Méthode d'études et lois du vieillissement et du rajeunissement magnétique de fers employés dans la technique téléphonique

Autor(en): **Wild, Georges / Perrier, Albert**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung = Bulletin technique / Administration des télégraphes et des téléphones suisses = Bollettino tecnico / Amministrazione dei telegrafi e dei telefoni svizzeri**

Band (Jahr): **3 (1925)**

Heft 6

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-873917

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Méthode d'étude et lois du vieillissement et du rajeunissement magnétiques de fers employés dans la technique téléphonique.

Par Georges Wild et Albert Perrier, Lausanne. [1])

I. Esquisse et buts du travail.

Les applications électrotechniques des fers doux ont rencontré dès longtemps sur leur route et d'une manière gênante ce que l'on a appelé leur vieillissement magnétique, soit essentiellement une décroissance lente de leur perméabilité, sans qu'un agent ait besoin d'agir directement; la matière n'acquiert qu'à la longue un état magnétiquement stable. Si les inconvénients de ces phénomènes ne sont plus guère sensibles dans la technique des courants forts, il en est tout autrement dans celle des courants faibles, tout particulièrement dans l'installation très actuelle des câbles téléphoniques à grande distance chargés inductivement.

Il s'agit là, comme on sait, de réaliser des selfs (bobines Pupin) d'encombrement très réduit, d'inductance notable, imposée par les conditions de la ligne, et très constante. D'où la nécessité d'enroulements sur matière ferromagnétique travaillant dans des champs assez faibles pour faire intervenir seulement la „perméabilité initiale" soit, dans la première partie de la courbe d'aimantation classique, cette branche *presque* dénuée d'hystérèse et qui se représente avec une bonne approximation par une formule de la forme

$$B = \mu_0 H + a H^2$$

d'où

$$\mu \text{ initiale} = \mu_0 + a H \text{ [2])}$$

Or, ces conditions de travail ne sauraient plus même s'accommoder de variations lentes de la perméabilité (inductance!) de l'ordre de 2 à 3 %, et la stabilité magnétique des métaux employés devient une exigence de premier plan.

Le présent travail est issu d'une question de cet ordre, posée à propos de fers et aciers destinés à la préparation de bobines Pupin. Il s'agissait de savoir si le choix de la composition et les traitements subis en usine par ces fils les avaient amenés à un degré de stabilité satisfaisant.

Il convient de remarquer avant tout que la réponse péremptoire à une telle question — question de fonction de temps! — ne peut être donnée en fait que par le temps lui-même, procédé dont les nécessités non moins péremptoires de l'industrie ne peuvent s'accommoder.

Nous avons donc dû nous assigner la tâche d'instituer une technique conduisant si possible à des conclusions motivées dans un temps très limité (10 semaines environ). Les résultats ont répondu à notre attente, par certaines faces, dans une plus grande mesure que nous le pensions.

Nous rassemblons dans la présente publication non pas tant les réponses obtenues aux questions posées que les méthodes qui ont permis d'en obtenir, et également des phénomènes en partie nouveaux qui ont été observés. Un tel travail à durée limitée et que, pour le moment, nous ne pouvons reprendre sur une base plus large, ne peut prétendre à des conclusions très généralement applicables, mais nous avons la conviction qu'il peut être utile à ceux qui ont pour mission d'étudier les propriétés magnétiques des fers et aciers industriels, si généralement et si obstinément complexes et capricieuses.

A compulser les innombrables données expérimentales que l'on accumule depuis plusieurs dizaines d'années sur les phénomènes irréversibles, dans le sens le plus étendu, du ferromagnétisme, on gagne facilement l'impression que le domaine soit inextricable, scientifiquement parlant. Mais toutefois, on arrive peu à peu à la conclusion plus juste que lorsqu'on s'est astreint — c'est le cas de la minorité des travaux, mais en nombre respectable cependant — à des traitements empiriques sans doute, mais conduits très systématiquement sur un nombre limité de substances bien déterminées, on a presque toujours trouvé des règles assez claires pour dégager les questions posées de leur cortège habituel d'obscurités ([3]).

En ce qui touche le présent travail, les recherches antérieures de l'un de nous ([4]), bien que consacrées à des problèmes apparentés, mais non identiques, nous donnaient, avec l'espoir d'aboutir, la suggestion de la ligne de conduite générale à adopter :

Par un nombre suffisant d'expériences, déterminer des régions de température, s'il y en a, où le vieillissement soit particulièrement rapide; observer systématiquement dans ces conditions beaucoup plus commodes ce vieillissement, en dégager des lois pour autant qu'il s'en manifesterait. Reprendre encore ces observations en intercalant des traitements thermiques à haute et basse température, afin d'amener la même matière aux états magnétiques les plus extrêmes accessibles. S'il apparaissait des lois qualitativement les mêmes, ne différant essentiellement que par des coefficients numériques, il devait être possible alors d'extrapoler des limites de certitude assignables.

Cette méthode découle au fond d'un raisonnement inductif basé sur un postulat d'états correspondants (cf. travaux précités de A. P.).

On verra par l'exposé la mesure dans laquelle les expériences ont répondu à ce programme, nonobstant le nombre restreint d'échantillons étudiés et la limitation du temps.

En particulier, nous avons pu grouper les phénomènes observés de variation lente et spontanée dans

[1]) Un extrait de ce travail a été présenté à la Société suisse de physique dans sa séance du 2 mai 1925 à Zurich (v. Arch. Sc. phys. et nat. V. v. 7, p. 209, 1925).

[2]) Dans le présent travail, il était suffisant de se limiter même à un seul terme ($\mu = \mu_0$).

[3]) Cons. p. ex. Mordey Proc. Roy. Soc. 57, 224—242, 1895; Mauermann Elektrot. Z. S. 22, 861—862, 1901; Stern, 24, 407 bis 412, 1903; Stern, Epstein, Soschinsky id. 25, 497—501, 1904; Mazzotto Cim. 7, 393—44, 1904; Phys. Z. S. 7, Nr. 8, p. 263; Renger Thèse Zürich 1913.

