

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES ACIERS TREMPÉS*

INTRODUCTION

Ce travail a été fait en vue d'étudier l'influence de la composition chimique des aciers sur leurs propriétés magnétiques et la manière dont ces propriétés sont modifiées par les conditions de trempe. Les aciers qui peuvent servir à faire de bons aimants permanents ont été étudiés plus complètement. Enfin, j'ai étudié l'effet d'un faible recuit sur les mêmes aciers et l'influence des secousses et du temps sur leur aimantation.

M. le professeur H. Le Chatelier a bien voulu faire mettre à ma disposition, pour effectuer ce travail, des échantillons de divers aciers et en faire faire l'analyse. Les aciers m'étaient fournis généralement sous forme de barreaux ayant 20 centimètres de longueur et une section carrée de 1 centimètre de côté; cependant, pour certains aciers, l'étude a été faite sur des barreaux de dimensions différentes. J'ai étudié aussi quelques aciers sous forme d'anneaux réalisant des circuits magnétiques fermés.

Je tiens à remercier bien sincèrement M. le professeur Le Chatelier, dont l'aide et les conseils m'ont été très précieux. Les directeurs de quelques usines et sociétés métallurgiques ont bien voulu prêter leur concours désintéressé, en procurant les échantillons d'aciers utilisés dans ce travail, dont plusieurs ont été préparés spécialement. Je remercie à ce sujet M. Hugot, Directeur des aciéries de Firminy et M. Choubley, ingénieur en chef, — M. de Montgolfier, directeur des forges et aciéries de la marine et des chemins de fer à Saint-Chamond et M. Grobot, directeur de l'usine d'Assailly, — M. Brüstlein, directeur des aciéries d'Unieux, — M. Werth, directeur des usines métallurgiques de la société Commentry-Fourchambault, — M. Lévy, directeur de la Compagnie des forges de Châtillon et Commentry, — M. Plichon, directeur de la fonderie de Grenelle, — enfin M. Carpentier, qui a bien voulu faire exécu-

* [Mme Skłodowska Curie, Bul. de la Sté d'Encouragement à l'Industrie Nationale 1898 — ed.].

ter gracieusement dans sa maison certains travaux pour la préparation des anneaux.

Pour caractériser les propriétés magnétiques d'un acier, j'aimantais les barreaux à saturation et je déterminais pour chacun d'eux:

- 1° Le champ coercitif;
- 2° L'intensité d'aimantation rémanente au milieu du barreau.

Pour les aciers étudiés sous forme d'anneau, j'ai construit la courbe d'aimantation cyclique.

Soit ABCDB'C'A (fig. 1) la courbe qui représente l'intensité d'aimantation I en fonction du champ magnétisant H , pour un circuit magnétique fermé, tel qu'un anneau d'acier. Le champ est produit par un courant circulant dans un fil enroulé régulièrement autour de l'anneau. Le champ variant d'une façon continue de $+H_1$ à $-H_1$ et de $-H_1$ à $+H_1$ l'intensité d'aimantation prend

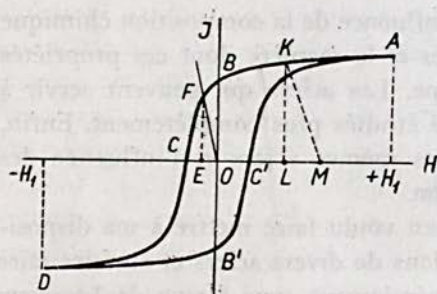


Fig. 1

successivement les valeurs représentées par les ordonnées des branches ABCD, DB'C'A de la courbe. Quand le champ H a sa valeur maximum H_1 l'intensité d'aimantation induite a sa valeur maximum I_m représentée par l'ordonnée du point A. Quand le champ est nul, 0 a l'intensité d'aimantation rémanente $I_r = OB$. Le champ étant négatif pour une certaine valeur $OC = H_c$, l'anneau sera complètement désaimanté. H_c sera le *champ coercitif* (cette quantité est

souvent appelée force coercitive). La connaissance complète du tracé de la courbe est nécessaire pour définir les propriétés d'un acier au point de vue magnétique. Cependant, les trois grandeurs: Intensité d'aimantation induite maximum I_m ; intensité d'aimantation rémanente I_r ; champ coercitif H_c , suffisent déjà pour caractériser assez bien la nature de l'acier à ce point de vue.

Dans le cas d'un barreau placé dans un champ magnétique uniforme H' et orienté parallèlement au champ, le champ magnétisant H , en chaque point, est dû à la superposition du champ H' et du champ démagnétisant H'' , dû à l'aimantation du barreau. Si, après avoir aimanté le barreau, on supprime le champ H' , le champ démagnétisant H'' dû aux pôles subsiste seul. Soit (fig. 1) OE la valeur de ce champ au milieu du barreau, EF représentera l'intensité d'aimantation rémanente I_r au milieu du barreau.

L'intensité d'aimantation rémanente d'un barreau est toujours plus faible que celle d'un anneau, et s'en rapproche d'autant plus que le rapport de la longueur du barreau à sa section est plus grand. Quand ce rapport est très grand,

le point F est très voisin de B. Quand ce rapport est petit, F est voisin de C, et l'intensité d'aimantation rémanente est presque nulle¹.

J'ai déterminé, dans ce travail, le champ extérieur désaimantant pour lequel l'intensité d'aimantation au centre du barreau est nulle, je l'appellerai le *champ coercitif du barreau*. Le champ coercitif du barreau est sensiblement le même que le champ coercitif pour un circuit fermé. En effet, au moment où le barreau se trouve désaimanté, le champ magnétisant est égal au champ extérieur.

Cette proposition n'est pas rigoureusement exacte parce que toutes les parties du barreau ne sont pas désaimantées en même temps².

L'expérience n'a pas montré de différence systématique entre les champs coercitifs déterminés pour le même acier à l'état de barreau ou à l'état d'anneau.

Le champ coercitif d'un acier joue un rôle prépondérant lorsqu'il s'agit de définir ses qualités pour la construction des aimants. L'intensité d'aimantation rémanente en circuit fermé est, en effet, du même ordre de grandeur pour un grand nombre d'aciers et même pour le fer doux. Au contraire, le champ coercitif qui, pour un acier très doux, peut être plus petit que 1, peut dépasser 80 pour certains aciers durs. — Les aciers à faible champ coercitif ne peuvent donc pas être utilisés pour la construction des aimants permanents. Leur aimantation en circuit magnétique non fermé est faible puisque le champ démagnétisant qui en dérive doit être inférieur au champ coercitif. La stabilité des aimants sous l'action des perturbations magnétiques croît aussi avec la grandeur du champ coercitif. Enfin l'expérience montre qu'il en est de même de la stabilité du magnétisme rémanent sous l'influence des secousses et des trépidations.

¹ On peut avoir approximativement la valeur du champ extérieur H' qui correspond à chaque valeur de I pour un barreau un peu long par rapport à son diamètre par une construction simple (voir fig. 1). Traçons OF, EF étant l'intensité d'aimantation rémanente au centre du barreau; pour l'état représenté par un point K quelconque, I étant toujours donné par KL et H par OL, H' sera donné par OM, obtenu en menant par le point K une droite KM, parallèle à OF. Cette construction équivaut à un changement d'axe. (Voir Du Bois — *Magnetische Kreise*.) En particulier, pour le point F, on a $H' = 0$; pour le point C, $H' = H$, c'est-à-dire, que le champ coercitif du barreau est égal au champ coercitif en circuit fermé.

² J'ai étudié, pour un barreau d'acier d'Allevard, l'état d'aimantation des diverses sections quand le barreau est placé dans un champ démagnétisant égal à son champ coercitif. On trouve que, dans ces conditions, les extrémités du barreau sont déjà aimantées légèrement en sens inverse de l'aimantation primitive. Cette aimantation inverse, localisée vers les extrémités, est inférieure à 1 p. 100 de l'aimantation primitive; elle crée au centre du barreau un faible champ démagnétisant; il en résulte que le champ coercitif du barreau est légèrement plus faible que le champ coercitif vrai de la substance (champ coercitif à circuit fermé). Pour se rendre compte de la différence des deux champs coercitifs d'après les expériences dont on vient de parler, on ne peut faire que des calculs approximatifs basés sur des hypothèses incertaines. Ces calculs conduisent à une différence de l'ordre de grandeur de 1 p. 100.

MÉTHODES DE MESURE

Etude des barreaux

On peut mesurer:

1° Le moment magnétique total du barreau M ;

2° Le flux d'induction φ qui traverse la section droite du barreau en son milieu;

3° Le champ coercitif.

Le barreau n'étant pas aimanté uniformément, l'intensité d'aimantation rémanente (moment magnétique rémanent par unité de volume) est variable d'un point à l'autre. Le quotient du moment magnétique total par le volume du barreau donne la valeur moyenne (I moyen) de la composante axiale de l'intensité d'aimantation. J'ai déterminé seulement pour quelques barreaux cette donnée complexe au point de vue des propriétés de la substance.

Connaissant le flux d'induction φ , on peut calculer l'intensité d'aimantation I au milieu du barreau. J'ai mesuré cette dernière grandeur pour chaque barreau étudié; elle a une signification plus simple au point de vue des propriétés magnétiques de l'acier; de plus, la détermination du flux est plus rapide que celle du moment magnétique.

Quand le barreau est très long par rapport à sa section, les valeurs de I moyen et de I au milieu du barreau sont sensiblement les mêmes. Pour les dimensions des barreaux employés, I moyen est bien inférieur à I au milieu du barreau.

Le champ coercitif a été déterminé pour tous les barreaux.

Les barreaux ont tous été aimantés dans une bobine parcourue par un courant avec un champ de 700 unités environ, plus que suffisant pour la saturation; un champ de 1 500 unités ne produisait pas une aimantation rémanente plus forte.

Détermination du moment magnétique du barreau. — La méthode employée était celle de Gauss. L'aimant étudié agissait sur un petit aimant suspendu par un fil de cocon, et, pour augmenter la sensibilité, je diminuais fortement le champ terrestre à l'aide d'un aimant directeur. J'évaluais le moment magnétique du barreau en lui substituant un solénoïde parcouru par un courant connu et produisant la même action que l'aimant. Le moment magnétique du solénoïde peut se calculer facilement.

Détermination de l'intensité d'aimantation au milieu des barreaux. — Il s'agit de déterminer en valeur absolue le flux d'induction à travers la section droite au milieu de chaque barreau.

Pour cela, on compare le flux d'un barreau à un flux calculable provenant d'un solénoïde C (fig. 4), parcouru par un courant et traversant les spires d'une

bobine coaxiale A. La détermination est basée sur la connaissance, en valeur absolue, des dimensions du solénoïde et de l'intensité du courant. Celle-ci résulte à son tour de la connaissance d'une résistance et d'une force électromotrice.

La détermination absolue n'était faite ainsi que pour quelques barreaux qui servaient d'étalon de flux et dont la constance a été vérifiée plusieurs fois dans le cours des expériences. Le flux des autres barreaux était déterminé par comparaison avec celui des barreaux étalons.

Voici comment on dispose l'expérience pour la détermination du flux d'un barreau en valeur absolue. On introduit dans le circuit d'un galvanomètre balistique deux bobines, a et A. La petite bobine a peut s'enfiler sur le barreau aimanté B qui est fixé verticalement (fig. 2).

La bobine a étant placée au milieu du barreau, on la laisse tomber. La déviation balistique du galvanomètre indique la grandeur du flux au milieu de l'aimant.

La bobine A (fig. 4) est traversée par un solénoïde coaxial C. Ce solénoïde très long est formé d'une seule couche de fil enroulé avec soin au point de vue de l'uniformité. La bobine A est courte et possède plusieurs couches de fil. Quand un courant i circule dans le solénoïde, on peut calculer le flux φ qui traverse la bobine A. On tient compte, pour ce calcul, des termes correctifs provenant de l'action des bouts de la bobine C sur chacune des couches de fil de A.

Au moment de la rupture ou de la fermeture du courant i , la variation de flux φ détermine un courant d'induction dans le circuit du galvanomètre. On règle l'intensité i du courant dans le solénoïde de façon que, par rupture du courant, la déviation balistique soit la même que pour l'aimant. φ est alors égal au flux du barreau aimanté.

Il faut connaître i pour calculer φ .

Pour évaluer i , on compare la différence de potentiel aux bornes d'une résistance connue parcourue par ce courant à celle d'un élément Latimer Clark et à celle d'un élément Gouy par la méthode du potentiomètre à boîte de résistance.

Les barreaux dont on a ainsi déterminé le flux étaient aimantés depuis plusieurs années. Ils ont été conservés à l'abri des secousses et des influences magnétiques pendant la durée des expériences, et leur aimantation est restée constante au degré de précision des expériences. L'aimant qui a presque constamment servi dans les mesures est un barreau cylindrique de 23 centimètres de longueur et de 1 centimètre de diamètre; pendant 15 mois, le flux de cet aimant est resté constant à $1/300^{\text{me}}$ près.

Pour mesurer le flux φ au centre d'un barreau quelconque, on le comparait par la méthode balistique au flux de l'un des barreaux étalons. On employait la disposition déjà décrite (fig. 2), et, avec la même bobine intercalée dans le circuit du galvanomètre balistique, on comparait les déviations provenant des flux traversant la section au milieu des deux barreaux.

Connaissant φ , on peut en déduire la valeur de l'intensité d'aimantation I au centre du barreau.

