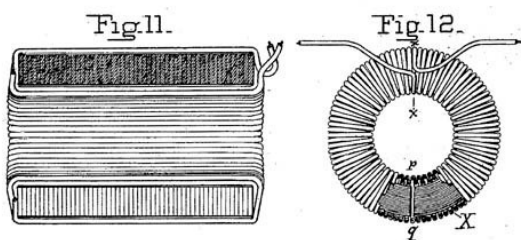


Schéma d'une ligne téléphonique chargée équilibrée. Les condensateurs ne sont pas des composants discrets mais représentent la capacité distribuée entre les fils conducteurs de la ligne qui sont très proches les uns des autres, ce qui est indiqué par les lignes pointillées. Les bobines de charge empêchent le signal audio (voix) d'être déformé par la capacité de la ligne. Les enroulements de la bobine de charge sont enroulés de manière que le flux magnétique induit dans le noyau soit dans la même direction pour les deux enroulements.

No. 652,230. Patented June 19, 1900.
M. I. PUPIN.
ART OF REDUCING ATTENUATION OF ELECTRICAL WAVES AND APPARATUS THEREFOR.
(No. Model.) (Application filed Dec. 14, 1899.) 2 Sheets—Sheet 2.



Witnesses:

Samuel W. Balch
J. A. Whitman

Inventor

Michael I. Pupin.
by Thomas E. Smith, Jr.,
Attorney.

(A lire pour plus de détails sur la pupinisation)

Pupin améliora ainsi la transmission des communications téléphoniques sur les longues distances en plaçant des bobines le long des câbles de communication. Il était alors possible de faire des communications longue distance sans passer par des éléments actifs.

Campbell connaissait les travaux de Heaviside sur la condition de Heaviside, qui définit la spécification pour une transmission sans distorsion des signaux, mais ignorait apparemment sa suggestion d'utiliser des bobines de charge pour contraindre une ligne à la respecter. Campbell aborda initialement le problème sous un angle totalement différent. AT&T lui avait confié la mission d'étudier la possibilité d'améliorer la qualité de la ligne grâce au câble bimétallique fer-cuivre inventé par **John S. Stone**, un ingénieur d'AT&T. Ce câble, conçu par Stone, permettait également d'augmenter l'inductance de la ligne et avait le potentiel de satisfaire à la condition de Heaviside. Cependant, Campbell peinait à mettre en place une démonstration pratique sur une véritable ligne téléphonique avec le budget qui lui était alloué. Constatant que ses simulateurs de lignes artificielles utilisaient des composants localisés plutôt que les grandeurs distribuées présentes dans une ligne réelle, il se demanda s'il ne pouvait pas introduire l'inductance à l'aide de composants localisés au lieu d'utiliser la ligne distribuée de Stone. Lorsque ses calculs ont démontré que les regards d'égout sur les lignes téléphoniques étaient suffisamment rapprochés pour permettre l'insertion des bobines de charge sans qu'il soit nécessaire de creuser ou de poser de nouveaux câbles, il a opté pour ce nouveau plan. La toute première démonstration de bobines de charge sur un câble téléphonique a eu lieu le 6 septembre 1899 sur un tronçon de 74 kilomètres du câble dit de Pittsburgh (le test s'est en réalité déroulé à Boston, le câble ayant déjà servi à des essais à Pittsburgh). Elle a été réalisée par Campbell lui-même et son assistant. Le premier câble téléphonique utilisant des lignes chargées a été mis en service public entre Jamaica Plain et West Newton, près de Boston, le 18 mai 1900.

Bataille juridique

AT&T a engagé une bataille juridique contre Pupin concernant sa revendication. Pupin fut le premier à déposer un brevet, mais Campbell avait déjà réalisé des démonstrations pratiques avant même que Pupin ne dépose le sien (décembre 1899). Le retard de Campbell dans le dépôt était dû aux lenteurs administratives d'AT&T. L'affirmation de Pupin dans son autobiographie selon laquelle il aurait eu l'idée lors d'une ascension en montagne en 1894 est largement contestée, et aucune preuve ne vient étayer cette affirmation, ni dans les documents ni dans les activités ultérieures de Pupin et de ses étudiants. Cependant, AT&T a commis l'erreur de supprimer de la demande de brevet proposée par Campbell tous les tableaux et graphiques détaillant la valeur exacte de l'inductance requise avant le dépôt du brevet. Le brevet de Pupin contenant une formule (moins précise), AT&T s'exposait à des accusations de divulgation incomplète. Craignant que la bataille juridique ne se solde par une déclaration d'inadaptabilité de l'invention (en raison des travaux antérieurs de Heaviside), ils décidèrent d'acquiescer à une option sur le brevet de Pupin moyennant une redevance annuelle, afin qu'AT&T contrôle les deux brevets. En janvier 1901, Pupin avait déjà perçu 200 000 \$ (l'équivalent de 6 000 000 \$ en 2024) et, en 1917, date à laquelle le monopole d'AT&T prit fin et les paiements cessèrent, il avait reçu un total de 455 000 \$ (l'équivalent de 11 330 000 \$ en 2024).