[4]) Alb. Perrier. Les variations thermiques de l'hystérèse tournante et de l'hystérèse alternative, Archives Sc. phys. et nat. (IV) 27, p. 617 (1909); 28, pp. 119 et 237 (1909); Journal de Phys. (V) 9, pp. 785 et 865 (1910). Voir aussi: même auteur, Remarques à propos de viscosité magnétique, Journ. de Phys. (VI) 5, p. 95 (1924).

une loi de forme très simple, commune à tous les échantillons étudiés.

Mais en outre, nous avons rencontré deux phénomènes imprévus. Compliquant les choses en apparence, ils ont contribué à nous abréger la tâche. Ils pourront expliquer sans doute beaucoup d'obscurités rencontrées ailleurs; nous nous y arrêterons donc davantage qu'aux sujets à l'origine du travail; nous avons entendu quelque chose de l'un d'entre eux dans une conversation privée, mais n'avons rien trouvé qui les concerne dans la bibliographie. Leur signification de principe est caractéristique: un traitement purement magnétique (champ alternatif) sans changement de température peut modifier — voire considérablement — d'une manière temporaire ou définitive la perméabilité d'une matière; faculté que l'on réservait très généralement aux seuls traitements thermiques.

Dans le texte, nous avons mis l'accent sur ces phénomènes généraux (v. IV et V) eu égard à leur importance pour les recherches ultérieures et aussi à ce qu'ils ont de singulier. Leur poursuite s'est imposée à nous chemin faisant; mais à côté d'eux, nous avons simultanément dû nous occuper de deux questions d'ordre purement technique.

D'abord l'effet sur la perméabilité initiale effective subséquent à l'action accidentelle d'un courant continu intense; c'est un problème maintenant essentiel de la technique des câbles chargés. Mais il revient simplement à la détermination de la perméabilité apparente en fonction de l'aimantation rémanente, et nous n'en rendrons pas compte ici.

Ensuite, nous avons fait une investigation rapide de l'influence sur les résultats donnés par la méthode balistique de champs alternatifs et continus, longitudinaux et transversaux, superposés durant les opérations de mesure; on en trouvera un bref résumé sous VI.

Il va de soi que les lois de vieillissement et plus encore les phénomènes désignés plus haut nécessiteraient, pour acquérir toute leur signification, des recherches plus prolongées et sur de nombreux échantillons.

II. Procédés et installation.

Les *matières* que nous avons étudiées nous ont été confiées par la S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay. C'étaient des fils d'acier doux d'une part, de fer silicié de l'autre. Nous les désignons dans la suite brièvement par acier et fer.

La perméabilité a été mesurée par voie balistique, la matière étant sous forme de tores. Ceux-ci sont constitués par 25.000 tours de fil de 0,1 mm. de diamètre, ce qui correspond à une section de 1,96 cm². Les dimensions sont: rayon extérieur 68 mm., rayon intérieur 51 mm., hauteur 37 mm. Les enroulements des échantillons qui ont servi aux essais jusqu'à 200° étaient montés de la manière suivante: L'enroulement primaire, isolé du tore par une couche de papier, était composé de 289 tours jointifs de fil émaillé de 0,5 mm. Le secondaire (circuit galvanométrique), 300 tours de fil émaillé de 0,4 mm., était séparé du primaire par une couche de papier d'amiante collé avec du kaolin et de l'eau. Dans ces conditions, la résistance d'isolement primaire-secondaire après séchage était de 200.10^6 Ω et n'a pas diminué même après un séjour de plusieurs semaines entre 150° et 200°.

Pour les essais à haute température (800°), nous avons enroulé 25.000 tours de fil d'acier sur un gabarit de laiton. Les enroulements primaire et secondaire (100 tours de fil de nickeline isolé à l'amiante) étaient isolés l'un de l'autre et du noyau par du mica. La résistance d'isolement, même à chaud, était de 10^7 Ω. Le tore s'est très bien conservé, nous n'avons jamais noté de défaut d'isolation.

Nous avons préparé 4 tores d'acier, 4 tores de fer et 1 tore pour essais à haute température.

Les *fours* qui ont servi pour l'étude du *vieillissement* étaient constitués par un cylindre de tôle de cuivre de 2 mm. (hauteur 20 cm., diamètre 12 cm.), sur lequel on avait enroulé en bifilaire du fil de nickeline de 1,2 mm. isolé à l'amiante. L'enroulement était séparé du cylindre par du carton d'amiante et recouvert par de nombreuses couches également en carton d'amiante, le tout collé par une pâte de kaolin et d'eau. La protection thermique ainsi constituée avait une épaisseur de 2 à 3 cm. Les extrémités du cylindre en cuivre sont fermées par des bouchons en *stéatite*, le bouchon supérieur étant percé de 3 trous, l'un pour le thermomètre, les deux autres pour les circuits primaire et secondaire du tore.

Le tore en essai reposait au milieu du four sur un bloc de stéatite.

Le four, semblable aux précédents, qui servait au *recuit*, avait un enroulement bifilaire de chauffage en nichrome. L'isolement thermique avait 5 à 6 cm. d'épaisseur. Le tore était posé sur une petite plaque de stéatite suspendue au couvercle supérieur par 2 tiges de laiton. De cette façon, on pouvait transporter facilement le tore dans un four pour plus basse température afin d'y étudier le vieillissement. Les couvercles supérieur et inférieur de ce four étaient percés de 2 grands trous que l'on pouvait fermer par de gros bouchons de stéatite également. En enlevant ces deux bouchons, on provoquait un violent courant d'air, ce qui, en produisant un refroidissement énergique, devait éviter un stationnement trop long aux températures de vieillissement rapide. Cette précaution s'est heureusement révélée peu utile, étant donné que l'acier recuit vieillit très lentement.

