



HAL
open science

Applications des aciers au nickel à la chronométrie

Ch.-Éd. Guillaume

► **To cite this version:**

Ch.-Éd. Guillaume. Applications des aciers au nickel à la chronométrie. J. Phys. Theor. Appl., 1904, 3 (1), pp.273-281. 10.1051/jphystap:019040030027301 . jpa-00240880

HAL Id: jpa-00240880

<https://hal.science/jpa-00240880v1>

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.

APPLICATIONS DES ACIERS AU NICKEL A LA CHRONOMÉTRIE ;

Par M. Ch.-Éd. GUILLAUME⁽¹⁾.

Les propriétés particulières des aciers au nickel ont permis d'apporter, dans le réglage des appareils destinés à la mesure du temps, des perfectionnements de trois ordres distincts, que je me propose de passer rapidement en revue. La première de ces applications se rapporte au pendule des horloges, la seconde au spiral des montres ordinaires, la troisième enfin au balancier compensateur des chronomètres de précision.

Le pendule. — La compensation des pendules, soit par le procédé classique du gril, soit par la dilatation ascendante du mercure, est trop connue pour qu'il soit utile d'y insister. La simplification tout à fait remarquable que comporte ce problème par l'emploi d'une tige possédant une dilatation très faible est aussi d'une évidence telle qu'il ne me paraît pas nécessaire de donner ici la description des quelques dispositifs, en nombre très restreint, que l'on peut imaginer pour en réaliser l'application.

Il me suffira de dire que, lorsque la tige d'acier-nickel du pendule a été convenablement traitée, c'est-à-dire lorsqu'elle a subi un étuvage systématique destiné à précipiter les transformations qui ne se produiraient à la température ambiante qu'avec une extrême lenteur, sa stabilité est bien suffisante pour que son emploi ne donne lieu à aucune crainte pour la sécurité de la mesure du temps, même s'il s'agit des meilleures horloges des observatoires. La marche de l'horloge variera, il est vrai, dans le cours du temps, mais d'une façon très régulière et d'une quantité très petite qu'indiqueront constamment des observations astronomiques.

⁽¹⁾ Communication faite à la Société française de Physique : Séance du 3 juillet 1903.

Le mode d'emploi de l'invar dans la construction du pendule dépendra d'ailleurs du degré de perfection que l'on voudra réaliser dans la compensation. Des expériences très nombreuses ont montré que, dans des coulées bien faites, les différences de dilatabilité des tiges semblablement traitées sont de l'ordre du dix-millionième, alors que, entre les diverses coulées sortant d'une même usine, les divergences peuvent atteindre le millionième. Une compensation réglée sur un invar moyen, sans aucun examen des coulées, exposera donc à des écarts d'un demi-millionième dans les dilatabilités, ou d'un quatre-millionième dans les variations de la durée d'oscillation par degré de température. Il faudrait donc, pour ces écarts extrêmes, atteindre des variations de la température de l'ordre de 40 degrés pour que les erreurs des marches attribuables au pendule fussent d'une seconde par vingt-quatre heures. Pour une compensation réglée sur la dilatation moyenne d'une coulée dont une seule tige a été examinée, les écarts sont encore dix fois plus petits.

Le pendule à tige d'invar remplit donc, avec la plus grande simplicité, les conditions que lui impose la mesure la plus précise du temps par les horloges, et se plie, *a fortiori*, aux exigences de l'horlogerie ordinaire. Il est entré dans l'usage courant, notamment en Allemagne et en Angleterre, où les meilleurs constructeurs l'ont adopté.

Le spiral. — Les indications données dans la communication qui précède dispensent d'entrer dans de nombreux détails sur l'application des aciers au nickel à la compensation des montres ordinaires. Nous avons vu en effet que la variation du module d'élasticité du métal composant le spiral produit un retard au chaud, si l'on ne prend pas la précaution de munir la montre d'un organe qui en annule les effets. Le procédé presque seul employé aujourd'hui pour compenser les variations du spiral consiste à l'associer à un balancier dont le moment d'inertie est rendu systématiquement variable par l'action de deux lames bimétalliques, fixées aux extrémités d'un bras diamétral, et qui se recourbent de façon à se rapprocher de l'axe lorsque la température s'élève. Ces lames portent des masses amovibles, dont on peut régler la position à volonté, de manière à régler à la fois l'équilibre parfait du balancier autour de son axe, et la variation du moment d'inertie en fonction de la température.