L'invention s'avéra extrêmement précieuse pour AT&T. Les câbles téléphoniques pouvaient désormais couvrir une distance deux fois supérieure à celle possible auparavant, ou bien un câble deux fois moins performant (et deux fois moins cher) pouvait être utilisé sur la même distance. Au moment d'autoriser Campbell à procéder à la démonstration, leurs ingénieurs estimaient qu'ils pourraient économiser 700 000 \$ (l'équivalent de 22,2 millions de dollars en 2024) sur les coûts d'installation, rien qu'à New York et au New Jersey. On estime qu'AT&T a économisé 100 millions de dollars (3,18 milliards de dollars en 2024) au cours du premier quart du XX^e siècle. Heaviside, à l'origine de tout, n'en tira aucun profit. On lui proposa une somme symbolique qu'il refusa, préférant la reconnaissance de son travail à une compensation financière. Il fit remarquer avec ironie que si sa publication antérieure avait été admise, cela aurait « entravé... le flux des capitaux vers la bonne direction... »

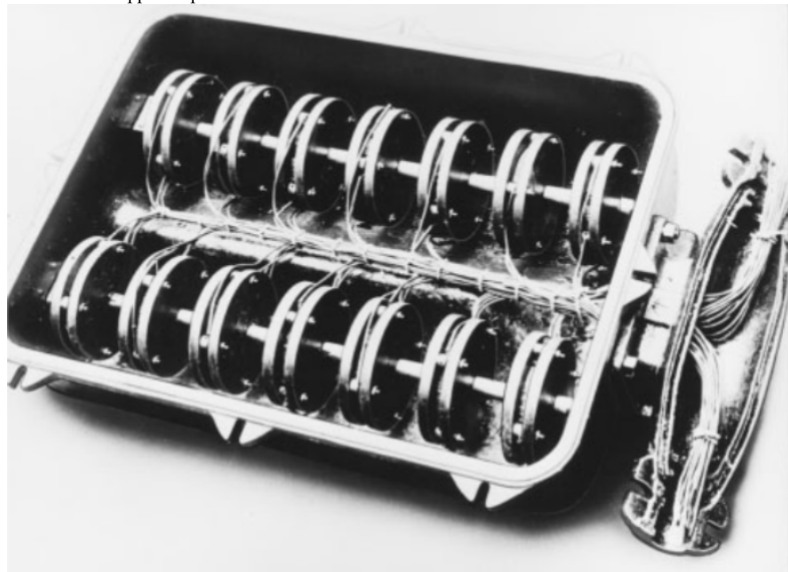
Pupin publia en 1900 un article plus précis intitulé « Transmission d'ondes sur câbles non uniformes et lignes longue distance », dans lequel il affirmait qu'avec des bobines spécialement conçues, appelées plus tard bobines Pupin, disposées à intervalles réguliers, la téléphonie sur câble souterrain pouvait être étendue de quelques centaines de kilomètres et en surface de plusieurs milliers de kilomètres sans augmentation du diamètre du conducteur. Ses recherches aboutirent à une formule mathématique précise pour la conception des bobines de charge, pour laquelle il déposa des demandes de brevet la même année. Deux brevets lui furent accordés le 19 juin 1900 sous les numéros **652 230** et **652 231**. AT&T acquit immédiatement ces brevets pour la somme de 455 000 dollars, sans doute le prix le plus élevé jamais payé pour une formule ! En réalité, bien que George Ashley Campbell et John Stone d'AT&T travaillaient depuis plusieurs années sur une solution au problème de la capacité de leurs longues lignes téléphoniques, ils n'avaient pas eu l'occasion de breveter leurs travaux, contraignant ainsi AT&T à racheter les brevets de Pupin. Une vingtaine d'années plus tard, AT&T affirmait avoir économisé plus de 100 millions de dollars grâce aux bobines Pupin, somme qui aurait autrement été nécessaire pour des câbles différents et des amplificateurs supplémentaires.

AT&T installa les premières bobines Pupin sur un câble de 17 km entre New York et Newark (New Jersey) en 1902.

D'autres câbles suivirent rapidement, si bien qu'en 1906, des câbles chargés furent installés, par exemple, entre New York et New Haven (127 km) et entre New York et Philadelphie (140 km). Ces câbles, composés de conducteurs de calibre 14 AWG (American Wire Gauge) de 1,6 mm de diamètre, étaient chargés de bobines de 250 mH à intervalles de 1,6 km (1 mile). Le plus long câble chargé (avant l'introduction des amplificateurs téléphoniques) reliait Boston à Washington via New York, sur une distance de 724 km. La charge sur les circuits de câbles fantômes fut utilisée pour la première fois en 1910 sur un câble reliant Boston à Neponset.

Sur le continent européen, Pupin rencontra des difficultés considérables pour démontrer que sa demande de brevet ne s'inspirait pas uniquement des théories respectives d'Oliver Heaviside au Royaume-Uni et de Vaschy en France.

