



Newsletter N°58 : Les variations de température Bilame & fatigue thermique

I. Une astuce d'horloger : Le bilame

Au XVIII^{ème} siècle, les horloges sont souvent équipées d'un ressort spiral et d'un balancier en acier. On constate que l'horloge retarde de 2 minutes par jour lorsque la température augmente de 10°C par jour pour un système balancier/spiral non compensé. On attribue ce phénomène à une diminution de la rigidité de l'acier lorsque la température varie (figure 1).

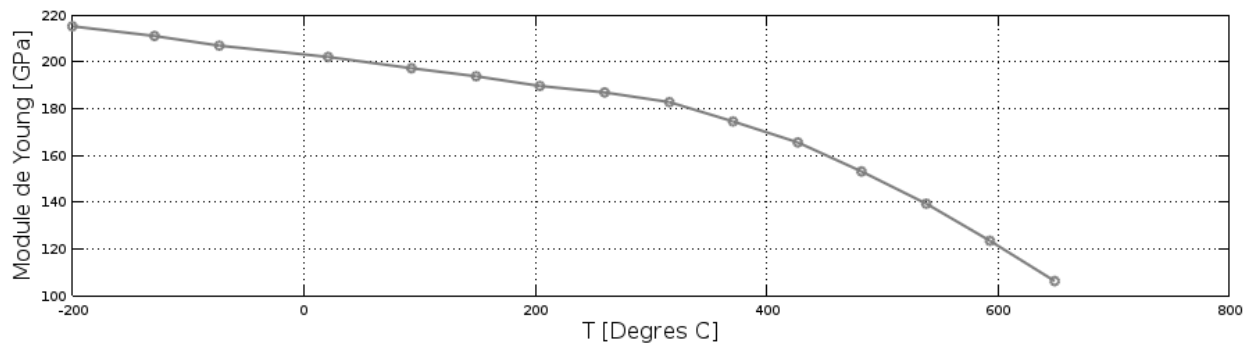


Figure 1 : Evolution du module de Young du spiral acier en fonction de la température.
[SUISSE XX]

A cette époque, le problème était crucial lorsque l'on réfléchissait à la conception de chronomètres de marine destinés à déterminer la longitude en mer. La précision d'un chronomètre tient pour beaucoup à la justesse de l'incrément de temps, lequel est réglé par le mouvement alternatif du balancier. Sa période d'oscillation dépend de la tension du ressort spiral qui le rappelle dans ses mouvements. Or, les variations de température influent sur la tension de ce dernier et donc sur la période d'oscillation du balancier.

La première solution pour corriger l'effet de la température est attribuée à John Harrison, qui a développé un dispositif qui agit sur la modification de la longueur du spiral en fonction de la température. Pour ce faire, il utilise une lame bimétallique (bilame cuivre/acier) pour ajuster la fin de la partie active du spiral grâce à des chevilles qui maintiennent le spiral en son extrémité extérieure, proche du pignon (Cf. figure 2). La dilatation du bilame en fonction de la température s'oppose à celle du spiral pour garantir la constance de sa tension et donc de l'incrément de temps produit.



«Gestion des risques industriels »