Les *températures* ont été mesurées avec des thermomètres à mercure, dont le rôle le plus important était d'accuser l'établissement du régime stationnaire. Le four ayant été mis en marche, il fallait attendre au minimum 6 heures avant que ce régime soit atteint.

L'uniformité des températures était satisfaisante: entre l'axe du tore et la région adjacente à la paroi du cylindre de cuivre régnait, à vide, une différence de température de 2 à 3° aux environs de 120° et de 4 à 5° aux environs de 200°. Les tores, conducteurs dans leur intérieur, ne pouvaient que présenter une plus grande uniformité.

La température du recuit a été déterminée au moyen de pyromètres électriques. Au cours des expériences, qui ont porté sur plusieurs jours, la température subissait de lentes fluctuations. Les plus grands écarts de température à partir de la valeur

moyenne étaient de 2°, rarement 3°. Ces fluctuations, dues à la variation de tension du réseau, avaient une période de 6 à 12 heures. Le courant de chauffage des fours (alternatif urbain 50 pér./sec) était réglé par des bobines de self.

Pour ce qui est des circuits primaire et secondaire, l'énumération suivante résume leurs dispositions.

Circuit primaire: 1 batterie d'accumulateurs (12 volts); 3 rhéostats avec clefs pour les court-circuiter individuellement, ce qui permet de décrire la courbe d'aimantation par bonds; 1 ampèremètre de précision avec 3 shunts et sur lequel on peut apprécier 0,1 milliamp.; 1 commutateur; 1 distributeur permettant d'envoyer le courant soit dans l'un des 4 tores à l'étude, soit dans le solénoïde d'étalonnement; 1 autre distributeur qui permet de lancer dans les tores du courant alternatif destiné soit à la désaimantation, soit au rajeunissement.

Circuit secondaire (entièrement monté sur paraffine) : 1 galvanomètre; 1 boîte de résistances pour le réglage de la sensibilité; 1 bobine secondaire placée sur le solénoïde étalon; 1 distributeur qui permet de brancher le galvanomètre et tout son circuit sur l'un ou sur l'autre des 4 tores à l'étude.

Le *dispositif de désaimantation* était composé d'une bobine de self (800 tours) à noyau de fer parcouru par le courant d'éclairage. Sur le noyau, une bobine secondaire, 150 tours de gros fil, que l'on pouvait éloigner à plus d'un mètre du noyau. Lorsque cette bobine était enfilée sur le noyau et branchée sur un tore, le courant alternatif qui y circulait était de 4 ampères environ, soit plus du double des courants les plus forts que nous ayons employés pour l'aimantation. En éloignant graduellement la bobine mobile, l'intensité diminuait jusqu'à zéro. Nous n'avons jamais constaté la moindre aimantation rémanente après l'application du processus précédent, même lorsque la durée de toute l'opération n'avait été que quelques secondes.

Du fait que tout le circuit galvanométrique était monté sur paraffine jusqu'à l'entrée du four, il était facile de localiser le moindre défaut d'isolation des tores dans les fours. On pouvait d'ailleurs à chaque instant, par le simple jeu d'un distributeur qui envoyait le courant dans le solénoïde étalon, vérifier s'il était arrivé un accident à l'un quelconque des tores, au cas où l'on aurait observé quelque anomalie. Nous n'avons du reste jamais eu de désagréments de cet ordre.

Au cours des essais qui ont porté sur l'acier recuit (tore d'acier isolé au mica), nous avons employé la technique de Renger ([5]) pour obtenir une substance fortement instable, c'est-à-dire en l'espèce pour produire une perméabilité beaucoup plus élevée. Cette technique consiste à chauffer la substance jusque vers 800°, soit légèrement au-dessus du point de Curie (disparition du ferromagnétisme), de la laisser refroidir à 700°, de l'amener de nouveau à 800° et ainsi de suite. On obtient un effet limite au bout de 4 à 5 oscillations.

[5]) Renger, loc. cit.

III. Stabilité des échantillons.

Les valeurs de la „perméabilité" ont toujours été obtenues en divisant la variation de flux observée au galvanomètre balistique, lorsqu'on commute le courant d'aimantation, par la variation du champ magnétique; c'est donc l'expression $\mu = 2\ B/2\ H$, ($+$ B, $+$ H) et ($-$ B, $-$ H) représentant les coordonnées des sommets d'un cycle hystérétique.

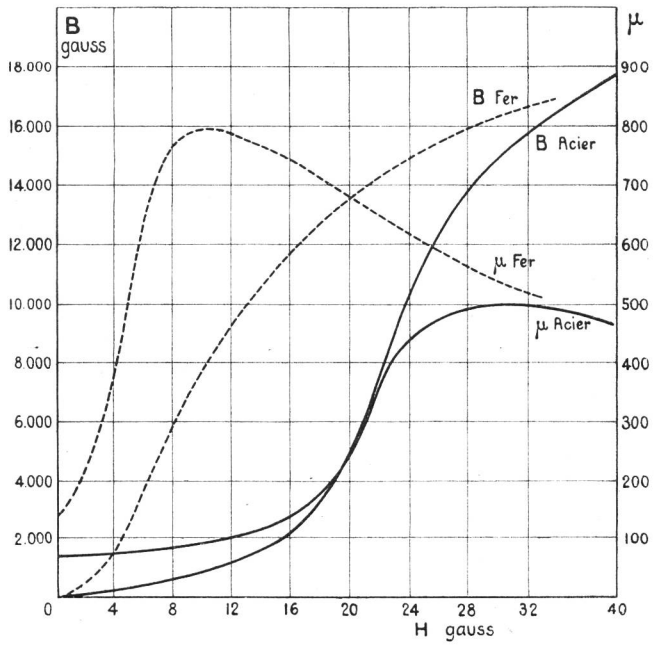

Fig. 1.

