



**HAL**  
open science

## Recherches sur les aciers au nickel

Ch.-Éd. Guillaume

► **To cite this version:**

Ch.-Éd. Guillaume. Recherches sur les aciers au nickel. J. Phys. Theor. Appl., 1898, 7 (1), pp.262-274. 10.1051/jphystap:018980070026200 . jpa-00240182

**HAL Id: jpa-00240182**

**<https://hal.science/jpa-00240182>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## RECHERCHES SUR LES ACIERS AU NICKEL ;

Par M. Ch.-Éd. GUILLAUME.

Les curieuses anomalies que présentent les aciers au nickel ont provoqué, dans ces dernières années, de très intéressantes études de la part de MM. J. Hopkinson, H. Le Chatelier, Osmond, A. Le Chatelier et de quelques autres métallurgistes. En dehors des recherches ayant un caractère industriel, on s'est attaché surtout à l'étude des transformations irréversibles découvertes par M. Hopkinson, qui en a décrit les caractères les plus saillants.

Les premières recherches, faites au Bureau international des Poids et Mesures, sur les aciers au nickel furent entreprises par M. Benoît, directeur du Bureau, à l'occasion de la détermination d'une règle à bouts appartenant à la Section technique de l'Artillerie. C'est au cours des mesures de la longueur de cette règle, faites en mars 1895 à des températures un peu différentes, que M. Benoît découvrit que sa dilatation était voisine de celle du bronze. Plus tard, en mai 1896, ayant entrepris de mesurer la dilatation d'une barre d'acier à 30 0/0 de nickel, je la trouvai d'un tiers environ plus faible que celle du platine.

Le premier alliage contenait 22 0/0 de nickel et 3 0/0 de chrome. On pouvait espérer dès lors, en augmentant la teneur en nickel au-delà de 30 0/0, obtenir des alliages à très faible dilatation. L'importance de pareils alliages pour la Métrologie m'engagea à faire une étude plus complète de l'anomalie de dilatation, pour laquelle on ne possédait encore que deux points de repère. Je m'adressai alors à M. L. Dumas, secrétaire général de la Société de Commentry-Fourchambault, qui, d'accord avec M. H. Fayol, directeur général de cette Société, voulut bien mettre à ma disposition tous les alliages nécessaires à cette étude<sup>(1)</sup>.

L'anomalie de dilatation n'est pas isolée ; elle est intimement liée à d'autres propriétés des alliages, dont plusieurs ont été l'objet de quelques recherches. L'ensemble des variations que l'on constate dans

---

(1) Au cours de ces recherches j'ai été conduit à demander la fabrication de plus de trente nouveaux alliages, qui m'ont tous été fournis à titre gracieux par la Société de Commentry-Fourchambault. Ils ont été préparés dans les aciéries d'Imphy, dirigées par M. Adenot, et livrés en barres forgées de 22 à 24 millimètres de côté et de 1<sup>m</sup>,20 de longueur environ. Tous les alliages ont été analysés, les uns dans les forges de Fourchambault, la plupart dans les aciéries d'Imphy.

ces alliages semble dépendre de transformations analogues à celles que subissent le fer et le nickel lorsqu'ils passent de l'état ferromagnétique à l'état faiblement magnétique. C'est ce qui m'a engagé à faire une étude sommaire de ces transformations.

*Propriétés magnétiques.* — Pour l'étude des transformations magnétiques, le barreau à examiner était suspendu à une balance en bois et plongeait dans une chaudière en laiton, posée sur une pièce polaire d'un électro-aimant, et remplie, suivant les températures, d'huile, d'eau ou d'alcool. On mesurait la force d'arrachement en même temps que la température du bain. La plupart des mesures ont été faites à température lentement descendante ; quelques-unes ont été répétées à température ascendante.