Cependant, Siemens, en collaboration avec Pupin, développa immédiatement des bobines de charge basées sur sa théorie. Ces bobines furent installées sur 14 paires d'un câble téléphonique de 32 km et 28 paires reliant Berlin à Potsdam. Un test officiel fut réalisé en mars 1902, au cours duquel 25 experts allemands et étrangers purent constater l'amélioration apportée par les nouvelles bobines.



Premières bobines Pupin utilisées en Allemagne, 1902.

Après trois ans de procédure en Allemagne, durant lesquels Pupin perfectionna son brevet avec le soutien de Siemens & Halske, celui-ci fut accordé le 4 février 1904 et immédiatement acquis par Siemens. Dans un premier temps, la bobine de Pupin fut principalement utilisée sur les lignes à voie unique. La plus longue ligne aérienne d'Europe, longue de 1 350 km, reliait Berlin, Francfort, Bâle et Milan. Mise en service en 1914, elle utilisait deux conducteurs en cuivre étiré à froid de 4,5 mm de diamètre. Elle traversait le tunnel du Simplon via un câble Krarup (section 20.5) de 22 km, posé en 1906.

Le premier projet européen de câble souterrain sur grande distance, utilisant des bobines Pupin, a débuté en 1912 en Allemagne avec le câble dit de Rheinland.

Ce câble couvrait une distance de 600 km entre Berlin, Magdebourg, Hanovre, Dortmund et Cologne. Il était installé dans des conduits en béton à quatre sections, laissant ainsi trois emplacements pour de futurs câbles. Le premier tronçon, un câble à 52 paires entre Berlin et Magdebourg, fut mis en service le 11 novembre 1913. Hanovre y fut raccordée en août 1914. La Première Guerre mondiale retarda la poursuite des travaux jusqu'en 1921, date à laquelle un câble à 142 paires fut posé entre Hanovre et Cologne.

La construction du câble a été optimisée pour la transmission téléphonique par le torsadage des conducteurs en paires. Deux méthodes différentes de torsadage des paires en quad (quatre conducteurs par circuit physique) ont été mises au point : le quad Dieselhorst-Martin (quad DM, principalement utilisé en Allemagne) et le quad en étoile. Dans un quad DM, deux conducteurs sont torsadés pour former une paire, puis deux paires ainsi obtenues sont torsadées avec des longueurs de torsion différentes pour former un quad. Dans un quad en étoile, quatre conducteurs sont torsadés simultanément pour former un quad. La portée téléphonique d'un tel câble, avec un diamètre de conducteur de 1,5 mm, était typiquement de 40 km sans bobines de Pupin et de 220 km avec bobines de Pupin. Pour un diamètre de conducteur de 2,0 mm, ces valeurs étaient respectivement 320 km.

Les bobines Pupin, utilisées pour la première fois dans un câble sous-marin isolé par ruban de papier, datent de 1906. Ce câble à sept paires, long de 12 km, était posé dans le lac de Constance à 250 m de profondeur entre Friedrichshafen (Allemagne) et Romanshorn (Suisse). Des gaines souples permettaient d'accueillir les 22 bobines Pupin. Associées à des conducteurs en cuivre de 1,5 mm de diamètre, ces bobines rendirent possible la liaison téléphonique entre Zurich, Stuttgart et Munich. Le câble fut inauguré en présence du comte Zeppelin et resta en service pendant une quarantaine d'années. Le premier câble sous-marin à bobines Pupin, long de 37,1 km, fut installé entre St. Margaret (Royaume-Uni) et Sangatte (France) en mai 1910. Les bobines Pupin des deux paires étaient intégrées au câble, ce qui augmentait son diamètre d'environ 5 cm à 10 cm sur une longueur de 1 m.

Des câbles similaires furent posés un an plus tard entre Sainte-Marguerite et La Panne (Belgique), sur une longueur de 89 km, puis en 1913, sur une longueur de 165 km, jusqu'aux Pays-Bas. Des câbles téléphoniques sous-marins utilisant des bobines Pupin à 24 paires pour la transmission de 12 canaux téléphoniques furent également installés sur une distance de 47 km entre Gledser (Danemark) et Warnemünde (Allemagne) en 1926, et sur une distance de 117 km entre Malmö (Suède) et Stralsund (Allemagne) en 1927.

Pupin reçoit en 1924 le prix Pulitzer pour son autobiographie : From Immigrant to Inventor.

LES BREVETS

Pupin a délivré **115 brevet** [consultables à cette page](#).