Pour fonctionner d'une manière satisfaisante, le balancier doit être construit avec soin, et en suivant une technique rigoureusement

fixée : Dans une rondelle d'acier, percée en son centre d'un trou sur lequel on réglera ensuite tout le travail, on creuse une rainure circulaire que l'on remplit de laiton ou de bronze par fusion au four. La rondelle est ensuite mise sur le tour, pour être planée sur ses deux faces et débarrassée de l'excédent d'acier extérieur à l'anneau de laiton. Ce dernier est forgé par petits coups de manière à prendre une élasticité suffisante ; puis le centre du balancier est creusé pour amener le bras diamétral à une épaisseur convenable, en même temps que pour former la bilame ; le champ continu entre le centre et la lame extérieure est découpé pour dégager le bras. Chaque lame est enfin séparée du bras à l'une des extrémités, de manière à fonctionner librement. Le pourtour est muni, pour les pièces de poche, d'une série de vis que l'on peut déplacer dans des trous supplémentaires, ou auxquelles on peut substituer d'autres vis d'une masse différente. Dans les chronomètres de marine, les vis sont remplacées par des masses cylindriques serrées sur la lame.

Tel est le supplément de travail qu'impose la nécessité d'appliquer aux montres un système compensateur des variations dues à la température. Faute de posséder un tel système, une montre munie d'un spiral d'acier éprouve un retard dont la valeur est de douze secondes environ par vingt-quatre heures pour chaque degré dont la température s'élève.

Or nous avons vu que les aciers au nickel éprouvent, dans un intervalle de température étendu, une variation anormale du module, reliée aux variations de sens normal par deux régions limitées, où le module passe par un maximum ou par un minimum. La position de l'ensemble de l'anomalie dans l'échelle des températures se déplace en même temps que la teneur en nickel varie dans les alliages qui nous occupent. On pourra donc fixer cette teneur de façon telle que le maximum ou le minimum se produisent aux températures ordinaires ; une montre munie d'un spiral d'un tel alliage et d'un balancier monométallique pourra alors n'éprouver, à toutes les températures qu'elle sera susceptible d'atteindre, que des variations de peu d'importance.

Cette remarque conduirait à la solution complète du problème de la compensation pour l'horlogerie et la chronométrie, si deux propriétés des aciers au nickel n'en limitaient un peu la portée. La première est l'importance des termes supérieurs dans l'expression de la variation du module, c'est-à-dire le peu d'étendue du maxi-

mum ; la seconde est la rapide variation de la position du maximum dans l'échelle des températures en fonction de la teneur.

Il résulte de cette dernière propriété que les petits écarts du dosage des coulées placeront le maximum un peu au-dessus ou au-dessous des températures les plus usuelles ; la première entraîne un défaut de proportionnalité des marches aux diverses températures d'un ordre de grandeur tel qu'une montre, munie d'un spiral d'acier-nickel au maximum du module, et dont la marche est la même à 0° et à 30°, avance de dix à douze secondes par jour à 15°.

En prenant un alliage au voisinage du minimum, plus étendu que le maximum, on atténuerait l'erreur ; mais les alliages qui se trouvent, à la température ordinaire, dans cette phase de leur variation, sont peu élastiques, et n'ont pas donné de résultats très satisfaisants.

On comprend, d'après ce qui vient d'être dit, que le réglage des montres par les spiraux en acier au nickel doit être, au moins pour le moment, limité aux pièces ordinaires, dont le mécanisme n'est pas construit de manière à permettre une régularité de marche supérieure à une dizaine de secondes par jour.

Dans ces montres, l'emploi du spiral d'acier au nickel constitue un progrès très sérieux, car, si l'on se reporte aux nombres donnés plus haut, on verra qu'une montre à spiral d'acier éprouve, pour un intervalle de température de 30 degrés, une variation environ trente fois plus forte. D'une part, le nouveau spiral permet d'assurer le bénéfice d'une réduction très considérable de l'effet des températures à des pièces que leur prix très bas ne permet pas de munir d'un système compensateur. D'autre part, il conduit à réduire le prix des mécanismes auxquels on applique un système compensateur approximativement réglé.

Les spiraux d'acier au nickel unissent à l'avantage d'une faible variation du module ceux d'être peu oxydables et très peu sensibles au magnétisme, puisque l'état dans lequel on les emploie est immédiatement inférieur à la première apparition de leurs propriétés magnétiques. Ces spiraux ont conquis rapidement la faveur des horlogers et se répandent de plus en plus.

Le balancier. — Le module d'élasticité des aciers au carbone varie suivant une fonction de la température dont les termes supérieurs au premier sont relativement importants ; la nécessité de compenser ce changement du module dans les chronomètres augmente donc en même temps que la température. Or il est facile de démontrer,

en partant de la théorie établie par Yvon Villarceau, que le pouvoir compensateur d'un balancier à bilame circulaire est directement proportionnel, à toute température, à la différence des dilatabilités vraies des deux métaux qui composent cette bilame (1).