Ces expériences ont montré qu'au point de vue des propriétés magnétiques les aciers au nickel, ne contenant, en dehors du fer et du nickel, que de petites quantités de carbone, de silicium et de manganèse, se divisent en deux catégories bien distinctes. Les premiers, contenant de 0 à 25 0/0 de nickel environ, et qui semblent compris assez exactement entre les formules Fe et  $\text{Fe}^3\text{Ni}$ , sont irréversibles en ce sens qu'à une même température ils peuvent exister à deux états essentiellement différents, suivant le cycle des températures antérieures ; ils suivent, entre certaines limites de température, même pour de très faibles écarts, des chemins entièrement différents, à température ascendante et descendante.

Lorsque ces alliages sont chauffés, ils perdent leur magnétisme graduellement entre deux températures, qui sont comprises pour tous les alliages entre le rouge naissant et le rouge cerise. Lorsqu'on les refroidit, ils repassent par les mêmes températures sans redevenir magnétiques, et ne reprennent leur premier état qu'à une température inférieure à celles entre lesquelles se produit la perte du magnétisme. Le retour au premier état est graduel, et les températures entre lesquelles il se produit sont d'autant plus basses que l'alliage est plus riche en nickel. Pour l'alliage à 24 0/0, la transformation débute un peu au-dessous de zéro. Le chrome abaisse la température à laquelle se produit le retour à l'état magnétique. L'acier contenant 22 0/0 de nickel et 3 0/0 de chrome (acier NC4 de la Société de Commentry-Fourchambault) reste non magnétique même dans l'air liquide, comme j'ai pu le constater, grâce à l'obligeance de M. le Professeur J. Dewar, qui a bien voulu m'autoriser à en faire l'expérience avec lui.

Les aciers d'une teneur supérieure à 25 0/0 sont réversibles et possèdent, à chaque température, des propriétés magnétiques qui, en première approximation, ne dépendent que de la température actuelle. Toutefois les alliages dont la teneur est très peu supérieure à 25 0/0 se comportent d'une façon un peu différente, après avoir été chauffés ou refroidis; ils semblent contenir des traces d'un alliage irréversible entre des températures moins distantes que celles entre lesquelles les précédents alliages peuvent se présenter sous les deux états.

Pour les alliages réversibles, la température à laquelle se produit la perte totale du magnétisme est représentée, en fonction de la teneur en nickel, par la formule :

$$\theta = 34,1 (n - 26,7) - 0,80 (n - 26,7)^2,$$

dans laquelle  $n$  indique la teneur en nickel exprimée en centièmes. Cette formule a été établie sur des alliages contenant de 28 à 40 0/0 de nickel <sup>(1)</sup>.

*Dilatation.* — La dilatation de la plupart des alliages étudiés a été mesurée à l'aide du comparateur du Bureau international. Toutefois il a paru intéressant de pousser les recherches à des températures bien supérieures à celles que permet d'atteindre le comparateur, tout en sacrifiant une partie de la précision des résultats. Pour ces mesures, j'ai employé la méthode des dilatations relatives sous sa forme la plus simple.

Une règle de laiton, munie à l'une de ses extrémités d'une petite réglette à biseau portant une division, est fixée par l'autre extrémité, au moyen d'une forte vis, à la règle dont on veut connaître la dilatation. La réglette empiète sur la règle, qui porte, en regard de la division, un trait servant d'index. Les deux règles sont libres de se dilater, et leurs changements relatifs de longueur sont donnés

---

(1) Les expériences avec des barreaux courts soumis à un champ magnétique intense et non uniforme avaient donné des efforts d'arrachement à peu près constants jusqu'à une température de 50° environ inférieure à celle de la perte totale du magnétisme. Des recherches entreprises ultérieurement par M. E. Dumont, et dans lesquelles les alliages étaient soumis, sous forme de fils fins, à des champs magnétiques uniformes et peu intenses, ont montré que la perméabilité des alliages irréversibles augmente graduellement lorsqu'on abaisse la température jusqu'à une grande distance du point de transformation totale. La discussion des expériences de M. Dumont conduit à admettre que tous les alliages de la deuxième catégorie possèdent une perméabilité approximativement égale à une même distance de leur température de transformation totale.

par le mouvement de la réglette devant l'index. Les règles sont introduites dans une chaudière verticale en laiton, remplie d'huile et munie d'un agitateur et d'un thermomètre. La chaudière, entourée d'un manchon d'air, est placée sur un fourneau à gaz. On lit, à l'aide d'un micromètre, les déplacements relatifs de l'index et de la division.