NEWS 58 - Mai 2022

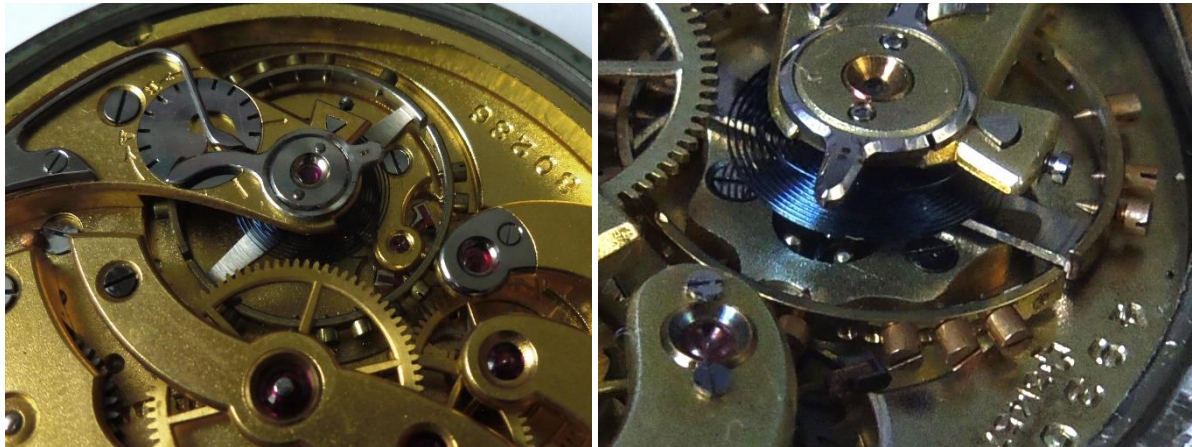


Figure 2 : Montres Ulysse Nardin et IWC : Balancier bimétallique

D'autres dispositifs contribuent également à la précision des chronomètres :

- Les paliers sont montés sur rubis, cela permet de diminuer les frottements perturbateurs du mouvement,
- Les poids sont guidés dans leur descente par des colonnes et le chronomètre est intégralement suspendu au centre d'un joint de Cardan qui lui permet de conserver une position verticale afin de ne pas entraver les mouvements de l'horloge en période de forte houle.

D'une façon plus générale, les bilames sont deux lames métalliques de natures différentes soudées l'une à l'autre. Quand il fait froid, elles sont rectilignes mais quand on le chauffe, une lame se dilate plus que l'autre et le bilame se courbe entraînant, en général, un contact électrique. De nos jours, les bilames ont de multiples applications (Cf. figure 3). Ils peuvent être utilisés pour donner une indication (mesure de la température), pour contrôler une installation (régulation de la température, limiteur de temps de chauffe) ou encore pour protéger des dispositifs électriques (interrupteur, disjoncteur thermique).

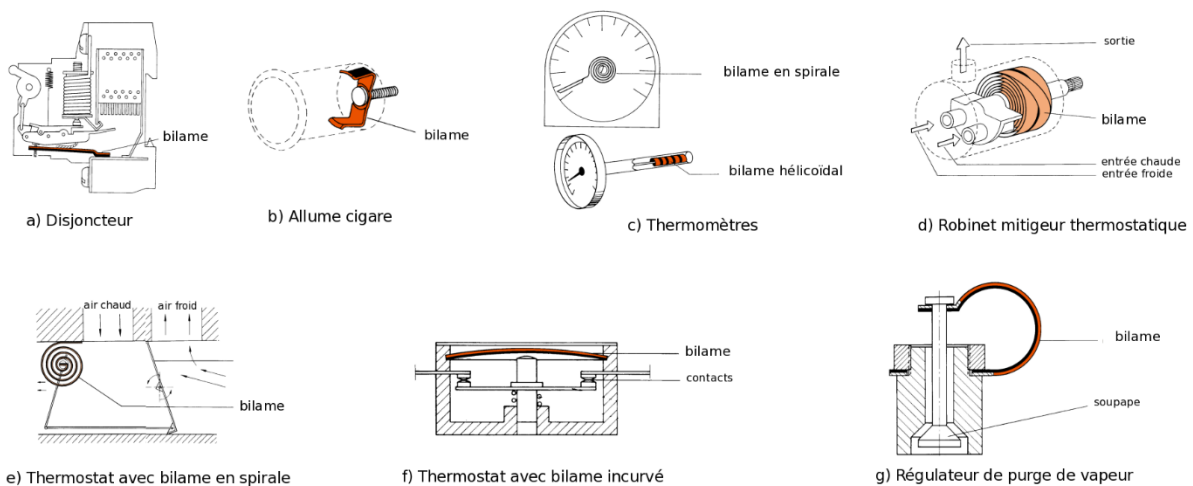


Figure 3 : Différentes applications des bilames chez Kanthal (www.kanthal.com).