En effet, soit s la section du barreau en son milieu, s' la surface moyenne des spires de la bobine induite a , n le nombre des spires

de cette bobine, h le champ démagnétisant au centre du barreau provenant des pôles; on a:

$$\varphi = 4\pi n I s - nhs'$$

Le terme nhs' dans le cas des barreaux employés, est toujours très petit par rapport à $4\pi n I s$ et constitue un terme de correction que l'on détermine d'une manière approchée comme il suit:

On place la bobine a (fig. 3), à côté du barreau, près du centre, et on la laisse tomber. La déviation obtenue mesure sensiblement le flux nhs' , car h , dans l'air, est à cet endroit très peu différent de h dans le barreau au centre.

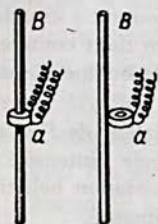


Fig. 2 et 3

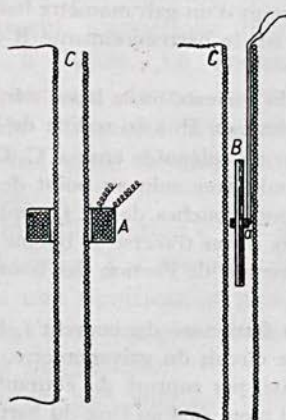


Fig. 4 et 5

La correction, pour les barreaux employés, pouvait atteindre $1/50^e$ de la quantité à mesurer. On tire de la formule la valeur de I .

Mesure du champ coercitif des barreaux. — Le barreau B (fig. 5) est placé au milieu d'une bobine très longue C et dirigé suivant l'axe de cette bobine. Un courant circulant dans un sens convenable dans le fil de la bobine C produit un champ magnétique uniforme, qui tend à désaimanter le barreau. On fait progressivement croître le courant depuis zéro jus-

qu'à la valeur pour laquelle l'aimant est désaimanté; le champ qui existe alors dans la bobine est le champ coercitif.

Pour suivre l'état d'aimantation du barreau, une petite bobine a est enfilée sur le barreau et placée en son milieu. La bobine a est dans le circuit du galvanomètre balistique. On se rend compte de l'état d'aimantation du barreau en tirant brusquement la bobine a hors de l'aimant et de la bobine C à l'aide d'une ficelle. La bobine a se déplace verticalement, guidée par deux fils de cuivre. Quand on lâche la ficelle, elle se remet en place au milieu du barreau sans qu'il soit nécessaire de déranger l'appareil.

Quand le barreau n'est plus aimanté, sa présence ne modifie pas le champ produit par le courant. Il faut donc déterminer le courant i pour lequel le flux dans la bobine est le même que quand le barreau ne s'y trouve pas.

La déviation, quand l'aimant est enlevé, est proportionnelle au courant. Dans une expérience préalable, on détermine la valeur de cette déviation par ampère. Elle est relativement très faible, de sorte que la valeur du courant qui annule l'aimantation diffère peu de celle qui annule la déviation.

Dans les expériences avec le barreau, on lit au galvanomètre les déviations balistiques pour des valeurs croissantes du courant. On note les deux valeurs de i voisines pour

lesquelles on a obtenu des déviations petites et de sens contraires, que l'on note également. On retranche algébriquement de ces déviations celles dues au courant de la bobine seule; on a ainsi les déviations dues à l'aimantation, et on calcule par interpolation la valeur de i pour laquelle l'aimantation est nulle. Le champ correspondant est le champ coercitif du barreau.

La correction due au champ de la bobine est à peine utile dans le cas des barreaux à champ coercitif faible, mais elle devient nécessaire pour les aciers à aimants.

On ne peut se servir, pour le calcul, que de très petites déviations. La mesure se fait par tâtonnement. Cependant, on ne peut pas diminuer le courant parce qu'on ne se trouverait plus sur la même courbe d'aimantation cyclique. Si on a employé un courant trop fort, il faut réaimanter le barreau et recommencer.

On mesurait le courant i à l'aide d'un ampèremètre précis de la maison Chauvin et Arnoux. Cet instrument s'emploie toujours avec des shunts soigneusement étalonnés qui permettent de lui donner la sensibilité que l'on désire. Les très petites corrections à apporter aux lectures faites sur cet ampèremètre ont été déterminées plusieurs fois durant le cours des expériences. On se basait, pour cela, sur la connaissance d'une résistance et de la force électromotrice des éléments étalons Gouy et Latimer Clark (méthode du potentiomètre à boîte de résistance).

Étude des anneaux

Chaque anneau se compose de deux demi-anneaux qui viennent se rajuster ensemble. Leurs bouts ont été soigneusement dressés sur le plan et polis de manière que l'on puisse amener les deux demi-anneaux à se raccorder très exactement ensemble. Chaque anneau avait un diamètre moyen de 11 centimètres et une section de 1 centimètre carré.

Pour établir le champ magnétique dans les anneaux, on s'est servi d'une bobine annulaire formée par la réunion de deux bobines semi-annulaires.

Les coupes (fig. 6 et 7) représentent les deux bobines semi-annulaires A et B; à l'intérieur de ces bobines, se trouvent les demi-anneaux acd , $a'c'd'$; ils sont fixés dans les bobines, par du sable représenté par un pointillé sur les figures. Des bouchons en a et d, a' et d' empêchent le sable de s'écouler. Dans la figure 6, les demi-anneaux sont séparés; dans la figure 7, ils sont raccordés de manière à former un circuit magnétique fermé. Le champ moyen dans l'anneau est $\frac{2Ni}{x}$, N étant le nombre total des spires, i l'intensité du courant, x le demi-diamètre moyen de l'anneau.

La bobine induite bb' (fig. 7 et 8), qui fait partie du circuit du galvanomètre balistique, est introduite entre les deux moitiés de la bobine annulaire et repose dans le creux formé par la courbure des joues. Elle est traversée par le flux magnétique ϕ dû au courant qui circule dans la bobine annulaire et à l'aimantation de l'anneau. On a:

$$\phi = 4\pi Is + \phi'$$

s étant la section de l'anneau, I son intensité d'aimantation, ϕ' le flux dû au champ de la bobine annulaire seule.

On peut mesurer au galvanomètre le flux φ , pour un courant donné i , en séparant brusquement les deux bobines semi-annulaires et en retirant au

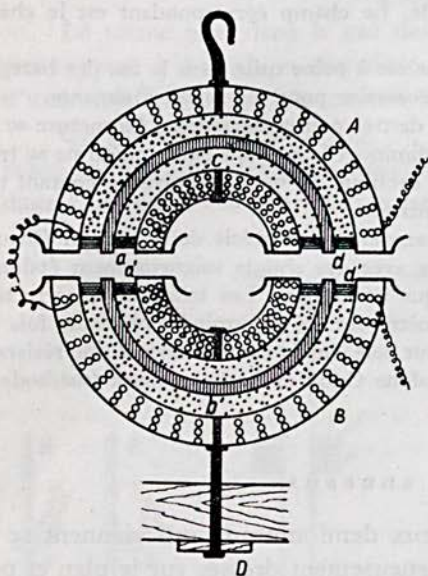


Fig. 6

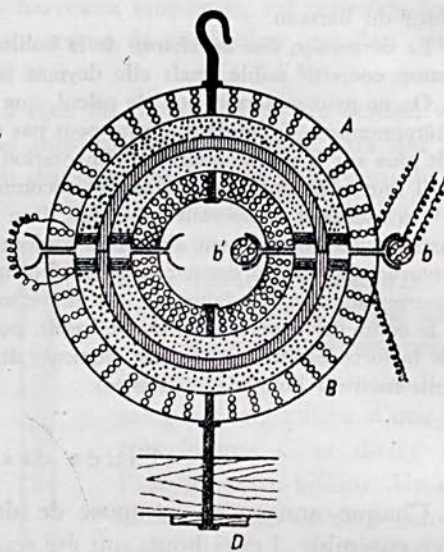


Fig. 7

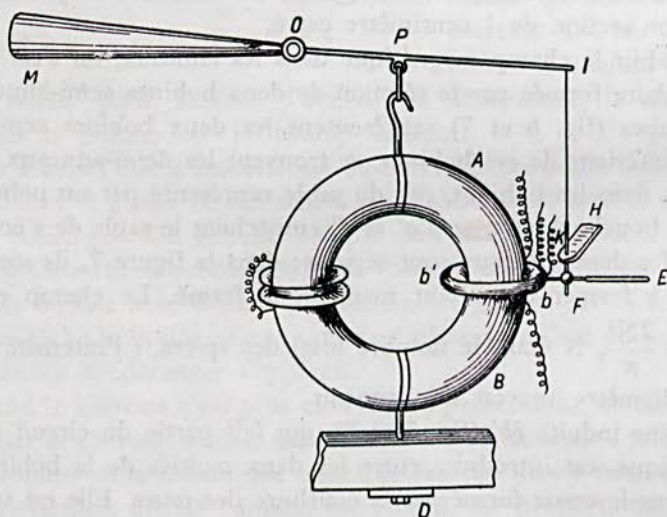


Fig. 8

même instant la bobine bb' du champ. Le circuit du galvanomètre comprend aussi la petite bobine a , qui sert à prendre le flux de l'aimant étalon pour déterminer la sensibilité du galvanomètre.

La bobine semi-annulaire supérieure A est tenue par son milieu et suspendue au moyen d'un crochet au bout d'un levier en P (fig. 8). La bobine inférieure B est fixée à demeure en D. Le levier tourne autour d'un axe fixe en O. Quand il est relevé, les deux bobines peuvent être amenées à se raccorder exactement comme dans les figures 7 et 8. Si on le laisse libre, le grand bras, très lourd, retombe de son propre poids. Eu même temps, le petit bras remonte assez pour arracher la bobine supérieure et la relever de quelques centimètres au-dessus de la bobine fixe (comme fig. 6). La bobine induite bb' , qui était maintenue en place par un arrêt KF, est en même temps rendue libre parce que cet arrêt, qui était maintenu latéralement par la planchette fixe H, se trouve soulevé au moyen du fil IK, relié au levier. Un caoutchouc tendu EF, auquel la bobine bb' est attachée en F, et dont l'autre bout E est fixé à demeure, retire la bobine du champ. L'opération complète se fait très rapidement, ce qui permet d'employer la méthode balistique.

Pour calculer I, il faut connaître le flux ϕ' dû à la bobine seule. Ce flux est proportionnel au courant; on détermine sa valeur par ampère en répétant l'expérience précédemment décrite sans que l'anneau soit dans la bobine.

Pour construire la courbe d'aimantation, on fait varier progressivement le courant entre $+i$ et $-i$ d'une manière cyclique. Pour avoir un point de la courbe, on s'arrête à une certaine valeur de i et on mesure le flux. On remet ensuite en place l'appareil et on fait parcourir un cycle au courant avant de déterminer un nouveau point¹.

Chauffage, trempe, température de transformation magnétique

Les barreaux ont été d'abord chauffés au moyen d'un four à gaz dans un bain formé par un mélange de chlorure de potassium et de chlorure de sodium fondus.

On a ensuite employé un four électrique analogue à celui qu'avait employé M. Charpy pour le même usage, mais sans mouvement de rotation².

Le barreau était placé dans un tube de porcelaine chauffé au moyen d'une spirale de fil de platine parcourue par un courant. Pour éviter le refroidissement, le tube était introduit dans un manchon de terre beaucoup plus large, et l'espace entre les deux tubes était bourré de magnésie calcinée. Ce procédé de chauffage avait ici un intérêt particulier: le courant avait pour effet d'aiman-

¹ La méthode est sujette à une cause d'erreur provenant des deux coupures de l'anneau. D'après Ewing (*Magn. Induction, London*) l'existence d'une coupure entraîne toujours un accroissement de la résistance magnétique du circuit magnétique, et cela même quand le contact des faces est assuré par un polissage parfait. La résistance magnétique additionnelle due aux coupures a pour effet de diminuer l'aimantation rémanente, et cela d'autant plus que l'acier est plus doux. Pour les aciers étudiés ici, cet effet est probablement négligeable, sauf peut-être pour les aciers doux de Firminy à 0,06 et 0,20 p. 100 de carbone. Les valeurs de l'intensité d'aimantation rémanente à circuit magnétique fermé, trouvées pour ces aciers, peuvent donc être trop faibles.

² *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1895, p. 670.

ter le barreau, et une petite aiguille aimantée placée sur pivot à côté du four, en face de l'un des pôles, s'orientait, sous l'action du barreau, à angle droit du champ terrestre auquel le four était parallèle. (Le champ du courant n'avait presque pas d'action sur l'aiguille.) Aux températures élevées l'acier n'est plus ferro-magnétique et l'aiguille se dirige de nouveau dans le méridien magnétique. Pendant que la transformation magnétique se produit, on voit l'aiguille changer de direction, et on peut déterminer la température à laquelle cette transformation a lieu. *Cette température est précisément celle qu'il faut dépasser pour tremper un barreau.*

On a encore employé, pour le chauffage des anneaux et de certains barreaux, des bains de chlorures fondus, chauffés électriquement au moyen d'une spirale de fil de nickel parcourue par un courant; on peut ainsi régler avec précision la température du bain. On a constaté que le fil de nickel pouvait très bien être utilisé pour la construction des fours électriques, ce qui dispense d'employer le platine bien plus coûteux.

La température était déterminée au moyen d'un couple Le Chatelier et d'un galvanomètre. On a adopté, pour la graduation, les températures suivantes:

Point d'ébullition du soufre	445°
Point de fusion de l'or	1050°

et on a supposé qu'entre ces deux températures la déviation variait linéairement en fonction de la température.

On trouve alors pour la température de fusion du chlorure de sodium, 772°, et pour la température de transformation du fer 745°.