Ce procédé a été appliqué à l'étude de quelques alliages irréversibles, dont j'ai déterminé la dilatation après les avoir soumis à une transformation de plus en plus complète. J'ai vérifié ainsi le phénomène signalé par M. A. Le Chatelier, qui a trouvé une dilatation beaucoup plus faible pour un même alliage à l'état magnétique qu'à l'état non magnétique. Les divers alliages que j'ai examinés m'ont permis, en outre, de constater que la transformation est graduelle pour la dilatation comme pour le magnétisme, et qu'un même alliage peut posséder une dilatation quelconque entre deux limites déterminées, suivant son degré de transformation. A l'un des états extrêmes, la dilatation est un peu supérieure à celle du laiton; à l'autre état, elle est inférieure à celle des aciers ordinaires. Je reviendrai, à une autre occasion, sur l'ensemble des propriétés des aciers irréversibles.

A la température ordinaire, les aciers de la seconde catégorie possèdent une dilatation qui varie d'une manière continue avec la teneur; pour les plus faibles teneurs, elle est un peu supérieure à celle du nickel, puis elle diminue graduellement lorsque la teneur augmente, passe par un minimum et remonte ensuite. *Les aciers contenant 35 à 36 0/0 de nickel se dilatent dix fois moins que le platine.* Le tableau suivant contient une partie des résultats trouvés <sup>(1)</sup>.

---

(1) Il serait illusoire de donner des chiffres précis pour des alliages irréversibles susceptibles d'exister à la température ordinaire sous des états différents, puisque leur dilatation dépend de leur degré de transformation. La courbe représentative de la valeur des dilatations en fonction des teneurs présente, si l'on s'en tient à la courbe des alliages refroidis seulement jusqu'à zéro, une partie lentement ascendante jusque vers 20 0/0, suivie d'un brusque relèvement qui atteint son maximum aux environs de 24 0/0. Mais cette dernière partie de la courbe s'abaisse pour faire suite à la première section, si l'on considère les alliages à l'état magnétique.

La dilatation des alliages de la deuxième catégorie dépend non seulement de la teneur en nickel, mais aussi des petites quantités de carbone, de silicium et de manganèse que contient l'alliage; elle varie avec l'état d'écroutissage et diminue par une trempe à l'eau, qui adoucit beaucoup ces alliages. Le tableau ne contient qu'une partie des résultats trouvés.

Les alliages n<sup>os</sup> 2, 3, 15, 16, sont certainement irréversibles, mais leur passage

Numéros des alliages	Teneurs pour 100 (Ni)	Coefficients de la dilatation moyenne entre 0° et 220°
1	0	(10,354 + 0,00523Θ) 10 <sup>-6</sup>
2	5	(10,529 + 0,00580Θ) »
3	19,0	(11,427 + 0,00362Θ) »
4	26,2	(13,103 + 0,02123Θ) »
5	27,9	(11,288 + 0,02889Θ) »
6	28,7	(10,387 + 0,03004Θ) »
7	30,4	(4,570 + 0,01194Θ) »
8	31,4	(3,395 + 0,00885Θ) »
9	34,6	(1,373 + 0,00237Θ) »
10	35,6	(0,877 + 0,00127Θ) »
11	37,3	(3,457 - 0,00647Θ) 10 <sup>-6</sup>
12	39,4	(5,357 - 0,00448Θ) »
13	44,4	(8,508 - 0,00251Θ) »
14	100,0	(12,661 + 0,00550Θ) »
15	12,2 + 1Cr	(11,714 + 0,00508Θ) 10 <sup>-6</sup>
16	16,8 + 1Cr	(11,436 + 0,00170Θ) »
17	16,2 + 2,5Cr	(19,496 + 0,00432Θ) »
18	21,3 + 3Cr	(18,180 + 0,00426Θ) »
19	34,8 + 1,5Cr	(3,580 - 0,00132Θ) »
20	35,7 + 1,7Cr	(3,373 + 0,00165Θ) »
21	36,4 + 0,9Cr	(4,433 - 0,00392Θ) »

