Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 9 (1927)

Artikel: Influence de l'écrouissage et du recuit sur les propriétés magnétiques de minces fils d'invar, de fer et d'acier
Autor: Biéler-Butticaz, C.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-740866

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: 15.09.2025

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

INFLUENCE DE L'ÉCROUISSAGE ET DU RECUIT

SUR LES

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DE MINCES FILS D'INVAR, DE FER ET D'ACIER

PAR

Mme C. BIÉLER-BUTTICAZ [1]

(Avec 2 fig. et une planche)

I. Introduction.

Dans une précédente étude [2], nous avons montré l'influence de l'écrouissage et du recuit sur le frottement intérieur de fils d'invar de 0,2 et 0,25 mm de diamètre.

Les fils tirés à froid ont été essayés, avant et après le recuit à 900° dans le vide, à des températures variant de 15° à 400°, dans un appareil permettant d'observer les oscillations de torsion. Les fils avant le recuit présentaient une brusque augmentation du frottement intérieur vers 340° qui coïncidait avec le maximum du module d'élasticité de torsion G. Après le recuit la courbe du frottement intérieur présentait une allure toute différente, le frottement intérieur augmentait graduellement à partir de 250° environ et c'est cette température qui correspondait au maximum du module G. Or on sait que le

[1] Ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique de l'Université de Genève, à l'instigation et sous la direction de M. le Professeur Ch.-E. Guye auquel nous exprimons ici notre vive reconnaissance.

[2] *Etude du frottement intérieur de minces fils d'invar aux températures élevées*, par Mme Biéler-Butticaz, *Archives* (5), 7, p. 19 (1925).

point de transformation de l'invar ordinaire est à 250° [1]. Il semble donc que le point de transformation de l'invar se soit déplacé de 90° sous l'influence de l'écrouissage. Ce déplacement peut être annulé par un recuit à 900° environ.

L'étude que nous présentons aujourd'hui a pour but de *rechercher, pour l'invar, s'il y a parallélisme entre les variations du frottement intérieur et celles de l'aimantation, en fonction de la température.* Y a-t-il aussi un déplacement, dû à l'écrouissage, du point de transformation magnétique ?

A titre de comparaison nous avons étudié, dans les mêmes conditions que l'invar, des fils de fer et d'acier tirés à froid.

Notre étude se rapporte à la fois aux traitements thermiques et mécaniques subis par les corps étudiés, aussi croyons-nous intéressant de donner un court résumé des travaux relatifs à l'effet de ces facteurs sur l'aimantation [2].

Influence des variations de température sur l'aimantation.

Les corps dits ferromagnétiques ont, à la température ordinaire, une susceptibilité magnétique élevée et dépendante du champ [3]. Elle diminue très rapidement à une *température* dite

1 M. GUILLAUME a donné une formule générale pour déterminer la température du point de transformation des aciers au nickel dits réversibles dont l'invar fait partie (*Archives* (4), 5 p. 267 (1898)), MM. GUYE et WOELFLE ont trouvé ce point vers 250° pour l'invar (*Archives* (4), p. 63 (1907)).

2 Voir bibliographie dans *Le Magnétisme du fer*, par Ch. MAURAIN, Scientia, Gauthier-Villars; *Recherches sur les propriétés magnétiques des aciers au nickel*, par DUMONT, *Archives* (4), 5, p. 331 (1898); *Alliages métalliques*, de CAVALIER, Vuibert, Paris, 1921, et *Données numériques d'électricité, magnétisme et électrochimie*, Gauthier-Villars, Paris, 1926.

3 CURIE a étudié, comme on sait, l'aimantation du fer doux pour des températures croissantes atteignant 1375°, avec des champs allant jusqu'à 1350 gauss (*Annales de Chimie et Physique* (7), 5, p. 289 (1895)). Il a trouvé quatre modifications allotropiques du fer correspondant à trois points de transformation.

K. HONDA et H. TAKAGI ont étudié la susceptibilité des aciers au nickel aux hautes températures (*Sci. rep. Tohoku imp. univ.* 6, 335. (1918)). Pour un acier voisin de l'invar, à 35% de Ni, la susceptibilité diminue de $142{,}5 \times 10^{-6}$ à $39{,}5 \times 10^{-6}$ de 611° à 998°. Voir aussi les graphiques de WEISS et FOEX, *Rev. de Mét.*, p. 50, 1917.

de transformation magnétique, variable avec le corps[1]. Si l'on chauffe le corps au-dessus de cette température, la susceptibilité magnétique devient indépendante du champ et continue à baisser quand la température croît, finalement le corps se comporte comme un corps paramagnétique[2]. Ces points de transformation du magnétisme correspondent à des modifications de la structure interne des corps, comme l'a montré, en particulier, la micrographie[3].

En se basant sur la loi des phases et à l'aide de courbes de refroidissement, divers auteurs ont établi, pour les alliages, des *courbes* dites *de transformation*, en fonction de la température et de la composition. Les courbes de transformation limitent les régions de stabilité des différentes structures solides. En ce qui concerne l'état liquide, des *courbes de solidification* ont aussi été établies.

Des retards dans les transformations à l'état solide se produisent fréquemment. Ainsi, dans les aciers fer-nickel dits irréversibles[4], le point de transformation du fer a été abaissé et en même temps dédoublé. En ce qui concerne l'état liquide on remarque aussi des retards au refroidissement qui se manifestent par la recalescence des aciers due à la surfusion[5].

On observe quelquefois dans les alliages des structures qui ne correspondent pas à l'équilibre définitif donné par le diagramme des courbes de transformation et de solidification. C'est le cas des métaux trempés. La trempe consiste à chauffer le métal au-dessus de son point de transformation et à amener, par un

[1] Pour les points de transformation des aciers au nickel voir GUILLAUME, *loc. cit.*

[2] Voir note 3, page 33.

[3] On observe les échantillons après des trempes, effectuées à diverses températures, qui fixent la structure des corps à étudier.

