

**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 101 (1920)

**Artikel:** Les aciers au nickel dans l'Horlogerie

**Autor:** Guillaume, Ch.-Ed.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-90311>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 19.02.2026

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

## Les aciers au nickel dans l'Horlogerie.

CH.-ED. GUILLAUME

Le voyageur qui parcourt pour la première fois les montagnes et les hautes vallées neuchâteloises ne peut manquer d'être frappé par la place immense qu'y occupe l'horlogerie. Elle en est comme le sang et la moëlle. Depuis tantôt deux siècles, elle a modelé l'esprit de leurs habitants, et commandé tous les mouvements de leur population. Que l'on relève les dates ciselées dans la pierre qui surmonte la porte d'entrée des vieilles fermes burgondes, dont chacune abritait une seule famille, partageant son temps entre les travaux des champs et les délicates besognes de la montre, et l'on reconnaîtra qu'elles se groupent autour des périodes où l'horlogerie était florissante, et qu'elles s'espacent, pour disparaître presque, aux époques de grande crise, alors que les enfants du Pays neuchâtelois allaient au loin gagner le pain qui se faisait rare sur la terre natale.

L'intensité croissante de la production horlogère a créé les villages montagnards, le Locle et la Chaux-de-Fonds, dont les habitants disent, non sans fierté, qu'ils sont les plus grands du monde.

Au temps de mon enfance, l'atelier familial vivait encore. Donnons-lui un pieux souvenir. Là, dans les longues soirées d'hiver, tandis qu'à la lumière des quinquets, on taillait, limait, polissait des roues, des pignons, des platines, tour à tour les jeunes ou les très vieux faisaient, à toute la famille réunie, une lecture à haute voix : science, histoire, géographie, voyages ; et l'étranger venant au pays restait surpris de l'élévation de la pensée qui y régnait, du savoir étendu de chacun, au sein de ce patriciat des artisans, auxquels l'horlogerie apportait, avec le bien-être matériel, le désir profond de connaître et de tendre vers la perfection.

C'est à ce besoin de perfection qu'il faut rattacher les multiples progrès que la montre doit au travail neuchâtelois. Innombrables sont les artistes ingénieux qui ont apporté, à cet admirable mécanisme, un élément susceptible d'en améliorer le fonctionnement. Quelques noms se détachent de leur foule, plusieurs sont célèbres. Un siècle de labeur industriel n'a point amoindri le prestige qui entoure ceux de Ferdinand Berthoud et d'Abram-Louis Bréguet.

Beaucoup de Neuchâtelois ont, dès leur enfance, rêvé de marcher sur leurs traces. Au plus profond de ma mémoire, j'en retrouve les vestiges. J'en distingue encore une marque plus nette, lorsque je me revois, suivant les cours du Gymnase ou de l'Académie de Neuchâtel, sous l'égide de mes maîtres vénérés. Je tentais alors de très naïfs essais de calcul, ne me doutant pas qu'il me faudrait des années d'étude pour arriver seulement à comprendre les mémoires, alors déjà connus des initiés, et aujourd'hui classiques, dans lesquels Phillips et Yvon Villarceau avaient définitivement établi les principes mathématiques du réglage.

C'est par une autre voie que, vingt ans après, ayant parcouru un long circuit dans la métrologie, et ayant appris à connaître mieux les propriétés de la matière, j'eus enfin l'immense joie de voir se réaliser mon rêve d'enfant, et d'apporter, comme un hommage à tant de chers disparus, des solutions nouvelles de problèmes posés depuis le jour où les montres, construites avec une perfection suffisante, avaient laissé apparaître, dans leurs marches, des écarts systématiques, connexes des changements de la température. C'est ce problème de la compensation, auquel je me suis attaché, que nous allons maintenant examiner avec quelques détails. Mais, pour en bien saisir le fond dans le cas de la montre, il est utile de traiter d'abord celui de l'horloge.

### *Principes de la compensation.*

Les conditions sont connues, dans lesquelles le mouvement d'un pendule d'horloge est le même que celui d'un pendule libre, et les bonnes horloges y satisfont; on peut donc traiter, au point de vue qui nous occupe, les variations de leurs marches comme celles d'un pendule oscillant librement.

La tige, suspendue à un ressort, ou fixée à un couteau, porte une lentille, posée sur un écrou fileté servant au réglage moyen;

mais la dilatation thermique de la tige produit des changements de la durée d'oscillation, que l'on corrige par un organe compensateur. Les deux solutions classiques d'autrefois sont le pendule à gril et la compensation à mercure de Graham, peu à peu substituée au premier, malgré les inconvénients inhérents à une masse oscillante fluide.

Le calcul, limité aux organes propres du pendule, n'est pas complet. Si, en effet, l'oscillation s'effectue dans l'air, la poussée diminue le moment statique, sans affecter sensiblement le moment d'inertie; la période d'oscillation s'en trouve allongée; mais, l'effet diminuant avec la densité du milieu ambiant, l'air produit un peu de compensation, qui disparaît, évidemment, si le pendule oscille dans un espace hermétiquement clos.

Le calcul de la compensation se fait alors sur les éléments mêmes du pendule. Si sa tige est en acier, dont la dilatabilité est de l'ordre de 11 millionièmes, la quantité à compenser correspond à un retard d'une demi-seconde environ par jour et par degré. Le coefficient de la dilatation cubique du mercure dans le verre étant d'environ 160 millionièmes, la remontée du centre de gravité de la masse entière suffit à compenser la descente globale du vase qui le contient, sans que celui-ci doive atteindre une longueur impraticable.