En dehors des valeurs tout à fait anormales des dilatations de tous les alliages contenant de 29 à 45 0/0 de nickel, on remarquera que le deuxième terme des formules suit une marche systématique. Très fort pour les premiers alliages réversibles, il diminue ensuite et devient même négatif, passe par un minimum et remonte ensuite vers une valeur nulle. Il existe donc deux alliages, l'un voisin des moins dilatables, l'autre contenant environ 45 0/0 de nickel, pour lesquels la dilatation est constante entre des limites étendues de la température.

Il était intéressant de chercher si la perte du magnétisme correspond à un changement dans la loi de dilatation des alliages réversibles. Dans ce but, la dilatation des alliages les plus importants a été déterminée entre 0° et 220°. J'ai mesuré un grand nombre de différences des deux règles, acier et laiton, à des températures choisies de manière à ce que le phénomène fût suffisamment caracté-

---

à l'état magnétique est presque complet à la température ordinaire. Le n° 17 n'est pas magnétique à la température ordinaire; il passe à l'état magnétique dans l'air liquide d'après une expérience de M. Dewar.

Les limites de validité des formules du tableau dépendent des transformations des alliages, comme il sera dit plus loin.

risé. Pour quelques règles, le nombre des mesures a dépassé 40 ; on s'est contenté d'un nombre moindre d'observations lorsque la loi des dilatations se présentait sous une forme simple. En général, les valeurs trouvées en montant et en descendant ont montré une très bonne concordance. Toutefois la faible conductibilité thermique de la plupart de ces alliages obligeait à attendre un temps prolongé à chaque température avant de commencer les mesures ; lorsque l'observation suivait de trop près l'établissement de la température, la règle d'acier était en retard sur la règle de laiton. Ces mesures, pour lesquelles on chauffait un bain d'huile ayant plus d'un mètre de hauteur, exigeaient une surveillance assidue. M. L. Maudet m'a aidé, avec beaucoup de dévouement, dans ces expériences souvent très pénibles.

La différence de longueur des règles en fonction de la température, déduite de ces mesures, commence par une ligne faiblement courbée vers le haut ou vers le bas, suivant les teneurs, conformément à ce qu'ont donné les mesures au comparateur. Puis, lorsque l'alliage atteint la fin de la transformation magnétique, l'inclinaison de la courbe s'accroît beaucoup, et, lorsque l'alliage a passé à l'état faiblement magnétique, la courbe se rapproche d'une droite, mais dont l'inclinaison est beaucoup plus grande que celle du segment inférieur à la transformation.

Il est naturellement assez difficile de déterminer le point exact où la loi de dilatation se modifie ; mais on peut, en s'aidant de constructions graphiques, établir des formules qui, employées successivement entre des limites déterminées, représentent avec une approximation suffisante les dilatations depuis le point de départ. Comme ces formules ne partent pas de 0°, le mode le plus simple de représentation est celui des dilatations vraies. L'ensemble des dilatations vraies pour un même alliage est représenté par trois droites différemment inclinées, et se faisant suite. Le tronçon moyen, correspondant à la fin de la transformation, est de beaucoup le plus incliné.

Voici, à titre d'exemple, quelques-unes des formules trouvées.