[4] Les aciers au nickel contenant moins de 25 % de nickel sont dits irréversibles, ceux qui en contiennent davantage sont dits réversibles. Voir *Les applications des aciers au nickel*, GUILLAUME, Gauthier-Villars, 1904. L'invar est un acier contenant 0,2 % de carbone et 36 % de nickel, CAVALIER, *loc. cit.* p. 411.

[5] Les courbes d'aimantation relatives à un même échantillon, en fonction de la température, ne se superposent généralement pas. Voir expériences d'*Ewing*, MAURAIN, *loc. cit.* p. 24, 52, etc. Nos courbes présentent aussi une différence d'aimantation entre l'aller et le retour du cycle de température.

refroidissement très brusque, à la température ordinaire l'état d'équilibre correspondant à la température de la trempe.

Les métaux *recuits* et *lentement refroidis*, pour lesquels les états d'équilibre ont eu le temps de s'établir à toutes les températures, présentent la structure ordinaire.

Les modifications internes d'un métal, dues à divers traitements mécaniques, peuvent être annulées par le recuit, mais il n'en est pas de même en ce qui concerne les traitements magnétiques [1]. Ces derniers ne peuvent pas toujours être annulés, mais ils le sont souvent par un recuit au-dessus du point de transformation.

Disons quelques mots de la variation de la constitution des aciers au nickel avec la température.

Le nickel pur présente deux formes allotropiques, le Ni α, magnétique, et le Ni β, non magnétique; la transformation de l'un en l'autre a lieu à une température qui varie entre 320° [2] et 363° [3], suivant les auteurs.

MM. Gürtler et Tammann [4] ont établi le diagramme des *alliages binaires fer-nickel.* Ces auteurs supposent qu'il existe une combinaison Ni^2Fe ayant une forme magnétique α et une forme non magnétique β; les divers alliages binaires fer-nickel seraient composés de cristaux mixtes formés de cette combinaison mélangée tantôt avec du fer tantôt avec du nickel.

Dans les *aciers au nickel (alliages ternaires)*, le nickel ne forme pas de constituant spécial, il entre à l'état dissous dans les différents constituants qui sont ceux que l'on trouve aussi dans les aciers ordinaires.

Influence de l'écrouissage sur l'aimantation.

De nombreuses expériences ont montré que la courbe d'aimantation des corps magnétiques est très variable suivant les

1 Voir MAURAIN, *loc. cit.*, p. 92.

2 Voir CAVALIER, *loc. cit.*, p. 328 et 330, d'après GÜRTLER et TAMMANN. M. GUILLAUME indique 340° (*loc. cit. Applications des Aciers au nickel*, p. 199), ainsi que MM. JAQUEROD et GAGNEBIN, *Archives* (5), 8, p. 134 (1926).

3 *Données numériques*, *loc. cit.* p. 793; WEISS, PICCARD et CARRARD, *Journal phys.*, 7, p. 88 (1907).

4 *Zeitsch. f. anorg. Chemie.* 45, p. 205 (1905).

actions mécaniques qu'ils ont subies [1]. L'écrouissage a pour effet de diminuer la perméabilité et d'augmenter le champ coërcitif des fils d'acier et de fer doux [2].

Le métal écroui est souvent instable et tend à reprendre son état primitif par une nouvelle cristallisation (*recuit spontané* de fils de métaux purs). Comme le montrent nos micrographies [3], l'écrouissage brise les cristaux constituants et en forme un métal à grain plus fin. L'orientation interne est changée. Or, un changement de structure interne ou d'orientation peut changer les propriétés magnétiques.

C'est ce qui a été remarqué dans certains aciers au nickel non magnétiques qui ont acquis de la susceptibilité magnétique par écrouissage. M. Cavalier donne une micrographie d'un acier au nickel montrant l'influence de l'écrouissage: on constate une formation de martensite magnétique sur les bords d'un acier polyédrique non magnétique, avec orientation parallèle des cristaux [4].

Quand on travaille des aciers au nickel non magnétiques, on obtient souvent des copeaux magnétiques.

Tout ce qui précède montre que les phénomènes d'aimantation sont très complexes [5].

[1] Voir MAURAIN, *loc. cit.* p. 40, 45 et 46.

[2] *Idem* p. 44 courbes, et p. 81, expériences de M. WEISS sur fil de fer écroui.

[3] Les stries parallèles que l'on y remarque sont dues au polissage.

Ces micrographies ont été faites au Laboratoire de l'Ecole d'Horlogerie de Genève, par M. le professeur P. Werner, auquel nous adressons l'expression de notre reconnaissance pour l'exécution de ce travail délicat.

[4] Voir CAVALIER, planche XX, fig. 75 et p. 409. Diagramme des constituants, CAVALIER, p. 407. Définition des termes métallographiques dans notre précédente publication. Les aciers au nickel polyédriques sont formés de fer γ non magnétique.

[5] MM. WEISS et KAMMERLINGH ONNES ont constaté une *variation de l'aimantation moléculaire* avec l'état physique ou chimique de la substance, au voisinage du zéro absolu. Le nickel considéré soit dans les alliages de fer et de nickel, soit dans les sels de Ni, soit pur, donne trois nombres différents de magnétons. Voir LANGEVIN, *Congrès de physique de Bruxelles* en 1911, Gauthier-Villars.

Magnéton et théorie de M. WEISS sur le ferro-magnétisme, *C.R.*,

Dans les courbes du frottement intérieur, considéré en fonction de la température, des aciers fer-nickel écrouis, M. Chevenard a trouvé dernièrement une anomalie, vers 180°, que divers auteurs attribuent à l'écrouissage ou à la trempe. Cette anomalie avait été constatée auparavant dans les courbes du frottement intérieur des aciers au carbone [1] et M. Chevenard avait pu, chez ces derniers, la faire disparaître par un recuit suffisamment élevé.

Il est très intéressant de remarquer que, pour nos métaux écrouis, les courbes d'aimantation résultant de nos expériences montrent une anomalie à cette même température à laquelle on n'avait jusqu'ici constaté d'anomalie que pour le frottement intérieur.

II. Principe de la méthode.

Nous avons étudié, avant et après le recuit, l'aimantation, en fonction de la température, de fils tirés à froid.

