

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegraфи svizzeri |
| Herausgeber: | Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe |
| Band: | 53 (1975) |
| Heft: | 5 |
| Artikel: | Historique de la bobine Pupin et de son emploi en Suisse |
| Autor: | Chalet, Fernand / Goldschmidt, Robert / Saillen, Arnold |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-875600 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Historique de la bobine Pupin et de son emploi en Suisse¹

Fernand CHALET, Robert GOLDSCHMIDT, Arnold SAILLEN, Cossigny

921.318.43.054.3(091):621.315.2.054.3(091)(494)

Geschichte der Pupin-Spule

Zusammenfassung. Die Autoren rufen die Erfindung Michael Pupins in Erinnerung. Die Entwicklung der Pupin-Spule, die zum Teil in einer wirtschaftlichen und politischen Krisenzeiten geschah, wird erläutert und ein Überblick über die Pupinisierung des schweizerischen Fernmeldenetzes von Anfang an bis heute gegeben.

Résumé. Les auteurs rappellent l'invention de Michael Pupin. Le développement de la bobine Pupin, réalisé en partie au cours d'une période de crise économique et politique est également abordé. Pour terminer, l'article donne une vue d'ensemble concernant la pupinisation du réseau suisse des télécommunications, des débuts à nos jours.

Le origini della bobina Pupin

Riassunto. Gli autori rievocano l'invenzione di Michael Pupin e ne illustrano la bobina omonima, che fu sviluppata parzialmente durante un'epoca di crisi economica e politica. Per concludere, l'articolo informa sulla pupinizzazione della rete svizzera delle telecomunicazioni dai primordi fino a oggi.

1 Introduction

Le 19 juin 1900, *Michael Pupin* déposait, aux Etats-Unis, son brevet fondamental qui allait éterniser son nom dans le domaine des télécommunications.

En Suisse, il y a plus d'un demi-siècle que les bobines «Pupin» sont fabriquées et installées pour améliorer les transmissions téléphoniques. Plus d'un million de bobines sont aujourd'hui en service dans le réseau téléphonique suisse.

2 Les précurseurs des temps modernes

L'art de transmettre à distance des signaux conventionnels représentant un texte quelconque, est connu de toute antiquité. Les signaux de feu étaient utilisés par les tribus d'Israël; ceux des Grecs étaient émis du haut des tours; le système télégraphique des Gaulois était constitué par des cris.

Au deuxième siècle avant notre ère, *Cléomène* puis *Polybe* combinèrent les signaux lumineux de manière à former un code, et tout au long de l'histoire, une foule de chercheurs ont tenté d'améliorer, avec ou sans succès, les communications entre les hommes.

Le premier alphabet télégraphique apparaît au début du XVII^e siècle. Il reste cependant à triompher de la distance. Vers 1690, *Guillaume Amontons*, physicien français, imagine un moyen de transmission relativement rapide. Il s'agit de disposer, dans plusieurs postes consécutifs, des gens qui, avec des «longues vues», aperçoivent les signaux émis par le poste précédent, les transmettent au suivant et ainsi de suite. Les différents signaux sont autant de lettres de l'alphabet formant un message chiffré dont le code n'est connu qu'aux stations extrêmes.

Un siècle plus tard, en 1783, le moine cistercien *Dom Gauthey* utilise les propriétés des tuyaux pour transmettre la voix humaine. Il propose ce moyen à l'Académie des sciences de Paris. Les premiers essais ont lieu avec une conduite d'eau de 800 m et sont satisfaisants. Gauthey envisage de poursuivre ses recherches pour arriver à couvrir une distance de près de 600 km. Le projet est coûteux et doit être abandonné. Ce système peut être considéré comme l'ancêtre du tuyau acoustique utilisé peu avant la découverte du téléphone électrique.

¹ Note de la rédaction. Cet article est dû à la plume d'auteurs qui ont vécu la période de développement des bobines Pupin et reflète certains de leurs souvenirs personnels. Les faits rapportés témoignent d'une époque riche en événements et permettent de tirer des comparaisons intéressantes avec l'actualité.

Vers 1790, *Claude Chappe* invente le télégraphe aérien. Fils de savant, devant embrasser l'état ecclésiastique, il faisait ses études dans un séminaire, alors que ses frères fréquentaient un pensionnat voisin situé de telle manière qu'il était possible d'échanger des signaux entre les deux établissements. Claude Chappe conçoit d'entretenir des rapports suivis avec ses frères en communiquant avec eux à l'aide de signaux transmis par un appareil formé de trois bras mobiles en bois. Les différentes positions de ces bras correspondaient à un système alphabétique.

Sous la Révolution française et longtemps après la mort de Chappe, le télégraphe aérien devait prendre un essor important. Il devait rester un moyen rapide de transmission de messages jusqu'à l'avènement du télégraphe électrique.

3 Le début des télécommunications

On ne peut vraiment parler de télécommunications que depuis l'apparition des applications de l'électricité, conjuguée à l'invention du téléphone et du microphone ainsi qu'au développement des lignes aériennes et des câbles.

Les premières liaisons réalisées permirent de se rendre compte que, lorsque la ligne téléphonique est courte, la transmission de la parole sous forme de courant électrique est possible sans affaiblissement notable et sans grande variation de niveau. En revanche, lorsque la ligne est longue, l'affaiblissement croît rapidement et cet effet augmente avec la fréquence. On devait constater également que le phénomène dépend de quatre grandeurs caractéristiques de la ligne, soit sa résistance, son inductance, sa capacité et sa conductance.

Se fondant sur les résultats obtenus avec les câbles sous-marins et sur leurs connaissances de l'époque, les techniciens des télécommunications pensaient, vers le milieu du siècle dernier, que pour améliorer la qualité de transmission il fallait agir sur la self-induction, en l'abaissant autant que possible. Cette opinion s'appuyait sur la considération des phénomènes transitoires apparaissant lors des brusques changements de courant engendrés dans la transmission des signaux télégraphiques, retardés par la self-induction du circuit.