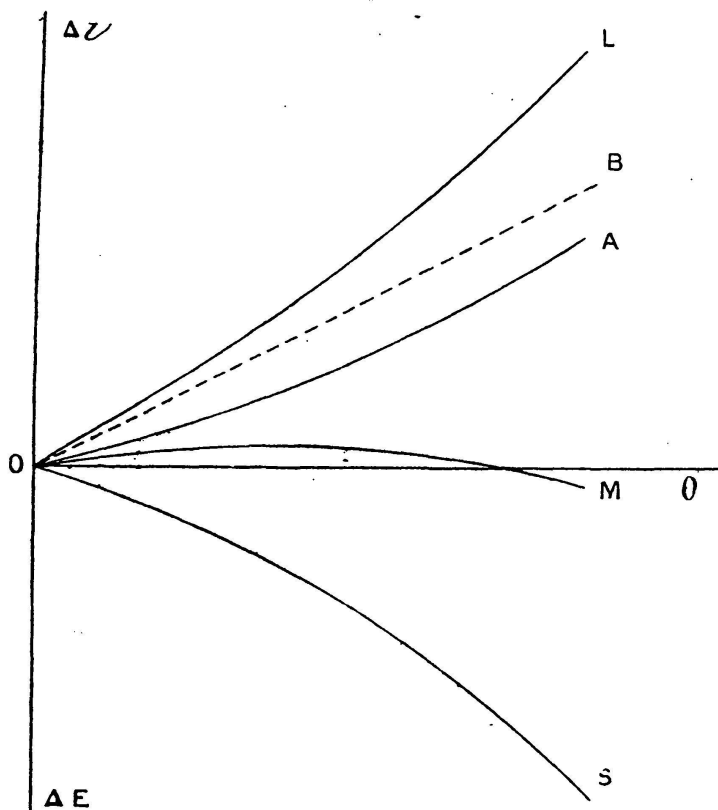
Tout autre est le cas de la montre. Ici, le moteur appliqué au mobile oscillant n'est pas la pesanteur, mais un ressort-spiral, fixé sur l'axe d'un balancier, qu'il ramène vers sa position d'équilibre, après qu'il en a été écarté par le choc de la roue d'échappement.

L'action de la température s'exerce alors sur le métal du spiral, dont, en s'élevant, elle diminue le module d'élasticité. Le spiral et le balancier se dilatent également; mais un examen tout élémentaire du problème montre que, dans la combinaison spiral d'acier et balancier de laiton, les deux actions se compensent sensiblement; pratiquement, tout le changement des marches se ramène donc à celui du module d'élasticité. Dans le cas envisagé ici, le retard de la montre est d'environ 11 secondes par degré et par jour.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, les horlogers opposaient à cette cause de variation des marches, un changement automatique de la longueur agissante du spiral, par le déplacement, provoqué à l'aide d'une raquette bimétallique, des goupilles de serrage. Arnold et Earn-



shaw ont enseigné l'emploi du balancier compensateur. Celui-ci se compose d'un bras diamétral, aux deux extrémités duquel sont fixées des lames semi-circulaires, composées de deux anneaux concentriques, respectivement en acier et en laiton. L'extrémité de chaque lame opposée au bras étant libre, l'élévation de la tempé-



Extrait de l'ouvrage :  
Ch.-Ed. Guillaume, Les Aciers au nickel  
et leurs applications à l'horlogerie. (Edit.:  
E. Magron, Bienne (Suisse))

Fig. 1.

Cause de l'erreur secondaire des chronomètres (OS  
fonction perturbatrice du spiral; OB fonction compen-  
satrice du balancier acier-laiton).

rature la courbe vers l'intérieur, et ainsi, le moment d'inertie du balancier se trouve diminué. Des vis placées en divers endroits des lames, et dont le régleur dispose, permettent de modifier à volonté les changements du moment d'inertie, et d'opposer ceux-ci exactement aux changements du moment élastique du spiral.

Mais voyons de plus près quel est le mode d'action du balancier.

Le changement du module d'élasticité de l'acier avec la température est régi par une fonction affectée d'un second terme important. On peut la représenter par la courbe OS. (fig. 1.) D'autre part, l'action compensatrice du balancier est proportionnelle à la

différence des dilatabilités des deux métaux constituant la lame du balancier: OA et OL pour l'acier et le laiton. Or, il se trouve que, les dilatabilités moyennes de ces deux corps étant très différentes, les termes quadratiques des fonctions qui les représentent sont cependant sensiblement égaux. La fonction compensatrice du balancier sera donc représentée par la ligne pratiquement droite OB, dont on peut modifier l'inclinaison, mais non pas la forme, par les dimensions de la bilame, ou par la position des vis de réglage.

La marche de la montre étant commandée par la somme algébrique, OM, de la fonction perturbatrice, OS, et de la fonction compensatrice, OB, on pourra réaliser l'égalité des marches pour deux températures déterminées; mais les marches aux autres températures seront affectées par le résidu quadratique, lié aux propriétés élastiques ou de dilatation de l'acier et du laiton.

La compensation ayant été réalisée pour deux températures telles que 0° et 30°, le maximum du résidu dans leur intervalle est de 2 secondes environ par jour. Cette erreur a été découverte en 1832, par l'horloger anglais Dent, et porte son nom, en même temps que celui d'*erreur secondaire*. Ferdinand Berthoud l'avait déjà aperçue, dès l'année 1775, dans les marches d'un chronomètre compensé par la raquette. Le diagramme ci-dessus s'applique identiquement à ce procédé de réglage, et il n'y a pas à nous étonner, si la valeur que Ferdinand Berthoud donne de l'erreur secondaire est égale à celle que lui attribue Dent.

La correction de l'erreur secondaire a beaucoup préoccupé les horlogers, et de multiples solutions en ont été proposées. Mais elles obligent à faire, au balancier, des additions coûteuses, et qui ne sont pas sans influence sur sa conservation dans le cours du temps.

Le seul emploi, dans la montre, d'un balancier compensateur, substitué à un volant monométallique, est déjà une complication inacceptable pour les pièces à bas prix. Il y a une vingtaine d'années, la grande majorité des montres ignoraient toute compensation, et leurs marches, en avance ou en retard marqué à tout changement de la température moyenne, exposaient leurs détenteurs à tous les inconvénients, graves dans la vie moderne, de ne jamais connaître l'heure exacte.