On détermine avec beaucoup de précision la déviation du galvanomètre correspondant au point de fusion de l'or en opérant comme il suit: On enveloppe la soudure du couple d'un très petit morceau de feuille d'or. On place la soudure au milieu d'un petit tube de porcelaine chauffé électriquement. On peut amener la soudure progressivement à une température donnant une déviation déterminée sans risquer de la dépasser, on supprime ensuite le courant, et on regarde si l'or a été fondu; après quelques essais de ce genre, on connaît très exactement la déviation qui correspond à la fusion.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Aciers étudiés. — J'ai étudié des aciers à divers pourcentages de carbone, ne contenant que de faibles quantités d'éléments autres que le fer et le carbone. Ces aciers sont de diverse provenance: aciers de Firminy, aciers d'Unieux, aciers Bohler de Styrie.

J'ai étudié aussi des aciers spéciaux à divers pourcentages de carbone: au bore, au cuivre, au silicium, au manganèse, au nickel, au tungstène, au molyb-

dène, provenant des usines des Sociétés Châtillon et Commentry, Commentry et Fourchambault; des aciers au chrome, au tungstène de l'usine d'Assailly; des aciers au tungstène de l'usine d'Allevar et de la maison Boehler de Styrie. On trouvera à la fin de ce travail les analyses complètes des aciers étudiés (tableau IX).

Température de transformation magnétique
et température de trempe

Température de transformation magnétique. — On a vu comment on pouvait suivre au moyen d'une aiguille aimantée l'aimantation induite dans un barreau par le courant de chauffage. Quand on chauffe le barreau à une certaine température le magnétisme induit tombe rapidement à une valeur très faible. Cette température, est celle de la *transformation magnétique*. Quand le barreau se refroidit, une transformation inverse se produit, mais généralement à une température plus basse que la première; il y a hystérésis par rapport à l'effet de la température sur l'acier. Il y a donc lieu de considérer: la température de transformation magnétique par échauffement et la température de transformation magnétique par refroidissement. Il convient toutefois de remarquer que la transformation magnétique n'est pas absolument brusque et semble s'étaler sur un certain nombre de degrés. On peut s'en convaincre en maintenant la température fixe au milieu de la transformation, auquel cas la transformation s'arrête, et l'aiguille reste dans une position invariable, à moitié déviée, et cela quel que soit le sens de la transformation qui était en train de se produire. On a adopté, comme température de transformation, celle qui correspondait à une transformation partielle donnant une même déviation de l'aiguille pour un même courant, afin de rendre les observations sur des barreaux de différente nature autant que possible comparables.

La vitesse de chauffe ou de refroidissement ne semble pas avoir d'influence sur la température de transformation pourvu que cette vitesse ne soit pas trop grande.

Pour les aciers au carbone de Firminy, les températures de transformations données dans le tableau I sont les moyennes d'un grand nombre d'observations faites, pour chaque espèce d'acier, sur deux ou trois barreaux différents. Pour les aciers d'Unieux, on n'a étudié qu'un seul barreau de chaque espèce, et fait seulement deux ou trois déterminations sur chaque barreau; les erreurs des expériences individuelles ont donc plus d'importance.

Les expériences ne sont pas assez précises pour pouvoir en tirer des conclusions très complètes. On a fait figurer les degrés de température dans le tableau parce que certains nombres cités sont des moyennes de diverses expériences, mais l'incertitude des déterminations individuelles est de plus de 10 degrés. On peut cependant remarquer: 1°, Que la température de transfor-

Condition nécessaire pour la trempe des aciers. — Pour prendre la trempe, l'acier doit être trempé quand il est à l'état faiblement magnétique à haute température. On constate en effet que si on chauffe un barreau d'acier à une température inférieure à celle de la transformation magnétique par échauffement, il ne prend pas la trempe par refroidissement brusque (immersion dans l'eau froide). Au contraire, si on chauffe le barreau à une température supérieure à celle de la transformation magnétique par échauffement, il prend la trempe par refroidissement brusque. Après transformation de l'acier par échauffement, on peut laisser le barreau se refroidir lentement d'un certain nombre de degrés avant de procéder au refroidissement brusque: le barreau prendra encore la trempe tant que le refroidissement lent n'aura pas produit la transformation inverse de l'acier; c'est-à-dire, que la trempe sera efficace tant que le refroidissement lent qui la précède n'aura pas amené l'acier à une température inférieure à celle de la transformation magnétique par refroidissement. — Voici, par exemple, comment varient les propriétés magnétiques d'un barreau d'acier au carbone à 0,84 p. 100 de carbone, trempé dans diverses conditions, pour des champs coercitifs H_c et des intensités d'aimantation rémanente I_r . (Dimensions du barreau: longueur 20 cm., section carrée de 1 cm. de côté.)

Température de transformation magnétique par échauffement . . .	730°	
— — — — — par refroidissement . . .	680°	
	H_c	I_r
Acier recuit	8	85
— trempé à l'état magnétique à 705°	14	130
— trempé à l'état non magnétique à 770°	52	410
Acier trempé à l'état non magnétique à 690° (après chauffe à 800° suivie de refroidissement)	50	380

L'effet de la 1^{re} trempe est faible; l'acier était, au moment de la trempe, à l'état ferromagnétique, la température n'ayant pas atteint 730°. L'effet de la 2^e et de la 3^e trempe est énergique; le barreau était, au moment de la trempe, à l'état faiblement magnétique, la température ayant dépassé 730° et n'étant pas redescendue au-dessous de 680°. Ainsi la 3^e trempe efficace a pu être faite à une température inférieure à celle de la 1^{re} trempe peu active.

Influence de la température de trempe sur les propriétés magnétiques des aciers au carbone. — J'ai étudié, sur les aciers au carbone à divers pourcentages de carbone, l'influence de la température de trempe sur les qualités magnétiques. On peut tirer de cette étude les conclusions suivantes (tableau II):

Pour du fer presque complètement doux ($C = 0,06$ p. 100) le champ coercitif et l'intensité rémanente croissent avec la température de trempe, cette température variant de 800° à 1025°; il y a avantage à tremper à température élevée.

Pour les aciers doux à 0,20 p. 100 de carbone, la température de trempe a peu d'influence entre 785° et 915°. Pour les aciers à 0,5 p. 100 de carbone,

Tableau II

Influence de la température de trempe. Aciers au carbone

			T	H _c	I _r	
Aciers de Firminy						
Barreaux de 20 cm. de longueur. Section carrée de 1 cm. de côté.						
C = 0,06	Barreau 1.	1 ^{re} trempe	795	2,2	22	
		2 ^e —	915	3,0	24	
		3 ^e —	1 025	3,4	31	
C = 0,20	Barreau 1.	1 ^{re} trempe	785	8	96	
		2 ^e —	825	11	113	
		3 ^e —	885	11	114	
	Barreau 2.	1 ^{re} trempe	840	11	118	
		2 ^e —	915	10	108	
C = 0,49	Barreau 1.	3 ^e —	840	10	107	
		4 ^e — après cycle	840	11	112	
		1 ^{re} trempe	770	23	222	
	Barreau 2.	2 ^e —	835	23	213	
		1 ^{re} trempe	835	20	195	
		2 ^e —	920	16	160	
	Barreau 1.	3 ^e —	780	20	208	
		1 ^{re} trempe	750	54	416	
		2 ^e —	830	48	378	
	C = 0,84	Barreau 1.	3 ^e —	765	52	426
1 ^{re} trempe			830	49	379	
2 ^e —			770	53	426	
Barreau 2.		3 ^e —	975	48	358	
		4 ^e —	770	50	376	
		5 ^e — après 2 cycles	770	52	387	
Barreau 3.		1 ^{re} trempe	760	52	412	
		2 ^e —	800	48	386	
		3 ^e —	730	53	411	
Barreau 1.		4 ^e — après 3 cycles	765	53	400	
		1 ^{re} trempe, cycle	760	57	430	
		2 ^e —	745	54	400	
C = 1,20		Barreau 1.	3 ^e —	725	54	399
			4 ^e —	770	51	384
			5 ^e — cycle	770	60	451
	Barreau 3.	6 ^e —	905	48	264	
		1 ^{re} trempe	770	39	335	
		2 ^e —	770	41	337	
		3 ^e —	770	59	454	
		4 ^e — cycle	770	60	468	
C = 0,75		1 ^{re} trempe	770	51	414	
		2 ^e —	795	51	393	
C = 0,80		1 ^{re} trempe	755	53	421	
		2 ^e —	810	51	370	
		3 ^e —	810	49	366	
C = 0,83		1 ^{re} trempe	770	56	440	
		2 ^e —	810	52	375	
C = 0,96		1 ^{re} trempe	775	58	431	
		2 ^e —	805	54	381	
Aciers d'Unieux						
Barreaux de 20 cm. de longueur. Section carrée de 1 cm. de côté.						
C = 1,40		1 ^{re} trempe	800	62	479	
		2 ^e —	750	57	468	
		3 ^e — cycle	750	61	505	
C = 1,41		1 ^{re} trempe	800	62	462	
		2 ^e —	745	47	404	
		3 ^e — cycle	745	60	494	
C = 1,61		1 ^{re} trempe	800	31	278	
		2 ^e — cycle	750	46	375	

T, température de trempe. — H_c, champ coercitif. — I_r, intensité d'aimantation rémanente du barreau.

les barreaux trempés entre 770° et 835° ont les mêmes propriétés; mais, après trempe à 920°, l'intensité d'aimantation et le champ coercitif sont plus faibles; il y a avantage à tremper au-dessous de 830.

Pour les aciers durs à 0,84 p. 100 et à 1,2 p. 100 de carbone, le champ coercitif et l'intensité d'aimantation décroissent avec la température de trempe; il y a avantage à tremper à température peu élevée en ayant soin toutefois de dépasser la température de transformation magnétique; on peut, par exemple, obtenir une bonne trempe en chauffant les barreaux à 770°. Pour les aciers à 0,84 p. 100 de carbone, une chauffe préalable à 975° modifie l'acier d'une façon permanente (acier brûlé), et, après une nouvelle trempe faite à 770°, on constate que l'acier a perdu de ses qualités magnétiques. Pour les aciers plus carbonés encore, une chauffe prolongée à 800° produit déjà un effet semblable; il convient donc de chauffer peu de temps avant la trempe les aciers fortement carbonés.

Influence des cycles de variation thermique effectués avant trempe. — Les variations cycliques de température dont il s'agit ici se font entre une température un peu plus basse que celle de transformation magnétique par refroidissement et une température un peu plus haute que celle de transformation magnétique par échauffement, de telle sorte que l'on fait subir successivement à l'acier les deux transformations inverses. Si on trempe à l'état non magnétique un acier après cycle de ce genre, l'effet de la trempe est généralement amélioré si l'acier est fortement carboné. Ce fait est bien manifeste pour l'acier à 1,2 p. 100 de carbone de Firminy et pour les aciers plus carbonés (voir tableau II). — L'effet des cycles de température sur les aciers fortement carbonés semble être précisément inverse de l'effet d'une chauffe prolongée; l'effet des cycles semble détruire en partie l'altération produite par la chauffe. Les aciers à pourcentage de carbone moindre que 1 p. 100, ne sont pas ordinairement influencés par les cycles de température. Cependant quand l'acier à 0,84 p. 100 de carbone a été modifié par une chauffe à température trop élevée, les cycles semblent lui rendre en partie ses qualités magnétiques.

Écrouissage et trempe

On sait, qu'au point de vue de la résistance à la traction, l'écrouissage produit sur les fils d'acier un effet analogue à celui de la trempe. J'ai constaté au contraire, qu'au point de vue des propriétés magnétiques, l'écrouissage agit beaucoup moins énergiquement que la trempe; l'augmentation du champ coercitif obtenue par écrouissage est très petite comparée à celle que l'on obtient en trempant. L'expérience a été faite sur des faisceaux de 5 ou 6 fils de 2 mm. de diamètre et de 20 cm. de longueur d'acier de Firminy à 0,84 p. 100 de carbone. Certains fils étaient recuits (résistance à la rupture 60 kg. par millimètre

carré), d'autres trempés, d'autres écrouis à la filière: résistance à la rupture 220 kg. par millimètre carré.

	H_c	I_r	I_r
6 fils recuits	11	415	
6 fils écrouis	16	780	
5 fils écrouis	16		680
5 fils trempés	52		630

Propriétés magnétiques des barreaux d'acier trempés.
Influence de la composition chimique

On trouvera, dans le tableau III, le champ coercitif H_c et l'intensité d'aimantation rémanente I_r pour des barreaux d'acier trempés de diverse provenance et de diverse composition. On a cherché à tremper chaque acier dans les conditions reconnues pour lui les plus favorables, — aussi la température de trempe n'est-elle pas la même pour tous les aciers. Les barreaux avaient tous une longueur de 20 cm.; la section, pour un grand nombre d'entre eux, était un carré de 1 cm. de côté. — Malheureusement certains barreaux avaient des sections différentes. On a fait figurer dans des colonnes différentes les intensités d'aimantation rémanentes qui se rapportent à des barreaux n'ayant pas même section; les nombres d'une même colonne sont donc comparables. Les intensités d'aimantation rémanente sont désignées par:

- I_1 pour une section carrée de 1 cm. de côté . . . $S = 1$
- I_2 pour une section carrée de 0^m,85 de côté . . . $S = 0,73$
- I_3 pour une section circulaire de 1 cm. de diamètre . $S = 0,785$
- I_4 pour une section circulaire de 0^m,5 de diamètre . $S = 0,196$

Enfin, dans une dernière colonne, on a fait figurer l'intensité d'aimantation rémanente I' à circuit magnétique fermé pour les quelques espèces d'aciers étudiés sous forme d'anneaux. — Des barreaux d'acier de Firminy à 0,84 p. 100 de carbone, ayant diverses sections, servent de terme de comparaison pour les barreaux de même section.