Les études théoriques de *Vachy*, en France en 1884, et celles de *Heaviside*, en Angleterre en 1886, devaient attirer l'attention des chercheurs sur le rôle que joue la self-induction dans l'affaiblissement, en corrigeant les effets de la capacité. Ces travaux devaient permettre de conclure qu'il était possible de diminuer l'affaiblissement en aug-

mentant l'induction, ce qui, sur le plan pratique, pouvait être obtenu en réalisant une charge continue (inductance uniformément répartie) ou discontinue (par insertion de bobines à intervalles réguliers). *Barberat*, ingénieur français, suivant les indications de *Vachy*, fait les premiers essais sur le câble téléphonique Paris–Bordeaux en intercalant des bobines de self aux points de coupure d'Orléans, de Blois, de Tours, de Poitiers et d'Angoulême. Vu les mauvais résultats obtenus, on apprit plus tard que la cause en était à l'espace trop grand entre bobines, les essais sont abandonnés.

De son côté, *Pickernell*, ingénieur en chef du département des longues distances à la Compagnie américaine des Téléphones et Télégraphes, et bien d'autres encore, connaissent les mêmes déboires.

4 L'intuition de Pupin

Né en 1858 à Idvor, dans le Banat hongrois, Michael Pupin est serbe d'origine. Durant les vacances scolaires, Pupin et ses camarades gardaient les troupeaux. La plaine où pâtraient les bêtes était située à la frontière, près d'un établissement roumain reconnu malfamé, en raison de la présence de voleurs de bœufs.

Pour prévenir un rapt éventuel, les jeunes gens imaginent un système de signalisation particulier: chaque garçon possédait un couteau muni d'un long manche de bois dont il fichait la lame en terre. Un choc donné sur le manche produisait un son. En appuyant fortement l'oreille sur le sol il s'agissait de déterminer la direction du son et d'évaluer la distance à laquelle se trouvait la source de celui-ci. Avec l'expérience, les jeunes gens acquièrent une très grande précision dans ce genre d'estimation. Sachant que la propagation du son était meilleure dans le sol que dans l'air, ils mirent leur découverte à profit pour dépister les ravisseurs en établissant des communications entre eux depuis leurs cachettes.

Cette expérience, Pupin ne l'oublia jamais et elle fut à l'origine de la découverte qu'il fit 25 ans plus tard.

Ce système de transmission, qui n'est du reste pas nouveau, est utilisé depuis des temps immémorables par les gens du désert qui plaquent l'oreille au sol pour repérer la présence des cavaliers.

En 1874, Pupin émigre aux Etats-Unis. Il travaille tout d'abord comme manœuvre en différents endroits, consacrant ses soirées à l'étude. En 1879, il réussit brillamment ses examens d'entrée à l'Université de Columbia. En 1883, il reçoit son diplôme et ses papiers de naturalisation puis s'embarque pour l'Europe. Il poursuit ses études sur les théories de *Farady* et de *Maxwell* en Angleterre, à l'Université de Cambridge et devient ensuite élève du célèbre physicien *Helmholtz* à l'Université de Berlin.

En 1884, Pupin se trouve de passage à Paris. Il visite la Sorbonne, le Collège de France et le quartier latin où il découvre, dans une librairie d'«occasions», le grand traité de *Lagrange*: «Mécanique analytique» publié pour la première fois en 1788 sous les auspices de l'Académie française.

Le problème qui préoccupait spécialement Lagrange se rapportait à une question de physique imaginaire qui peut s'énoncer ainsi:

«Une corde impondérable est tenue, comme une corde de violon, entre deux points fixes. A des intervalles équidistants, on y attache des petits poids égaux, par

exemple de menus plombs. Comment cette corde, ainsi chargée, vibrera-t-elle quand elle aura été ébranlée par une impulsion quelconque?»

Lagrange trouva à cette question une solution intéressante qui devait marquer le commencement d'une époque dans l'histoire de la physique mathématique. Elle lui permit d'analyser les vibrations d'une corde de violon, un des problèmes célèbres du 18^e siècle.

Pupin fit un essai hardi pour trouver une solution plus générale et moins hypothétique.

Il supposa que la corde elle-même était affectée d'un certain poids et qu'elle se mouvait, ainsi que les masselettes qu'elle supportait, dans un milieu visqueux. Il sentait intuitivement quelle serait la réponse et l'envisagea comme ayant une très grande importance scientifique. Il trouva finalement la solution mathématique la plus générale de ce problème et lorsque les résultats pratiques confirmèrent son attente, c'est avec émotion qu'il se souvint de ses expériences de transmission des ondes dans le sol, alors qu'il était pâtre à Idvor. C'est dans un langage imagé qu'il formula le problème de Lagrange en le rapportant aux phénomènes de transmission électrique:

«Le mouvement vibratoire de l'électricité sera transmis d'une extrémité à l'autre d'un fil conducteur d'autant plus facilement que cette électricité sera plus lourde et moins compressible. Ce qui signifie en termes propres, que, les autres conditions restant les mêmes, plus les réactions cinétiques et élastiques de l'électricité en mouvement sont grandes, plus facile est la transmission, dans le fil, de l'énergie de son mouvement vibratoire. Cela revient à dire que l'induction du fil devrait être aussi grande et sa capacité aussi petite que possible.»

Nommé, en 1889, professeur à l'Université de Columbia à New-York, Pupin reprend, en 1894, la théorie d'*Heaviside* et surtout celle de Lagrange.

Alors en vacances en Suisse et méditant sur son problème, c'est au cours d'une excursion dans la région de la Furka que Pupin pourra s'écrier *Eureka!* Cependant, absorbé par d'autres recherches – Röntgen vient de découvrir les rayons X – Pupin ne reprend qu'en 1899 l'étude commencée en 1894, publie un mémoire et dépose un brevet sur les câbles chargés de façon discontinue.

Il montre qu'il ne suffit pas d'échelonner à n'importe quelle distance des bobines compensatrices, mais que celles-ci doivent être insérées à des intervalles réguliers, suffisamment faibles par rapport à la longueur d'onde des oscillations transmises, pour que la ligne puisse être considérée encore comme courte.

Dans le cas de la ligne téléphonique non chargée inductivement, l'atténuation augmente proportionnellement à la racine carrée de la fréquence. Dans celui de la ligne pupinisée et pour une distance donnée entre les bobines, l'atténuation est presque constante pour une bande de fréquences d'autant plus large que la charge inductive est plus faible. La charge inductive influence également favorablement l'impédance caractéristique de la ligne.

Il y a lieu d'ajouter que la construction de la bobine demanda à Pupin presque autant de temps et d'études expérimentales que la recherche théorique de l'invention.

Au début du 20^e siècle, deux inventions ont marqué le domaine des télécommunications. Il s'agit du câble *Krarup* et des *amplificateurs*. Si la première, très importante pour les câbles télégraphiques sous-marins, n'est plus guère utilisée, la seconde a conservé toute son actualité.