Nous avons utilisé la méthode du magnétomètre [2]. Il s'agit d'observer les déviations dues à l'action d'un corps magnétique sur un aimant mobile. Le corps est placé à l'intérieur d'une bobine qui l'aimante. Pour annuler l'effet de la bobine sur l'aimant du magnétomètre, on place à égale distance de cet aimant une autre bobine, exactement semblable à la première, parcourue par un courant inverse. Le corps à étudier agit donc seul sur l'aimant.

Avec nos fils nous avons formé de petits faisceaux que nous avons placés successivement à l'intérieur d'un four, formé de

144, p. 25 (1907) et *Journal de Phys.* (1908) ; exposé d'ensemble *Phys. Zeitsch.* 12, p. 935 (1911).

M. Osmond (Cavalier, *loc. cit.* p. 10) a trouvé que, dans les cristaux de fer, certaines propriétés mécaniques diffèrent suivant l'orientation cristallographique de la face considérée.

[1] Voir Guye et Mintz, *Archives* (4), 26, p. 163 (1908) ; Chevenard, *C.R.* 166, p. 73 (1918), Robin, Anomalie de sons musicaux, *Journ. de Phys.* (5), 2, p. 307 (1912), Portevin et Chevenard, *C. R.*, p. 716 (1925).

[2] La méthode du magnétomètre a été appliquée dernièrement dans l'industrie pour déterminer la température optima pour la trempe. Cette dernière est atteinte après la perte du magnétisme.

substances non magnétiques, que l'on introduisait à l'intérieur de l'une des bobines.

1° Nous avons alors relevé les déviations, lues au magnétomètre, par la méthode de Poggendorf, à *champ magnétisant constant*, en fonction de la température.

2° Pour voir si nous étions près de la saturation, nous avons opéré *à température constante*, en faisant varier le champ. Nous avons constaté que nous n'avions pas atteint la saturation; avec les difficultés inhérentes à la méthode du magnétomètre, nous n'avons pas pu changer de dispositif, mais nous considérons que nous pouvons donner ici l'allure des phénomènes vu le nombre de résultats concordants obtenus, sans toutefois pouvoir indiquer des valeurs absolues bien certaines.

3° Pour contrôler le dispositif, nous avons fait une expérience complète « à blanc », c'est-à-dire que nous avons parcouru un cycle de température dans les conditions de nos expériences mais sans le faisceau de fils à observer. Dans ces conditions l'aiguille du magnétomètre n'a pas subi de déviation sensible.

Nous avons recuit nos fils à environ 800°, dans un four spécial à circulation d'azote.

III. Mode opératoire et description des appareils.

Il est très difficile d'obtenir l'invar en fils tirés à froid à un diamètre très faible (0,2 à 0,3 mm), aussi avons-nous dû nous contenter de faisceaux d'invar d'un poids d'environ un gramme, ce qui a rendu nos expériences très délicates vu la faible quantité de matière dont nous disposions.

Avec nos fils d'invar nous avons formé trois petits faisceaux allongés, d'environ 6 cm de longueur et comprenant en moyenne une vingtaine de fils. Nous avons aussi essayé un faisceau de fil de fer que nous avions écroui au diamètre de 0,33 mm et un autre faisceau formé de fil d'acier tiré à froid à 0,4 mm.

Pour éviter toute perturbation et trépidation nous avons fait presque toutes nos observations à des heures où nous étions seule dans le laboratoire.

Nous avons réalisé l'ensemble de notre montage sans utiliser des substances magnétiques. Seul le circuit amenant le courant alternatif de la Ville pour le chauffage du four, comprenant le transformateur et des résistances, faisait exception; mais ces appareils étaient placés aussi loin que possible du magnétomètre, et leur position n'a pas changé pendant toute la durée de nos essais; en outre nous avons vérifié, avant la plupart de nos expériences, qu'on n'obtenait pas de déviation au magnétomètre en lançant le courant alternatif.

L'invar a été étudié en une vingtaine de cycles établis aux températures croissantes et décroissantes, de 15° à 350°, quelquefois jusqu'à 370°. Chaque cycle de température était déterminé par une cinquantaine de points en moyenne, et entre les lectures, pour nous assurer du bon fonctionnement du magnétomètre, nous surveillions presque constamment sa marche. Le chauffage à 350° s'effectuait en une heure et demie environ. Pour que le refroidissement eût la même durée que le chauffage, le courant parcourant le four était diminué graduellement.

Le faisceau à étudier était placé au centre d'un four et d'une bobine magnétisante. Le faisceau était entouré d'une résistance de platine servant à mesurer la température. Cette résistance était fixée sur un croisillon de mica. Le four était chauffé par du courant alternatif, l'enroulement était exactement compensé. Autour du four se trouvait la bobine magnétisante parcourue par du courant continu aimantant le faisceau. L'ensemble du montage comprenait donc trois circuits électriques entourant tous les trois le faisceau à étudier.

Magnétomètre.

Il était constitué par la partie centrale d'un galvanomètre de Wiedemann dont l'aimant compensateur avait été enlevé. L'axe du faisceau à étudier était placé dans la direction EW[1]. Les bobines du magnétomètre, construites spécialement pour

[1] On peut négliger le champ terrestre, qui, dans cette position, produit l'effet minimum sur l'intensité du champ magnétisant.

nos expériences, pouvaient, à l'aide de pièces spéciales, glisser sur la règle graduée du galvanomètre. Grâce à cette graduation, on pouvait placer la bobine magnétisante toujours à la même distance de l'aimant du magnétomètre, ce qui permettait de comparer les diverses expériences. Les bobines étaient fixées par des vis de pression en laiton permettant de les rendre exactement perpendiculaires à la règle.

Les deux bobines du magnétomètre étaient composées chacune d'un enroulement de 112 spires porté par un anneau en laiton, de 57 mm de diamètre libre à l'intérieur et de 1 mm d'épaisseur. L'enroulement était fait sur 24,5 mm de largeur. Chaque bobine avait un bord en laiton sur lequel étaient fixées les vis de connexion des fils; ce bord était brasé à l'argent pour la bobine dans laquelle on plaçait le four. Cette bobine était quelque peu protégée de la chaleur par un enroulement de feuilles de mica placé à l'intérieur de l'anneau qui, de la sorte n'était pas en contact direct avec le four.