Le champ coercitif des barreaux est à peu près indépendant des dimensions de ceux-ci et à peu près le même que le champ coercitif pour un circuit fermé. L'intensité d'aimantation rémanente, pour un barreau, est au contraire une donnée complexe qui dépend de l'intensité rémanente à circuit fermé, du champ coercitif et de la forme du barreau. Pour les barreaux étudiés ici, l'intensité d'aimantation rémanente diffère complètement de celle que l'on aurait à circuit fermé. (Voir tableau III.) L'influence de la grandeur du champ coercitif est, en général, prédominante et l'intensité d'aimantation rémanente du barreau varie dans le même sens que le champ coercitif; cependant, si on compare entre eux les barreaux d'aciers à très grand champ coercitif (aciers au tungstène ou au molybdène), l'intensité d'aimantation rémanente se rapproche

de l'intensité d'aimantation rémanente à circuit fermé, et l'influence de la grandeur de celle-ci commence à se faire sentir; le champ coercitif et l'aimantation rémanente des barreaux ne varient plus alors toujours dans le même sens.

On ne peut apprécier les qualités magnétiques d'un acier en comparant simplement les intensités d'aimantation rémanente pour des barreaux de mêmes dimensions. On arriverait en effet à des conclusions entièrement différentes en changeant les dimensions du type de barreau adopté pour cette étude: les conclusions à tirer de la comparaison pourraient même être renversées.

Aciers au carbone. Influence du pourcentage de carbone. — Le champ coercitif et l'intensité d'aimantation les plus forts ($H_c = 62$; $I_r = 460$ pour barreaux de 20 cm. \times 1 cm. \times 1 cm.) ont été obtenus avec les barreaux pour lesquels le pourcentage de carbone est voisin de 1,1 à 1,2. Il convient de remarquer que les aciers d'Unieux sont les plus purs; viennent ensuite ceux de Firminy, contenant seulement environ 0,2 p. 100 de manganèse (voir les analyses à la fin de ce travail).

Aciers au bore. — Les aciers au bore mis à ma disposition ne contenaient cet élément qu'en très faible proportion (0,5 et 0,8 p. 100). Ces aciers ont des propriétés magnétiques comparables à celles des aciers au carbone seul de même pourcentage.

Aciers au silicium. — J'ai étudié seulement trois barreaux. La présence de petites quantités de silicium ne semble pas modifier sensiblement les propriétés magnétiques.

Aciers au nickel. — La présence de 3 p. 100 de nickel ne modifie pas beaucoup les propriétés magnétiques; cependant, l'acier au nickel faiblement carboné (0,5 p. 100 de carbone) a un champ coercitif 55, plus élevé que celui des aciers au carbone de même pourcentage. Il convient de tremper les aciers au nickel ici étudiés à température peu élevée; les qualités magnétiques diminuent rapidement quand la température de trempé augmente.

Aciers au manganèse. — Les aciers au manganèse à pourcentage inférieur à 2 p. 100 ont des propriétés magnétiques peu différentes de celles des aciers au carbone seul, contenant la même proportion de carbone.

L'acier au manganèse de Hadfield, à 13 p. 100 de manganèse, a, comme on sait, des propriétés très particulières. Trempé, il ne s'aimante pas, du moins l'intensité d'aimantation rémanente des barreaux n'est pas observable à l'aide des appareils employés pour ce travail; on ne peut donc pas non plus déterminer le champ coercitif. Au contraire, à l'état recuit, les barreaux s'aimantent, l'intensité rémanente est très faible et le champ coercitif très considérable.

Aciers au chrome. — Les aciers étudiés avaient de 2,5 à 3,5 p. 100 de chrome. Comme dans le cas des aciers au nickel, les aciers au chrome les moins carbonés (0,5 et 0,8 p. 100) sont améliorés tant au point de vue du champ coercitif que de l'intensité d'aimantation. Pour l'acier au chrome à 1 p. 100 de car-

bone, la présence du chrome améliore seulement l'intensité d'aimantation rémanente du barreau¹.

Acier au cuivre. — L'acier au cuivre étudié contenait 4 p. 100 de cuivre et 0,9 p. 100 de carbone; la présence du cuivre améliore les propriétés magnétiques.

Aciers au tungstène. — Les aciers à aimants actuellement employés pour les appareils sont des aciers au tungstène. La présence de ce métal augmente fortement le champ coercitif et l'intensité d'aimantation rémanente des barreaux, et cela pour tous les pourcentages de carbone (cependant, pour l'acier de Commentry, au pourcentage très élevé de 1,5 p. 100 de carbone, le champ coercitif n'est pas augmenté par la présence de 3,5 p. 100 de tungstène. Parmi les aciers au tungstène que j'ai étudiés, les meilleurs aciers à aimants se rapportent à deux types: 1° les aciers à 3 p. 100 de tungstène environ et à fort pourcentage de carbone ($C = 1,1$); tels sont: l'acier d'*Assailly* V₃, l'acier de *Commentry* (b), l'acier *Boehler spécial très dur* ($H_c = 74$; $I_r = 530$); — 2° les aciers à pourcentage de carbone plus faible ($C = 0,6$ p. 100) mais renfermant 5,5 p. 100 de tungstène; tel est l'acier à aimants d'*Allevard* ($H_c = 72$; $I_r = 560$) pour barreaux de dimensions $20^\circ \times 1^\circ \times 1^\circ$).

L'acier *spécial très dur Boehler* donne des résultats très différents suivant les conditions de trempe; chauffé longtemps avant trempe, il perd de ses qualités au point de vue magnétique. Enfin, les barreaux de cet acier cassent parfois à la suite de la trempe.

L'acier d'*Allevard* est moins susceptible de s'abîmer pendant qu'on le chauffe, mais les barreaux de cet acier sont aussi sujets à taper par la trempe. La température de trempe n'a pas d'influence bien sensible sur les propriétés magnétiques des barreaux trempés entre 740° et 825° . Cependant il est préférable de chauffer à température peu élevée pour éviter que l'acier ne tape pendant la trempe. En trempant vers 850° ou plus haut, on obtient des aimants moins bons. Une chauffe momentanée au-dessus de 900° est nuisible même quand on trempe ensuite à une température inférieure. Une chauffe prolongée (d'une heure) à 780° n'altère pas d'une façon sensible les propriétés de l'acier.

J'ai également fait varier les conditions du bain de trempe pour l'acier d'*Allevard*. Les trempes effectuées dans un mélange réfrigérant à -18° donnent les mêmes résultats que les trempes effectuées dans l'eau à $+15^\circ$. La trempe au mercure est au contraire plus efficace que celle à l'eau, mais je n'ai pu la pratiquer que sur de très petits barreaux. Pour tremper une grande pièce, il faudrait avoir un bain considérable afin d'éviter l'échauffement trop grand du mercure. Voici les résultats obtenus avec des petits barreaux d'acier d'Alle-

¹ Il convient de faire quelques réserves relativement à ces résultats. On a reconnu à l'analyse des aciers au chrome qu'une partie du carbone était à l'état de graphite ou tout au moins insoluble dans les acides.

vard ayant chacun 9,3 centimètres de longueur et une section carrée de 0,5 centimètres de côté:

Barreaux trempés à l'eau	$H_c = 73$	$I_r = 550$
Barreaux trempés au mercure	$H_c = 78$	$I_r = 540$

Le champ coercitif est remarquablement intense après trempe au mercure.

Les trempes moins énergiques que la trempe à l'eau froide étant souvent pratiquées pour éviter les taspures, j'ai cherché l'effet d'une pareille trempe sur les propriétés magnétiques des barreaux d'acier d'Allevard. La trempe à l'huile est insuffisante. Une trempe à l'eau recouverte d'une couche d'huile épaisse de 20 centimètres a donné des résultats plus satisfaisants, cependant les qualités magnétiques étaient ramenées à celles d'un bon acier au carbone pur trempé à l'eau. On trouverait peut-être une condition pratique convenable sans une trop grande perte des propriétés magnétiques en mettant sur l'eau une couche d'huile moins épaisse.

L'acier au *tungstène de Commentry*, à 1,53 p. 100 de carbone et 3,5 p. 100 de tungstène, n'est pas un bon acier à aimants. Il est à remarquer que, malgré la forte proportion de carbone, cet acier gagne, au point de vue des propriétés magnétiques, à être trempé à température élevée (trempé à 750°, par exemple, on obtient $H_c = 34$; $I_r = 315$; trempé à 850°, $H_c = 35$; $I_r = 318$; trempé à 900°, $H_c = 39$; $I_r = 340$; trempé à 1000°, $H_c = 50$; $I_r = 320$)¹.

L'acier *Boehler marque Boreas* est un acier dont les propriétés sont fort curieuses; il renferme une forte proportion de tungstène: 7,7 p. 100, une très forte proportion de carbone: 2 p. 100, et 2 p. 100 de manganèse. Cet acier simplement refroidi à l'air (trempé dans l'air) a déjà les propriétés des aciers trempés ordinaires, et c'est à cet état qu'il est employé comme outil. Un barreau d'acier à cet état est déjà susceptible de s'aimanter fortement ($H_c = 45$; $I_r = 350$ pour un barreau de dimensions 20° × 1° × 1°). Les qualités magnétiques s'améliorent par une trempe à l'eau ($H_c = 85$; $I_r = 370$). Cet acier trempé à l'eau possède donc un champ coercitif considérable, mais l'intensité d'aimantation est plus faible que celle des autres aciers au tungstène pour des barreaux de mêmes dimensions. En barreaux courts et épais, l'acier Boreas donnerait vraisemblablement des aimants plus forts que ceux constitués avec les autres aciers au tungstène en barreaux de mêmes dimensions. L'acier Boreas n'est pas homogène et se travaille mal. Après trempe, les résultats obtenus avec divers barreaux ne sont pas concordants; certains barreaux ont donné un champ coercitif beaucoup plus faible avec une intensité d'aimantation rémanente plus forte (par exemple, $H_c = 68$; $I_r = 430$).

Aciers au molybdène. — Parmi les aciers que j'ai étudiés, les aciers au molybdène donnent les meilleurs aciers à aimants. Ces aciers, ne sont pas encore entrés couramment dans le commerce. La présence de 3,5 à 4 p. 100 de molyb-

¹ Cet acier contenait 0,35 p. 100 de carbone insoluble dans les acides.

dène améliore fortement les qualités magnétiques des aciers, et cela pour tous les pourcentages de carbone, même pour le pourcentage très élevé de 1,7 p. 100. — Avec 1,25 p. 100 de carbone, on a $H_c = 85$; $I_r = 530$; avec 1,72 p. 100 de carbone, $H_c = 78$; $I_r = 560$ pour des barreaux de 20 centimètres de longueur et 1 centimètre de section. Avec une intensité d'aimantation analogue à celle des aciers au tungstène, le champ coercitif est beaucoup plus grand. Les barreaux tapent parfois par la trempe. Quand on élève la température de trempe, l'intensité d'aimantation des barreaux diminue, mais le champ coercitif reste stationnaire ou même augmente. Par exemple, pour un des barreaux au molybdène à 1,72 p. 100 de carbone, on a trouvé:

Barreau trempé à 745°	$H_c = 73$	$I_r = 465$
— — à 830°	$H_c = 79$	$I_r = 415$
— — à 890°	$H_c = 76$	$I_r = 300$

Remarques générales sur l'influence de la composition chimique sur les propriétés magnétiques des aciers. — Parmi les aciers au carbone seul, les meilleurs aciers à aimants ont environ 1,2 p. 100 de carbone. La présence d'un peu de bore, de silicium, de manganèse ne semble pas avoir une influence notable. Le nickel, le chrome, le cuivre améliorent les qualités magnétiques des aciers. Enfin les aciers au tungstène et au molybdène fournissent les meilleurs aciers à aimants. Il est assez remarquable que les métaux dont l'influence est relativement faible: nickel, chrome, font surtout sentir leur présence dans les aciers faiblement carbonés, tandis que les éléments plus actifs améliorent les aciers à tout pourcentage de carbone; la présence de molybdène ou de grandes quantités de tungstène donne même des qualités magnétiques remarquables à des aciers qui ont une très forte proportion de carbone (1,7 p. 100 et 2 p. 100).

Tableau IV
Intensité d'aimantation rémanente moyenne

	I_c	I_m	I_m/I_c	H_c
Aciers au carbone				
{ C = 0,49 p. 100	188	143	0,76	22
{ C = 0,84 —	376	294	0,78	50
Aciers au tungstène d'Assailly	V ₁ 413	298	0,72	42
	V ₂ 514	403	0,78	65
	V ₃ 420	345	0,82	66
Aciers au molybdène, trempe faible	A 590	450	0,76	74
Châtillon et Commentry	B 432	363	0,84	63
	I 541	435	0,80	73
	II 544	427	0,78	72
Acier d'Allevard	III 557	444	0,80	„
	IV 520	417	0,80	„
	V 572	458	0,80	„

Si on compare un acier au molybdène (tel que l'acier B, tableau III par exemple) à un acier au tungstène tel que l'acier d'Allevard, on reconnaît que, pour les dimensions des barreaux étudiés, l'intensité d'aimantation est analogue. Comme le champ coercitif de l'acier au molybdène est plus grand, il est très probable, qu'au contraire l'intensité rémanente à circuit fermé, pour cet acier, est plus petite que pour l'acier d'Allevard. En conséquence, les aimants réalisant des circuits magnétiques fermés ou presque fermés seront plus intenses s'ils sont faits avec de l'acier d'Allevard; au contraire, sous forme d'aimants ouverts ou de barreaux courts, l'acier au molybdène donnera plus d'intensité. Dans tous les cas, la stabilité du magnétisme sera plus grande avec l'acier au molybdène B¹.