Numéros des alliages	Teneurs en nickel pour 100	Limites		Dilatations vraies à $\Theta^\circ$	
7	30,4	de	0° à 110°	[4,570 + 0,0235	( $\Theta - 0$ )] $10^{-6}$
			110° à 164°	[7,15 + 0,104	( $\Theta - 110$ )] »
			164° à 220°	[12,60 + 0,008	( $\Theta - 164$ )] »
8	31,4		0° à 122°	[3,395 + 0,0150	( $\Theta - 0$ )] »
			122° à 182°	[5,25 + 0,128	( $\Theta - 122$ )] »
			182° à 220°	[13,00 + 0,036	( $\Theta - 182$ )] »
9	34,6		0° à 142°	[1,373 + 0,0047	( $\Theta - 0$ )] »
			142° à 220°	[2,05 + 0,065	( $\Theta - 142$ )] »

Pour les alliages contenant de 39 à 45 0/0 de nickel, je n'ai pas pu atteindre les températures auxquelles la loi des dilatations se modifie. Les formules trouvées par les mesures au comparateur représentent suffisamment les résultats des déterminations faites par ces alliages entre 0° et 220°.

L'alliage contenant 37,3 0/0 de nickel a montré une petite modification de la loi des dilatations déjà avant la fin de la transformation magnétique. On peut, en effet, représenter les mesures entre 0° et 220° par les deux formules suivantes :

$$\begin{array}{ll} \text{de } 0^\circ \text{ à } 150^\circ & [3,457 - 0,0072 (\Theta - 0)] 10^{-6} \\ 150^\circ \text{ à } 220^\circ & [2,37 + 0,011 (\Theta - 150)] \quad \text{»} \end{array}$$

*Propriétés mécaniques.* — Les propriétés mécaniques des aciers au nickel ont été étudiées jusqu'ici surtout en vue de leurs applications industrielles. M. J. Hopkinson a montré que les alliages irréversibles sont beaucoup plus durs et moins déformables à l'état magnétique qu'à l'état non magnétique. La limite de déformation permanente est aussi beaucoup plus élevée au premier état qu'au dernier. Les fils d'acier à 24 0/0 de nickel sont assez semblables à des fils de laiton bien recuit, lorsqu'ils sont à l'état non magnétique, tandis que dans l'autre état ils permettent de faire des ressorts analogues à ceux d'acier trempé.

La densité augmente avec la teneur en nickel, suivant une loi qu'il n'est pas aisé de mettre en évidence. Cependant, si l'on rapporte les densités à ce qu'elles devraient être d'après la loi des mélanges, on trouve un léger excès pour les alliages très dilatables, et un défaut pour les alliages les moins dilatables. Entre 26 et 40 0/0 de nickel, les densités sont toutes comprises entre 8,0 et 8,1; la plupart sont supérieures à 80,05.



Les modules d'élasticité montrent une allure plus systématique, comme l'indique le tableau suivant :

Alliages	Modules d'élasticité en tonnes par millimètre carré
5 pour 100 Ni	21,70
13,5 »	19,08
19 »	17,66
24,1 non magnétique	19,31
24,1 magnétique	17,42
26,2 pour 100 Ni	18,54
27,9 »	18,06
30,4 »	13,96
31,4 »	13,54
34,6 »	13,36
35,2 <sup>(1)</sup> »	14,86
37,2 <sup>(2)</sup> »	14,61
39,4 »	13,12
44,3 <sup>(2)</sup> »	16,30
12,2 + 1 Cr	18,97
16,2 + 2,5Cr	19,61
16,8 + 1 Cr	18,23
34,8 + 1,5Cr	13,47
35,7 + 1,7Cr	13,66
36,4 + 0,9Cr	13,67

On voit, en comparant ce tableau avec celui des dilatations, que les plus fortes dilatations correspondent à un maximum relatif du module d'élasticité, alors que les plus faibles se produisent pour les alliages présentant la valeur minima du module. Il est remarquable que des alliages de nickel et d'acier bien homogènes et parfaitement élastiques puissent posséder un module d'élasticité qui est de plus d'un tiers inférieur à celui de la moyenne de ceux des composants.