En 1901, Krarup, ingénieur en chef de l'Administration danoise des Téléphones, essaie de réaliser la charge inductive continue d'un câble, en enroulant un fil de fer de faible diamètre (0,1 mm) autour du conducteur. La perméabilité du champ magnétique et, par conséquent, l'induction de la ligne sont ainsi augmentées. En plus de la diminution de l'affaiblissement obtenue, ces câbles présentaient l'avantage d'être homogènes longitudinalement.

L'invention de Krarup permit un important développement des câbles télégraphiques sous-marins. Elle fut à la base des progrès réalisés dans les alliages à haute perméabilité au Fer-Nickel portant le nom de *Permalloy*.

Le premier câble Krarup (7×2), commandé par l'Entreprise des PTT suisses, fut monté dans le tunnel du Simplon en 1905. Le deuxième est celui de la ligne Bâle-Zurich (85 km). C'est un câble en quartes construit par *Aubert-Grenier* à Cossonay de 1914 à 1917.

L'ère de ces câbles s'éteint vers 1920, mais leur fabrication en Suisse devait continuer cependant, pour les CFF notamment, jusqu'en 1930.

Le développement des tubes à vide, pendant la première guerre mondiale, devait entraîner la mise au point d'amplificateurs qui furent alors utilisés avec plein succès dans le domaine des télécommunications. La grande sensibilité des circuits équipés de ces appareils contraint les spécialistes de l'époque à exiger une stabilité suffisante des caractéristiques électriques des lignes, afin d'assurer une transmission exempte de perturbations. Cette nécessité ne resta pas sans influence sur la construction des bobines Pupin et, après son inventeur, d'autres chercheurs proposèrent des solutions plus ou moins heureuses.

5 Les bobines Pupin et leur noyau

51 Bobine à noyau annulaire en fil d'acier

Dans son brevet fondamental, déposé en 1899, Pupin définit le noyau de sa bobine comme étant un tore en spires de fil d'acier. Ce fil d'acier fut le seul matériel magnétique utilisé jusqu'au début de la première guerre mondiale, permettant de maintenir les courants de Foucault dans des limites admissibles aux fréquences téléphoniques. Encore fallait-il prêter toute l'attention voulue à une isolation suffisante des fils entre eux.

La fabrication du noyau était simple; sa perméabilité initiale était d'environ 90. Malheureusement, elle diminuait jusqu'à 30% lorsqu'un courant instantané dans l'enroulement de la bobine provoquait une magnétisation permanente. Il est intéressant de noter que, selon une statistique américaine parue vers 1910, les courants perturbateurs provoqués dans les lignes téléphoniques par des coups de foudre ou par l'influence accidentelle d'un courant fort, peuvent atteindre la valeur de 2 ampères.

52 Bobine à noyau annulaire en poudre comprimée

La première guerre mondiale empêcha l'Europe de livrer à l'Amérique le fil d'acier nécessaire à la confection des noyaux en tore. Par la force des choses, les recherches en vue de fabriquer un nouveau noyau, dont la stabilité magnétique serait améliorée, furent activement poussées. Le traitement d'une poudre de fer laquée, mélangée avec une poudre céramique, puis soumise à une pression très élevée (25 t/cm²), donna naissance au «noyau comprimé».

Un tel noyau comporte une multitude d'entrefer et, de ce fait, sa perméabilité magnétique est relativement faible

(environ 30 pour les premiers exemplaires) mais très stable. La variation de la perméabilité, après le passage d'un courant instantané de 2 ampères était inférieure à 1%.

Les premiers noyaux en poudre fabriqués en Amérique étaient composés de 6 anneaux superposés. Dès la fin de la première guerre mondiale, leur fabrication fut entreprise dans la plupart des grands pays européens.

Plusieurs améliorations furent tentées tant dans la confection de la poudre magnétique que dans l'isolation et l'on obtint d'excellents résultats. La perméabilité, par exemple, fut portée à 120 tout en limitant à des valeurs faibles les pertes par courants de Foucault, par hystérisis et par viscosité.

Dans la fabrication des premiers noyaux, on faisait appel à une poudre de fer obtenue électrolytiquement. On essaya ensuite d'obtenir la poudre par un moyen mécanique en utilisant des machines spéciales, mais cette méthode se révéla trop compliquée. Bien que l'opération se fit dans une atmosphère de gaz inerte, cela n'empêcha pas des explosions dans l'installation (effet pyrophorique).

Vers 1930, un grand pas fut franchi lorsque *IG-Farben* mit à la disposition des fabricants de noyaux sa poudre produite chimiquement. Son promoteur, le Dr. *Hochheim*, était bien connu dans les milieux scientifiques suisses.

Le carbonyle de fer sous forme liquide, utilisé comme antidiétonant dans les moteurs à explosion était à la base de cette poudre obtenue par décomposition à haute température et sous pression élevée. Du fait que les grains étaient parfaitement sphériques, il fut, au début, très difficile d'obtenir des noyaux comprimés.

Un nouveau progrès fut réalisé par la *Bell Telephone* en remplaçant la poudre de fer par un alliage de Fer-Nickel puis de Fer-Nickel-Molybdène. Ces types de noyaux sont encore utilisés aujourd'hui en Amérique et au Canada. En Angleterre, *Polgreen* de la *General Electric* mit au point un autre procédé pour obtenir un matériau en poudre d'un alliage de fer-nickel. Depuis peu, on obtient des noyaux comprimés d'une perméabilité initiale allant jusqu'à 500.

53 La bobine à noyau cruciforme

Son inventeur *von Wysiecki* fut le premier constructeur de bobines Pupin aux *Câbleries et Tréfileries de Cossonay*. Le brevet suisse date du 1.8.1923. Le noyau cruciforme est formé de 4 bras dont les montants sont de mêmes dimensions. Un manteau de forme cylindrique ferme le circuit magnétique. La bobine possède deux enroulements placés diagonalement par rapport aux bras de la croix et perpendiculairement entre eux. Connectés en série, ils constituent le circuit de base. Connectées en parallèle, les bobines forment la moitié d'un circuit fantôme.

La valeur de l'inductance est obtenue par le choix du matériau tant pour le noyau que pour le manteau et dépend des sections respectives. Les bras du circuit de base sont constitués de fil d'acier de 0,1 mm alors que les deux autres sont en fil de fer. Le manteau est en fil Krarup.