La figure 1 représente les courbes d'aimantation de l'acier et du fer. On voit que l'acier est caractérisé par une courbe dont la première partie parabolique relativement longue, s'étend jusque dans les champs de 10 à 12 gauss. Le champ coercitif de cet acier est d'environ 24 gauss, ce qui correspond à un acier doux.

La caractéristique du fer silicié est sa haute perméabilité initiale. Son champ coercitif est de 7 à 8 gauss.

Les différents échantillons de chaque substance (4 de fer et 4 d'acier) que nous avons étudiés, se sont montrés à très peu de chose près identiques.

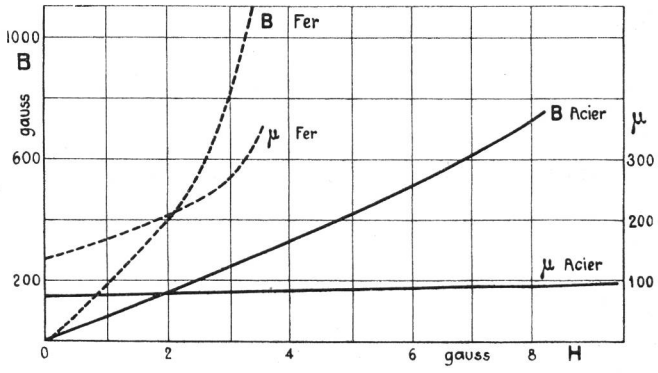

Fig. 2.

La figure 2 montre à une échelle plus grande les courbes d'aimantation dans les champs faibles. Nous avons noté dans l'introduction déjà que nos mesures se rapportent toutes au vieillissement dans

ces conditions de champ, car c'est la perméabilité initiale qui intervient toujours dans la technique téléphonique.

Il importait à la sûreté des mesures de connaître la *variation thermique de la susceptibilité initiale*. En la représentant par la formule (bien entendu valable dans d'étroites limites seulement) $\mu_t = \mu_0 (1 + at)$, nous avons trouvé pour l'*acier* a = 0,0006 à peu près invariable de 20° à 200°; pour l'*acier recuit*, le coefficient est voisin de 0,001 jusque vers 100°, puis se met à croître rapidement pour atteindre 0,0025 à 200°; le fer enfin accuse a = 0,0003 au-dessous de 120°, puis des valeurs graduellement croissantes jusqu'à 0,00045 vers 180°. Comme de juste, d'ailleurs, il se manifeste toujours de l'*irréversibilité thermique* (et ces coefficients ne sont que des moyennes), ce qui constitue une seconde cause d'incertitude.

En fait, traduits sur l'échelle galvanométrique, les chiffres ci-dessus correspondent, pour une fluctuation de température de 1 degré, à des changements d'élongation respectifs de 0,2 mm., 0,3 mm., 0,1 mm., pour l'acier, l'acier recuit et le fer. Ceci nous a obligés à ne compter les lectures que lorsque le thermomètre indiquait des températures identiques à 0,5 degré près.

Mais (les expériences de vieillissement duraient bien des heures et souvent plusieurs journées!) on ne pouvait éviter des fluctuations de température plus amples qu'une fraction de degré, conséquemment des fluctuations irréversibles après retour à température identique: *c'est là l'origine des écarts de position des points par rapport aux droites logarithmiques de vieillissement du § V.*

Ces écarts jouent un rôle plus considérable lorsque les variations à température fixe par vieillissement sont de faible ampleur (cas de l'acier tout particulièrement).

Nous allons résumer maintenant les résultats obtenus quant à la stabilité magnétique des échantillons.

Anticipant un peu sur ce qui sera exposé plus loin, nous avons trouvé que tous les échantillons soumis aux essais se sont comportés *qualitativement* de même façon, les phénomènes suivant des lois identiques, mais avec des allures *numériquement* distinctes. Nous avons particulièrement bien pu mettre en évidence ici le fait déjà signalé qu'il existe des conditions thermiques où le vieillissement est beaucoup plus rapide qu'à température ordinaire (variables entre 100° et 200° d'une substance à l'autre).

Mais, grâce aux faits et procédés expérimentaux décrits plus loin, dont il ressort essentiellement la similitude des lois du vieillissement aux différentes températures, nous pensons être en droit de déduire ce qui se passerait très lentement à température ordinaire de la détermination faite dans les régions de variation rapide, seule pratiquement exécutable parce qu'en un temps incomparablement moins long. Ainsi une certaine variation de perméabilité initiale, qui aurait exigé au moins quelques 500 heures pour se manifester vers 20°, s'est effectuée dans les conditions artificiellement établies en 2 heures à peine.

Dès lors, l'étude de la stabilité a consisté à faire séjourner les échantillons tels qu'ils étaient fournis à leur température de vieillissement le plus rapide, fixée par des expériences préalables sur des échantillons semblables; cependant qu'on relevait à intervalles convenablement choisis l'état magnétique. Nous avons ainsi pu observer des variations (diminutions) de la perméabilité initiale proprement insignifiantes, soit 0,5 % pour l'acier, 0,6 % pour le fer, *durant une semaine entière*. En se basant sur les variations observées de la vitesse de vieillissement en fonction de la température, on peut évaluer qu'une telle minuscule variation, dans les conditions correspondantes à température ordinaire, aurait demandé plus de 4 ans.

En outre, les expériences décrites plus loin conduisent à la conviction que cette ultime variation observée représentait le dernier écart qui séparait l'état de la substance de la stabilité asymptotique. Il y avait donc toutes les raisons de conclure, dans le cadre de quelques réserves faites plus haut et tenant au nombre restreint des expériences, à une stabilité magnétique aussi bonne que possible des échantillons étudiés.

Les expériences de recuit (traitement à haute température suivant technique indiquée plus haut) ne touchaient plus directement la question stricte de stabilité, puisque ce traitement donne en fait une matière à structure différente. Nous en avions besoin pour l'étude plus générale du vieillissement. Le recuit portait la perméabilité initiale de l'acier de 120 à 180 environ.