Consultez [la page "Pupin Patent"](#) (*traduction ci dessous*)

En termes de nombre de brevets déposés, Pupin n'est devancé que par Nikola Tesla. Découverte d'un brevet posthume Mihajlo Pupin était également un chercheur et inventeur de grand talent. Parmi ses nombreuses inventions, le plus grand succès commercial fut celui des bobines de Pupin, qui permirent de passer des conversations téléphoniques sur de longues distances, même intercontinentales. Cette invention fut si importante qu'elle fut baptisée « pupinisation » en hommage à son créateur. Les inventions de Pupin ont constitué le fondement de sa fructueuse collaboration avec de nombreuses entreprises américaines et étrangères, à commencer par American Telephone & Telegraph (AT&T), en passant par Siemens-Halske, Westinghouse Electric & Manufacturing Co., la société Marconi et la Commercial Cable Company, spécialisée dans les câbles de communication sous-marins. Malgré quelques exceptions, comme ses premiers travaux sur les rayons X, notamment la découverte des rayonnements secondaires émis par des corps préalablement irradiés, ainsi qu'une méthode permettant de réduire le temps d'irradiation lors de l'obtention d'images radiographiques (dont il n'a pas déposé de brevet), Pupin a néanmoins protégé la grande majorité de ses inventions par des brevets. Parmi les ouvrages consacrés aux brevets de Pupin et publiés en Italie, on peut citer « Brevets ! ». et « Patents II » (Institut des manuels et du matériel pédagogique, Belgrade, 1997), publié dans le cadre des Œuvres choisies de Mihajlo Pupin, dont le premier volume contient les traductions de 14 brevets américains de Pupin, tandis que le second volume contient les données et les traductions de 18 autres de ses brevets. Six années de procédure judiciaire. Comme l'indique le professeur Vojin Popovic dans la préface de l'édition susmentionnée, les listes initialement publiées contenaient des données sur 24 brevets de Pupin, tous dans le domaine des télécommunications, et par la suite, le nombre de brevets publiés dans les ouvrages susmentionnés a été porté à 32. Les listes actuelles les plus complètes contiennent des données sur 34 brevets américains de Pupin, comme par exemple la liste des brevets de Pupin figurant dans la publication « Mémoire biographique de Michael Idvorsky Pupin » (auteur : Bergen Davis, éditeur : Académie nationale des sciences des États-Unis d'Amérique, 1938). La liste susmentionnée des 34 brevets américains de Pupin a longtemps été considérée comme définitive, mais les recherches menées par Slobodan Stojkovic, ingénieur en brevets de Belgrade, ont permis de découvrir un autre brevet de Pupin, sous le numéro US 2 150 781, déposé le 9 juillet 1936, soit après sa mort. Un brevet pour l'invention appelée « Système télégraphique » a été délivré à sa fille, Varvara Pupin Smith, le 14 mars 1939. La première page de ce brevet est visible sur l'image. Fait intéressant, Varvara possédait elle-même des brevets aux États-Unis et en Grande-Bretagne pour son invention d'un protège-lèvres, conçu comme une aide à la toilette féminine (brevets US 2 032 672 et GB 460 105). Bien qu'il accordât une grande importance aux brevets, l'attitude de Pupin à leur égard était quelque peu ambivalente. Dans son ouvrage « Du pâturage au scientifique », Pupin décrit les difficultés rencontrées lors du dépôt de ses premières demandes de brevet, avouant l'avoir souvent regretté, car cela lui a causé de nombreuses complications et l'a entraîné dans des procès coûteux et pénibles. Il souligne également l'étrange phénomène psychologique qui pousse un inventeur dont l'invention est contestée à se battre avec une férocité inouïe pour ses petits. Pupin évoque avec fierté le succès financier qu'il a obtenu en vendant son brevet américain n° 652 230, relatif aux bobines, à AT&T. Pupin a déposé sa première demande de brevet le 14 décembre 1893 pour une invention intitulée « Appareil de transmission télégraphique ou téléphonique », pour laquelle il a obtenu le brevet américain n° 519 346 moins de cinq mois plus tard. Ce dispositif permettait de surmonter les problèmes d'atténuation et de distorsion des signaux télégraphiques et des informations sonores, qui constituaient un obstacle majeur à l'utilisation de liaisons filaires ou câblées de grande longueur. Encore plus rapidement, moins de trois mois plus tard, il obtint le brevet américain n° 519 347 pour son invention suivante, intitulée « Transformateur pour systèmes télégraphiques, téléphoniques ou autres systèmes électriques ». Cependant, Pupin rencontra de nombreuses difficultés avec sa troisième demande de brevet, qu'il décrit dans l'extrait du livre cité plus haut. Il obtint le brevet américain n° 707 007 pour une invention appelée « Télégraphie multiple » après six ans de procédure auprès de l'Office américain des brevets, sa demande ayant initialement été rejetée au profit d'autres inventeurs. C'est sans doute grâce à sa persévérance et à sa conviction d'avoir raison que la décision lui fut finalement favorable. Parmi les brevets suivants de Pupin, le plus important est le brevet américain n° 652 230, relatif aux bobines et intitulé « Art de réduire l'atténuation des ondes électriques et appareil correspondant ». Ce brevet forme un tout avec le brevet américain n° 652 231, car les deux ont été déposés à partir de la même demande. Durant cette période prolifique de sa créativité, qui s'étend de 1893 à 1903, Pupin obtint 14 brevets dans le domaine du génie électrique, notamment des télécommunications. Il déposa tous les brevets individuellement, à l'exception du brevet américain n° 697 660, relatif à une machine adaptée au bobinage de ses bobines, qu'il prépara en collaboration avec Samuel V. Balc. Première présentation Une interruption s'ensuivit jusqu'en 1915, année où il obtint six brevets conjointement avec son élève et collaborateur, le futur lauréat du prix Nobel Edwin Armstrong. Ce ne furent pas les seuls exemples de collaboration de Pupin avec d'autres experts pour obtenir la protection par brevet des inventions issues de leur travail commun. Pupin obtint par la suite un brevet avec Millard Cole Spencer et un autre avec Henry Frank Herbig. Il vendit un grand nombre des brevets obtenus durant cette période, qui dura jusqu'à sa mort en 1935, à diverses entreprises. La Westinghouse Electric & Manufacturing Co. en acquit la plus grande partie, tandis qu'un nombre légèrement inférieur fut cédé à la Commercial Cable Company. Les inventions protégées par ces brevets concernaient les télécommunications, la téléphonie et la radiocommunication, et plus particulièrement la technique de la télégraphie filaire, également appelée télégraphie multiple, qui permettait l'envoi d'un grand nombre de télégrammes sur une seule ligne. Les inventions de Pupin ont permis non seulement d'établir des liaisons téléphoniques et télégraphiques terrestres sur de longues distances, mais la « pupinisation » à grande échelle a également rendu possible l'utilisation de câbles de communication sous-marins. En hommage à Pupin : À Belgrade, l'Institut « Mihajlo Pupin » a été fondé en 1946 et un petit cratère lunaire porte son nom. À Novi Beograd, l'un des principaux boulevards, ainsi que la Faculté d'ingénierie de Zrenjanin, portent son nom. Un film sur Mihajlo Pupin, inspiré de son autobiographie, a été réalisé en collaboration avec l'Université Columbia. À l'occasion du 125e anniversaire de sa naissance, une pièce d'argent à son effigie a été frappée. Aux États-Unis, la « Médaille Mihajlo Pupin », créée en 1958, récompense chaque année une personne ayant apporté une contribution exceptionnelle aux intérêts nationaux américains. Titres, récompenses, décorations...
--