Malgré la simplicité du schéma, l'exécution technique de cette bobine comportait de nombreuses difficultés. Le boîtier de la bobine fut d'abord en zinc puis en cuivre. Afin de limiter la dispersion du flux et, par conséquent, diminuer la diaphonie entre bobines voisines, il fallut encore prévoir deux anneaux magnétiques en fil de fer aux extrémités de l'enroulement. La stabilité de cette bobine (inductance totale) était garantie par les entrefer. Malheureusement, la symétrie entre les deux moitiés d'enroulement devenait insuffisante lorsque l'un de ceux-ci était parcouru par un

courant perturbateur. Cette construction fut abandonnée en 1929.

54 La bobine à manteau

Mise au point à Cossonay par l'ingénieur *F. Chalet*, cette bobine est à noyau droit formé de deux blocs séparés par un entrefer et constitués par des galettes en fil d'acier collées et comprimées ensemble. Un manteau en fil Krarup, dont le corps est en papier bakélisé, ferme le circuit magnétique (fig. 1). Les côtés ont une forme légèrement bombée, de façon que le fil de fer s'applique fermement sur le support et que l'entrefer entre le noyau et le manteau soit déterminé avec précision.

55 La bobine à noyau comprimé fendu

Pour parer aux difficultés rencontrées dans le bobinage des tores, une méthode de fabrication originale fut mise à l'essai. Un segment d'environ 30° était découpé dans le noyau et 12 secteurs d'enroulement bobinés à part. En glissant ceux-ci sur le noyau ouvert et en remettant en place le segment portant également une bobine, le tore et le circuit magnétique étaient reconstitués. Vu les complications techniques du procédé, il ne lui fut pas donné suite.

56 La bobine à noyau toroïdal à fils transversaux

Pour obtenir un noyau aux propriétés magnétiques stables avec un matériau magnétiquement instable, il y a lieu de prévoir des entrefers. Une des solutions proposées consistait à bobiner un fil de fer en couches successives parallèles à l'axe d'un cylindre de bois, dont le diamètre était égal au diamètre intérieur du tore à obtenir, jusqu'à ce que les dimensions extérieures de ce dernier soient atteintes. Le tout était imprégné d'un vernis et ainsi maintenu ensemble. Une fois les extrémités coupées et le

cylindre de bois retiré, on disposait d'un tube qui pouvait être coupé en rondelles de l'épaisseur voulue. Cette méthode est restée à l'état d'essai.

57 La bobine à noyau en double U

Deux noyaux en forme de U étaient composés de minces tôles de FeNi, superposées et isolées entre elles. Deux bobines de self constituant les demi-charges étaient glissées en bout de bras des deux noyaux de manière que ceux-ci viennent se placer en face l'un de l'autre, mais à la distance constituant l'entrefer au milieu de chacune des bobines. On obtenait ainsi une certaine stabilité magnétique. Les essais ne furent pas poussés plus avant.

58 La bobine à noyau toroïdal en isoperme

Dans les laboratoires des télécommunications de l'AEG à Berlin, on avait réussi en 1929, à fabriquer des bandes ferromagnétiques en alliage fer-nickel 50-50% dont la rémanence et la force coercitive étaient extrêmement faibles et dont la courbe d'hystérisis était donc très étroite. Ce résultat fut obtenu en réduisant, par un laminage répété et sans recuit intermédiaire, l'épaisseur des bandes d'environ 99% soit, par exemple, de 5 à 0,05 mm. Ce matériau, appelé *isoperme*, est extrêmement stable du point de vue magnétique. Après une forte aimantation, allant même jusqu'à la saturation, il reprend pratiquement son état primitif. Sa perméabilité initiale ne change donc que très peu (moins que 1%). Fabriqué également sous le nom de «ferroxcube» par la Maison Philips dès 1934, ce matériau, enroulé sous forme de noyau toroïdal, put être livré en Suisse, et utilisé pour des noyaux de bobines Pupin dès 1935.

59 La bobine à noyau en pot de ferrite

Pendant le deuxième conflit mondial, *Snoeks*, un chimiste des laboratoires de Philips à Eindhoven put, le premier, réaliser la fabrication de ferrites de qualités magnétiques intéressantes. On savait déjà depuis longtemps que l'oxyde de fer (Fe_3O_4) était légèrement magnétique. En mélangeant dans des proportions appropriées différents oxydes métalliques, en les traitant surtout thermiquement (frittage) et d'une manière bien définie, *Snoeks* put obtenir un produit qui allait dominer les marchés mondiaux des matériaux magnétiques pour les télécommunications durant les décennies suivantes. Malheureusement, *Snoeks* fut tué en 1950 dans un accident d'automobile.

Ces ferrites présentent normalement une perméabilité initiale élevée (environ 2000) mais sont magnétiquement instables. Il est donc nécessaire de prévoir un entrefer, d'où la construction en forme de pot, avec l'entrefer dans la partie centrale. Etant donné le rétrécissement très prononcé des ferrites lors du frittage (environ 15%), des travaux de recherche de longue haleine durent être menés à terme avant de pouvoir passer de la fabrication d'essai à celle en grande série. Les difficultés furent surmontées par la mise au point de fours à programmation de température très précise. Au début, seules des pièces simples, telles que plaques, anneaux ou tiges pouvaient être traitées. Ce ne fut que plus tard qu'il devint possible de traiter directement des demi-pots complets.

6 Les bobinages

61 Bobinage des noyaux annulaires

Jusqu'en 1924 environ, le bobinage des enroulements pour noyaux annulaires se faisait à la main. La création de