Four électrique.

Le four était introduit à l'intérieur de la bobine magnétisante.

Il était constitué de la façon suivante : autour d'un tube de laiton recouvert de carton d'amiante, nous avons préparé deux enroulements réguliers, de même longueur, de sens opposé et disposés en deux couches. Ainsi le courant de chauffage était sans action sur le magnétomètre. En outre nous avons employé du courant alternatif. Le four était centré au milieu de la bobine et fixé par l'interposition des feuilles de mica protectrices et par une suspension près de l'ouverture.

Supports du faisceau
et dispositifs pour la mesure des températures.

La partie la plus délicate de nos expériences fut celle qui consista à repérer exactement la position du faisceau au centre de la bobine magnétisante et sa distance à l'aimant du magnétomètre; le moindre déplacement du faisceau, soit en hauteur, soit en profondeur, déformait les courbes.

L'appareil mobile porteur du faisceau fut d'abord constitué comme suit.

Une tige de cuivre avec poignée, recourbée à l'autre extrémité, portait un support de carton d'amiante sur lequel était fixé, avec des fils d'argent, le faisceau à étudier, entouré lui-même d'une mince gaîne de carton d'amiante. Un repère correspondant à l'entrée du four indiquait la position à donner à l'appareil pour centrer le faisceau.

Dans la première moitié de nos expériences, la mesure des températures fut faite au moyen d'un thermomètre à mercure allant jusqu'à 450°. Le réservoir de ce thermomètre était placé à côté du faisceau. Dans cette position, la colonne mercurielle n'était visible que vers 250°. Pour les températures inférieures, il fallait retirer le thermomètre pour en faire la lecture. Ces déplacements pouvaient provoquer de légers ébranlements sensibles au magnétomètre; nous avons craint également que le retard constaté au refroidissement ne fût dû à une inertie thermique du thermomètre. Ce n'était pas le cas, car nous avons trouvé les mêmes résultats avec notre seconde méthode.

Pour éviter les inconvénients que nous venons de mentionner, nous avons utilisé une résistance de platine de 10 ohms pour mesurer les températures. Il fallait pour cela modifier l'appareil porteur du faisceau. Nous avons préparé un croisillon de mica au centre duquel le faisceau à étudier pouvait être introduit. Des encoches faites à la partie extérieure du croisillon permettaient l'enroulement du fil de platine tout autour du faisceau. Le croisillon était fixé à une des extrémités d'un tube de laiton. Les fils amenant le courant à la résistance de platine étaient placés dans deux minces tubes de quartz, enrobés dans du plâtre, à l'intérieur du tube de laiton mobile. Les fils conducteurs étaient soudés à l'argent au fil de platine. L'appareil porteur était soutenu au fond du four par une rondelle de mica terminant le croisillon, et à l'autre extrémité par un bouchon d'amiante qui servait à le centrer.

Les lectures relatives aux températures étaient faites au moyen d'un pont de Wheatstone. Pour rendre notre pont plus sensible, nous avons ajouté à chaque extrémité une résistance de

10 ohms. Par le choix d'un fil de résistance convenable, nous avons obtenu une variation d'environ 50 cm sur le pont pour une augmentation de la température de 400°.

Après avoir serré à fond tous les contacts du circuit de mesure des températures, nous ne les avons plus touchés pendant toute la durée des expériences.

Pour déterminer les températures à l'aide de la résistance de platine, nous avons voulu utiliser la formule de P. Chappuis [1]. Pour cela, toutes les connexions des fils étant faites comme pour les expériences ordinaires, nous avons déterminé, dans un tube fermé, la résistance du fil de platine à 0°, à la température de l'eau bouillante et à la température de la salle. Après avoir parcouru un cycle de température, nous avons constaté que la position du curseur du pont correspondant à la température de la salle avait subi un léger déplacement. Notre fil de platine ayant déjà servi autrefois à des expériences, nous ne l'avions pas recuit. Sa résistance variait légèrement après chaque chauffe. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons, presque entre tous les cycles d'expériences, construit des courbes représentant les lectures au pont en fonction de la température, mesurée à l'aide de notre thermomètre à mercure, à une vingtaine de températures entre 0° et 350°. Les températures de nos expériences ont donc été relevées au moyen de la résistance de platine et comparées à celles du thermomètre.

Avant et après chaque expérience nous lisions le pont de Wheatstone en fonction de la température de la salle.

Circuits électriques.

1° Le circuit de chauffage du four était à courant alternatif (courant de la Ville), dont la tension était abaissée au moyen d'un transformateur. Un ampèremètre et des résistances en série permettaient d'établir un chauffage et un refroidissement sensiblement uniformes dans toutes les expériences.

2° Le circuit du magnétomètre était alimenté par une batterie d'accumulateurs donnant 16 volts. Suivant nos échantillons, le courant eut une intensité de 0,4 à 0,7 amp., donnant un

[1] *Tables des Const. Phys.* Sté de phys.. Paris 1913, p. 16.

champ assez faible[1]. Il était essentiel que le courant aimantant le faisceau restât rigoureusement constant pendant toute la durée d'un cycle, soit pendant plusieurs heures consécutives. Malgré l'interposition des feuilles de mica, la bobine magnétisante, placée autour du four, s'échauffait. Pour que l'augmentation de résistance de la bobine, due au chauffage, fût une faible fraction de la résistance totale du circuit, nous avons mis en circuit avec elle une grande résistance extérieure. La bobine qui avait une résistance de 1,75 ohms représentait en moyenne le 5 % de la résistance totale du circuit. Le courant était maintenu constant par le réglage continuel d'une petite résistance à curseur, d'après les indications d'un ampèremètre gradué de 0 à 1 ampère au centième d'ampère. Les deux bobines du magnétomètre étaient montées en série.