L'acier au molybdène A, au contraire, donnant en barreau une forte intensité d'aimantation avec un champ coercitif plus faible que pour l'acier d'Allevard, il est vraisemblable que cet acier donnerait, à circuit fermé, une intensité d'aimantation plus forte que l'acier d'Allevard, avec une stabilité de magnétisme moindre. En résumé, l'action du tungstène semble être analogue à celle du molybdène, mais une proportion plus forte de tungstène est probablement nécessaire pour produire un effet comparable. Il semble cependant que l'acier au molybdène peut supporter sans inconvénient un plus grand pourcentage de carbone.

Intensité d'aimantation moyenne des barreaux

L'aimantation moyenne n'a été étudiée que pour quelques barreaux. Le rapport $\frac{I_m}{I_c}$ de l'intensité d'aimantation moyenne I_m à l'intensité au centre du barreau I_c , donne *le rapport de la distance des pôles à la longueur du barreau*.

Les nombres du tableau IV sont tous relatifs à des barreaux ayant 20 cm. de longueur, une section carrée de 1 cm. de côté, et aimantés à saturation.

¹ On peut imaginer l'expérience suivante: Soient trois aimants en fer à cheval largement ouverts, de même forme, mais constitués respectivement avec de l'acier au carbone à 0,5 p. 100 de carbone, de l'acier d'Allevard et de l'acier au molybdène B. Les aimants étant munis d'abord d'armatures de fer doux de manière à réaliser des circuits magnétiques presque fermés, on aimante chaque aimant à l'aide d'un courant circulant autour des branches, puis on supprime le courant. Dans ces conditions, les aimants d'acier au carbone et d'acier d'Allevard seront également puissants et auront une force portative plus grande que celle de l'aimant au molybdène. Si on arrache les armatures, c'est, au contraire, l'aimant au molybdène qui restera le plus fortement aimanté; l'aimant d'Allevard viendra ensuite, mais l'aimant au carbone aura perdu la plus grande partie de son aimantation. En remplaçant les armatures, l'aimant au molybdène conservera sa supériorité et aura une force portative plus grande que celle de l'aimant d'Allevard; la force portative de l'aimant au carbone sera très faible.

Les rapports $\frac{I_m}{I_c}$ sont compris entre des limites relativement étroites: 0,72 et 0,84, et sont le plus souvent voisins de 0,80. On ne voit pas de relation simple entre ce rapport, l'intensité d'aimantation I_c et le champ coercitif H_c . Il paraît probable que le rapport $\frac{I_m}{I_c}$ dépend à la fois du champ coercitif et de l'intensité d'aimantation au centre. Ce rapport tend vraisemblablement à augmenter quand le champ coercitif augmente et à diminuer quand l'intensité d'aimantation augmente.

Circuits magnétiques fermés

J'ai étudié à circuit magnétique fermé, c'est-à-dire sous forme d'anneau, les aciers suivants:

Une série de cinq aciers au carbone provenant des aciéries de Firminy à pourcentage croissant de carbone. Un acier au carbone d'Unieux; l'acier d'Allevard; un acier au tungstène de l'usine d'Assailly V₂; un acier à 3 p. 100 de nickel; un acier à 0,7 p. 100 de manganèse.

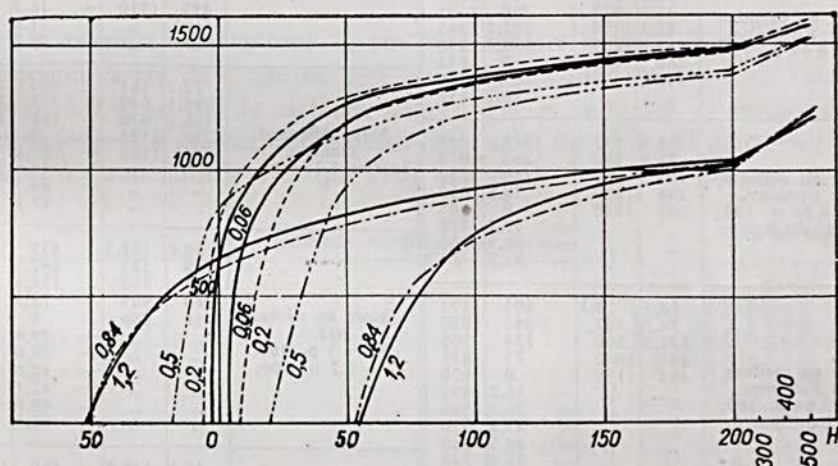


Fig. 9

Il manque à cette étude quelques aciers intéressants, qui se trouvent parmi ceux étudiés sous forme de barreaux. Un anneau de l'acier Boehler spécial très dur a été abîmé par un chauffage trop prolongé. L'acier Boehler Boreas n'a pas pu être mis sous forme d'anneau, l'anneau s'étant cassé pendant qu'on le façonnait. Je n'ai pas pu non plus me procurer des anneaux d'acier au molybdène, et des anneaux d'aciers au carbone à grand pourcentage de carbone.

Pour les anneaux étudiés, j'ai construit la courbe d'aimantation cyclique entre les limites de champ ± 500 unités, (tableau V). Les figures 9 et 10 repré-

Tableau V

Circuits magnétiques fermés. Cycles d'aimantation

	branche ascendante		branche descendante			branche ascendante		branche descendante	
	H	I	H	I		H	I	H	I
Acier au carbone de Firminy. C = 0,06 p. 100.	3,5	36	505	1560	Acier au carbone d'Unieux. C = 0,96 p. 100	..	..	44,0	102
	4,2	181	256	1495		..	..	46,4	64,7
	5,5	350	167	1440		..	..	48,7	14,0
	8,3	685	78,5	1330	Acier Allevard trempé W = 5,5 p. 100 C = 0,59 p. 100 a.	74,2	89	515	1240
	21,0	925	42	1220		81,0	323	270	1160
	52,8	1190	16,1	980		89,0	624	166,5	1120
	135,5	1400	0	625		113,3	880	153,5	1115
	258	1490	1,8	480		161,5	1050	105	1060
	..	..	2,5	293		183	1085	98	1055
	..	..	2,9	113		269	1140	55	985
	..	..	3,2	0,8		505	1240	33,3	940
	..	..	..	..		..	..	23,9	920
	..	..	..	..		..	..	0	850
Acier au carbone de Firminy. C = 0,20 p. 100.	7,7	36,5	505	1590	Acier Allevard non trempé.	26,9	122,5	495	1515
	11,4	340	490	1580		31,7	630	280	1420
	23,6	825	248	1500		55,0	1050	164	1350
	56,0	1200	162	1450		113	1255	52,1	1180
	84,5	1300	76,8	1320		290	1425	0	900
	120,5	1350	0	770		490	1510	16,2	630
	137,5	1390	4,2	460		..	..	21,6	350
	250	1480	6,9	64		..	..	25,8	5,8
	485	1580	..	..	Acier Allevard trempé. Section 0,25 cent. c. b.	72,3	161	495	1230
	..	..	..	..		96,5	840	257	1160
Acier au carbone de Firminy. C = 0,49 p. 100.	19,6	14,5	515	1525		136,5	970	168	1110
	28,8	350	510	1520		257	1125	0	850
	46,5	875	260	1425		495	1130	39,0	670
	82,5	1150	167,5	1365		..	..	38,5	450
	136,5	1285	79,3	1230		..	..	60,5	410
	260	1400	0	835		..	..	67,2	136,5
	510	1525	13,9	360	Acier au nickel Ni ₂ . Ni = 3 p. 100. C = 0,7 p. 100.	58,6	153,5	455	990
	..	..	16,7	137		78	525	242,5	930
Acier au carbone de Firminy. C = 0,84 p. 100. 1 ^{er} échantillon a.	58,6	192	515	1230		121	750	137,5	860
	78,5	580	268	1070		240	905	78,5	805
	135	880	160	990		450	980	0	640
	254	1080	78,6	850		..	..	29,6	490
	505	1230	0	605		..	..	39,0	353
	..	..	33,3	370		..	..	42,8	290
	..	..	46,3	150		..	..	47,1	199
	..	..	51,7	11,3		..	..	49,0	153,5
	..	..	..	..		..	..	53,5	10,5
	..	..	..	..	Acier au manganèse A. Mn = 0,7 p. 100 C = 0,46 p. 100.	34,1	139,3	460	1390
Acier au carbone de Firminy. C = 0,84 p. 100. 2 ^e échantillon b.	58,1	3,7	505	1155		34,5	121,5	270	1325
	74,7	442	245	1070		43,5	700	260	1320
	137,5	860	134	965		52,5	870	140	1245
	245	1040	75	875		99,5	1130	134,5	1230
	495	1155	0	670		159	1240	80,8	1140
	..	..	16,7	595		264	1330	59,2	1095
	..	..	26,7	535		515	1390	0	860
	..	..	43,0	370		..	..	16,2	705
	..	..	48,5	260		..	..	27,3	395
	..	..	53,3	140	Acier au tungstène V ₂ . W = 2,7 p. 100. C = 0,76 p. 100.	70,1	28,6	510	1240
Acier au carbone de Firminy. C = 1,21 p. 100.	58,7	128	535	1200		78,2	358	269	1115
	79,2	550	270	1080		89,0	635	157,5	1060
	124	865	161,5	1015		113,0	855	53,8	930
	199	1025	78,5	890		161,5	995	0	800
	291	1090	0	645		291	1115	26,9	685
	515	1200	14,5	555		490	1240	53,8	480
	..	..	21,9	500		..	..	59,3	352
	..	..	33,3	347	Acier au carbone d'Unieux. C = 0,96 p. 100.	52	43,7	495	1175
	..	..	51,7	20		60,6	262	253	1075
	..	..	..	..		78,5	570	165	1010
	..	..	..	..		139	915	78,2	875
	..	..	..	..		255	1075	0	640
	..	..	..	..		495	1175	16,0	530
	..	..	..	..		..	..	32,8	292

sentent la moitié des courbes cycliques. La figure 9 est relative aux aciers au carbone, le pourcentage étant indiqué sur chaque courbe. La figure 10 est relative aux autres aciers.

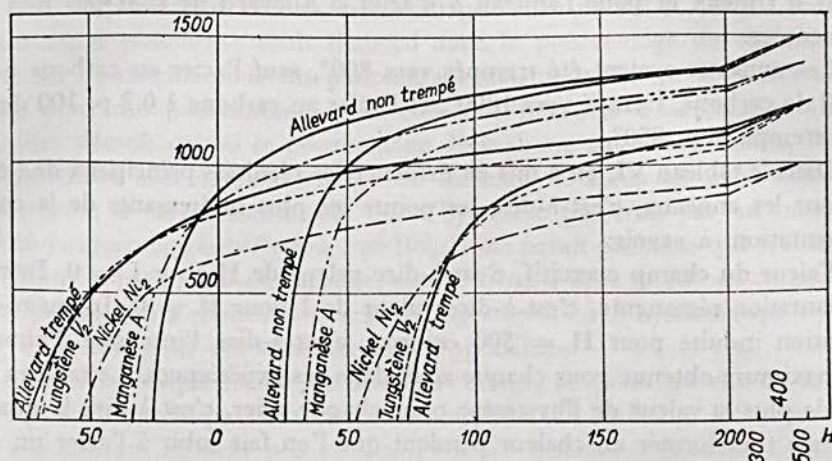


Fig. 11

Les anneaux avaient tous 11 cm. de diamètre moyen; la plupart avaient une section carrée de 1 cm. de côté, sauf les suivants: anneau *b* de l'acier de Firminy, à 0,84 p. 100 de carbone, anneau d'acier au nickel, et anneau d'acier au manganèse qui avaient des sections circulaires de 1 cm. de diamètre; enfin, l'anneau *b* d'acier d'Allevard, qui avait une section carrée de 0,5 cm. de côté.

Circuits magnétiques fermés

Tableau VI

		champ coercitif.	intensité d'aimantation rémnente.	intensité d'aimantation induite maximum.	hystérèse
	C%				
Aciers au carbone de Firminy	0,06	3,2	625	1 560	28 000
	0,20	7,4	770	1 590	68 000
	0,49	19,3	835	1 525	108 000
	a 0,84	52	605	1 230	170 000
	b 0,84	58	670	1 155	217 000
	1,21	53	645	1 200	182 000
Acier au carbone d'Unieux	0,96	50	640	1 175	165 000
Acier d'Allevard trempé W = 5,5 p. 100	a 0,59	73	850	1 240	280 000
	b 0,59	70	850	1 230	265 000
Acier d'Allevard non trempé	0,59	26	900	1 515	115 000
Acier au tungstène d'Assailly (V2) W = 2,7 p. 100	0,76	69	800	1 240	260 000
Acier au nickel (Ni ₂) Ni = 3 p. 100	0,70	54	640	990	177 000
Acier au manganèse (Mn ₂) Mn = 0,7 p. 100	0,46	33	860	1 390	142 000

La courbe pour l'anneau *b*, à 0,84 p. 100 de carbone, ne se trouve pas représentée sur la figure 9; bien que le champ coercitif soit plus fort que pour l'échantillon *a*, les deux courbes ont la même allure. Les courbes pour l'anneau d'acier d'Unieux et pour l'anneau *b* d'acier d'Allevard ne sont pas non plus représentées.

Les anneaux avaient été trempés vers 800°, sauf l'acier au carbone à 0,06 p. 100 de carbone, trempé vers 1000°, et l'acier au carbone à 0,2 p. 100 de carbone trempé vers 850°.