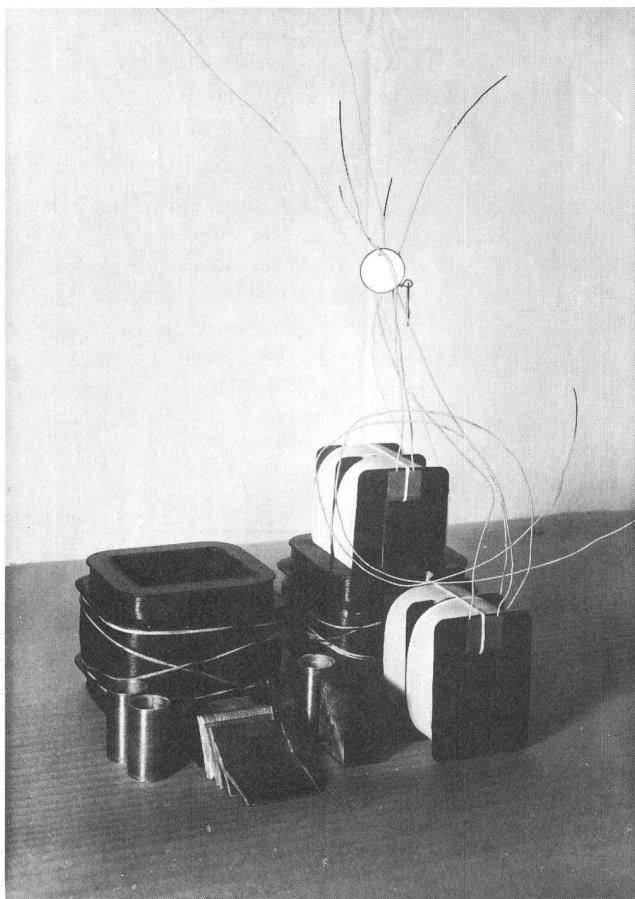


Fig. 1
Eléments d'une bobine à manteau (1930...1934)

machines à bobiner devenait urgente. Plusieurs maisons mirent au point des bobineuses automatiques (*Froitzheim et Rudert, Micafil, Philips*). Sans entrer dans les détails techniques, notons cependant que toutes ces machines sont dotées d'un magasin annulaire divisible facile à introduire à l'intérieur du tore magnétique (voir *page de couverture*).

Au début, la bobine Pupin affectée aux circuits de base est répartie en deux enroulements tandis que celle destinée aux circuits fantômes l'est en quatre. Les différents enroulements devaient être aussi égaux que possible et couvrir toute la circonference du noyau afin d'éviter une aimantation irrégulière de ce dernier lors du passage d'un courant perturbateur dans un des enroulements. Par la suite, l'amélioration des qualités du noyau permit de se rendre compte qu'il était suffisant de diviser les bobines du circuit fantôme également en deux enroulements. Cette méthode fut utilisée en Suisse de 1935 à 1957. A la demande de l'Entreprise des PTT, le bobinage bifilaire pour les enroulements de base fut introduit, afin de diminuer l'inductance résiduelle dans les circuits fantômes. Il fallut ensuite résoudre d'autres problèmes ayant trait à l'isolation et à l'éventuelle imprégnation des bobinages.

62 Bobinage des noyaux cruciformes

Ces enroulements étaient encore bobinés à la main. La bobine comportait deux enroulements divisés en $\frac{1}{4} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4}$. L'un des demi-enroulements était connecté avec les deux quarts de l'autre enroulement et inversement. Les fils étaient isolés au coton et imprégnés d'une masse spéciale.

63 Le bobinage des bobines à manteau

Le bobinage sur carcasse droite peut se faire avec les machines utilisées couramment pour les bobines ouvertes. Il doit cependant être réalisé parallèlement sur les deux moitiés de la carcasse avec croisement au milieu pour répartir judicieusement chaque enroulement sur toute la longueur du noyau.

64 Bobinage pour noyaux en pot

Le bobinage est effectué sur une carcasse de matière thermoplastique injectée comportant un compartiment pour la bobine de base (circuit réel) et deux pour la bobine fantôme (circuit combiné). La perméabilité effective élevée du noyau permet de diminuer sensiblement le nombre de spires et le diamètre du fil de cuivre (0,25 à 0,40 mm suivant l'inductance). Le fil est isolé par un émail synthétique renforcé spécial. Le nombre de spires est déterminé par la valeur de la perméabilité du pot.

L'enroulement est bifilaire, les deux fils étant torsadés à un pas bien déterminé. Dans le cas de la bobine fantôme, on procède en outre à un croisement à la moitié de l'enroulement. L'inductance résiduelle devient ainsi pratiquement nulle, ce qui est important lors de la constitution des unités pour les circuits combinés.

Ce genre de bobinage s'effectue sur des machines dites «droites», plus simples que celles qui sont utilisées pour le bobinage des tores. Cette particularité, jointe à celle de l'équilibrage facile de l'inductance, amène une économie appréciable de main-d'œuvre et de matières premières. L'ajustage de l'inductance varie selon le type de pot. Si les deux coquilles comportent des cavités excentriques, on procède par rotation de l'une d'elles par rapport à l'autre.

Lorsque les coquilles comportent un trou dans la portée centrale, on utilise alors une tige composée de caoutchouc et de poudre de fer introduite dans ce trou. Les tiges sont classées en 12 catégories de perméabilité.

7 Les boîtes

Comme les câbles, les bobines Pupin sont enfouies dans le sol, voire logées dans des chambres souterraines. Il y a donc lieu de les monter dans des récipients étanches et résistants aux effets de la corrosion. A cet effet, on utilise soit des caissons en fonte goudronnés, soit des boîtes en acier recouvertes d'une couche protectrice, soit encore des manchons en plomb.

Les *caissons en fonte* furent utilisés de longues années durant dans le monde entier, en raison de leur très bonne résistance à la corrosion. Ils étaient souvent doublés à l'intérieur d'un boîtier en tôle de zinc ou de laiton. Les bobines encapsulées (fig. 2) et noyées dans une masse isolante étaient placées dans le boîtier métallique de façon à utiliser au mieux la place disponible. Le tout était enrobé d'une masse isolante coulée une fois le montage terminé et le boîtier introduit dans le caisson. L'espace entre les deux récipients était rempli de bitume. En Suisse, les premiers caissons en fonte ont été fabriqués par la SA des Câbleries et Tréfileries de Cossonay (fig. 3 et 4).

Les *manchons en plomb* trouvent application en particulier dans les chambres souterraines. De section ovale, ils sont fermés sur un côté par un couvercle de plomb soudé à l'ensemble, l'autre extrémité étant réservée au câble de raccordement (stub) (fig. 5).

L'introduction des *caissons en acier* coïncide avec la fabrication des bobines Pupin à noyau de ferrite. Le montage devient plus sophistiqué. Le volume des bobines ayant sensiblement diminué, elles sont fixées sur un gabarit mobile qui permet d'en monter trois rangées en parallèle (fig. 6). De plus, les câbles de raccordement sont à isolation thermoplastique. Les caissons fermés hermétiquement



Fig. 2
Bobine de type annulaire encapsulée



Fig. 3
Caisson en fonte (1920)

ment sont recouverts d'un enduit spécial de protection contre la corrosion. Le poids de l'ensemble est réduit, ce qui représente également un avantage.