IV. Effets de traitements au champ alternatif.

C'est au cours d'essais de première investigation que nous avons rencontré les deux phénomènes dus au champ alternatif, dont il a été question dans l'introduction, et qui ont en réalité permis la technique simple et rapide dont nous avons fait usage pour résoudre la question essentielle: établir le degré de stabilité atteint par les échantillons donnés. Voici une description concrète des faits:

Premier effet. — Si l'on place la matière, acier, fer ou acier recuit, dans un champ alternatif assez intense (il a été de 100 gauss dans toutes nos expériences) et qui diminue ensuite graduellement jusqu'à zéro, on constate, consécutivement à ce traitement magnétique, que la perméabilité initiale de la matière a augmenté de quelques %, et ceci *seulement d'une façon temporaire*. Ce traitement, identique à celui que l'on emploierait si l'on voulait désaimanter la substance, place donc la matière dans un nouvel état plus perméable: il produit un „rajeunissement".

Cet accroissement temporaire de la perméabilité initiale diminue ensuite et disparaît de lui-même suivant une loi dont il sera question plus loin.

L'intensité du phénomène est encore fonction et de la température et du champ maximum dont on part, ainsi:

Le rajeunissement obtenu s'accentue d'abord au chauffage pour les trois substances étudiées, passe par un maximum entre 140° et 160°, puis diminue et disparaît vers 220°. A température ordinaire, seul le fer le manifeste sensiblement. Avec l'acier, recuit ou non, il ne devient appréciable qu'à partir de 60°.

La disparition du phénomène vers 220° et le fait que la *répétition du traitement* ne l'amplifie pas,

suffisent à éliminer l'hypothèse que l'augmentation temporaire de la perméabilité est due à une élévation de la température produite par le courant alternatif.

Pour ce qui est de l'*intensité du champ alternatif*, nous avons constaté qu'un effet sensible commence à se produire pour des champs atteignant la partie fortement montante de la courbe d'aimantation. L'effet augmente avec l'intensité du champ et atteint une *valeur limite* qui apparaît à peu près avec le champ correspondant à la perméabilité maximum. Aux températures les plus favorables, la valeur inférieure de l'intensité pour laquelle un effet est décelable, est diminuée quelque peu.

Nous avons pris soin de vérifier, après retour à la valeur stable de la perméabilité initiale, que toute la courbe d'aimantation se superpose avec celle relevée avant traitement.

Deuxième effet. — Lorsqu'à la suite d'un traitement thermique prolongé et énergique par exemple, une substance se trouve fortement „adoucie" (à haute susceptibilité), donc en somme très éloignée de son état stable, nous avons observé que l'application immédiate d'un traitement magnétique identique au précédent, soit l'*action d'un champ alternatif quelque peu intense, efface presque instantanément (fraction de seconde) la majeure partie de l'accroissement irréversible de perméabilité initiale.*

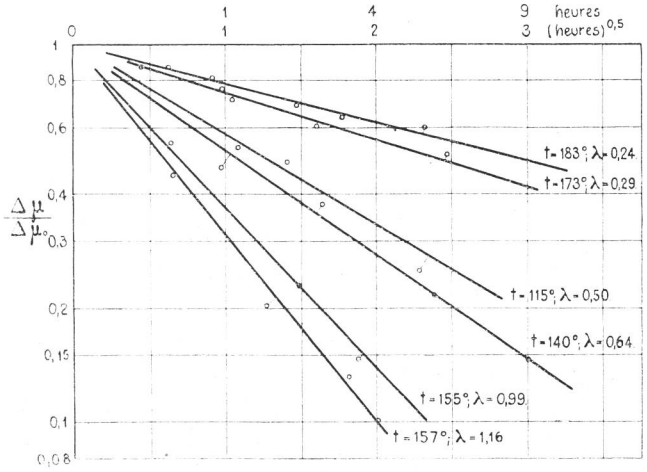

Fig. 3.

Il s'agit ici d'une chose qui peut être considérable, d'un „gros phénomène". Ainsi notre acier soigneusement recuit vers 800° a vu sa perméabilité réduite d'un *seul traitement magnétique* de 30 %, dans quelques expériences de 40 % même (v. aussi tableau III sous § V).

Il importe de noter aussi que cet effet se produit à *toute température.*

Avec le fer et l'acier non recuit, nous n'avons guère observé ce phénomène, ce qui est bien naturel si l'on considère que ces deux matières étaient très proches d'un état stable à faible susceptibilité, par conséquent que dans les limites de température usitées (0-200°) les écarts irréversibles étaient petits.

Il faut penser également que ce deuxième effet, inverse du premier, ne l'exclut pas, bien entendu. Nous voyons d'après les chiffres ici consignés qu'ils sont d'ordres de grandeur différents, en sorte qu'un

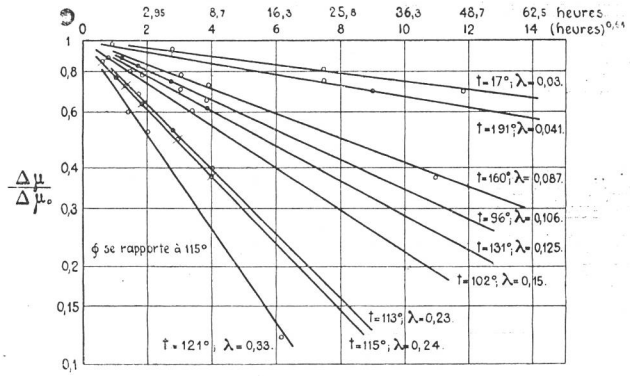

Fig. 4.

traitement magnétique après traitement thermique doit faire jouer les deux phénomènes simultanément, c'est-à-dire qu'il se produit en un temps très court un fort vieillissement (deuxième effet) qui s'arrête où il rencontre en quelque sorte le rajeunissement qu'il aurait produit à partir de la substance déjà stabilisée; ensuite, le phénomène lent termine le vieillissement, sauf nouvelle intervention d'un champ alternatif.