Dans le tableau VI, on a mis en évidence les résultats principaux de l'étude faite sur les anneaux, c'est-à-dire les points les plus intéressants de la courbe d'aimantation, à savoir:

Valeur du champ coercitif, c'est-à-dire valeur de H pour $I = 0$. Intensité d'aimantation rémanente, c'est-à-dire valeur de I pour $H = 0$. Intensité d'aimantation induite pour $H = 500$ environ, c'est-à-dire l'intensité d'aimantation maximum obtenue pour chaque acier dans ces expériences. Le tableau contient de plus la valeur de l'hystérèse pour chaque acier, c'est-à-dire la quantité d'énergie transformée en chaleur pendant que l'on fait subir à l'acier un cycle complet d'aimantation. Cette quantité est égale à $\int H dJ$, et s'obtient en mesurant l'aire de la courbe d'aimantation; elle est exprimée en ergs par centimètre cube de la substance étudiée et se rapporte à un cycle accompli entre les limites de champ ± 500 environ.

En comparant les champs coercitifs obtenus pour les anneaux et pour les barreaux de même acier (tableaux VI, II et III), on trouve que la concordance est généralement satisfaisante¹; cependant, il existe des différences, mais elles n'affectent pas une allure systématique et ne semblent pas devoir être attribuées à une différence de méthode. Je crois que, dans les cas où la concordance n'est pas bonne, il faut donner la préférence aux déterminations faites sur les barreaux. Les déterminations faites sur les anneaux réalisent mieux les conditions théoriques mais, pour diverses raisons, les résultats sont moins sûrs. En effet, l'acier peut avoir été plus ou moins altéré pendant le façonnage à chaud de l'anneau, et c'est probablement ce qui est arrivé pour l'acier de Firminy à 1,2 p. 100 de carbone et pour l'acier d'Unieux. Puis, la préparation et l'étude des anneaux étant longue (trempe, dressage des faces de contact, montage, déterminations pour construire la courbe), je n'ai opéré qu'avec un seul anneau et une seule trempe pour chaque espèce d'acier, sauf l'acier de Firminy à 0,84 p. 100 de carbone et l'acier d'Allevard, dont chacun a été étudié avec deux anneaux de sections différentes. Au contraire, avec les barreaux dont l'étude est rapide, j'ai pu multiplier les essais, et les résultats ainsi contrôlés sont beaucoup plus sûrs.

¹ Voir remarques faites page 5.

On peut suivre l'influence d'un pourcentage de plus en plus élevé de carbone. Le champ coercitif croît constamment pour des pourcentages ne dépassant pas 1 p. 100 (l'étude des barreaux montre qu'il doit y avoir un maximum pour le champ coercitif avec un pourcentage voisin de 1,2 p. 100). L'intensité d'aimantation rémanente croît d'abord avec le pourcentage de carbone; elle atteint un maximum pour un pourcentage voisin de 0,5 p. 100, elle décroît ensuite pour des pourcentages plus élevés. L'intensité d'aimantation induite maximum décroît quand le pourcentage de carbone augmente. Enfin, l'hystérèse augmente avec le pourcentage de carbone. D'après les expériences sur les barreaux, il est vraisemblable que l'hystérèse passerait par un maximum pour un pourcentage supérieur à 1 p. 100. Il me paraît probable que les anneaux de Firminy à 1,2 p. 100 de carbone, et d'Unieux à 0,96 p. 100 de carbone ont été un peu altérés à chaud, et que le champ coercitif et l'hystérèse qui figurent dans le tableau pour ces anneaux sont trop faibles.

A circuit presque fermé, on aurait avantage, au point de vue de la grandeur du flux magnétique, à employer des aciers à 0,6 ou 0,7 p. 100 de carbone, mais ces aimants seraient peu stables. Pour les aimants ordinaires, il y a toujours avantage à employer les aciers plus fortement carbonés.

L'examen des courbes des aciers spéciaux montre que l'introduction des divers métaux modifie peu l'intensité rémanente à circuit fermé; elle augmente le champ coercitif et l'hystérèse, elle diminue l'intensité d'aimantation induite maximum.

Constance de l'aimantation des barreaux

Diverses causes peuvent agir pour faire varier l'état d'aimantation d'un aimant. On doit considérer en particulier:

- 1° L'action des chocs, secousses et trépidations;
- 2° L'action des variations de la température ambiante;
- 3° L'action des champs magnétiques provenant d'aimants ou de courants voisins;
- 4° L'action du temps, l'aimant pouvant spontanément se modifier en fonction du temps.

MM. Barus et Strouhal¹ ont étudié avec beaucoup de soin cette question et, en particulier, ils ont montré la nécessité d'un recuit prolongé à température peu élevée. On s'est aussi aperçu que le magnétisme est bien plus stable dans un aimant si, après l'avoir aimanté à saturation, on le désaimante partiellement². D'où les deux opérations destinées à rendre un aimant constant: recuit à température peu élevée et désaimantation partielle après saturation.

¹ Bull. of the United States Geological Survey, 1885.

² Voir Du Bois et E. Taylor Jones, *Electrotechnische Zeitschrift*, 1896, Heft 3.

MM. Barus et Strouhal distinguent deux espèces de variations produites par les causes ci-dessus énoncées: les variations de nature de la pièce d'acier dont est formé l'aimant et les variations de l'état d'aimantation de cet aimant. Ils étudiaient les variations de nature des barreaux d'acier en mesurant leur résistance électrique. J'ai ici, dans ce même but, mesuré le champ coercitif, dont la grandeur caractérise très bien l'état du barreau. Une variation de nature de la pièce d'acier dont est formé l'aimant, entraîne généralement une perte dans l'intensité d'aimantation, si l'acier est aimanté au moment où la variation se produit; il est donc nécessaire que l'état de la pièce d'acier varie aussi peu que possible.

Effet d'un recuit à température peu élevée sur la nature des barreaux d'acier trempés. — J'ai cherché dans quelle proportion un recuit à 60°, 100°, 200° faisait varier le champ coercitif et l'intensité d'aimantation rémanente maximum des barreaux de diverse nature. (Voir tableau VII).

La première série d'expériences a porté sur 15 barreaux d'aciers trempés de nature différente. On a mesuré le champ coercitif et l'intensité d'aimantation rémanente au centre¹ après chaque chauffe successive. La première chauffe a été de 3 heures à 100°, la deuxième de 7 heures à 100°, la troisième de 3 heures à 200°.

La deuxième série d'expériences, plus soignée que la première, a porté sur 3 barreaux seulement. D'après les résultats de la première série, la chauffe de 10 heures à 100° ne semblait pas avoir épuisé, pour les aciers durs, l'effet que peut produire un recuit à cette température. Dans la deuxième série, les recuits à 100° ont duré en tout 24 heures; on a procédé ensuite à des recuits de 8 heures et demie à 150° et de 7 heures à 200°. Ces recuits sont probablement suffisants pour épuiser l'effet possible du recuit à ces températures. MM. Barus et Strouhal ont montré en effet que l'effet du recuit se produit complètement en un temps d'autant plus court que la température est plus élevée. Dans une troisième série d'expériences, on a étudié sur quelques barreaux l'effet du recuit à 60°.

Pour l'acier à 0,06 p. 100 de carbone (fer doux) le champ coercitif a été trouvé plus grand quand le barreau a été recuit à 200°.

Pour l'acier à 0,2 p. 100 de carbone, les constantes magnétiques varient peu par recuit à 100° ou 200°.

Pour l'acier à 0,5 p. 100 de carbone le champ coercitif diminue légèrement par le recuit.

Pour tous les aciers durs, le champ coercitif diminue déjà beaucoup par le recuit à 100°; la diminution est de 12 à 13 p. 100 pour l'acier au carbone à 0,84 p. 100 de carbone pour l'acier d'Allevard et pour un acier au molybdène;

¹ L'intensité d'aimantation dont il est question ici est celle que garde le barreau lorsqu'il a été réaimanté à saturation à température ambiante après chaque recuit.

Tableau VII

Effet du recuit

1^{re} série

		Champ coercitif				Intensité d'aimantation rémanente			
		acier non recuit	acier recuit			acier non recuit	acier recuit		
			3 heures à 100°	10 heures à 100°	3 heures à 200°		3 heures à 100°	10 heures à 100°	3 heures à 200°
C%									
Aciers au carbone de Firminy	0,06	3,4	3,0	3,2	4,3	27	27	20	41
	0,20	11	11	11	11	116	105	119	111
	0,5	23	21	22	20	207	204	205	197
	0,84	51	47	48	29	394	391	386	295
	1,2	58	56	55	33	445	434	426	334
Aciers au carbone d'Unieux	0,96	54	51	51	35	382	374	363	337
	1,40	58	57	56	27	353	354	348	251
	1,41	60	58	57	29	361	356	347	258
	1,61	46	45	44	26	270	264	266	223
Acier d'Allevard	Barreau I	73	70	68	44	552	543	542	449
	Barreau II	72	69	68	34	562	548	548	374
Acier Boehler spécial très dur		74	69	68	37	572	557	553	422
Acier Boehler Boreas		85	80	78	55	385	385	386	434
Aciers au molybdène	B	85	79	78	30	512	509	502	327
	C	73	70	69	47	442	434	437	406

2^e série

	acier au carbone C = 0,84%		acier d'Allevard		acier au molybdène C	
	H _c	I _r	H _c	I _r	H _c	I _r
Acier non recuit	51	422	69	574	79	429
Acier recuit 3 heures à 100°	45	415	65	583	73	433
— 10 heures à 100°	45	396	63	549	71	418
— 16 heures à 100°	44	397	62	544	70	416
— 24 heures à 100°	44	390	61	540	70	413
— en plus 8 heures 1/2 à 150°	37	363	46	465	50	417
— en plus 7 heures 1/2 à 200°	28	310	37	401	40	382
Perte totale p. 100 après recuit à 100°	13	8	12	6	12	4
Perte totale p. 100 après recuit à 200°	41	27	47	33	50	11

3^e série

	acier d'Allevard 1 ^{er} barreau		acier d'Allevard 2 ^e barreau		acier Boehler Boreas		acier au molybdène B	
	H _c	I _r	H _c	I _r	H _c	I _r	H _c	I _r
Acier non recuit	70,7	561	70,7	579	79,8	336	82,5	496
Acier recuit 7 h. à 60°	69,7	572			78,3	340	79,7	494
— 42 h. à 60°	69,9	564			79,0	339	79,8	490
— 52 h. à 60°			69,6	579				

encore convient-il de remarquer que, pour les deux derniers aciers, l'effet du recuit ne semblait pas complètement épuisé après 24 heures de chauffe.

Après un recuit à 200° , le champ coercitif des aciers durs a diminué beaucoup plus encore; de 41 p. 100 pour l'acier à 0,84 p. 100 de carbone, de 47 p. 100 pour l'acier d'Allevard, de 50 p. 100 et de 65 p. 100 pour deux aciers différents au molybdène.

Il ressort de cette étude que le recuit, même à température peu élevée, diminue le champ coercitif des aciers durs dans une proportion d'autant plus forte que l'acier est plus propre à faire de bons aimants. On ne peut pas recuire à 200° les aimants dont on veut assurer la constance; l'acier perd, dans ces conditions, 50 p. 100 de son champ coercitif et ses qualités magnétiques sont considérablement altérées. Un recuit à 100° fait perdre de 12 à 13 p. 100 du champ coercitif; il est donc déjà fort nuisible, parce qu'il entraîne une diminution correspondante très sensible de la stabilité de l'aimantation.

Il semble qu'il faut se contenter, dans la pratique, d'un recuit assez prolongé (de 24 heures par exemple) à 60° ou 70° ; la perte de champ coercitif qui en résulte n'est que de 1 à 3 p. 100 pour les aciers durs.

L'intensité d'aimantation rémanente des barreaux varie aussi par le recuit, mais cette grandeur est une donnée complexe, et les résultats obtenus eussent été très différents si on avait employé des barreaux ayant une autre forme¹. Pour une certaine forme de barreaux par exemple, l'intensité d'aimantation rémanente peut rester invariable alors que les propriétés de l'acier sont profondément modifiées.

Les barreaux étudiés avaient une longueur de 20 cm. et une section carrée de 1 cm. de côté, sauf les barreaux d'acier d'Unieux à 1,40, 1,41 et 1,61 p. 100 de carbone, qui avaient une section carrée de 0,83 de côté.

Pour les aciers doux au carbone, $C = 0,06$ p. 100, $C = 0,2$ p. 100, $C = 0,5$ p. 100, l'intensité d'aimantation varie comme le champ coercitif. Elle augmente par recuit à 200° pour l'acier à 0,06 p. 100, elle est presque invariable pour l'acier à 0,20 p. 100, elle diminue un peu pour l'acier à 0,5 p. 100.