8 La pupinisation en Suisse

81 Les premiers essais

En 1920, l'Entreprise des PTT envisage la pupinisation d'un premier câble téléphonique. Il s'agit de la liaison Lausanne-Genève, réalisée en câble DM $40 \times 2 \times 1,5$. La moitié des circuits est pupinisée en base et fantôme à 177/107 mH, l'autre moitié l'est en base à 177 mH. L'équilibrage des couplages capacitifs est assuré à l'aide de condensateurs. Les travaux sont exécutés par *Siemens et Halske*, une partie des bobines Pupin étant livrées par les usines d'Albisrieden à Zurich.

A peu près à la même époque, les Câbleries et Tréfileries de Cossonay créent un laboratoire et un atelier de fabrication pour bobines Pupin. En 1921, elles procèdent à la pupinisation de certains tronçons, tels que la ligne du St-Gothard, celle de Coire-Landquart, Bâle-Liestal, pour n'en

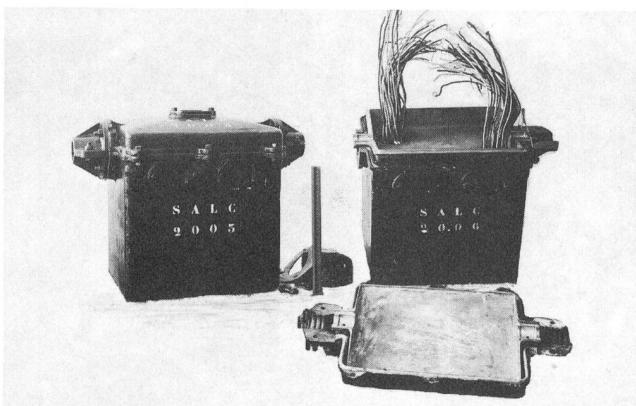


Fig. 4
Caisson en fonte (1922)

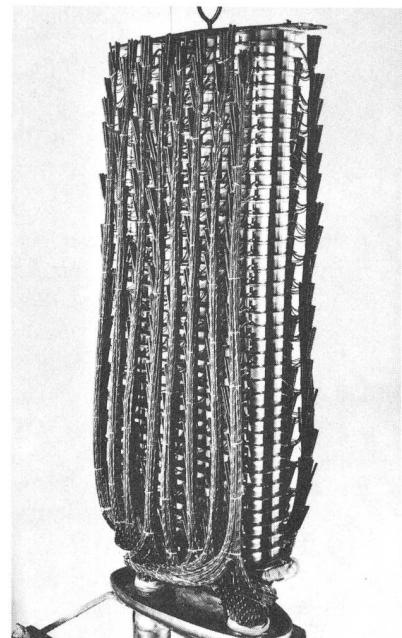


Fig. 5
Manchon de 600 bobines en pots de ferrite pour la pupinisation des lignes intercentrales

citer que quelques-unes. D'autres travaux sont également réalisés en 1922, par exemple la pupinisation en «réel» à 100 mH de la ligne Berne-Hunzikenbrücke, à l'occasion de laquelle l'impédance des circuits en fonction de la fréquence est mesurée pour la première fois.

82 La pupinisation devient adulte

Lors des travaux d'électrification de la ligne du St-Gothard en 1922, un court-circuit momentané d'environ 12 000 ampères se produit qui induit un courant d'environ une dizaine d'ampères dans le câble téléphonique. L'inductance des bobines diminue d'environ 40% et les décréments d'affaiblissement augmentent d'environ 30%, ce qui conduit l'Entreprise des PTT à édicter de nouvelles prescriptions. Alors qu'une variation maximale de 2...5% de l'inductance

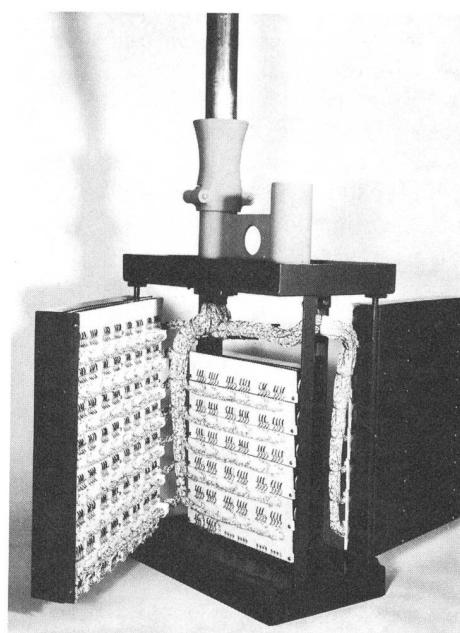


Fig. 6
Caisson en acier ouvert, montrant la disposition intérieure des panneaux portant les bobines

après le passage d'un courant de 0,1 A était admise, les nouvelles valeurs imposées sont de $\pm 2\%$ après le passage d'un courant de 1 A. Des nouvelles études requises, naquit la bobine à noyau cruciforme (Brevet Wysiecki). Entre 1923 et 1925, de nombreuses lignes furent équipées de ce type de bobines.

En 1926, *Felten et Guilleaume* fournit le câble et les bobines de 176 mH pour la liaison Zurich–Bülach. Il s'agit du premier câble toronné en étoile monté en Suisse. En 1928, un câble DM (166×2), au centre duquel se trouve une quarte pupinisée à 9,5 mH, sous gaine de plomb, pour les transmissions musicales est livré par les usines de *Cortaillod*. Les bobines Pupin sont fabriquées par *Bell Téléphone*. Le câble est posé au St-Gothard.

Les essais se poursuivent sur d'autres tronçons (Berne-Thoune, Aarau–Lucerne, etc.). Les difficultés concernant l'équilibrage des capacités des longueurs de pupinisation ne sont pas encore surmontées. Les bobines Pupin ne sont pas encore tout à fait au point. Si la stabilité d'inductance du circuit de base est remarquable, celle du circuit fantôme l'est moins. Cela provient du fait que le flux magnétique dû au passage d'un courant circulant seulement dans un fil ne traverse qu'une partie de l'ensemble croix-manteau. En 1929, les études concernant la nouvelle bobine à manteau sont terminées. Une stabilité remarquable est obtenue en intercalant trois entrefers dans le circuit magnétique. Près de 32 000 bobines de ce genre ont été posées dans le réseau suisse de 1930 à 1934.