Il était également docteur ès sciences (Université Columbia, 1904), docteur honoris causa ès sciences (Université Johns Hopkins, 1915), docteur ès sciences (Université de Princeton, 1924), docteur honoris causa ès sciences (Université de New York, 1924), docteur honoris causa ès sciences (Muhlenberg College, 1924), docteur en ingénierie (École des sciences appliquées, 1925), docteur ès sciences (Université George Washington, 1925) et docteur (Union College, 1925). 1927, Doctorat, Université de Roi (1927, Doctorat, Collège de Midiburi - 1928, Doctorat, Université de Belgrade - 1929, Doctorat, Université de Prague - 1929. Pour ses travaux scientifiques, Pupin a été récompensé à plusieurs reprises : 1902, Médaille Elliot Cresson de l'Institut Franklin ; 1916, Prix Herbert de l'Académie française ; 1919, Médaille Edison de l'Institut américain des ingénieurs électriciens ; 1924, Médaille d'honneur de l'Institut de radio d'Amérique ; Médaille d'honneur de l'Institut des sciences sociales ; 1931, Médaille John Fritz des Quatre Sociétés nationales d'ingénierie. Il a également reçu de nombreux prix et décorations : 1928, Prix George Washington de la Western Society of Engineers, 1929, Aigle blanc, Premier ordre de Yougoslavie (Aigle blanc du Premier ordre, Royaume de Yougoslavie), 1929, Lion blanc, Premier ordre de Tchécoslovaquie.

Ses travaux s'étendaient même au domaine de l'électronique, qu'il explorait en collaboration avec Edwin Armstrong. Il a également réalisé des filtres électriques et des générateurs de son, ce qui témoigne de son talent aux multiples facettes.

Les résultats de ces recherches sur les brevets de Pupin déposés dans d'autres pays seront présentés ici pour la première fois. Avant de fournir des données précises, il convient de souligner que, malgré certaines différences, les brevets sont limités dans le temps, c'est-à-dire qu'ils durent au maximum 20 ans à compter de la date de dépôt de la demande. Plus important encore, ils sont limités territorialement : ils ne sont valables que dans le pays qui les a délivrés. Dans tous les pays où une invention n'est pas protégée par un brevet, chacun peut librement l'utiliser. C'est pourquoi plusieurs brevets peuvent être délivrés dans différents pays pour une même invention. Un ensemble de brevets protégeant une même invention dans différents pays constitue une famille de brevets, et les brevets qui la composent sont appelés équivalents. Le brevet pour lequel la première demande a été déposée est appelé brevet de base. Mihajlo Pupinje a obtenu un grand nombre de brevets à l'étranger : les données actuelles indiquent plus de 40 brevets, dont certains déposés personnellement et d'autres dont il a cédé le droit de dépôt aux sociétés mentionnées précédemment. Pupin a obtenu le plus grand nombre de brevets pour ses inventions en Angleterre (17 brevets), puis au Canada (8), en France (7), au Danemark (5) et en Espagne (4). En Autriche, en Allemagne, en Hongrie et en Suisse, il a obtenu un brevet dans chacun de ces pays (voir tableau 1). Cette liste n'est pas exhaustive ; il est donc probable que d'autres brevets de Pupin soient découverts, tant dans ces pays que dans ceux pour lesquels les données pertinentes n'ont pas encore été trouvées.