Pour les aciers durs, l'intensité d'aimantation diminue en général par recuit, mais dans une proportion moindre que cela n'a lieu pour le champ coercitif. Pour certains aciers à grand champ coercitif, l'intensité d'aimantation rémanente reste constante ou même augmente par recuit alors que le champ coercitif diminue fortement. Il faut en conclure que, pour ces aciers, l'intensité d'aimantation rémanente à circuit fermé doit croître fortement par l'effet du recuit. Pour l'acier Boreas par exemple, l'intensité d'aimantation des barreaux

¹ Barus et Strouhal, *loc. cit.*

reste constante après recuit à 100° ; elle augmente après recuit à 200° ; cependant le champ coercitif diminue fortement par le même recuit.¹

Action des chocs et des trépidations sur l'état d'aimantation d'un barreau aimanté à saturation. — Les chocs étaient produits par des chutes. Le barreau, orienté d'abord verticalement, tombait d'une hauteur de 85 cm. sur un pavé de grès dur; puis le barreau orienté horizontalement tombait d'une hauteur de 30 cm. sur le même pavé; on reproduisait ensuite alternativement les deux espèces de chutes. Ces chutes ne modifient pas la nature du barreau d'acier, et on trouve, après les avoir fait subir, le même champ coercitif et la même faculté d'aimantation qu'avant. Il convient donc d'étudier l'effet des chutes sur l'état d'aimantation des barreaux. On mesurait pour cela l'intensité d'aimantation au centre du barreau environ 2 minutes après avoir aimanté à saturation², puis on procédait aux chutes successives en mesurant, dans l'intervalle des chutes, l'intensité d'aimantation du barreau. Les premières chutes sont celles qui produisent le plus d'effet, les suivantes en produisent de moins en moins; l'intensité d'aimantation tend asymptotiquement vers une valeur constante plus faible que la valeur initiale. Cependant le phénomène n'est pas toujours aussi régulier; il arrive parfois, qu'après quelques chutes inactives, les chutes suivantes produisent encore une petite diminution de l'intensité d'aimantation, comme si un nouveau petit groupe de particules aimantées était atteint par les secousses.

On trouvera (tableau VIII) le résultat des expériences sur des barreaux de diverse nature. Les résultats relatifs à des barreaux de mêmes dimensions sont seuls comparables entre eux. On trouvera, dans ce tableau, le pourcentage de perte totale quand l'effet des chutes est épuisé.

Pour les aciers très doux, à 0,06 et 0,2 p. 100 de carbone, le pourcentage de perte d'aimantation est très grand; de plus, il faudrait un tel nombre de chutes pour obtenir une aimantation sensiblement constante que j'ai dû renoncer à y arriver. D'une manière générale, la perte limite par les chutes est d'autant plus petite que le champ coercitif est plus grand (voir tableau VIII). Cependant l'intensité d'aimantation a aussi une influence, et, à champ coercitif égal, la perte p. 100 par les chutes semble d'autant plus grande que l'intensité d'aimantation est elle-même plus grande. L'acier Bohler Boreas par

¹ D'après ce qui précède, il est probable que les aciers doux seraient encore convenablement trempés si le bain de trempe avait une température de 150° à 200° ; au contraire, les aciers durs prendraient, dans ces conditions, une trempe généralement insuffisante.

² Quand on a aimanté un barreau à saturation, il perd ensuite spontanément une petite partie de son aimantation pendant quelques minutes. Ce phénomène n'est guère sensible que pour les aciers à faible champ coercitif; mais l'aimantation de ces aciers varie sous l'influence de la moindre secousse, et il est impossible de dire si la perte, en apparence spontanée, n'est pas due aux trépidations et aux petites secousses inévitables.

exemple, qui a un champ coercitif considérable et une intensité d'aimantation relativement faible, est celui qui perd le moins par les chutes.

On a fait figurer, dans le tableau VIII, le nombre des chocs actifs, c'est-à-dire le nombre des chocs nécessaires pour que l'intensité d'aimantation prenne sensiblement sa valeur limite pour des chutes déterminées, les chutes semblables subies ultérieurement par le barreau ne produisant plus d'effet appréciable. Étant donné la nature du phénomène, ce nombre de chutes n'est évidemment pas une donnée bien définie, sa valeur approximative donne cependant une idée de la rapidité avec laquelle l'intensité d'aimantation prend sa nouvelle valeur pour des barreaux de diverse nature. On voit que, d'une manière générale, la nouvelle valeur est atteinte d'autant plus vite que les chutes font moins d'effet. Cependant il existe des différences individuelles entre les barreaux à ce point de vue. On voit aussi que, pour les aciers durs, on arrive assez rapidement à l'état limite.

Tableau VIII

Perte d'aimantation par chutes successives

		Barreaux non recuits				Barreaux recuits à 100°			Barreaux recuits à 200°		
		H _c	I _r	perte p. 100 d'aimantation	nombre de chutes actives	H _c	perte p. 100 d'aimantation	nombre de chutes actives	H _c	perte p. 100 d'aimantation	nombre de chutes actives
Barreaux de 20 ^{cm} de longueur, section carrée 1 ^{cm} de côté											
	P. 100										
Aciers au carbone	C=0,06	3	27	>83	>75						
	C=0,2	11	117	>45	>95						
	C=0,5	23	210	23	30	22	20	20	20	24	80
	C=0,84	54	398	3,2	15						
	C=0,96	54	386	3,4	20						
	C=1,2	58	451	4,8	20						
Acier d'Allevard I		72	570	6,0	45						
Acier d'Allevard II		73	560	5,0	50	68	7	100	44	9,2	60
Acier au molybdène C		73	448	2,9	10	69	3	30	47	7	100
Boehler, spécial très dur		74	580	3,0	20						
Acier au molybdène B		85	520	3,2	10						
Boehler, Boreas		86	390	1,5	5				55	3,7	20
Barreaux de 20 ^{cm} de longueur, section carrée 0 ^{cm} ,85 de côté											
	P. 100										
Aciers au carbone	C=1,40	59	358	3,5	15						
	C=1,41	60	366	5,5	20						
	C=1,61	46	274	8,5	20						
Acier d'Allevard		74	680	2,6	10						

Les secousses dont il est question ici étaient assez énergiques (certains barreaux se sont cassés); lorsque l'état définitif est atteint, on peut frapper l'aimant assez fortement dans divers sens avec un marteau en cuivre sans obtenir de nouvelle variation.

Comme les pièces d'acier qui servent à constituer des aimants permanents doivent être recuites à basse température, il était intéressant d'examiner (tableau VIII) après recuit et réaimantation l'influence des chutes.

Le caractère du phénomène n'est pas changé. Le pourcentage de perte d'intensité d'aimantation par les chocs est plus grand après recuit; c'est une conséquence naturelle de la diminution du champ coercitif.

Effet des chocs sur des barreaux aimantés, partiellement désaimantés. — Les chocs étaient produits par les mêmes chutes que précédemment.

Expériences sur un barreau aimanté d'acier d'Allevard ayant une longueur de 20 centimètres et une section carrée de 0^m,85 de côté

	Intensité d'aimantation
Barreau aimanté à saturation	676
Après un grand nombre de chutes	658
Barreau réaimanté et désaimanté dans un champ de 6,4 unités . .	660
Après un grand nombre de chutes	656
Barreau réaimanté et désaimanté un peu plus dans un champ de 14 unités	632
Après un grand nombre de chutes	632
Les chutes ne font plus d'effet sensible.	

Expériences avec un barreau d'acier au carbone peu carboné C = 0,5 p. 100
longueur, 20 centimètres; section carrée de 1 centimètre de côté

	Intensité d'aimantation
Barreau aimanté à saturation	200
Après un grand nombre de chutes	152
Barreau réaimanté et désaimanté dans un champ de 8,5 unités . .	150
Ensuite perd encore par chutes.	
Barreau réaimanté et désaimanté plus fortement dans un champ de 13,8 unités	118,4
L'aimantation augmente ensuite spontanément.	
Au bout de 4 jours, elle est devenue presque constante . . .	123
Ensuite les chutes ne font plus aucun effet ¹ .	

¹ Quand on désaimante partiellement un barreau, il tend à reprendre peu à peu une partie de son aimantation primitive; cette augmentation progressive est à peine sensible pour les barreaux d'aciers durs désaimantés, seulement de 1/10^e de leur aimantation. Mais, pour les aciers doux assez fortement désaimantés, le phénomène d'accroissement spontané de l'intensité d'aimantation est très manifeste. Pour le barreau d'acier trempé à 0,5 p. 100 de carbone étudié ici, on a obtenu les résultats suivants:

Barreau aimanté à saturation I = 200. Barreau désaimanté partiellement le 3 juin dans un champ de 13,8 unités donne, de suite après désaimantation, I = 118,4; le 5 juin, I = 120,8; le 6 juin, — I = 122,3, le 7 juin, — I = 122,9.

Ainsi, en désaimantant partiellement les barreaux, on rend l'effet des chutes de moins en moins sensible. Le barreau d'Allevard est devenu complètement insensible aux chutes lorsque la désaimantation a été de 6 p. 100 environ de l'intensité d'aimantation à l'état saturé. Pour le barreau d'acier doux, il a fallu porter la désaimantation à 40 p. 100 pour le rendre insensible aux chutes. On peut donc, par une désaimantation partielle, rendre l'aimantation des barreaux insensible aux secousses. Ce procédé est évidemment moins dangereux pour le barreau et plus facile que celui qui consiste à rendre le barreau insensible en le faisant tomber un assez grand nombre de fois d'une certaine hauteur. Pour des barreaux trempés d'*aciers durs* de diverse nature, ayant 20 cm. de longueur et une section carrée de 1 cm. de côté, j'ai constamment trouvé qu'une désaimantation de $1/10^{\circ}$ de l'aimantation maximum du barreau est plus que suffisante. Les barreaux ainsi légèrement désaimantés peuvent subir des secousses énergiques sans perdre rien de leur aimantation¹.

Influence d'un recuit à température peu élevée sur l'état d'aimantation d'un barreau aimanté. — On peut en chauffant des barreaux aimantés, se rendre compte des effets que peuvent produire les variations de la température ambiante.

Voici, pour 4 barreaux d'aciers durs, trempés et aimantés à saturation, le résultat relatif à l'effet d'une chauffe de 10 minutes à 60° .

		Intensité d'aimantation	
		Avant chauffe	Après chauffe
Barreau d'acier au carbone C = 0,84 p. 100		394	387
Barreau d'acier d'Allevard A		562	541
— — B		523	517
— — C		580	568

On voit que tous les barreaux ont perdu une partie de leur aimantation. Cependant, la chauffe ayant été très courte, la nature de l'acier n'a pas éprouvé de modification sensible pour les appareils de mesure employés. En effet, le champ coercitif des barreaux n'avait pas varié, et, en réaimantant les barreaux à saturation, on retrouvait l'intensité primitive. L'un des barreaux d'Allevard avait subi antérieurement, après trempe, un recuit prolongé à 60° . Ainsi, un barreau aimanté à *saturation* perd une partie de son aimantation par une chauffe de quelques minutes à 60° , et cela même quand le barreau a été recuit antérieurement à cette température. Il est donc de toute nécessité d'employer des

¹ Il convient toutefois de remarquer que la désaimantation directe du barreau doit être plus forte que celle obtenue par les chutes pour que le barreau devienne insensible aux secousses ultérieures. Les deux modes de désaimantation ne sont donc pas absolument équivalents, et, s'il s'agissait de construire des aimants étalons de très haute précision, il serait prudent après la désaimantation directe de faire subir quelques chutes à l'aimant.

barreaux non aimantés à saturation si on veut que leur aimantation reste constante lors des variations de la température ambiante.

J'ai fait quelques expériences sur des barreaux possédant au centre environ les $9/10^{\text{mes}}$ de leur aimantation rémanente maximum.

Le barreau d'acier d'Allevard D, trempé mais non recuit ($H_c = 70,7$) a été aimanté à saturation ($I_r = 580$), puis désaimanté partiellement dans un champ de 13 unités; son intensité d'aimantation est alors $I = 528$ (environ 0,9 de l'aimantation primitive).

Dans ces conditions, l'aimantation s'est montrée beaucoup plus stable, et ne diminuait pas par des chutes de 80 cm. de haut. Après une chauffe de 10 minutes à 60° , l'aimantation est restée sensiblement invariable, $I = 527$; mais, après une chauffe prolongée (52 heures) à 60° elle a diminué d'une façon sensible, $I = 510$; le champ coercitif est devenu $H_c = 69,6$. On a ensuite recommencé la même série d'opérations. Le barreau a été réaimanté à saturation ($I_r = 580$) et désaimanté partiellement dans un champ de 12 unités; l'intensité d'aimantation est alors $I = 519$; après de nouvelles chauffes successives à 60° de 8 heures, de 6 heures et de 17 heures, cette intensité est demeurée constante au degré de précision des expériences près; on avait en effet respectivement, après chaque chauffe, $I = 519,3$, $I = 519$, $I = 520$.

Ainsi, lorsque le barreau (acier d'Allevard trempé, non recuit) a été aimanté à saturation et désaimanté de $1/10$, une chauffe prolongée à 60° lui fait perdre encore une partie de son aimantation, mais il n'en est plus de même quand le barreau, après trempe, a été recuit à 60° , aimanté à saturation et désaimanté de $1/10$; des chauffes à 60° ne modifient plus ensuite l'intensité d'aimantation.

En désaimantant plus fortement le barreau, le recuit préalable à 60° ne serait peut-être pas nécessaire.

Voici des expériences analogues faites sur deux autres barreaux d'acier dur (barreau d'Allevard E, barreau au molybdène B).

Ces deux barreaux ont été trempés et recuits ensuite à 60° pendant 7 heures. Le barreau E a été ensuite aimanté à saturation $I_r = 573$, désaimanté partiellement dans un champ de 14 unités, après quoi on a eu $I = 508,8$; après 33 heures de chauffe à 60° , on a eu $I = 509$.

Le barreau, a été également aimanté à saturation ($I_r = 493$) désaimanté partiellement dans un champ de 20 unités ($I = 444,2$), après chauffe de 23 heures à 60° , $I = 445,6$; après nouvelle chauffe de 16 heures à 60° , $I = 444,5$.

Les différences dans les valeurs de l'intensité d'aimantation après chauffe sont de l'ordre de grandeur des erreurs des expériences.