Les propriétés singulières des aciers au nickel ont permis de résoudre très simplement les divers problèmes qui viennent de se poser devant nous. Il est temps d'apprendre à les connaître.

*L'anomalie des aciers au nickel.*

Quel que soit le mode d'investigation que l'on applique aux alliages du fer et du nickel, on constate que leurs propriétés les classent à part de tous les autres corps métalliques. Il en est, par exemple, de non-magnétiques à la température ordinaire; mais, si on les refroidit, on voit apparaître les propriétés magnétiques, qui se conservent ou s'évanouissent suivant la composition de l'alliage, lorsqu'il est ramené à la température de départ. Les propriétés de ces alliages sont donc *irréversibles* ou *réversibles*, et leur étude montre que les plus pauvres en nickel appartiennent à la première catégorie, les plus riches à la seconde.

Pour l'objet qui nous occupe, les alliages à transformations réversibles sont les seuls intéressants. Ces alliages partent d'une proportion de nickel égale au quart environ, et s'étendent jusqu'au nickel pur.

Leur dilatabilité est en frappante contradiction avec la règle des mélanges.

Partant d'une valeur en forte anomalie positive, marquée par la distance à la droite AB (fig. 2), qui représenterait les résultats conformes à cette règle, elle s'abaisse rapidement, coupe la droite aux environs 29 p. 100, puis continue, pour passer, vers 36 p. 100, par un minimum accusé, après lequel elle vient lentement se raccorder à la droite des mélanges. Les alliages voisins du minimum ont reçu le nom générique d'*invar*.

Il est nécessaire de préciser le sens dans lequel la courbe doit être comprise. Elle ne se rapporte pas à des alliages de fer et de nickel, purs de toute addition. Ces alliages, sans doute irréalisables, seraient, de plus, inutilisables, faute de pouvoir subir le forgeage. Tous les résultats ont été ramenés à des alliages contenant uniformément 0,4 p. 100 de manganèse et 0,1 p. 100 de carbone, proportions moyennes des fabrications industrielles pour les alliages du type invar.

Les dilatabilités représentées ici se rapportent, en plus, aux alliages dits *à l'état naturel*, pour cette raison qu'ils ont été simplement abandonnés à l'air après le laminage, fait au rouge.

Partant d'un alliage à l'état naturel, on peut relever sa dilatabilité en le réchauffant au rouge pour le laisser refroidir lentement; on l'abaisse par la trempe, et plus encore par un écrouis-

sage: forgeage, laminage, tréfilage; ainsi, des dilatabilités négatives peuvent être aisément obtenues. Une chauffe prolongée (à 100° par exemple) les relève modérément. Et l'on possède maintenant

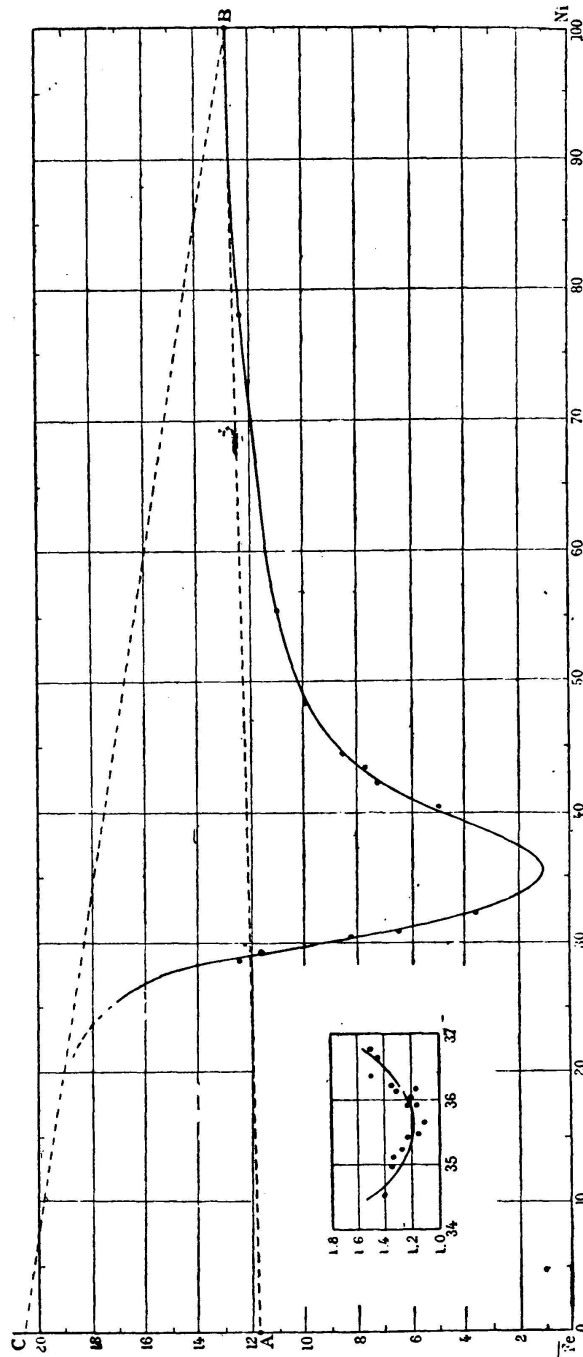


Fig. 2.

Dilatabilités vraies à 20° ( $\alpha_{20}$  en millionièmes) des alliages de fer et de nickel, additionnés de 0,4 Mn. et 0,1 C p. 100.

tous les détails d'une technique permettant de jouer, pour ainsi dire, avec les dilatabilités, et d'amener aussi près de zéro qu'on le désire celle d'un échantillon donné d'invar, de composition appropriée.