Pour illustrer et appuyer ces considérations, constatons qu'un échantillon d'acier chauffé à 100° et ramené aussi rapidement que possible à 20° par un courant d'air (pour accentuer l'irréversibilité) a accusé un accroissement sensible de perméabilité que le traitement magnétique a fait disparaître à peu près complètement (effet 2). Or, précisément, on sait que l'effet 1 est négligeable à température ordinaire avec cette matière.

Constatons encore que le traitement magnétique détruit le 95 % de l'accroissement irréversible de perméabilité marqué *par le recuit*, et que le 5 % restant représente ce qui s'efface ensuite de soi-même, c'est-à-dire en somme le „rajeunissement" qu'aurait provoqué le même processus de désaimantation appliqué à une substance complètement vieillie.

V. Lois du vieillissement.

En possession d'un procédé pour amener artificiellement les échantillons dans un état instable, la méthode du travail devenait la suivante:

Maintenir un échantillon donné à une température constante, attendre que l'on n'observe plus de variations de la perméabilité autres que celles dues aux fluctuations de température du four, appliquer le processus de rajeunissement et mesurer d'heure en heure la perméabilité initiale.

On portait ensuite en fonction du temps z (compté à partir de l'instant où l'on a rajeuni le métal) les

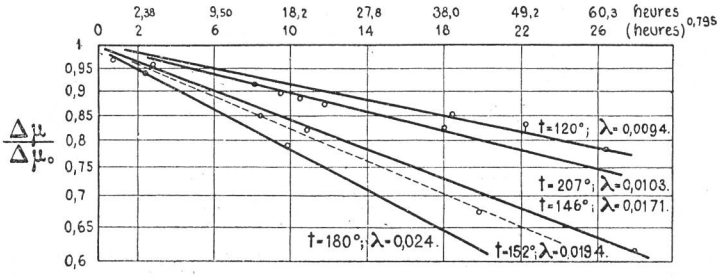

Fig. 5.

différences $\triangle\mu$ entre la perméabilité et sa valeur à l'état stable (avant rajeunissement ou à z infini); ces points se placent avec une bonne approximation sur une courbe exponentielle d'équation

$$\triangle\mu = \triangle\mu_0 \, e^{-\lambda z^{\upsilon}}$$

$\triangle\mu_0$ désignant l'élévation totale de μ provoquée par rajeunissement ($z = o$), λ et υ deux constantes dont la première exprime très clairement ce que l'on peut appeler la „*vitesse de vieillissement*".

Les tableaux I et II montrent à quelle approximation l'allure du vieillissement est représentée par la formule exponentielle. I se rapporte à un échantillon d'acier, II à un échantillon de fer, tous deux rajeunis par le procédé magnétique.

Le tableau II, où le rajeunissement a été particulièrement faible, montre très nettement l'influence des fluctuations de température. Rappelons ici que la cause principale et très probablement unique des écarts réside dans les fluctuations de température par leurs effets réversibles et irréversibles sur la perméabilité (v. § III), et que nous avons systématiquement laissé de côté les points se rapportant à températures divergeant de plus de 0,5° de celle qui régnait au moment du rajeunissement. On observera que les écarts à partir des droites n'ont en effet rien de systématique.

Tableau I (acier)

t°	heures	élongation (mm.)		μ	$\triangle\mu$	$\frac{\triangle\mu}{\triangle\mu_0}$ 100 observé	calculé
155 rajeunissement		par commutation de	200.4	77.1			
155	0	— 1.06	209.5	80.6	+ 3.5 ($\triangle\mu_0$)		
155.2	0.40	à	205.3	79.0	+ 1.9	54.2	53.4
154.9	2.22	+ 1.06	202.3	77.9	+ 0.8	22.9	22.8
154.5	3.27	gauss	201.7	77.6	+ 0.5	14.3	16.7

Tableau II (fer)

t°	heures	élongation (mm.)		μ	$\triangle\mu$	$\frac{\triangle\mu}{\triangle\mu_0}$ 100 observé	calculé
191.0 rajeunissement		par commutation de	229.4	180.5			
191.0	0	—0.636	242.5	190.6	10.1		
191.5	0.816	à	242.4	190.5	10.0	99.0	96.5
191.4	5.3	+0.636	241.8	190.0	9.5	94	88.8
190	8.85	gauss	239.5	188.3	7.8	77.2	84.8
191.1	23.4		239.3	188.1	7.6	75.2	73.2
189.9	30.9		238.5	187.5	7.0	69.3	69.2

En réalité, nous avons, bien entendu, procédé par voie logarithmique en portant en abscisse z^{υ} et en ordonnée le logarithme du rapport $\triangle\mu/\triangle\mu_0$ (figures 3, 4, 5). Dans ces conditions, le vieillissement est représenté par une droite. Toutes les droites partent du point $\triangle\mu/\triangle\mu_0 = 1$, $z = o$ qui correspond à l'origine de ce phénomène de vieillissement. En ordonnée, nous avons indiqué en regard non la valeur du logarithme, mais directement celle du rapport. La constante υ vaut 0,50 pour l'acier, 0,64 pour le fer et 0,795 pour l'acier recuit.

Quant à l'acier recuit (tableau III), qui a été adouci par le procédé de Renger, puis amené rapidement à 146°, et où les observations portent sur des variations de perméabilité beaucoup plus grandes.