Les brevets britanniques sur six font référence à des demandes américaines antérieures. Il s'ensuit que Pupin a d'abord déposé les demandes correspondantes aux États-Unis, mais que celles-ci ont été rejetées ou qu'il les a abandonnées lui-même.

Il a également été établi que Pupin détenait au moins 39 brevets analogues.

En termes de nombre de brevets obtenus, Mihajlo Pupin n'est devancé que par Nikola Tesla, qui aurait obtenu environ 300 brevets dans divers pays. Au vu des données disponibles, je pense qu'il est fort probable que des brevets de Pupin encore inconnus soient découverts dans certains pays. Cependant, il est réaliste de penser que ces brevets porteront sur des inventions déjà connues et que leur nombre sera limité. Quoi qu'il en soit, il est important de les rechercher et de les inclure dans la liste des brevets de Pupin afin de mieux comprendre son œuvre.

Sur le site de l'INPI, en 1894 Pupin dépose un brevet Brevet [239299](#) (14.06.1894) "Perfectionnements aux transmissions télégraphiques et téléphoniques".

Heaviside n'a jamais breveté son idée : en fait, il n'a tiré aucun avantage commercial de ses travaux. Malgré les différends juridiques entourant cette invention, il est

incontestable que Campbell a été le premier à construire un circuit téléphonique à l'aide de bobines de charge. Il ne fait également aucun doute que Heaviside a été le premier à publier et que beaucoup contesteraient la priorité de Pupin.

AT&T a mené une bataille juridique avec Pupin à ce sujet. Pupin a été le premier à déposer un brevet, mais Campbell avait déjà effectué des démonstrations pratiques avant même que Pupin ne dépose son brevet (décembre 1899). Le retard de Campbell dans le dépôt de sa demande était dû à la lenteur des machinations internes d'AT&T.

Cependant, AT&T a bêtement supprimé de la demande de brevet proposée par Campbell tous les tableaux et graphiques détaillant la valeur exacte de l'inductance qui s'avérait nécessaire avant le dépôt du brevet.

Comme le brevet de Pupin contenait une formule (moins précise), AT&T s'exposait à des réclamations pour divulgation incomplète. Craignant que la bataille ne se termine par une déclaration de non-brevetabilité de l'invention en raison de la publication antérieure de Heaviside, elle décida de renoncer à la contestation et d'acheter une option sur le brevet de Pupin moyennant une redevance annuelle, de sorte qu'AT&T contrôlerait les deux brevets.

En janvier 1901, Pupin avait reçu 200 000 dollars (équivalent à 13 millions de dollars en 2011) et en 1917, lorsque le monopole d'AT&T a pris fin et que les paiements ont cessé, il avait reçu un total de 455 000 dollars (25 millions de dollars de 2011).

Avantages pour AT&T

L'invention a eu une valeur énorme pour AT&T. Les câbles téléphoniques pouvaient désormais être utilisés sur une distance deux fois plus grande qu'auparavant, ou bien un câble d'une qualité (et d'un coût) deux fois moindre pouvait être utilisé sur la même distance. Lorsqu'ils ont décidé d'autoriser Campbell à poursuivre la démonstration, les ingénieurs ont estimé qu'ils pourraient économiser 700 000 dollars en coûts d'installation dans les seuls États de New York et du New Jersey. On estime qu'AT&T a économisé 100 millions de dollars au cours du premier quart du 20e siècle. Heaviside, qui a commencé tout cela, n'a rien gagné. On lui a offert un paiement symbolique, mais il n'a pas accepté, voulant être crédité de son travail. Il fit remarquer ironiquement que si sa publication antérieure avait été admise, cela aurait "interféré ... avec le flux de dollars dans la bonne direction ...

Anecdote :

Pupin avait basé son brevet de bobine d'induction sur l'oscillateur à courant alternatif de Tesla. Tesla était plutôt solitaire, un génie raffiné qui se consacrait entièrement à son travail, tandis que Pupin, compétitif et habile promoteur, aimait être sous les projecteurs, comme en témoigne son autobiographie à succès de 1923, *De l'immigrant à l'inventeur*, récompensée par le prix Pulitzer.

Lors d'un procès âprement disputé en 1915 pour savoir qui avait inventé la télégraphie sans fil, Pupin témoigna que, selon lui, c'était Guglielmo Marconi qui avait inventé la technologie sans fil. Tesla se sentit blessé et trahi et refusa de parler à Pupin pendant des années. Pupin finit par regretter son témoignage et, sur son lit de mort en 1935, supplia Tesla de venir accepter ses excuses. À contrecœur, Tesla céda et alla voir Pupin qui, en le voyant, s'effondra et fondit en larmes. Pupin mourut quelques jours plus tard.