L'aspect de la courbe se modifie assez rapidement lorsqu'on la trace pour une autre température. En effet, le coefficient

du terme quadratique<sup>1</sup> dans l'équation de dilatation possède des valeurs tout aussi anormales que le coefficient principal, ainsi que le montre la courbe fig. 3. Partant d'une valeur voisine de la

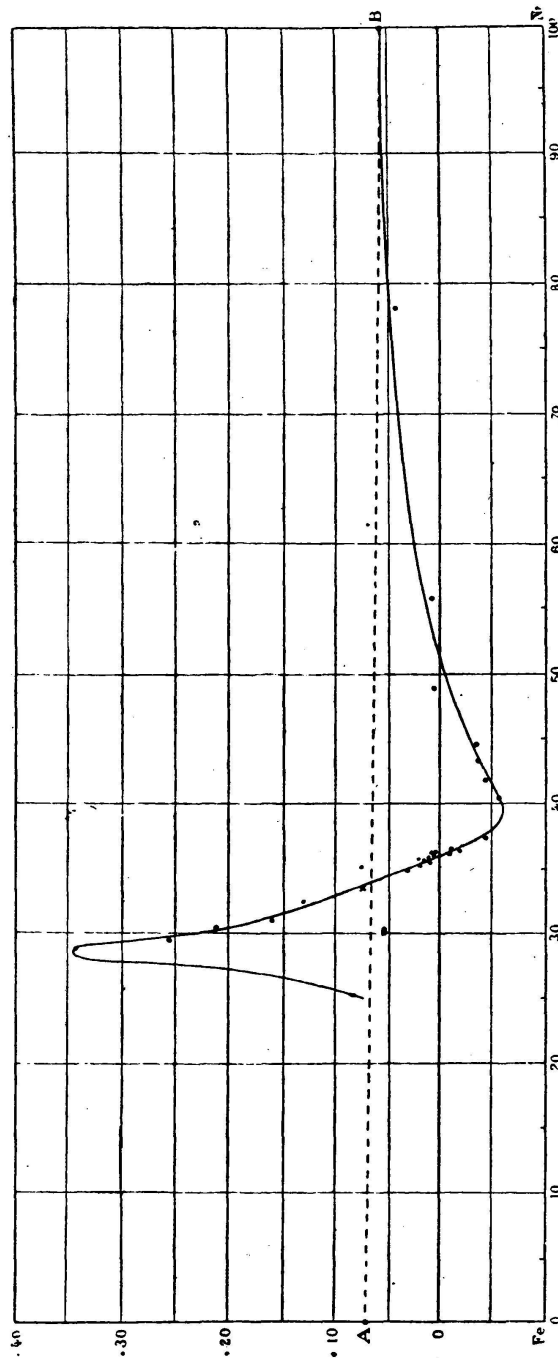


Fig. 3.

Valeur du coefficient  $10^5 \beta$  dans les alliages de fer et de nickel, additionnés de 0,4 Mn. et 0,1 C p. 100.

<sup>1</sup> Rappelons que, dans la plupart des métaux ou alliages possédant des propriétés *normales*, la dilatabilité peut, dans un large intervalle de température, être représentée par une équation de la forme:

$$l_{\theta} = l_{\theta} (1 + a\theta + \beta\theta^2)$$

Les coefficients  $a$  et  $\beta$  sont respectivement nommés linéaire et quadratique.

normale, ce coefficient monte très rapidement au quadruple, puis, après avoir franchi un maximum très brusque, s'abaisse jusqu'à des valeurs négatives, pour remonter lentement vers la valeur normale.

Mais même les valeurs de ce coefficient ne sont données ici que pour un intervalle étroit de température, car la dilatabilité d'un acier au nickel ne peut, en général, être représentée par une fonction du second degré que dans un intervalle restreint.

Les propriétés élastiques des aciers au nickel ne sont pas moins singulières. Marc Thury a publié le premier ce résultat,

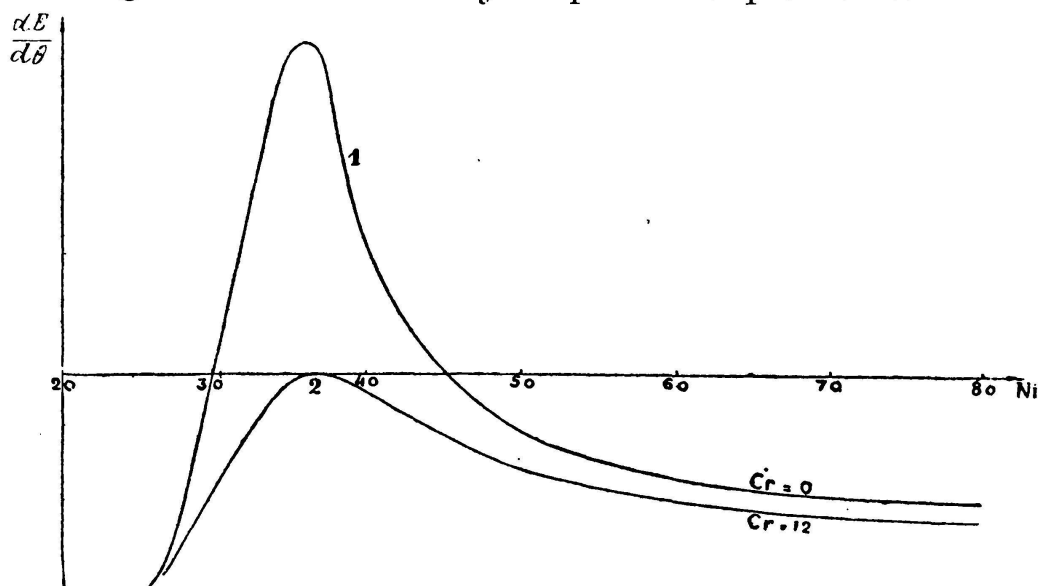


Fig. 4.