Dans leur transformation irréversible, les alliages du premier groupe éprouvent aussi une modification importante de leur module d'élasticité. En passant de l'état non magnétique relativement mou et très déformable à l'état magnétique, dur et très élastique, ils subissent une *diminution* du module qui dépasse le dixième de la première valeur.

Le chrome augmente les modules pour les deux catégories d'alliages.

Je reviendrai, à une autre occasion, sur les variations qu'éprouve

(<sup>1</sup>) Moyenne de dix règles.

(<sup>2</sup>) Moyenne de deux règles.

le module sous l'action de la température dans les divers alliages étudiés.

*Déformations permanentes.* — Les transformations des aciers au nickel permettaient de prévoir une certaine instabilité dans leurs propriétés. On a trouvé, en effet, que, sous l'action du temps, et plus encore par l'effet du recuit, ces alliages subissent des variations de dimensions qui, pour quelques-uns d'entre eux, sont assez importantes.

Les alliages du premier groupe, chauffés au-dessus de la température à laquelle ils ont subi une augmentation de volume, se contractent légèrement, accusant un léger retour en arrière avant la transformation inverse qui se produit au rouge.

Les alliages de la seconde catégorie, au contraire, s'allongent sous l'action de certains recuits suivant des lois complexes qu'il eût été difficile d'élucider si l'on n'avait eu pour guide les variations aujourd'hui bien connues du verre, avec lesquelles les variations de volume des aciers au nickel présentent la plus frappante analogie.

Lorsqu'une barre d'un alliage réversible a été refroidie rapidement après le forgeage, elle éprouve, à toute température inférieure à celle qu'elle vient de subir, un allongement dont la vitesse dépend de la température actuelle et du traitement antérieur qu'a subi la barre. Plus la température est élevée, plus le mouvement est rapide au début, mais plus aussi l'allongement définitif est faible. Lorsqu'une barre a été complètement recuite à une température déterminée, de façon à ne plus éprouver aucun allongement, elle recommence son mouvement, si on l'amène à une température plus basse. Ce mouvement finit à son tour par s'arrêter et reprend lorsqu'on abaisse encore la température. Inversement, lorsqu'une règle est complètement recuite à une température basse, elle revient en arrière lorsqu'on la chauffe. Comme pour le verre, les mouvements sont plus rapides à température ascendante qu'à température descendante.

Il est important de remarquer que la rapidité et l'amplitude de tous ces mouvements dépendent de la distance à laquelle l'alliage se trouve de sa température de perte totale du magnétique. Au-dessous de cette température, la stabilité est d'autant plus grande que l'on en est plus éloigné. Pour un même alliage, les mouvements se ralentissent, en effet, à mesure que la température s'abaisse; de plus, pour les alliages magnétiques, la stabilité à une même température augmente rapidement avec la teneur en nickel.

Les variations de ces alliages les rendraient impropres à une foule d'applications que leur faible dilatation rendrait désirables, si les mouvements dont il vient d'être question étaient de grande amplitude. Mais un exemple montrera que ces alliages, s'ils ne peuvent encore prétendre à fournir la matière des règles étalons de premier ordre, sont assez stables, pour être susceptibles de nombreuses applications.

Une barre de l'alliage le moins dilatable, s'allonge, dans les cent premières heures de chauffe à 100°, de 0,00003 environ de sa valeur. Refroidie graduellement jusqu'à 40°, et maintenue pendant un mois à cette dernière température, elle gagne encore près de 0,00001. Puis, amenée à 20°, elle varie de 3 millièmes en quatre mois. Enfin, à 10°, elle s'allonge de 2 millièmes en cinq mois. A ce moment, la variation mensuelle est inférieure à un 1/2 millième, et peut être considérée comme négligeable pour toutes les applications où les dernières limites de la précision ne sont pas nécessaires, et dans tous les cas où l'on peut contrôler de temps en temps la valeur des étalons employés.