On n'obtiendra donc une compensation complète des effets de la température sur le spiral qu'en associant dans la bilame deux métaux présentant une différence de dilatabilité croissant avec la température dans la proportion indiquée par les changements du spiral.

À ce point de vue, l'association de l'acier et du laiton, à peu près imposée par des conditions pratiques, est aussi mal choisie que possible. En effet, d'après les mesures de M. Benoît, alors que les termes du premier degré diffèrent sensiblement dans les formules exprimant la dilatation de l'acier et du laiton, les termes du second degré sont presque identiques, de telle sorte que le taux de l'action du balancier acier-laiton est sensiblement le même à toute température.

Il en résulte ce fait, observé par Dent en 1833, bien avant qu'on pût en établir la théorie complète, qu'un chronomètre ayant des marches identiques à deux températures déterminées prend de l'avance aux températures intermédiaires et du retard aux températures extérieures.

En pratique, si un chronomètre muni d'un spiral d'acier est réglé de manière à reprendre, à 30°, les mêmes marches qu'à 0°, il avance, à 15°, de 2,5 secondes environ par vingt-quatre heures. Cette avance est généralement connue sous le nom d'*anomalie de Dent*, et sa valeur numérique, pour le groupe de températures ci-dessus, est désignée par convention par l'expression d'*erreur secondaire du chronomètre*.

La *fig. 1* permet de représenter les diverses données du problème. La courbe S donne, en fonction de la température, les variations ΔE du module d'élasticité du spiral; les courbes A et L, les dilatations Δl de l'acier et du laiton; la droite B, leur différence à laquelle la fonction compensatrice du balancier est proportionnelle. M, somme algébrique de S et B, est la courbe des marches aux diverses températures.

Depuis que cette anomalie a été découverte, les horlogers se sont

(1) *Recherches sur le mouvement et la compensation des chronomètres (Annales de l'Observatoire de Paris, t. VII)*; voir aussi mon ouvrage : *les Applications des aciers au nickel* (Gauthier-Villars, 1904).

ingéniés à la faire disparaître, en munissant le balancier d'organes accessoires destinés à fournir à sa fonction compensatrice le terme quadratique qui lui manque. Plusieurs de ces systèmes fonctionnent d'une manière satisfaisante; mais la plupart sont coûteux à établir, et, comme tous introduisent des complications dans la construction de cet organe déjà très délicat par lui-même, on peut légitimement craindre qu'ils deviennent la source de variations irrégulières des marches après le plus petit dérangement.

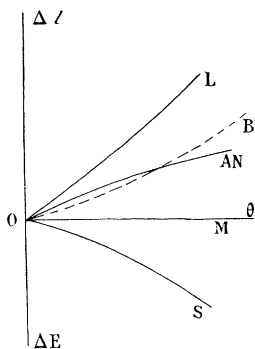


FIG. 1.

J'ai indiqué, dans ma première communication relative aux aciers au nickel ⁽¹⁾, que non seulement les valeurs globales de leurs dilatabilités sont anormales et tout à fait imprévues, mais encore que le rapport entre le premier terme et les termes supérieurs de la formule des dilatations aux températures ordinaires prend des valeurs très diverses. Ainsi, le coefficient du terme proportionnel au carré de la température part d'une valeur positive qui peut être, dans l'alliage à 28 ou 29 0/0 de nickel, dix fois supérieure à la valeur du terme correspondant dans la formule de dilatation des métaux ou alliages de même dilatation moyenne. Puis, à mesure que la teneur en nickel s'élève, le deuxième terme diminue, s'annule vers 36 0/0, devient négatif, passe par un minimum et remonte ensuite vers des valeurs positives qu'il atteint au delà de 50 0/0.

Cette série de valeurs diverses de ce coefficient, trouvées pour différents alliages à la même température, se manifeste aussi à des températures diverses pour un même alliage, conformément à la règle

(1) Séance du 2 juillet 1897.

des états correspondants, rappelée dans ma précédente communication. La forme générale de la courbe complète de dilatation pour un acier au nickel réversible est, en effet, celle qu'indique la *fig. 2*, dans laquelle l'alliage traverse successivement toutes les phases de sa transformation, depuis l'état magnétique complet, dans les portions inférieures de la courbe, jusqu'à l'état non magnétique, dans la portion supérieure à peu près rectiligne.