Valeurs, à 20°, du coefficient de variation thermique du module d'élasticité dans les aciers au nickel en fonction du nickel (Courbe 1: alliage pur. Courbe 2: alliage contenant une proportion d'addition équivalente à 12 p. 100 de chrome).

qu'une lame d'invar, fléchie par un moment donné, se redresse lorsqu'on la chauffe, marquant ainsi que son coefficient thermo-élastique est positif, contrairement à ce que l'on constate dans tous les autres métaux ou alliages connus.

Dès avant cette publication de Marc Thury, nous avons entrepris, Paul Perret et moi, l'étude détaillée du coefficient thermo-élastique des aciers au nickel, dont l'allure est représentée par

Si l'on représente la dilatation par une courbe,  $\alpha$  est le coefficient d'inclinaison de la tangente,  $\beta$  le coefficient de courbure.

Dans l'équation ci-dessus,  $\alpha$  indique l'inclinaison de la courbe de dilatation à 0°. Il est convenu, en outre, que, si l'on affecte  $\alpha$  d'un indice numérique, il représente alors l'inclinaison de la tangente au point correspondant à la température donnée; on lui donne alors l'appellation de *coefficient vrai* à cette température. Ainsi,  $\alpha_{20}$  est le coefficient vrai à 20°; c'est celui qui est représenté dans la courbe de la figure 2.

les diagrammes 1, fig. 4 et 5; le premier indique les valeurs vraies du coefficient thermo-élastique à 20°, le second la marche du module, pour un même alliage, dans un large intervalle de température.

L'intime parenté de ces diagrammes avec ceux de la dilatation est immédiatement évidente; si, en effet, au lieu de représenter les modules, ils figuraient les quantités inverses proportionnelles aux déformations élastiques, les deux premiers seraient amenés à une coïncidence très approchée par une simple translation en hauteur; et cette remarque établit, à n'en pas douter, la communauté d'origine des deux anomalies.

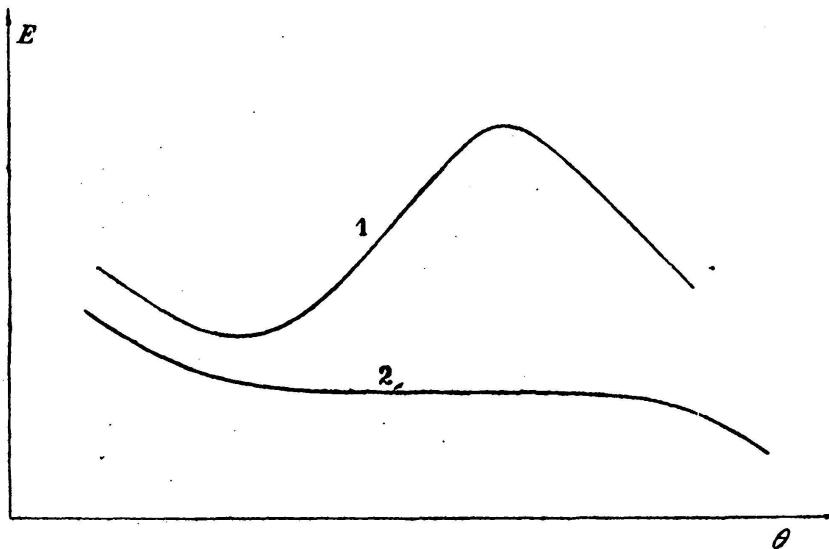


Fig. 5.

Valeur du module d'élasticité dans un même acier au nickel en fonction de la température (Courbes 1 et 2: comme ci-dessus).

Nous avons maintenant tout ce qu'il faut pour comprendre les progrès que les singularités des aciers au nickel ont permis d'apporter aux diverses formes de la compensation.

### *Le pendule.*

Le rapprochement de quelques nombres nous suggérera immédiatement la construction d'un pendule compensé, d'extrême simplicité. La dilatabilité relative du mercure dans le verre est à celle de l'acier dans un rapport du même ordre que la dilatabilité du bronze à celle de l'invar. Remplaçons donc la tige d'acier du pendule par une tige d'invar, nous aurons la possibilité d'établir la compensation simplement par une lentille de bronze. Ou, si on la trouve trop coûteuse, on la fera en fonte, et, l'ayant suffisamment entaillée, on insérera, entre elle et l'écrou de support, un tube de

bronze ou de laiton, qui assurera le mouvement ascensionnel nécessaire de la lentille.

Cette compensation comporte des variantes à l'infini; et l'on choisira la forme la mieux appropriée au genre ou au rang de l'horloge dont il s'agit. On possède, d'ailleurs, une variété étendue de dilatabilités de l'invar, et on peut même, ainsi que nous l'avons vu, réaliser des tiges n'exigeant aucune compensation.

Le pendule à tige d'invar diffère de celui de Graham non seulement par la simplicité et l'économie de sa construction. Le calcul d'une compensation suppose l'uniformité de température aux divers niveaux de la cage qui abrite le pendule, condition qui n'est pas toujours suffisamment réalisée. Or, les erreurs qui en résultent sont proportionnelles aux valeurs individuelles des deux actions que l'on corrige l'une par l'autre. A cet égard, le pendule à tige d'invar est libéré des neuf dixièmes au moins des erreurs qui, de ce chef, atteignent le pendule à compensation mercurielle.