Cette variation de longueur subie en un mois par une règle d'acier au nickel est égale à celle d'une règle de laiton dont la température s'élève de un quarantième de degré. Un pendule subissant cette variation modifierait, en un mois, sa durée d'oscillation d'une quantité correspondant à 2 centièmes de seconde par 24 heures. Une variation de cet ordre de grandeur ne présente aucun inconvénient pour une horloge dont on peut déterminer l'état au moins une fois par mois.

*Résistance électrique.* — On sait que les aciers au nickel possèdent une résistance spécifique élevée. Je l'ai trouvée peu différente d'un alliage à l'autre, et comprise, pour tous ceux que j'ai étudiés, entre 80 et 90 microhms-centimètres.

Il était intéressant de voir si les relations trouvées entre les modifications magnétiques et les autres transformations que subissent ces alliages ont une action sur les variations de la résistance électrique. J'ai déterminé, pour cela, la résistance, à un grand nombre de températures comprises entre 20° et 150°, de quelques alliages choisis, de manière à faire ressortir les variations de cette nature, si elles se produisent. Les résultats de ces mesures, portés sur du papier quadrillé, n'ont pas laissé voir la moindre déviation d'une courbe générale, embrassant, pour chacun des alliages, tout l'inter-

valle des températures. Pour tous ces alliages la variation de la résistance a pu être représentée par une formule à deux termes, avec des erreurs résiduelles qui n'ont jamais présenté une allure systématique, et sont toujours restées très petites.

Voici les résultats trouvés pour quelques alliages :

Alliages	Coefficients moyens de la variatio entre 0° et 6°
22 Ni + 3Cr	(784 — 0,13T) 10 <sup>-6</sup>
26,2	(844 + 0,04T) »
28,7	(700 — 0,20T) »
30,4	(897 — 0,43T) »
35,0	(1361 — 1,69T) »
35,7	(1611 — 1,68T) »

On peut remarquer que, pour tous ces alliages, le coefficient du second terme de la formule est toujours très petit, tandis que, dans l'intervalle des mesures, le coefficient de dilatation de plusieurs d'entre eux varie du simple au double. On voit aussi que les plus grands coefficients de variation appartiennent aux alliages les moins dilatables. La variation de résistance avec la température semble donc bien indépendante des variations de volume.

*Conclusions.* — Je n'insisterai pas sur les applications possibles des aciers au nickel fondées soit sur leur variation irréversible de volume, soit sur les changements de leurs propriétés magnétiques à des températures relativement basses, soit surtout sur le fait que, grâce à cette singulière catégorie d'alliages, on possède aujourd'hui les moyens d'obtenir des corps métalliques doués de propriétés mécaniques remarquables, et dont la dilatation varie d'une manière continue depuis celle du laiton jusqu'à une valeur égale au dixième de celle du platine. Il me paraît plus important de coordonner les quelques faits déjà connus qui permettront plus tard, en connexion avec le grand nombre de ceux qui restent à découvrir, d'établir une théorie générale des aciers au nickel.

Il semble, au premier coup d'œil, y avoir discontinuité entre les alliages irréversibles et les alliages réversibles, qui sont séparés par la teneur correspondant sensiblement à la formule Fe<sup>3</sup>Ni.

Mais, si l'on considère l'une des propriétés des alliages de la deuxième catégorie, pour l'ensemble des températures, la dilatation par exemple, on voit que, pour les alliages les plus voisins des irré-

versibles, cette quantité varie dans des proportions considérables avec la température. Ainsi, entre 0° et 200°, la dilatation de l'alliage à 26,2 0/0 de nickel passe de 13,1 à 18,5 millièmes, et l'analogie avec les alliages d'une teneur immédiatement supérieure, aussi bien que l'existence d'un deuxième terme important dans la formule de dilatation nous indique que la dilatation diminue encore sensiblement au-dessous de zéro, tandis que cet alliage passe à l'état magnétique. Or nous avons vu que les alliages irréversibles peuvent posséder une dilatation comprise entre 10 et 19 millièmes, suivant leur état. Nous pouvons donc, en amenant un alliage de la deuxième catégorie à un état particulier au point de vue magnétique, lui donner une dilatation égale à celle d'un alliage de la première catégorie amené aussi à un état particulier. Les limites supérieures des dilatations que l'on obtient sont sensiblement les mêmes, et il est probable que les limites inférieures sont peu différentes.