Tant sur le plan de ses propriétés magnétiques qu'en ce qui concerne son volume, la bobine à manteau représentait un grand progrès par rapport aux bobines à noyau cruciforme. Cependant, il devint bientôt nécessaire de rechercher des solutions permettant d'en diminuer le volume pour maintenir la fabrication suisse au niveau international. C'est pourquoi la décision fut prise, en 1934, d'adopter une construction à noyau toroïdal en «Fernicube», utilisée de 1935 à 1965 et partiellement remplacée par des tores en poudre comprimée, dès 1952. Les ensembles étaient livrés dans des manchons de plomb pouvant contenir jusqu'à 60 bobines ou dans des caissons en fonte pour un nombre supérieur d'éléments. Une exception concerne les deux manchons cylindriques contenant 40 bobines, immersés dans le lac de Zurich pour la pupinisation d'un câble livré par les *Câbleries de Brougg*.

Cependant, la seconde guerre mondiale provoque de graves difficultés d'approvisionnement et il devient nécessaire et urgent d'envisager la fabrication des noyaux en Suisse. Les premiers essais ont lieu dans de petits fours à induction HF aux laboratoires de l'Université de Lausanne ou au Bureau fédéral des poids et mesures à Berne. Le fer et le nickel purs sont prélevés du stock de guerre. Les résultats concluants permettent de passer à la fabrication de lingots, qui seront coulés et laminés à chaud par les *Usines métallurgiques de Dornach*. Le laminage à froid, jusqu'à une épaisseur de 0,05 mm sera assuré par les Câbleries et Tréfileries de *Cossonay*.

83 Evolution au cours des 30 dernières années

L'évolution durant cette période dans le domaine de la pupinisation en Suisse, peut être illustrée par les dates ci-après:

- 1946 Remplacement de la pupinisation 177/63 par 88,5/31,5 mH.
- 1947 Premiers essais d'utilisation de tores de 42,5 mm de diamètre moyen au lieu de 50 mm.

Premiers essais avec des pots en ferrite, composés de 5 pièces.

- 1948 Première commande de manchons de bobines de 15,5 mH et de manchons de condensateurs de 40 nF pour les lignes d'abonnés (circuits pour la télédistribution).
- 1955 Réduction de l'inductance des bobines musicales de 15,5 mH à 6 mH.
- 1957 Adoption d'une boîte unique pour les bobines de 15,5 mH et les condensateurs de 40 nF. Choix d'un enroulement bifilaire pour les bobines de base afin de diminuer l'inductance résiduelle dans le circuit fantôme.
- 1958 Premier manchon de 600 bobines pour les circuits intercentraux et d'abonnés. Bobines de 15,5 mH sur noyau comprimé de 40×26×12 mm.
- 1959 Reprise de l'étude de l'utilisation des pots de ferrite constitués maintenant en deux pièces identiques. En effet, si le mode de bobinage et d'encapsulage sont des plus simples, la constance des propriétés électriques en fonction du temps et la stabilité mécanique sont beaucoup plus difficiles à garantir. Les coquilles sont très friables, leur sensibilité aux chocs thermiques est grande. Pour cette raison, il faut utiliser une masse de remplissage à bas point de goutte.
- 1964 La qualité du ferrite s'améliore. Il a fallu ces quelques années pour observer et limiter les variations dans le temps de l'inductance des nouvelles bobines. Celle-ci diminue selon une loi exponentielle. En conséquence, on aurait un intérêt évident à stocker les bobines le plus longtemps possible (au moins une année). Malheureusement, les noyaux sont livrés à une cadence ne le permettant pas. On adopte alors la solution du vieillissement artificiel: Les bobines sont placées dans une armoire où la température passe alternativement de +20 à +60 °C pendant 5 cycles et durant 5 jours. Cette opération permet aussi la polymérisation de la colle fixant les deux coquilles du pot. Le temps de stockage est ainsi ramené à 1 mois au minimum. La valeur de l'inductance est en outre réglée à environ 1% au-dessus de la limite supérieure imposée. De plus, l'amélioration de la qualité de l'émail permet de supprimer le guipage du fil dans la fabrication de tous les enroulements, donc de diminuer la section de bobinage et d'augmenter celle du fer.
- 1966 Etude de l'automatisation de certains procédés de fabrication afin de palier la difficulté de recrutement du personnel du laboratoire et de simplifier son travail.
- 1967 Commande des premières bobines à noyau en pot de ferrite (12 000 pièces pour la ligne Schönbühl–Münchenbuchsee). En outre, quelques manchons de pupinisation de 10 et 20 bobines sont montés dans le tunnel du St-Gothard, dans des armoires adéquates. Les bobines sont du type dit «miniature». Le manchon est constitué par un tube de forme cylindrique en PCV dur, terminé d'un côté par un cône en CVP mou pour permettre le collage de ces deux parties et du câble amorce à isolation thermoplastique. Les quatre plus gros manchons en plomb (types M7, M8, M9 et M9_c), peu maniables sur le chantier, sont munis d'une cage de manutention (fig. 7).

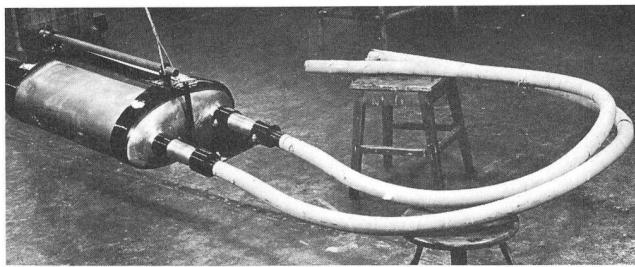


Fig. 7
Manchon de pupinisation avec cage de manutention

Après l'abandon des caissons en fonte, il semble bien que les manchons en plomb pour plus de 100 bobines soient destinés à disparaître. La nouvelle solution envisagée est celle d'une boîte en acier inoxydable. Cet alliage est du reste utilisé dans la construction du caisson sous-lacustre posé en 1969 dans le Lac Léman (fig. 8).

Pour les lignes souterraines, les PTT proposent un caisson d'acier recouvert d'un vernis protecteur constitué par une couche de zinc pulvérisé recouverte d'une peinture à base de résine époxy.