Les Câbles sous-marins

La distorsion est un problème particulier pour les câbles de communication sous-marins, en partie parce que leur grande longueur permet à la distorsion de s'accumuler, mais aussi parce qu'ils sont plus sensibles à la distorsion que les fils ouverts sur les poteaux en raison des caractéristiques du matériau isolant. Les différentes longueurs d'onde du signal se déplacent à des vitesses différentes dans le matériau, ce qui entraîne une dispersion. C'est ce problème sur le premier câble télégraphique transatlantique qui a motivé Heaviside à étudier le problème et à trouver la solution. Les bobines de charge résolvent le problème de dispersion, et la première utilisation de celles-ci sur un câble sous-marin a été faite en 1906 par Siemens & Halske dans un câble traversant le lac de Constance.

L'utilisation de bobines de charge avec des câbles sous-marins lourds pose un certain nombre de problèmes. Le renflement des bobines de chargement ne pouvait pas facilement passer à travers l'appareil de pose des câbliers et le navire devait ralentir pendant la pose d'une bobine de chargement. Les discontinuités à l'endroit où les bobines étaient installées provoquaient des tensions dans le câble pendant la pose. Si l'on n'y prend pas garde, le câble risque de se rompre et d'être difficile à réparer. Un autre problème était que la science des matériaux de l'époque avait des difficultés à sceller la jonction entre la bobine et le câble contre la pénétration de l'eau de mer. Le chargement continu a été développé pour surmonter ces problèmes, ce qui présente également l'avantage de ne pas avoir de fréquence de coupure.

CÂBLE KRARUP

L'ingénieur télégraphiste danois Carl Emil Krarup trouva une autre solution pour augmenter l'inductance des câbles.

Né à Copenhague, Krarup étudia le génie civil et fut chargé des travaux publics dans sa ville natale jusqu'à son entrée à l'Administration télégraphique danoise en 1898. En 1901, il fut envoyé à l'Université de Wurtzbourg, en Allemagne, où il mena des expériences sur des conducteurs en cuivre gainés de fils de fer.

De retour à Copenhague en 1902, il rédigea un article sur l'inductance des lignes électriques, pour lequel il reçut un second prix de l'Université de Copenhague. Krarup, désormais ingénieur télégraphiste, prouva sa théorie la même année lors de la planification d'un câble sous-marin entre Helsingør, au Danemark, et Helsingborg, en Suède. Il proposa de répartir l'inductance uniformément le long du câble en enroulant de fins fils de fer, généralement de 0,2 à 0,3 mm de diamètre, autour de chaque conducteur en cuivre sur toute sa longueur. Le câble de 5 km fut installé et fonctionna parfaitement. Un an plus tard, deux câbles téléphoniques sous-marins Krarup furent installés. Un câble à deux paires de 20 km de long traversa le Fehmarnbelt, reliant l'Allemagne au Danemark. Un second câble Krarup à deux paires fut installé sur le même tracé en 1907. Ce câble, d'une longueur remarquable de 75,5 km, reliait l'île d'Helgoland au continent allemand à Duhnen, près de Cuxhaven. Il utilisait deux paires pour deux lignes téléphoniques et une paire pour la télégraphie. Les conducteurs en cuivre avaient un diamètre de 4 mm, ce qui en faisait le plus long câble téléphonique sous-marin sans amplificateur. La production du câble Krarup était relativement coûteuse et son inductance relativement faible, ce qui limita son utilisation. Il fut par la suite remplacé par le câble en permalloy, offrant une inductance bien supérieure.

Le chargement continu au moyen d'une couche de fer longitudinalement discontinue recouvrant le conducteur a été proposé par J. S. Stone d'AT&T en 1897 et breveté dans le brevet américain **578 275**. Le professeur allemand Breisig a suggéré l'utilisation d'une hélice ouverte de fer enroulée autour du conducteur en 1901, tandis que Krarup a utilisé une spirale fermée de sorte que les spires adjacentes soient en contact.

1911 LES AMPLIFICATEURS TÉLÉPHONIQUES METTENT FIN AUX BOBINES PUPIN

L'amplification des signaux téléphoniques est devenue possible grâce à l'invention de la triode par Lee de Forest et Robert von Lieben en 1906.

De même, alors que les signaux télégraphiques étaient régénérés par des relais pour les transmissions longue distance, des répéteurs de ligne électroniques ont pu être utilisés pour amplifier la bande vocale lors des transmissions téléphoniques longue distance, au-delà de 100 km sur câble à électrodes fines ou de 600 km sur lignes aériennes.

En 1912, les premiers essais d'un amplificateur téléphonique ont eu lieu sur une ligne de 1 000 km entre Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad, en Russie) et Strasbourg, via Berlin. Trois ans plus tard, le 15 janvier 1915, AT&T mettait en service la plus longue ligne téléphonique aérienne du monde, longue de 5 419 km, entre New York et San Francisco.