Si l'on veut obtenir un effet croissant de l'action du balancier, on associera par exemple au laiton un acier au nickel à deuxième terme négatif, c'est-à-dire qui se trouve, aux températures ordinaires, dans la région de la courbe de la *fig. 2* dont l'inclinaison va en diminuant à mesure que la température s'élève.

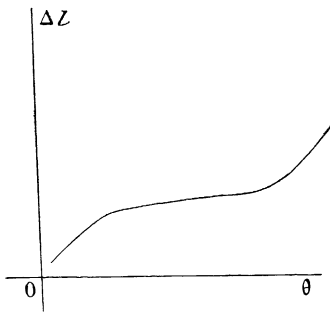


FIG. 2.

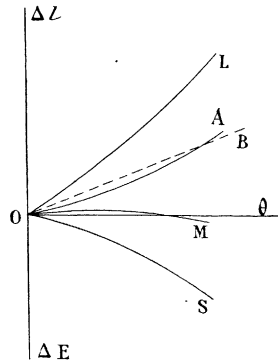


FIG. 3.

La *fig. 3* représente les rapports ainsi obtenus, et désignés comme dans la *fig. 1* ; la courbe AN, remplaçant la courbe A de la figure précédente, combinée avec la courbe L, donne une courbe B à inclinaison progressive ; et, si la courbure de AN a été convenablement choisie, B pourra être rigoureusement symétrique à la courbe S, d'où il résulte que la courbe des marches, somme algébrique des deux précédentes, se confondra avec l'axe des abscisses.

Telle était, réduite à son aspect tout à fait général, la théorie que j'avais développée numériquement dès le commencement de l'année 1899. Peu après sa première publication dans le *Journal suisse d'Horlogerie*, deux des premiers horlogers suisses, M. Paul Nardin et M. Paul Ditisheim, m'offrirent de la vérifier par la mise en pratique

des balanciers construits conformément aux indications données ci-dessus.

Le résultat de ces expériences, faites par M. Nardin sur des chronomètres de marine, et par M. Ditisheim sur des pièces de poche, fut très concluant. Dès les premiers essais, il fut constaté que, comme l'indiquait la théorie, l'erreur secondaire était devenue inappréciable.

La *fig. 4* représente les marches de l'un des premiers chronomètres construits et examinés par M. Nardin. Les températures sont portées en abscisses, les marches en ordonnées. La courbe parabolique indique les marches qu'aurait données un chronomètre théoriquement parfait, compensé par le système habituel; les marches réelles sont marquées par les croix isolées, rangées si près d'une ligne droite que les erreurs accidentelles, très petites, du chronomètre examiné, surpassent les erreurs attribuables au système.

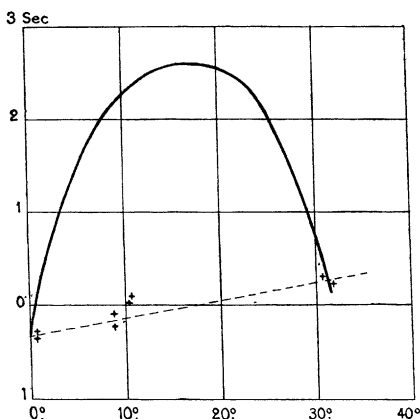


FIG. 4.

Depuis lors ces résultats ont été confirmés par un grand nombre d'autres ; ils n'ont pas toujours été aussi remarquables ; mais, dans tous les cas, l'erreur secondaire des pièces munies du nouveau balancier s'est trouvée extrêmement faible.

Ce perfectionnement a pu être obtenu sans qu'aucune des autres qualités des chronomètres eût été diminuée. En particulier, la stabilité des marches s'est montrée au moins aussi bonne que dans les pièces munies du balancier compensateur ordinaire. Tout récemment encore, une pièce de poche, compensée à l'aide du nouveau balancier,

présentée à l'observatoire de Kew par M. Ditisheim, a dépassé de beaucoup en précision les résultats obtenus jusqu'ici par plusieurs milliers de chronomètres soumis à l'examen de ce célèbre observatoire. A toutes les températures, les marches diurnes de ce chronomètre se sont révélées constantes au dixième de seconde près, et les marches se sont conservées remarquablement pendant toute la durée des épreuves. M. Leroy et M. Boudeaud, à Paris, et plusieurs autres horlogers très habiles, en Angleterre, en Allemagne et en Suisse, ont poursuivi des essais qui, pour la plupart, ont conduit à des résultats satisfaisants. Les quelques succès qui ont été enregistrés ont pu être attribués soit à une fabrication accidentellement défectueuse des balanciers, soit au défaut d'habitude des régleurs, auxquels le nouveau balancier impose certaines précautions d'ailleurs faciles à mettre en pratique, mais qu'il est nécessaire de bien connaître.