On peut donc, en choisissant convenablement l'état magnétique des alliages voisins de la séparation, établir un passage continu dans les dilatations, les valeurs élevées correspondant dans les deux cas à l'état non magnétique, et les valeurs faibles à l'état magnétique. La seule différence consiste en ce que l'un des réseaux est réversible, l'autre irréversible. Le même raisonnement s'applique à l'élasticité.

Les propriétés des alliages irréversibles aident à comprendre l'anomalie négative de dilatation, qui se manifeste à partir de 28 0/0 de nickel. Nous avons vu que, pour les premiers, le passage à l'état magnétique a lieu avec augmentation du volume. Si l'on admet que le même passage produit aussi une augmentation de volume moléculaire dans les alliages de la seconde catégorie, on comprendra comment l'ensemble peut, en se refroidissant, se contracter beaucoup moins que chacun des composants considérés isolément.

Les déformations permanentes semblent indiquer qu'il en est bien ainsi. Nous avons vu, en effet, qu'un alliage, amené rapidement d'une température élevée à une température basse, subit une certaine contraction, puis commence immédiatement à se dilater jusqu'à ce qu'il ait atteint son état définitif à la nouvelle température. L'établissement de cet état dure, pour les alliages les moins dilatables, une centaine d'heures à 100°, et semble à peu près terminé au bout de dix mois à la température ordinaire. Ce mouvement est le résidu du mouvement de dilatation interne dont la plus grande partie se produit

en même temps que la température s'abaisse, tandis qu'une très faible partie se poursuit au-delà de cette période.

On peut affirmer que la transformation caractérisée par les modifications magnétiques ou par l'anomalie de dilatation est d'ordre chimique ; et l'on est conduit à admettre que les composés fer-nickel possèdent, à chaque température, un équilibre bien défini, vers lequel ils tendent et qui peut être réversible ou irréversible suivant les teneurs. La stabilité de l'alliage dépend en particulier de ses relations avec un composé défini. Ainsi l'alliage irréversible qui conserve le plus longtemps son état non magnétique semble être le plus voisin du composé  $\text{Fe}^3\text{Ni}$ . Les alliages plus pauvres en nickel sont des solutions réciproques de cet alliage et de fer pur, et la présence de ce dernier métal atténue les propriétés caractéristiques du composé, qui résiste d'autant plus mal à la transformation qu'il contient plus de fer.

Dans l'intervalle de température où ils peuvent exister sous les deux états, les alliages du premier groupe sont en faux équilibre ; ceux du second groupe, au contraire, tendent, à toute température, vers l'état définitif et stable correspondant à cette température. Lors de l'établissement de la température, l'alliage arrive tout près de l'équilibre, mais il ne l'atteint qu'après un temps plus ou moins long.

Cette théorie chimique des déformations permanentes des aciers au nickel conduit à établir une théorie analogue pour les déformations du verre, dont la cause serait ainsi ramenée à une transformation des combinaisons dont la stabilité varie pour chacune d'elles suivant la température. Le recuit prolongé à température élevée aurait pour effet une migration de certains éléments, et la formation définitive de composés stables aux dépens des composés instables qui existeraient dans la masse en quantité de plus en plus faible suivant l'état d'avancement du recuit <sup>(1)</sup>.

---

(1) Cette théorie des déplacements du zéro, à laquelle j'ai été conduit par l'analogie avec les variations des aciers au nickel est bien d'accord, entre autres, avec les récentes recherches de M. L. Baudin sur le recuit des thermomètres. Cet habile constructeur est arrivé suivant une communication personnelle, et, d'une façon indépendante, à une théorie semblable par la seule considération des déplacements du zéro des thermomètres.