3° Le circuit du courant servant à mesurer la température à l'intérieur du four était alimentée par un accumulateur et parcourait le pont de Wheatstone et la résistance de platine qui entourait le faisceau à étudier. Son action sur le magnétomètre était pratiquement nulle, à cause de sa faible intensité, le cou-

[1] Pour calculer le champ H de la bobine magnétique, nous avons employé la formule suivante (*Electricité*, II, p. 90, MASCART et JOUBERT, Paris, Masson, 1886), pour chaque centimètre de longueur x de nos faisceaux. Nous avons utilisé les ordonnées moyennes des courbes obtenues, ce qui donne des résultats de 32 % plus faibles que ceux de la formule ordinaire de la bobine plate:

$$H = 2\pi n_1^2 \left[(x+b) \log_e \frac{a'' + \sqrt{a''^2 + (x+b)^2}}{a' + \sqrt{a'^2 + (x+b)^2}} - (x-b) \log_e \frac{a'' + \sqrt{a''^2 + (x-b)^2}}{a' + \sqrt{a'^2 + (x-b)^2}} \right] \frac{I}{10}$$

(en unités C.G.S.)

a' = rayon intérieur de l'enroulement, a'' = rayon extérieur de la bobine,

$2b$ = longueur de la gorge, $2c$ = épaisseur de l'enroulement,

n = nombre total des spires, $n_1^2 = \dfrac{n}{2b \times 2c}$.

I = intensité du courant en ampères.

x = distance d'un point au plan médian de la bobine.

Le champ utilisé dans la plupart de nos expériences est ainsi, pour 0,6 amp., de 10 gauss.

rant ne passant d'ailleurs qu'au moment des lectures, très rapides, faites au pont.

Four pour le recuit des fils.

Nous avons recuit nos fils dans un four électrique spécial [1] à la température d'environ 800°. Le faisceau de fils à étudier était placé dans une nacelle en porcelaine disposée à l'intérieur d'un long tube de quartz mobile. La température du four était mesurée à l'aide d'un couple platine–platine rhodium placé à côté de la nacelle. Le faisceau était introduit dans le four lorsque ce dernier était déjà partiellement chauffé. Le chauffage du faisceau dans le four et le refroidissement total duraient chacun environ dix minutes [2]. Une circulation d'azote empêchait l'oxydation de nos fils.

Marche d'une expérience.

Avant de commencer une expérience, on laissait pendant plusieurs heures l'aimant mobile du magnétomètre prendre sa position d'équilibre, sans aucun courant dans les circuits et sans le faisceau à étudier. Le milieu de l'échelle de Poggendorf étant placé sur cette position d'équilibre, on vérifiait l'absence d'influence du courant de chauffage et du courant d'aimantation. Une compensation complète du champ magnétisant était obtenue par réglage de la position de la bobine compensatrice du magnétomètre.

Ces réglages terminés, l'appareil porteur du faisceau et de la résistance de platine était introduit délicatement dans le four. Une lecture au pont de Wheatstone était faite en fonction de la température de la salle. Alors nous commencions le chauffage et les lectures.

Pendant l'expérience, il fallait constamment régler le courant de chauffage et celui des bobines. Les lectures au pont de

[1] Au laboratoire de M. le Prof. Duparc auquel nous adressons ici encore nos remerciements.

[2] Un refroidissement plus lent aurait donné à nos échantillons une structure à plus gros cristaux, mieux visibles à la micrographie, mais nous avons choisi ce mode de refroidissement pour pouvoir comparer nos résultats avec ceux de notre précédente étude. Voir à ce sujet, refroidissement des aciers au nickel à l'air libre, DUMONT, *loc. cit.* p. 348.

Wheatstone étaient immédiatement précédées et suivies de deux lectures du galvanomètre dont on prenait la moyenne. La température de la salle et l'heure étaient notées plusieurs fois.

Après refroidissement, le zéro du magnétomètre était vérifié.

IV. Résultats expérimentaux.

Nous avons groupé les résultats de nos expériences dans les figures qui suivent.

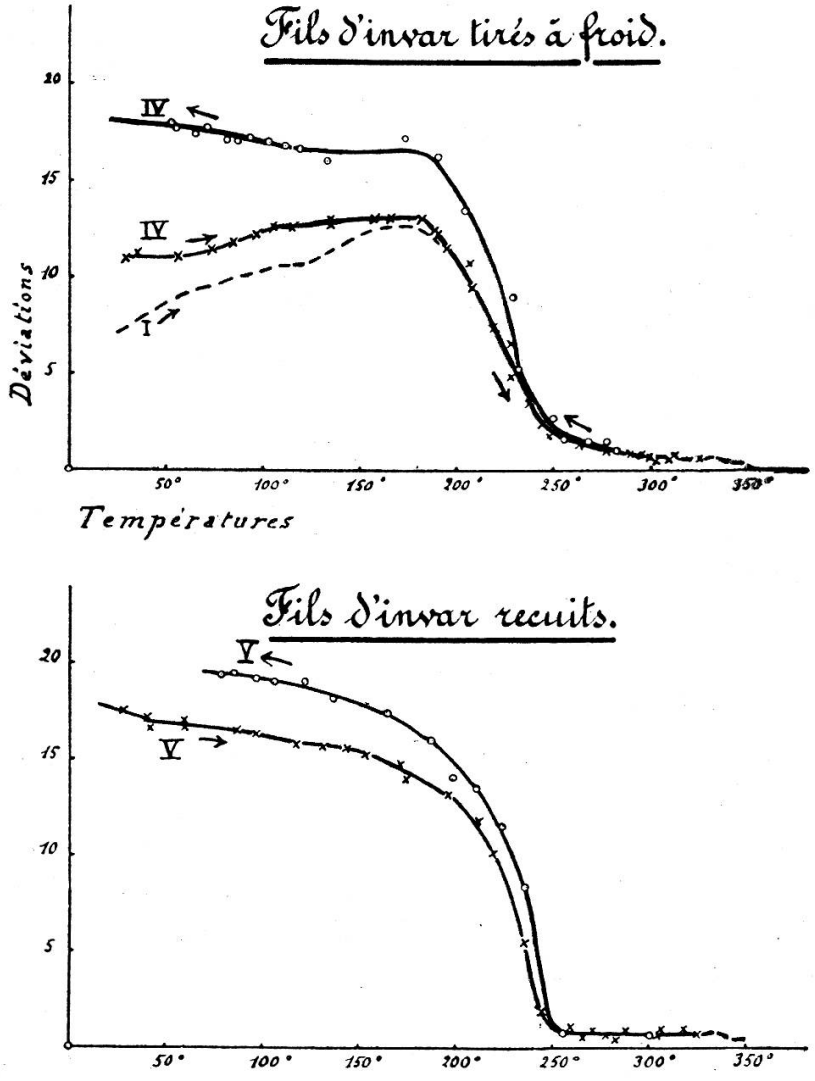


Fig. 1.