#### *La compensation approximative de la montre.*

La seule inspection des deux diagrammes de l'élasticité fait entrevoir deux solutions du problème de la compensation approximative des montres: choisir un acier au nickel dont le module passe, aux températures ordinaires, par un minimum ou un maximum; ou, ce qui revient au même, retenir l'un de ceux pour lesquels la courbe des coefficients thermo-élastiques coupe la ligne zéro, et en constituer un spiral. Le minimum étant plus élargi que le maximum, et, comme conséquence,<sup>1</sup> la deuxième intersection de la courbe avec la ligne zéro étant moins inclinée que la première, c'est cette solution qui semblerait devoir être choisie. Pourtant, la limite élastique des alliages dont, aux températures ordinaires, se produit le maximum du module, les a fait choisir d'abord pour l'établissement des spiraux compensateurs. L'erreur secondaire déterminée sur un intervalle de 30 degrés est notable: 20 secondes ou un peu plus. Mais, si l'on se souvient que, dans le même intervalle, une montre munie d'un spiral d'acier non compensé varie de 5 à 6 minutes par jour, on conviendra que le progrès est très considérable. Il apparaît augmenté de moitié si l'intervalle de compa-

<sup>1</sup> Cette conséquence ressort avec évidence d'une règle approximative des états correspondants, suivant laquelle les propriétés, à la même température, d'une série d'alliages de teneurs croissantes en nickel, se retrouvent, dans le même alliage, à une série de températures successivement descendantes.



raison est de 20 degrés, qui est bien plutôt celui dans lequel se tiennent ordinairement les montres. L'erreur linéaire est, en effet, proportionnelle à l'écart des températures extrêmes, l'erreur secondaire à son carré.

Une difficulté demeure. La montée très rapide de la courbe du coefficient thermo-élastique au voisinage de l'axe zéro fait que les plus petits écarts des teneurs éloignent de la meilleure solution, en déplaçant le maximum le long de l'intervalle de compensation, ou même en le rejetant au dehors. Pourtant, la solution pratique a été reconnue tellement bonne par les horlogers et par le public, que les spiraux compensateurs ont été utilisés par dizaines de millions, et ont permis soit d'abaisser sensiblement le prix des montres que l'on munissait, presque à la limite, d'un balancier compensateur, soit d'assurer des marches à peu près corrigées de la température à des montres auxquelles on n'aurait jamais pu songer autrefois à appliquer la compensation. Il n'est donc pas exagéré de dire que l'avènement du spiral compensateur fut, il y a quelque vingt ans, une révolution dans l'horlogerie courante.

#### *Correction de l'erreur secondaire par le balancier intégral.*

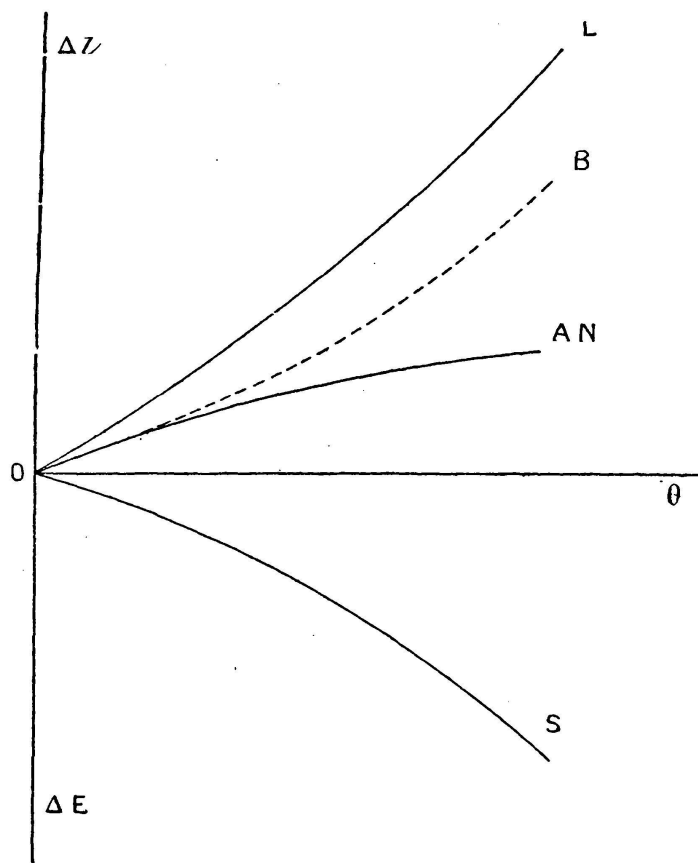
Cette erreur tient, comme nous l'avons vu, à ce que le balancier compensateur agit suivant une fonction sensiblement linéaire, tandis que le spiral d'acier exigerait une correction nettement quadratique. La considération attentive des diagrammes va nous suggérer la solution.

Associations, en effet, au laiton du balancier, un acier au nickel dont la dilatabilité est représentée par une courbe telle que OAN, (fig. 6), correspondant à une équation de dilatation douée d'un coefficient quadratique négatif. L'action compensatrice, représentée par la différence des ordonnées de la courbe OL et OAN sera une fonction progressive, OB, de la température, que l'on pourra rendre symétrique de OS, de telle sorte que la somme soit constamment nulle. L'idée étant conçue, il suffit de rechercher, parmi les alliages dont on dispose, celui qui résout le problème.

Les données de ce problème étaient tellement bien établies qu'un jour du printemps 1899, le calcul complet de l'action d'un balancier compensateur ayant été fait, on put le réaliser et le monter sur un chronomètre achevé, et qui même terminait ses épreuves d'ob-

servatoire. Ce chronomètre s'était montré affecté de l'erreur secondaire habituelle de 2 secondes. La substitution, à son balancier, de celui qui venait d'être construit, en fit disparaître toute trace.

Sera-t-il permis, à un Neuchâtelois, parlant en terre neuchâteloise, de dire que le problème de l'erreur secondaire est positive-



Extrait de l'ouvrage:  
Ch.-Ed. Guillaume, Les Aciers au nickel  
et leurs applications à l'horlogerie (Edit.:  
E. Magron, Bienne (Suisse)).

Fig. 6.