Variation de l'intensité d'aimantation des barreaux aimantés avec la température. — Un barreau d'acier dur trempé, recuit à 60° , aimanté à saturation et désaimanté de $1/10$ de son aimantation rémanente maximum possède une aimantation qui a toujours la même valeur pour une température donnée, et cela même après diverses fluctuations de la température ambiante. Au contraire, en étudiant l'aimantation du barreau à diverses températures, on trouve que l'aimantation est un peu plus petite quand la température est plus élevée que la température ambiante, un peu plus grande quand la température est plus

basse. Autrement dit, il existe un coefficient de variation de l'intensité d'aimantation avec la température, et ce coefficient est négatif.

Les différences sont fort petites et difficilement mesurables à l'aide des instruments employés.

Voici, par exemple, une série d'expériences faites avec le barreau D d'acier d'Allevard et le barreau au molybdène B. On a fait figurer ici l'intensité d'aimantation au centre du barreau exprimée en unités arbitraires.

Barreau d'Allevard				Barreau au molybdène			
Aimantation maximum rémanente		Aimantation		Aimantation maximum ré-		Aimantation	
Barreau désaimanté dans un champ de 13 unités.	1 ^{re} série	à 17°	36,5	Aimantation maximum ré-	manente	à 17°	31,17
		environ 45°	32,06			à 17°	27,66
		à 17°	31,88			environ 45°	37,50
	2 ^e série	à 17°	32,08	Barreau désaimanté dans un champ de 21 unités		à 17°	27,67
		env. — 10°	31,81			à 17°	27,93
		à 17°	31,99			env. — 10°	27,93
		à 17°	31,83			à 17°	27,66
		env. — 10°	31,99				
		à 17°	31,82				
		environ 45°	31,68				
		à 17°	31,81				

Ces expériences permettent seulement de donner l'ordre de grandeur du coefficient de variation de l'aimantation avec la température. On trouve environ 0,0002 pour l'acier d'Allevard et 0,0003 pour l'acier au molybdène; on pourrait donc avoir des variations de 1/400 dans l'intensité d'aimantation d'un barreau pour une dizaine de degrés de variation de température. Le coefficient de variation pourrait dépendre de la forme du barreau et de son état d'aimantation. Les barreaux ici étudiés avaient 20 cm. de longueur et une section carrée de 1 cm. de côté.

Variations d'aimantation produites par les actions magnétiques extérieures.
— Pour modifier l'intensité d'aimantation d'un barreau d'une fraction donnée de sa valeur, il faut, en général, agir avec un champ d'autant plus grand que le champ coercitif du barreau est plus fort. Ainsi, pour désaimanter de 1/10 et d'une façon permanente des barreaux possédant l'aimantation rémanente maximum, il a fallu les placer un instant dans un champ de:

3,5 unités pour l'acier	au carbone C = 0,5 p. 100,	champ coercitif . . . 21
13,5 — — —	d'Allevard recuit à 60°,	— — . . 70
13,0 — — —	d'Allevard non recuit,	— — . . 71
27,5 — — —	Boreas recuit à 60°,	— — . . 78
21,0 — — —	pour l'acier au molybdène B recuit à 60°,	— — . . 80

Le champ nécessaire pour désaimanter de 1/10 le barreau d'acier Boreas est remarquablement intense.

Les quatre derniers barreaux ayant été aimantés à saturation puis désaimantés au $1/10$, j'ai examiné quelle serait l'action perturbatrice et permanente d'un champ magnétique agissant temporairement dans un sens ou dans l'autre. J'ai constaté que les champs inférieurs à celui qui avait servi à désaimanter au $1/10$ faisaient varier l'intensité d'aimantation de 0,1 p. 100 à 0,3 p. 100; l'emploi de champs supérieurs amenait de suite des variations assez considérables. Ainsi, les variations restent inférieures à 0,3 p. 100 quand le champ perturbateur n'atteint pas 13 pour le barreau d'acier d'Allevard, 27 pour le barreau d'acier Boreas, 21 pour le barreau d'acier au molybdène B. Si on désaimante les barreaux plus fortement qu'au $1/10$, le champ qui a servi à désaimanter est plus fort, et il en est de même du champ perturbateur, pour lequel les variations deviennent grandes; mais, d'autre part, pour les champs faibles, les variations sont plus importantes que précédemment. Par exemple, pour un barreau d'Allevard désaimanté de 0,37 et de 0,64 de l'aimantation rémanente maximum (champs démagnétisants respectifs, 40 et 68 unités), un champ perturbateur de 7 unités produit des variations permanentes respectives de 0,3 p. 100, et de 0,6 p. 100.

Un procédé qui, pour toutes les grandeurs de la désaimantation, donne de bons résultats, consiste à désaimanter partiellement, en plaçant successivement le barreau dans des champs de sens opposé et de valeur absolue progressivement décroissante. En opérant ainsi, on amène le barreau à varier moins que précédemment sous l'influence des champs faibles.

On pourrait obtenir ce genre de désaimantation à l'aide d'un champ créé par une bobine parcourue par des courants alternatifs dont l'intensité diminuerait peu à peu jusqu'à zéro par le moyen d'un rhéostat.

Constance de l'état d'aimantation des barreaux. — L'aimant qui a servi le plus souvent comme étalon dans ces expériences est resté constant à $1/300$ près de sa valeur pendant 15 mois. Cet aimant avait été construit et aimanté depuis plusieurs années, et avait servi à des expériences variées. Conservé ensuite à l'abri des secousses et des actions magnétiques extérieures, cet aimant s'est montré constant. Ceci ne prouve pas qu'il ne varierait pas encore par l'effet d'un échauffement plus intense ou plus prolongé que ceux subis durant l'année écoulée, ou par l'effet d'un choc.

Pour mettre un aimant autant que possible à l'abri d'actions de ce genre sans lui faire perdre trop de son intensité magnétique, il convient de le recuire, après trempe à 60° ou 70° seulement, pendant un temps assez prolongé, 48 heures, par exemple, puis de l'aimanter à saturation, et enfin de le désaimanter partiellement¹. Pour des barreaux de 20 cm. de longueur et de 1 cm. de section,

¹ MM. Barus et Strouhal recommandent de recuire une première fois le barreau, de l'aimanter, et de le recuire une seconde fois à l'état aimanté. Cette deuxième opération agit surtout en désaimantant faiblement le barreau, et peut, je crois, être remplacée par une désaimantation partielle à température ambiante. Cependant, comme on a déjà

on peut conserver les 9/10 de l'aimantation rémanente maximum; l'aimant peut, dans ces conditions, supporter des chocs énergiques et les variations de la température ambiante sans variation sensible de l'état d'aimantation. On se placerait dans des conditions encore meilleures en désaimantant plus fortement le barreau; mais l'aimantation est toujours susceptible de varier sous l'action de champs magnétiques extérieurs¹. On peut cependant l'amener à un état tel que des champs inférieurs à 5 unités ne produisent plus que des variations permanentes inférieures à 0,2 p. 100 et que des champs inférieurs à 16 unités ne produisent pas de variation de 1 p. 100. De toute façon, il faut éviter avec le plus grand soin le voisinage d'un autre aimant. Un pôle de 500 unités à 10 cm. de distance peut déjà produire un effet dangereux.

Il convient de faire des réserves sur ce qui précède. Même quand on a fait subir à un aimant le traitement indiqué, on ne pourra pas affirmer que cet aimant ne variera plus par une secousse même moins forte que celles qu'il a supportées, ou par une variation de température même moins grande que celles auxquelles il a été soumis². Tout ce qu'on pourra dire, c'est que la probabilité pour que le magnétisme de l'aimant ne varie pas est devenue très grande. Il serait illusoire de chercher à obtenir une stabilité absolue au point de vue des secousses ou des variations de température données, parce que l'état d'équilibre parfaitement stable correspond à l'état non aimanté.

Enfin, il convient d'examiner l'action possible du temps, modifiant lentement les propriétés de l'aimant à partir du moment où cet aimant a été constitué. Je n'ai, sur ce sujet, que quelques expériences incomplètes et de trop courte durée.

Le barreau d'Allevard D a été trempé et recuit à 60° pendant 52 heures vers la fin de juillet. Le 31 juillet, champ coercitif 69,6 et intensité rémanente maximum 586. Le 16 septembre, champ coercitif 69,7 et intensité rémanente maximum après réaimantation 584. Les constantes magnétiques du barreau n'ont pas varié pendant un mois et demi.

Le barreau, pendant cet intervalle de temps, du 31 juillet au 16 septembre, était resté aimanté; on lui avait donné, le 31 juillet, une aimantation de 9/10 environ de l'aimantation rémanente maximum, soit 520,5; on a retrouvé, le 2 août 521,5, le 8 septembre, 522,4, le 16 septembre, 523,2. L'intensité d'aimantation semble avoir augmenté progressivement, mais d'une quantité à peine sensible, pour la méthode expérimentale employée.

De même, le barreau d'Allevard E, le barreau au molybdène A et un barreau Bo-reas trempés, recuits à 60° le 1^{er} août, aimantés à saturation et désaimantés de manière à conserver les 9/10 de l'aimantation rémanente maximum le 2 août, ont été conservés ainsi aimantés. Pour le barreau d'Allevard E, l'intensité d'aimantation est, le 2 août, 505,5,

fait remarquer pour le cas analogue de désaimantation partielle par les chocs, les deux modes de désaimantation peuvent ne pas être absolument équivalents, et, s'il s'agissait de construire des étalons de très haute précision, il serait prudent de faire suivre la désaimantation partielle à température ambiante d'une chauffe à 60° de l'aimant à l'état aimanté.

¹ Voir page 32.

² Voir page 34, effets des chocs successifs.

Tableau IX

Analyses des aciers

		Carbone	Silicium	Manganèse	
Analyses de M. Moutonnet					
Aciers au carbone de Firminy	}	0,057	0,053	0,13	
		0,205	0,076	0,15	
		0,493	0,045	0,24	
		0,845	0,130	0,24	
		0,837	0,135	0,24	
Aciers d'Unieux	}	1,206	0,112	0,21	
		0,747	0,057	0,15	
		0,802	0,061	0,15	
		0,829	0,091	0,19	
		0,960	0,065	0,15	
Aciers Boehler de Styrie	{ doux. mi-dur. extra tenace dur. extra mi-dur.	1,405	0,075	0,14	
		1,411	0,093	0,14	
		1,609	0,076	0,13	
		0,699	0,316	0,47	
		0,959	0,274	0,41	
		0,994	0,278	0,18	
		1,166	0,443	0,32	
Tungstène					
Acier d'Allevard	{ 1 ^{er} échantillon. 2 ^e échantillon	5,52	0,591	0,018	0,32
		4,92	0,617	0,027	0,27
Aciers au tungstène d'Assailly	{ V ₄ . V ₃ . V ₂ .	2,917	0,551	0,201	0,42
		2,717	0,760	0,298	0,44
		2,696	1,107	0,322	0,38
Acier Boehler spécial très dur de Styrie		2,870	1,101	0,163	0,27
Chrome					
Aciers au chrome d'Assailly	{ C ₁ . C ₂ . C ₃ .	2,486	0,501	0,273	0,23
		2,831	0,819	0,274	0,21
		3,445	1,069	0,363	0,21
Nickel					
Aciers au nickel de Fourchambault	{ Ni ₄ . Ni ₃ . Ni ₂ .	3,616	0,567	0,176	0,34
		3,029	0,702	0,186	0,34
		3,732	1,214	0,280	0,32
Aciers au manganèse de Fourchambault	{ A . B . C .	..	0,464	0,161	0,69
		..	1,183	0,882	1,83
		..	1,941	0,984	2,20
Analyses de M. Goutal					
Aciers au silicium, Châtillon et Commentry	{ I. II. III.	..	0,91	0,11	0,44
		..	0,91	0,64	0,54
		..	0,72	1,28	0,70
Bore					
Aciers au bore, Châtillon et Commentry	{ b. c.	0,5	1,05	0,16	0,29
		0,8	0,97	0,09	0,26
Cuivre					
Acier au cuivre, Châtillon et Commentry		3,95	0,87	0,03	0,28
Tungstène					
Aciers au tungstène, Châtillon et Commentry	{ a.. b.. c.	3,17	0,77	0,03	0,21
		2,70	1,02	0,04	0,22
		3,52	1,53	0,04	0,31
Acier d'Allevard		5,84	0,59	0,09	0,58
Acier Boehler Boreas de Styrie		7,75	1,96	0,34	1,98
Molybdène					
Aciers au molybdène, Châtillon et Commentry	{ A. B. C.	3,48	0,51	0,08	0,34
		3,36	1,25	0,03	0,21
		4,05	1,24	0,03	0,22
		3,91	1,72	0,04	0,33

le 8 septembre, 509,5, le 17 septembre, 508,8. Pour le barreau au molybdène, l'intensité d'aimantation est, le 2 août, 444, le 8 septembre, 446, le 17 septembre, 446. Pour le barreau Boreas, l'intensité d'aimantation est, le 2 août, 307, le 8 septembre, 308,4, le 17 septembre, 307,8.

Il semble résulter de ce qui précède que, dans les premiers mois après recuit, les constantes magnétiques (champ coercitif, intensité rémanente maximum après réaimantation) des barreaux ne varient pas.

Lorsque les barreaux ont été aimantés à saturation et désaimantés de manière à conserver les 9/10 de la valeur maximum de l'intensité rémanente, cette aimantation reste constante pendant les premiers mois; cependant, il semble y avoir, dans les premiers jours après la désaimantation, une petite augmentation progressive de l'intensité. Ce serait, en beaucoup moins fort, le même phénomène que celui qui est si manifeste avec les aimants faiblement carbonés désaimantés partiellement. (Voir note page 35).