1971 Commande des premiers caissons en tôle d'acier, contenant 111 unités de 88,5/36 mH + 4 bobines de 6 mH.

Tableau I. Evolution des volumes et des poids des bobines

| Modèle | Année | Inductance mH | Volume cm ³ | Poids g |
|-----------------------|-------|---------------------|---------------------------|------------|
| Annulaire | 1920 | 200 | 1100 | 2860 |
| Cruciforme | 1923 | 177 $\frac{107}{2}$ | 1700 | 5350 |
| A manteau | 1930 | 177 | 860 | 3250 |
| Annulaire | 1934 | 177 | 180 | 565 |
| Annulaire | 1948 | 88,5 | 110 | 390 |
| En pot | 1964 | 88,5 | 28 | 90 |
| En pot | 1973 | 88,5 | 18 | 55 |
| En pot (miniature) | 1973 | 15,5 | 11 | 30 |

9 Conclusion

L'idée de Michael Pupin fut à l'origine d'une certaine forme d'évolution des télécommunications. D'autres chercheurs y ont également contribué et les crises politiques ou économiques qui ont secoué les pays industrialisés pendant la première moitié de ce siècle n'ont fait qu'aviver l'esprit

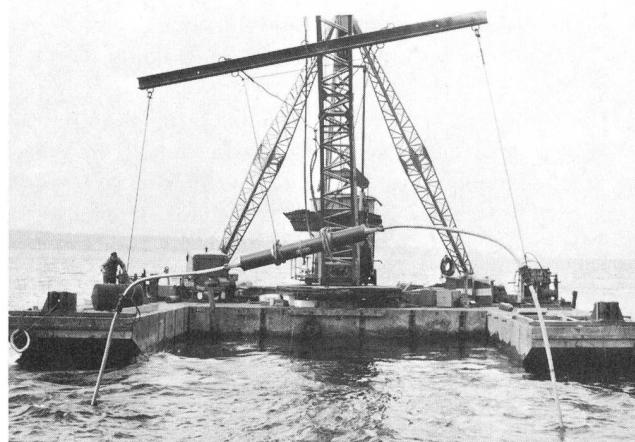


Fig. 8
Manchon spécial immergé dans le Lac Léman en 1970

d'invention des pionniers. Ceux-ci ont contribué au développement d'un moyen d'échange d'informations dont plus personne ne saurait se passer aujourd'hui. Sachons le reconnaître et nous en souvenir.

Adresses des auteurs:

Fernand Chalet, av. Recordon 21, 1000 Lausanne.
Robert Goldschmidt, av. C.-F. Ramuz 115, 1009 Pully.
Arnold Saillen, av. Mon-Loisir 2, 1006 Lausanne,

Bibliographie

- M. Pupin. From immigrant to inventor.*
PTT suisses. 100 Jahre elektrisches Nachrichtenwesen in der Schweiz: 1852-1952.
H. Dohmen. Das Pupinsystem in deutscher Anwendung.
M. Pupin. Wave transmission over non uniform cables and long distance air lines. Trans. AIEE 17 (1900) 445.
A. Ebeling. Über das im Bodensee verlegte Fernsprechkabel mit Selbstinduktionsspulen nach Pupin'schem System ETZ (1907) 661.
B. Gherardi. Commercial loading of telephone circuits in the Bell System. Trans. AIEE 30 (1911) 1743.
M. Pupin. Die Anfänge der Pupin'schen Erfindung. Fernkabel 1 (1922) 3.
L.D. Cahen. Le progrès et l'état actuel de la technique des lignes pupinisées. Bull. Soc. franç. des Electriciens (1924) 755.
Pupinkästen für die schweizerische Obertelegraphendirektion. Siemens Zeitschrift (1924) 364.
Th. Shaw and W. Fondillier. Developpement and application of loading coils for telephone circuits. AIEE 45 (1926) 253.
R.D. Jessup. Manufacture of Pupincoils. Tel. Eng. 2 (1927) 37.
W. Deutschmann. Über die günstigsten Ausmassen von Pupinspulenkernen. TFT 6 (1931) 171.
W. Doecke. Die Hysteresedämpfung von Pupinleitungen. ENT 8 (1931) 340.
R. Goldschmidt. Über die Temperaturabhängigkeit von Wellenwiderstand und Dämpfung pupinisierter Leitungen. Techn. Mitt. PTT 15 (1937) 104.
T. Shaw. The evolution of inductive loading for Bell Telephone facilities. BSTJ 30 (1951) 149.
R. Goldschmidt. Über den Einfluss der Streuinduktivität der Pupinspulen auf die Übertragungseigenschaften des Phantomkreises. Techn. Mitt. PTT 37 (1959) 304.
V.E. Legg: Analysis of quality factor of annular core inductors. BSTJ 39 (1960) 105.
A. Pierrot. Résistance des conducteurs de bobines d'inductance à noyau ferromagnétique. Câbles et Transmissions 4 (1966) 250.
K. Schüssler. Zur Entwicklung der Pupinspulentechnik. Siemens Zeitschrift 47 (1973) 660.
B. Speed and G.W. Elmen. Magnetic properties of compressed powdered iron. Trans. AIEE 40 (1921) 596.
H. Jordan. Die ferromagnetischen Konstanten für schwache Wechselfelder. ENT 1 (1924) 7.
W. Ehlers. Pupinspulen mit Massekernen. ENT 2 (1925) 121.
W.J. Shackleton and J.G. Barber. Compressed powdered permalloy, AIEE (1928) feb.
F. Ollendorf. Magnetostatik der Massekerne. AfE25 (1931) 436.
H. Deutschmann. Über Massekerne. ENT 9 (1932) 421.
H. Jordan, T.H. Volk, R. Goldschmidt. Pupinspulen mit Kernen aus Isopermblech oder Band. Europ. Fernsprechdienst 31 (1933) 8.
O. Dahl, J. Pfaffenberger, H. Sprung. Neuartige magnetische Werkstoffe für Pupinspulen (Isoperme). ENT 10 (1933) 317.
R. Goldschmidt. Die Werkstoffforderungen der Fernmeldetechnik unter besonderer Berücksichtigung des Pupinspulenbaus. Z. f. techn. Phys. 15 (1934) 95.
H. Kersten. Spulen mit Massekernen. Siemens Veröff. 7 (1937) 849.
V. Legg and F.G. Given. Compressed powdered Molybdenum Permalloy for high quality inductance coils BSTJ 19 (1940) 384.
G.R. Polygreen. Magnetic dust cores. The Post Office Eng. Journal 37 (1944) 1.
V.E. Legg. Ferrites, new magnetic material for communication engineering. Bell Lab. Record 29 (1951) 203.
W. Six. Einige Anwendungen von Ferroxcube. Philips Techn. Rundschau 13 (1952) 293.