Correction de l'erreur *secondaire* des chrono-  
mètres (OB fonction perturbatrice du spiral, OB fonc-  
tion compensatrice du balancier intégral).

ment une sorte de question nationale? Posé dès l'année 1775 par Ferdinand Berthoud, né à Plancemont-sur-Couvet, ce problème a été résolu par le travail conjoint de plusieurs neuchâtelois. M. James Vaucher, à Travers, a construit les premiers balanciers, qui furent, par les soins des chronométriers célèbres, M. Paul-D. Nardin au Locle et M. Paul Ditisheim à la Chaux-de-Fonds, montés sur des chronomètres de marine ou de poche, observés à l'Observatoire de Neuchâtel, où le Dr Hirsch, dont la belle figure est demeurée chère

à nos mémoires, achevait sa brillante carrière d'astronome et d'organisateur. Il avait lui-même étudié l'erreur secondaire des chronomètres, et avait toujours espéré la voir vaincue. Ce fut l'une des joies de ma vie de métrologiste, moi qui lui devais l'impulsion décisive de mes débuts, de lui apporter cet hommage reconnaissant.

Le nouveau balancier, pour lequel j'ai proposé le qualificatif d'*intégral*, et dont la Société des Spiraux a assuré la production, s'est rapidement répandu parmi les chronométriers. Parant, sans aucune complication et sans cause de dérangement, à la dernière erreur systématique du chronomètre, il donnait un intérêt puissant à tout perfectionnement de détail susceptible de faire gagner quoi que ce soit dans la régularité des marches. Aussi a-t-on vu, dans ces dernières années, une véritable course vers l'absolu, marquée par une élévation constante du nombre des „points“ gagnés dans les observatoires par les chronomètres qui leur étaient soumis. Ainsi, Paul Ditisheim, après avoir distancé de beaucoup tous les records antérieurs à l'Observatoire de Kew, s'est, par trois fois, battu lui-même, non par des succès de hasard, mais par des séries nombreuses et compactes de montres de précision. A Besançon, à Genève, à Neuchâtel, à Hambourg, à Washington, le balancier intégral apparaît maintenant presque seul. La fidélité bien connue de la nation anglaise à ses vénérables traditions attache encore beaucoup d'horlogers britanniques à l'ancien balancier compensateur ; mais aussi, la tête des concours de Kew, aujourd'hui Teddington, leur est le plus souvent ravie.

Je voudrais appuyer encore sur un point particulier de ce qui précède. Le premier balancier intégral construit a donné *exactement* le résultat prévu. On trouverait difficilement une plus heureuse confirmation de la sécurité avec laquelle on se meut maintenant dans les problèmes de la métrologie ; car c'est sur la connaissance exacte des *courbures* dans les fonctions de dilatation, et non point sur la dilatabilité moyenne du laiton, de l'acier et de son substitut, l'acier-nickel choisi, que reposait tout le succès du calcul.

#### *L'erreur secondaire éliminée de l'action du spiral.*

Pendant plus de dix ans, je pensai que la solution proposée pour l'erreur secondaire était définitive. Ainsi, les montres se ran-

geaient, suivant la perfection de leur compensation, adaptées à des mécanismes appropriés, dans quatre catégories successives. Les montres de la plus basse d'entre elles, pour lesquelles on estime superflu d'engager une dépense de quelques centimes dans le but de ramener au dixième les écarts de leurs marches aux températures, continuent à être munies d'un spiral d'acier et d'un balancier monométallique. Mais, dès qu'on s'élève un peu dans la qualité, on recherche le spiral plus ou moins compensateur, c'est-à-dire issu de coulées plus ou moins approchées, préalablement clas-

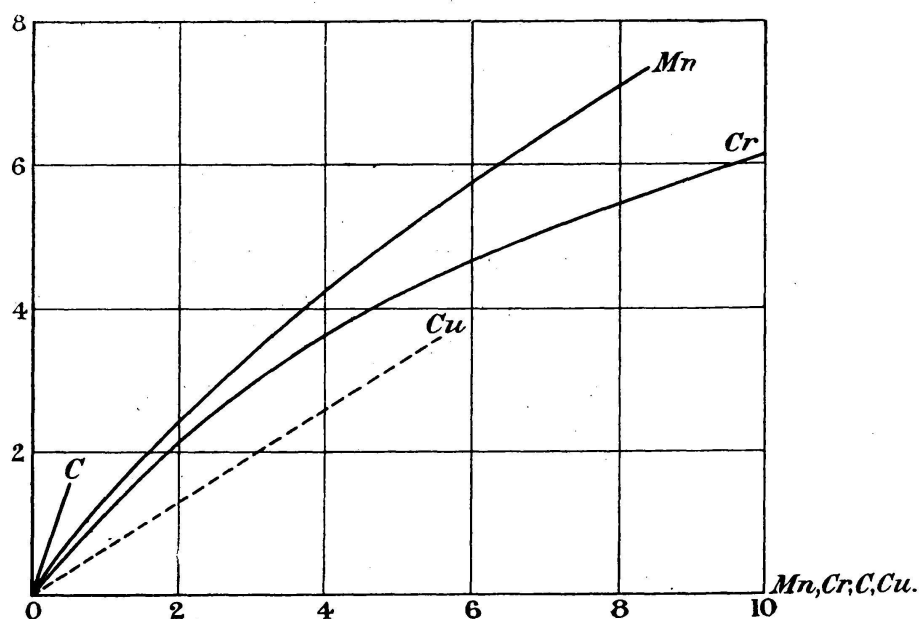


Fig. 7.

Relèvement du minimum de la dilatabilité dans les aciers au nickel contenant un troisième constituant.

sées, et dont la perfection s'élève en même temps que celle des mécanismes auxquels on les adapte. L'erreur secondaire, cependant, reste notable, et, de plus, les qualités d'un spiral étant données, on devra l'accepter sans aucune correction. Des montres meilleures supporteront, par leur prix, et rendront désirable, par leur qualité, une plus grande approximation de la compensation. Elles seront alors munies d'un spiral d'acier et d'un balancier compensateur acier-laiton, susceptible de retouches *a posteriori* au moyen de vis réglantes. Enfin, pour les chronomètres, le balancier intégral permettra d'atteindre aux dernières limites du réglage.