Poids moyen des faisceaux 0,9 gr.
Diamètre des fils = 0,2 et 0,3 mm.
Champ magnétisant H = 7 à 11 gauss.
x Lectures faites aux températures croissantes.
o » » » » décroissantes.

Les courbes représentent les déviations du magnétomètre en fonction des températures, tantôt croissantes, tantôt décroissantes, de 15° à 350°, à champ constant.

Invar écroui (fig. 1).

La courbe I, indiquée en pointillé, représente une moyenne entre les courbes relatives au premier cycle de température des trois faisceaux de fils d'invar étudiés, immédiatement après l'étirage. La courbe de retour du cycle I se trouverait placée au-dessus de la courbe indiquée. Pour ne pas surcharger la figure nous n'avons pas indiqué les deuxièmes et troisièmes cycles que nous avons fait parcourir aux fils.

La courbe IV représente le quatrième cycle. Cette courbe, marquée en trait plein, est relative à un échantillon déterminé.

Nous remarquons dans ces courbes, au-delà de 150°, une *anomalie d'aimantation* qui n'a pas été constatée jusqu'ici, à notre connaissance. La courbe d'aimantation des aciers au nickel réversibles donnée par M. Guillaume, en fonction de la température, montre depuis le début de la courbe jusqu'à la perte du magnétisme une susceptibilité constante. *La différence entre nos courbes et celle de M. Guillaume peut*, nous semble-t-il, *être attribuée à l'écrouissage.* Nous avons constaté que *cette anomalie s'atténue par le recuit.*

Une anomalie semblable a été constatée dans les courbes du frottement intérieur en fonction de la température [1].

L'invar semble acquérir peu à peu une plus forte susceptibilité magnétique en parcourant des cycles dont la température supérieure est plus élevée que son point de transformation. L'aimantation de l'invar tiré à froid tombe assez rapidement de 200 à 250°, puis plus lentement au-delà de 250°, jusque vers 340° [2]. Aux environs de cette température, nous avons constaté une très petite anomalie d'aimantation correspondant peut-être

[1] Voir plus haut, p. 37.

[2] En ce qui concerne les températures supérieures, la susceptibilité magnétique des aciers au nickel à 35 % de nickel a déjà été étudiée par MM. HONDA et TAKAGI, voir note p. 33.

au point de transformation du nickel ou à une relation avec le frottement intérieur [1].

Invar recuit (fig. 1).

La courbe V représente le premier cycle de température après le recuit, à 800°, du fil représenté à la courbe IV. On remarque que l'aimantation acquise à la fin du cycle IV est la même qu'au début du cycle V; *l'aimantation maximum est restée ce qu'elle était avant le recuit.* Par contre, vers 250°, l'invar recuit perd son aimantation plus brusquement que l'invar écroui, la courbe est beaucoup plus régulière, l'anomalie d'aimantation vers 150°, due probablement à l'écrouissage, a disparu; la courbe se rapproche de celle donnée par M. Guillaume pour les aciers au nickel réversibles. Nous avons constaté également une très petite anomalie vers 340°.

Nous avons essayé un fil tiré à 0,2 mm de diamètre. L'effet des cycles de température a été de recuire ce fil partiellement dans l'appareil de mesure, si bien que le quatrième cycle avant le recuit au four à 800° était analogue à celui, après le recuit, que nous donnons dans la courbe V. Donc, *les fils tirés à froid, soumis à des cycles de température successifs, tendent à la forme de courbe limite donnée par le recuit, et ceci d'autant plus rapidement que leur diamètre est plus faible.*

Acier écroui (fig. 2).

Nous avons examiné une corde de mandoline, tirée à froid au diamètre de 0,4 mm. La courbe I montre le premier cycle de température de cet acier écroui. L'aimantation croît ici à peu près de la même manière que le frottement intérieur étudié précédemment, puis, contrairement au frottement intérieur qui grandit indéfiniment, l'aimantation reste fixe. Le cycle de cet acier est irréversible, le frottement intérieur semble réversible. Ces courbes indiquées en pointillé long sont données ici à titre de comparaison. On y remarque également une *anomalie d'aimantation* dans les mêmes régions de température que pour l'invar.

[1] Voir plus loin, p. 50.