Tableau III (acier recuit)

t°	heures	élongation (mm.)		μ	$\triangle\mu$	$\frac{\triangle\mu}{\triangle\mu_0}$ 100 observé	calculé
146	0	par ren-	124.8	178.5	32.5 ($\triangle\mu_0$)		
146.5	1.92	verse-	124.4	177.8	31.8	97.9	97.2
145.8	2.83	ment de	123.9	177.0	31.0	95.5	96.2
146	21.0	1.24	120.8	172.8	26.8	82.4	82.6
146.3	66.0	gauss	116.2	166.2	20.2	62.2	62.0
traitement au courant alternatif (effet II)							
146.3	66.0		102.2	146			

la concordance entre les valeurs observées et celles de la loi analytique est très bonne.

Ayant laissé vieillir la substance à 146° pendant 66 heures, nous l'avons ensuite désaimantée: la perméabilité initiale est tombée instantanément de 166,2 à 146. Cette dernière valeur est à peu de chose près la valeur stable à 146°.

Nous avons pu répéter ces différentes opérations plusieurs fois et avons trouvé après chaque désaimantation des perméabilités presque identiques, quoique l'amplitude du rajeunissement ait été très variable d'une expérience à l'autre.

Dans un autre cas se rapportant au vieillissement à 210°, nous avons observé au cours des diverses opérations les perméabilités consignées au tableau IV, le rajeunissement ayant été de 25,5 %.

Tableau IV

	μ	
Avant recuit	125	17°
Après recuit	157	
A 210°	227	210° H = 1,24
Au bout de 3 jours	217	
Traitement au courant alternatif	182	
Revenu à la température ordinaire	128	17°

Pour les trois types de matière étudiés, nous avons pu mettre en évidence un maximum très aigu de λ en fonction de la température (fig. 6). Les droites logarithmiques des figures 3, 4 et 5, qui représentent le vieillissement à température constante, sont très parlantes à ce point de vue. Au fur et à mesure que la température augmente, l'inclinaison de la droite (coefficient angulaire — λ) s'accentue, elle passe par un maximum, puis la droite se redresse lorsque la température continue à croître.

Des valeurs de λ en fonction de t sont consignées au tableau V.

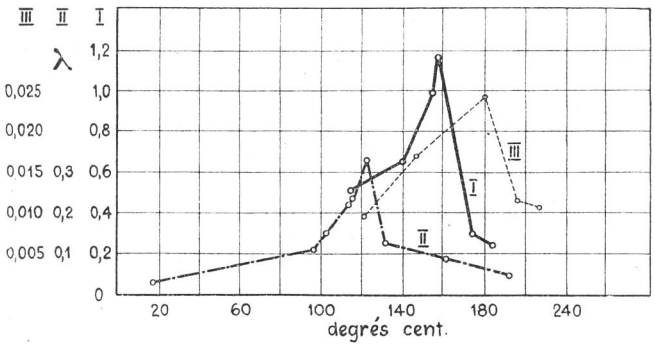

Fig. 6.

Tableau V („vitesses de vieillissement")

Acier		Fer		Acier recuit	
t = 115°	λ = 0.50	t = 17°	λ = 0.03	t = 120°	λ = 0.0094
140	0.64	96	0.106	146	0.0171
155	0.99	102	0.15	152	0.019
157	1.16	113	0.23	180	0.024
173	0.29	115	0.24	196	0.0108
183	0.24	121	0.33	207	0.0103
(Courbe I)		131	0.125	(Courbe III)	
		160	0.087		
		191	0.041		
		(Courbe II)			

La figure 6 représente ces constantes en fonction de la température. L'allure des 3 courbes $\lambda = f(t)$, quoique à des *échelles très différentes*, est semblable. Du fait que nous avons pu directement mesurer λ à la température ordinaire dans le cas du fer, on peut sans grande erreur estimer la valeur de λ pour l'acier dans les mêmes conditions à 0,1, valeur beaucoup plus élevée que celle de l'acier recuit à la température du vieillissement le plus rapide.

Il est curieux de constater que l'acier recuit, qui est celle des trois substances la plus éloignée de son état stable, vieillit à la température la plus favorable 50 fois *moins rapidement* que l'acier.

Un fait intéressant est celui qu'illustrent les 2 droites (fig. 4) correspondant à 113° et 115° pour le fer; le tore de fer ayant servi à déterminer le vieillissement à 115° a été chauffé d'abord à 130°, puis à 160° et à 190°; il a été aimanté et désaimanté souvent au cours des séjours à ces différentes températures, puis il a de nouveau servi à une série de mesures à 113° (au lieu de 115° qui aurait été désirable; revenir à la même température *stationnaire* demande souvent un temps fort long). Les deux droites obtenues sont si près l'une de l'autre que l'on est autorisé à conclure que le paramètre υ est presque rigoureusement constant, et que la facteur λ est une *fonction uniforme de la température, ne dépendant pas de l'histoire antérieure tant thermique que magnétique de l'échantillon à l'étude.*

Toujours à raison du temps très limité, mis à notre disposition, nous n'avons pas pu répéter cette expérience pour les différentes substances et à d'autres températures.

Un essai exécuté avec l'acier recuit est illustré par la droite pointillée de la figure 5. Elle se rapporte au vieillissement qui a suivi un faible rajeunissement (2 %) obtenu par le *procédé magnétique* cette fois, *toutes les autres droites de la figure 5 se rapportant au vieillissement après un recuit.*

La droite 152° [6] se plaçant entre celle de 180° et celle de 146° et assez près de cette dernière, on peut admettre qu'à 146° exactement nous aurions obtenu la coïncidence de ces deux droites. Cet essai semble donc établir que le vieillissement admet les *mêmes constantes* pour une substance donnée *quelle que soit la cause du rajeunissement*, donc qu'il n'existerait qu'*une espèce de vieillissement.* Ce fait montre que le domaine d'application des grandeurs que nous avons déterminées est plus étendu qu'on aurait pu le croire, l'une υ ne dépendant pratiquement que de la substance à l'étude et qui ne varie du reste que très peu d'une substance à une autre, tandis que λ *dépend au premier chef de la température et varie beaucoup avec la matière.*

Ajoutons encore un fait intéressant. Les modifications profondes subies par l'acier lors du recuit (vers 800°) sont manifestées de la façon la plus accentuée par la constante λ. Ce traitement thermique a influencé cette vitesse de vieillissement beaucoup plus qu'aucune autre grandeur caractéristique des propriétés magnétiques, le champ coercitif par exemple.