La construction de cette ligne avait débuté en 1911 par le tronçon New York-Denver. La ligne était constituée de deux paires de fils de cuivre étirés à froid de 4,2 mm de diamètre, supportées par 130 000 poteaux.

Des bobines Pupin d'une inductance de 250 mH étaient placées tous les 13 km. Un circuit fantôme était appliqué aux deux paires afin de permettre l'utilisation de trois circuits téléphoniques. Trois amplificateurs téléphoniques étaient utilisés en 1915 et huit en 1918.

En 1920, toutes les bobines Pupin furent retirées et douze amplificateurs téléphoniques améliorés installés, ce qui permit d'augmenter la bande passante de 1 500 Hz à 3 000 Hz. Le coût d'un appel était de 20,70 \$ pour trois minutes.

Les lignes à fils nus restèrent très populaires aux États-Unis pour les communications longue distance.

En 1930, plus de 5,5 millions de kilomètres de fils nus traversaient le pays et 185 000 km supplémentaires étaient ajoutés chaque année. Parallèlement, 34 000 km de câble furent installés sur les lignes longue distance, dont environ 50 % de câble aérien. Les abonnés étaient reliés à leur central téléphonique local presque exclusivement (94 %) par câble. Ce câble, d'un diamètre extérieur de 6,7 cm, comportait généralement 1 800 paires de conducteurs en cuivre de calibre 28 AWG (0,32 mm de diamètre).

Après la Première Guerre mondiale, le câble de Rheinland fut équipé d'amplificateurs téléphoniques tous les 75 km sur les circuits à quatre fils de 0,9 mm et tous les 150 km sur les circuits à deux fils de 1,4 mm. Il fut étendu à un réseau national, atteignant une longueur de plus de 7 000 km en 1927 et de 16 000 km en 1939.

Il devint le noyau d'un réseau téléphonique européen assurant les communications téléphoniques internationales entre les pays européens voisins.

Le câble est devenu le principal moyen de transmission pour la téléphonie en Europe. En Allemagne, par exemple, en 1922, seulement 25 % des lignes longue distance étaient câblées ; ce chiffre est passé à 50 % en 1925 et à 84 % fin 1939. À cette époque, 89 % des lignes téléphoniques locales allemandes étaient également câblées. En 1939, le réseau de transmission allemand comptait 28 millions de kilomètres de câble, dont 3 000 km de câble coaxial et 2,4 millions de kilomètres de lignes bifilaires.

Des amplificateurs téléphoniques étaient également utilisés pour les câbles sous-marins. Le 1er décembre 1919, la mise en service d'un câble de 120,5 km de long entre Stralsund (Allemagne) et Trelleborg (Suède) a débuté ; il s'agissait alors du plus long câble téléphonique sous-marin.

Le câble comportait deux paires de conducteurs, utilisées dans un circuit virtuel pour trois canaux téléphoniques. Des amplificateurs téléphoniques étaient utilisés à Stralsund et à Malmö (à 30 km au nord de Trelleborg).

Un autre câble téléphonique sous-marin remarquable, parmi les premiers du genre, entra en service le 11 avril 1921 entre La Havane (Cuba) et Key West (Floride), exploité par la Cuban-American Telephone and Telegraph Company. Cette société avait été fondée en 1917 par le puissant groupe AT&T et le nouvel arrivant IT&T, dans le but de construire et d'exploiter un câble entre les États-Unis et Cuba.

La Première Guerre mondiale retarda le projet jusqu'en 1921, date à laquelle trois câbles monopaires de 190 km de long chacun furent posés à travers le détroit de Floride à une profondeur de 1 860 m. La Telegraph Cable Company du Royaume-Uni fabriqua les câbles selon un modèle conçu par l'expert britannique en câbles, Sir William Slingo. Chaque câble était constitué d'un conducteur de type Krarup, composé d'un fil de cuivre enroulé d'un fin fil de fer isolé par de la gutta-percha. Le conducteur de retour était un ruban de cuivre épais enroulé autour de l'isolant, donc en contact avec l'eau de mer. Chaque câble transmettait un canal téléphonique et quatre canaux télégraphiques, trois au-dessus et un en dessous de la bande vocale. Des amplificateurs téléphoniques étaient installés aux deux extrémités.

Un quatrième câble fut ajouté en 1931. Autre réalisation remarquable : la construction de la ligne téléphonique transatlantique, reliant l'Argentine et le Chili entre Buenos Aires et Santiago en 1928.

Un projet de câble téléphonique transatlantique fut également lancé au début des années 1930. AT&T et la GPO prévoyaient de poser un câble à charge continue pour un circuit téléphonique unique, sans utiliser de répéteurs téléphoniques immergés. Ce câble devait assurer une liaison téléphonique unique entre Terre-Neuve et l'Irlande.

Quatre couches de ruban Perminvar étaient prévues pour la charge. La fabrication du câble avait déjà commencé en Allemagne lorsque le projet fut abandonné en raison de la crise économique et de la forte concurrence de la radio à ondes courtes. ...