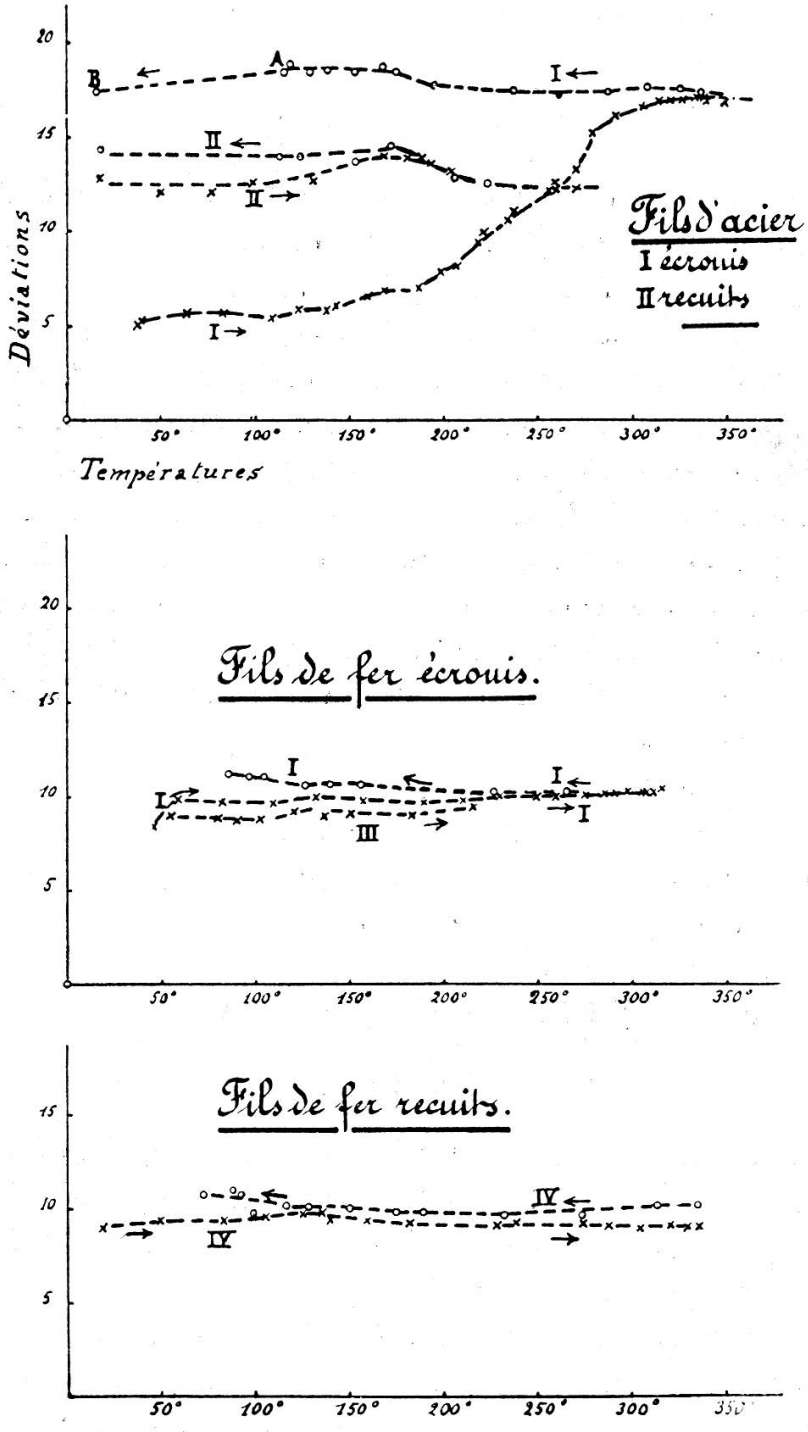
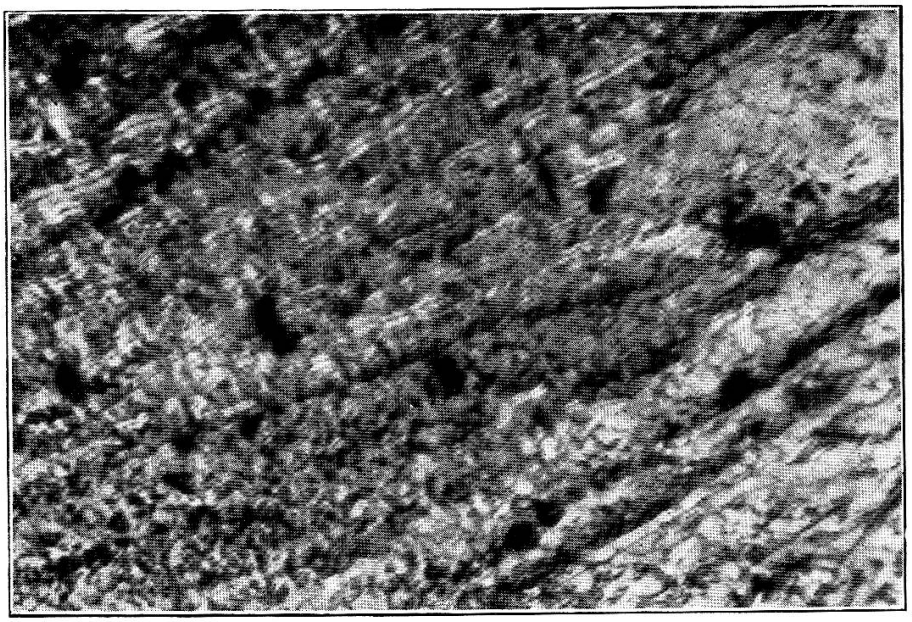
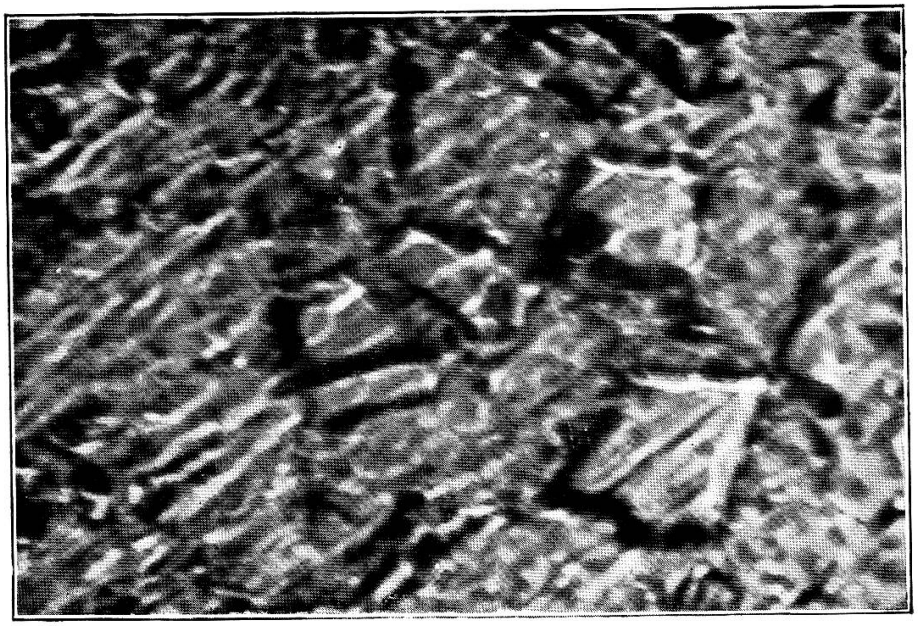


Fig. 2.