[6]) 152 au lieu de 146, même raison que plus haut.

V. Influence de champs parasites sur la mesure.

Les résultats rassemblés plus haut impliquent évidemment l'exclusion de fours enroulés non bifilairement pour l'étude à haute température. Lors d'expériences préliminaires, nous avions dû nous contenter d'un four de ce type. Bien que le champ qu'il produisait, de l'ordre de 10 gauss au plus, soit notablement inférieur à ceux qui entraînent les effets I et II à leur maximum, nous avions eu à lutter avec des irrégularités ne s'expliquant pas complètement par ces effets, et, lorsque nous avons été au clair sur eux, nous avons repris quelques expériences à *température ordinaire* pour évaluer l'importance des perturbations que peut introduire dans la *mesure proprement dite* la superposition d'un champ alternatif étranger au champ d'aimantation.

A cet effet, nous avons installé des tores d'essai successivement avec axe vertical (position normale de toutes les mesures faites) puis axe horizontal dans un four non bifilaire où l'air circulait librement. Puis on a procédé à des déterminations de perméabilité initiale en présence et en l'absence d'un champ alternatif d'une douzaine de gauss, toutes les précautions de désaimantation préalable, etc., étant prises comme à l'ordinaire.

Dans toutes ces expériences, la perméabilité initiale mesurée s'est montrée *toujours plus forte* en présence du champ alternatif qu'en son absence; exemples:

Position coaxiale du tore et du four: 2,4 % avec l'acier, 17,7 % avec le même recuit.

Position normale des axes du tore et du four: 11,9 % pour l'acier, 55,6 % pour l'acier recuit.

L'explication de ces faits doit sans aucun doute être cherchée en ceci que le champ alternatif parasite est suffisant pour faire entrer en jeu, durant la variation du champ de mesure, les phénomènes d'hystérèse dans une proportion beaucoup plus considérable que seul il ne le ferait; et cela entraîne nécessairement des variations résultantes de l'induction sensiblement ou notablement supérieures à ce qu'elles sont avec la réversibilité presque pure. Ceci est assez élémentaire dans la première position où les deux espèces de champs sont partout normales; dans la seconde, les phénomènes sont plus complexes, puisqu'il y a situations parallèles ou normales suivant les régions du tore; mais les mêmes considérations sont évidemment valables et font prévoir aussi que l'effet doit être plus accentué dans cette position. On notera encore comme argument en faveur de cette explication simple l'intensité plus accentuée des effets sur l'acier recuit, matière où, comme on sait, la région de réversibilité est plus étroite (champ coercitif plus petit). Il n'était pas nécessaire de pousser ces essais plus avant, ils suffisent à montrer combien ces précautions sont nécessaires contre l'influence de champs parasites, dans les mesures en tout premier lieu et dans la technique des courants faibles aussi.

VII. Résumé des résultats.

Tous les phénomènes de vieillissement observés sur trois matières ferromagnétiques bien différentes les unes des autres, sont représentables avec une bonne approximation par la loi empirique:

$$\triangle\mu = \triangle\mu_0 \, e^{-\lambda z^{\upsilon}}$$

λ, paramètre exprimant la „vitesse de vieillissement", dépend de la nature de la substance et fortement de la température. υ varie, mais pas beaucoup, d'une substance à l'autre et ne dépend pas de la température. λ ni υ ne se sont montrés sous l'influence de l'histoire antérieure tant thermique que magnétique des échantillons. De ce fait, en particulier, ces grandeurs deviennent précieuses et pratiques pour caractériser une substance. Comme nos expériences ont porté non seulement sur des „rajeunissements" par voie thermique connue, mais aussi à température fixe par voie magnétique, les grandeurs λ et υ se sont montrées indépendantes du processus employé pour obtenir l'instabilité magnétique. Ceci conduirait à la très utile et intéressante conclusion qu'il n'existe qu'*une seule espèce de vieillissement*. Il serait toutefois bien utile ici de disposer d'un matériel expérimental plus riche, si possible avec d'autres procédés plus ou moins différents, mécaniques par exemple, pour modifier l'état magnétique.

Lorsque la matière est soumise à un champ alternatif suffisamment intense, dont l'amplitude diminue graduellement (processus de désaimantation), nous avons pu constater deux effets différents:

1. Sur les échantillons bien stables et dans des conditions favorables de température, une élévation de la perméabilité initiale qui s'efface d'elle-même ensuite par le vieillissement.

2. Sur des échantillons notablement éloignés de leur état de stabilité (par exemple fraîchement recuits), le traitement a effacé d'une manière pratiquement instantanée la majeure partie de l'élévation gagnée de perméabilité.

Nous avons fait application pratique de ces résultats d'une manière qui se résume en la méthode suivante, laquelle pourra être employée utilement dans des laboratoires industriels:

Déterminer d'abord pour un matériel ferromagnétique donné la région de vieillissement rapide, ce qui s'exécute facilement et sûrement. Ensuite laisser des échantillons frais séjourner à ces températures; leur maintien magnétique indique très vite si l'on se trouve en présence de matières déjà stabilisées („vieillies") ou non. Mais fréquemment, on constatera à la longue encore une décroissance plus ou moins perceptible de la perméabilité. Alors, on recourra au rajeunissement artificiel et on déterminera les valeurs de λ et υ à différentes températures. Cela fait, il sera possible, pour une température donnée, et à l'aide de la perméabilité mesurée pour deux valeurs de z, de fixer et la limite de stabilité, et à quelle précision près elle serait atteinte au bout d'une durée donnée, 10.000 heures par exemple.

Laboratoire de physique de l'Université.

Août 1925.