Il y a quelques années, cependant, m'apparut la faible lueur d'une possibilité nouvelle. J'avais demandé à la Société de Com-

mentry-Fourchambault et Decazeville, qui, depuis un quart de siècle, collabore à mes recherches avec l'esprit le plus libéral et la technique la plus subtile, de chercher à incorporer aux aciers au nickel des proportions notables de manganèse. Dans la région de l'invar, on put atteindre environ 8 %, tout en conservant des lingots bien maniables. Les alliages plus riches en manganèse refusaient rapidement le travail de la forge. L'étude des dilatabilités me fit voir que l'anomalie était grandement atténuée, le minimum s'élevant, en fonction des additions centésimales de manganèse, de chrome, de cuivre ou de carbone, ainsi que l'indiquent les courbes de la figure 7.

Ce fut, pour moi, aussitôt, la vision d'une possibilité, lointaine peut-être, mais certaine, vers une solution toute nouvelle du problème de la compensation.

Pour en bien comprendre la raison, comparons à nouveau les diagrammes des dilatabilités et des élasticités. Si les coefficients thermiques se rapportent à la docilité avec laquelle les métaux se prêtent aux déformations, les coefficients relatifs à l'élasticité devront, comme nous l'avons vu, changer de signe.

Les additions faites aux alliages de fer et de nickel doivent donc atténuer graduellement l'anomalie thermoélastique; tout le problème convergeait dès lors vers la possibilité de l'abaisser de telle sorte que la courbe en vînt à placer son maximum sur l'axe des valeurs nulles. Le problème pratique imposait, en plus, cette condition, que l'alliage fût aisément réalisable, et possédât la limite élastique élevée que réclament les régleurs.

La solution fut trouvée dans l'incorporation, à un alliage voisin de l'invar, de quantités élevées de chrome et de carbone, opération dont il fallait trouver la méthode. Mais les Aciéries d'Imphy ne se laissent pas longtemps arrêter par les problèmes ardu; elles purent, dans le courant du printemps 1913, réaliser des alliages à haute teneur en chrome, qui affirmèrent immédiatement la possibilité d'obtenir la nouvelle solution que j'avais entrevue.

L'intérêt d'opérer sur une courbe tangente à l'axe des valeurs nulles est multiple.

Au voisinage du maximum, les variations de la teneur en nickel peuvent être notables, sans que les propriétés thermoélastiques du spiral cessent d'être bonnes; alors que, dans les alliages binaires,

le changement est une fonction tellement rapide de la composition, que le défaut d'homogénéité dans une même coulée fait varier de façon appréciable le résultat de la compensation dans des portions de fil prises à la suite l'une de l'autre. Mais, en plus, la règle des états correspondants enseigne que les coefficients thermo-élastiques des nouveaux alliages ne pourront plus avoir de valeurs positives; la courbe ne connaîtra ni minimum, ni maximum, mais bien un long palier, à forme d'inflexion, entre deux branches descendantes.

L'expérience, faite à la fin de l'année 1913, par les soins de la Société des Fabriques de Spiraux réunies, a brillamment confirmé mes prévisions. Je sus, dès cette époque, qu'aucune difficulté insurmontable ne s'opposerait à la réalisation d'un spiral compensateur libéré de l'erreur secondaire. Il restait seulement à le mettre au point.

La grande guerre, qui a tendu toutes les énergies vers des questions d'un autre ordre de grandeur que les délicates actions se jouant dans l'organe réglant des montres, a, pour un temps, arrêté les recherches, et c'est seulement dans le courant de l'année dernière, que le problème de la compensation par le spiral put être considéré comme entièrement résolu.

Je ne sais si un temps viendra où le balancier compensateur aura passé tout entier du domaine de l'actualité à celui de l'histoire, après sa glorieuse existence, au cours de laquelle il aura assuré la bonne marche de montres se chiffrant par centaines de millions.

L'un des grands avantages du nouveau spiral réside dans le fait que son association avec un balancier donné fournit d'emblée, et sans aucune intervention de la part du régleur, une égalité très approchée des marches aux températures. Mais ce sera là, peut-être, au moins pour un temps, une faiblesse, puisque le propre du balancier compensateur est précisément de permettre les retouches qui amènent progressivement la montre aussi près de la perfection que le veulent la patience et l'habileté du régleur.

Au moins peut-on affirmer que le domaine du balancier compensateur se trouvera, dès maintenant, singulièrement rétréci. En effet, des chronomètres réglés par les nouveaux procédés ont révélé, dans des épreuves d'observatoires, une perfection de marche équi-

valente aux résultats qui, il y a peu d'années, établissaient la limite alors réalisable. Les chronométriers les plus hautement qualifiés<sup>1</sup> voient, dans l'avènement du nouveau spiral, un progrès d'un caractère révolutionnaire; à l'enfant nouveau-né ils attachent les plus beaux espoirs.

Qu'il me soit permis maintenant de jeter un regard en arrière, et de scruter les pensées qui hantaient, voici un peu plus de quarante ans, l'esprit d'un jeune étudiant de l'Académie de Neuchâtel. Un germe y levait, bien fragile, fortifié seulement par l'immense espoir d'apporter un jour un élément de progrès à l'industrie vitale de son pays.

Le cycle, alors timidement ouvert, se clôt aujourd'hui. C'est pour moi la source d'une joie profonde, de l'apporter tout entier, ici même, à mes maîtres d'autrefois, et de l'offrir, comme un hommage de pieuse reconnaissance, à la mémoire de tous les chers disparus qui ont guidé mes premiers pas.

---

<sup>1</sup> M. Paul Ditisheim, M. Henri Rosat.