Poids des faisceaux: Acier = 1,17 gr. Fer = 0,50 gr.
Diamètre des fils: Acier = 0,4 mm. Fer = 0,33 mm.
Champ magnétisant H = 11,3 gauss.
x Lectures faites aux températures croissantes.
o » » » » décroissantes.
B (fils d'acier, courbe supérieure). Lecture faite 8 jours après les observations jusqu'au point A.



Fil d'invar de 0,3 mm tiré à froid.
Grossissement 725 diamètres.



Même fil, recuit à 800° dans de l'azote.
Grossissement 725 diamètres.

Acier recuit (fig. 2).

La courbe II montre que *l'allure de l'aimantation reste à peu près semblable à ce qu'elle était avant le recuit.* Cet échantillon a subi un seul cycle de température avant le recuit.

Fer écroui (fig. 2).

Nous avons tiré à froid du fil de fer ordinaire dans une filière du laboratoire. Nous avons réduit son diamètre de 0,6 mm à 0,33 mm. Malgré un fort graissage de la filière le fil s'échauffait beaucoup pendant le tirage. La courbe I montre une très faible *anomalie d'aimantation.* Une anomalie semblable n'a pas été constatée dans les courbes du frottement intérieur du fer. Nous pensons que cette anomalie d'aimantation est due au fait que nous avons fait subir un très fort écrouissage à notre fer et qu'il n'était pas pur. Cette anomalie d'aimantation n'a pas été observée jusqu'à présent [1].

La courbe III représente le troisième cycle de température, le deuxième se placerait entre les deux.

Fer recuit (fig. 2).

La courbe IV représente le fil de fer après le recuit. C'est le quatrième cycle de température que subit l'échantillon. *L'aimantation est sensiblement la même avant et après le recuit à* 800°. Au retour du quatrième cycle, l'anomalie d'aimantation a disparu, l'échantillon était probablement suffisamment recuit.

V. Conclusions.

Comparaison des variations de l'aimantation avec celles du frottement intérieur et du module de torsion en fonction de la température [2].

1 Une anomalie dans la durée de sons musicaux a été trouvée dans la même région de température. Voir Robin, *loc. cit.*

2 En interprétant nos résultats, il y a lieu de se demander si les couches superficielles de nos fils ont joué un rôle. Le diamètre

Notre étude avait pour but de répondre à la question suivante:

Les propriétés magnétiques de minces fils d'invar, tirés à froid puis recuits, subissent-elles des changements, en fonction de la température, parallèles à ceux du frottement intérieur ?

Nous avons trouvé précédemment que, pour de minces fils d'invar écroui, la courbe représentant le frottement intérieur en fonction de la température change brusquement d'allure vers 340°. Pour les fils recuits, une variation du frottement intérieur a lieu vers 250°. Les maxima du module de torsion G correspondaient à ces deux températures[1].

Nos expériences montrent que *le point de transformation magnétique ne semble pas déplacé par l'écrouissage, mais l'écrouissage change néanmoins la forme de la courbe d'aimantation.*

La perte principale de susceptibilité magnétique a lieu entre 200° *et* 250°, *soit pour l'invar ordinaire, soit pour l'invar écroui, soit pour l'invar recuit.*

D'autre part, nos courbes d'aimantation présentent des *analogies avec celles qui représentent le frottement intérieur* en fonction de la température.

1° Nous avons trouvé dans nos courbes relatives à divers fils fortement écrouis une *anomalie d'aimantation* au-delà de 150°. Pour l'invar et l'acier, l'anomalie est plus sensible que pour le fer. A mesure que nos échantillons subissaient des cycles de température (compris entre la température ordinaire et une température moyenne maximum de 350°), nous voyions cette anomalie s'atténuer de plus en plus. Enfin par le recuit à 800° elle avait disparu.

Divers auteurs ont constaté, dans les courbes du frottement

de nos fils n'était que de 0,2 et 0,3 mm et les dimensions des cristaux constituant les métaux sont généralement de 0,05 à 0,1 mm (CAVALIER, *loc. cit.*, p. 8). Pour un solide comme pour un liquide, les propriétés des couches superficielles ne sont pas les mêmes que celles des couches profondes; la conductibilité électrique de couches métalliques très minces est plus faible que celle du métal compact. Les couches superficielles prennent une importance considérable quand le grain est très fin *(id.* p. 9*)* et les métaux écrouis présentent une structure particulièrement fine.

[1] Voir plus haut, p. 32.

intérieur, une anomalie dans les mêmes régions de température [1], anomalie qui peut être supprimée par recuit. Dans notre précédente étude on peut remarquer, vers 200°, un léger maximum dans les courbes du frottement intérieur de l'invar écroui [2].

2° Nos expériences montrent que *l'invar écroui perd lentement son aimantation jusqu'à 340°, tandis que l'invar recuit semble la perdre plus brusquement vers 250°*. Ces deux températures correspondent à celles trouvées pour le maximum du module de torsion G et le changement d'allure des courbes du frottement intérieur.

Enfin dans presque toutes nos expériences nous avons constaté une très légère *anomalie aussi vers* 340°, *correspondant probablement au point de transformation du nickel*, qui serait ainsi en relation avec le déplacement du maximum du module de torsion G et du point de transformation du frottement intérieur des fils d'invar écrouis [3].

[1] Voir plus haut, p. 37.

[2] Nous avions recuit tous nos fils, sauf le premier, dans l'appareil de mesure, avant de commencer les expériences, ce qui avait beaucoup atténué cette anomalie.

[3] Il importe de remarquer que ces divers essais ont été effectués assez loin de la région de saturation, ce qui les a rendus particulièrement délicats; c'est vraisemblablement pour cette raison que les résultats n'ont pas toute la netteté que nous aurions désirée; néanmoins tels qu'ils sont, ils nous montrent l'allure générale de ces phénomènes et permettent de les comparer à ceux du frottement intérieur étudiés antérieurement.