Contact : alexandre.fleurentin@metallocorner.fr - 07.81.47.10.07 - www.metallocorner.com



Les bilames plats et incurvés sont utilisés principalement comme interrupteurs thermiques. Les bilames entortillés en spirale ou hélicoïdaux offrent une plus grande sensibilité, ils sont alors plutôt utilisés comme thermomètres ou thermostats.

II. Un autre problème associé aux variations de température : la fatigue thermique.

Dans le cas de conditions de travail particulières, il arrive assez souvent en mécanique que des pièces soient soumises à des chocs thermiques répétés lorsque celles-ci sont chauffées et refroidies, de façon non homogène, au cours d'un cycle de travail. Les gradients de contraintes d'ordre thermique associées à la répétition des phénomènes de dilatation / retrait peuvent être à l'origine de l'amorçage et de la propagation d'une fissure. Ce type d'endommagement prend naissance sur des défauts géométriques (angles vifs, rayon de raccordement, rainure de clavette, ...), de surface (soufflures de moulage, coup d'outils, repli de forgeage,) ou d'ordre métallurgique (structure de soudage, carbures grossiers, ...). La fatigue thermique conduit à des sollicitations de traction-compression alternées qui génèrent de la dégradation par faïençage (Cf. figures 4 et 5).

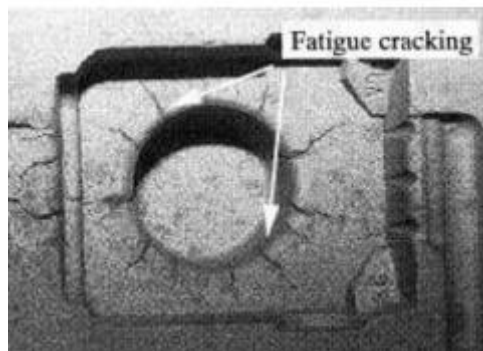


Figure 4 : Fatigue thermique d'un outil de moulage [Wong 2008].

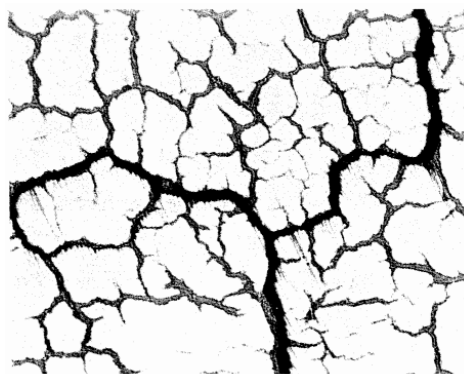


Figure 5 : Aspect de la dégradation de surface d'un acier X40CrMoV5 (Rm 1300MPa) après 10000 cycles entre 20°C et 620°C. [LEVE 1988]



La fatigue thermique se différencie de la fatigue à température par son mode de chargement. Les chargements cycliques en fatigue thermique sont dus aux gradients de dilatation alors que dans le cas de la fatigue à température, les contraintes sont dues à des charges appliquées. Les deux modes de sollicitations peuvent être superposés en cas de charges appliquées sous chocs thermiques.

L'amplitude de ces contraintes dépend de nombreux critères : la vitesse d'échauffement (ou du refroidissement), les propriétés thermiques du matériau (conductivité, chaleur spécifique), la masse spécifique, les facteurs géométriques « a » (en limitant les gradients thermiques et les facteurs de concentrations de contraintes) et les propriétés mécaniques (limite d'élasticité R_e , module d'Young E , coefficient de poisson ν). On peut calculer les contraintes d'ordre thermique en reprenant la valeur du coefficient de dilatation (α) :

$$\sigma = a \cdot \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \Delta T$$

Les contraintes générées peuvent aller jusqu'à la plastification du matériau métallique lorsqu'une zone chauffée tend à se dilater alors que celle-ci est bridée par une autre adjacente de section plus épaisse ou plus froide.

L'aptitude d'un matériau à supporter un choc thermique dépend de ses possibilités de relaxer les contraintes par déformation plastique. L'endurance à la fatigue thermique dépendra plutôt de la ductilité du matériau que de sa résistance à la rupture. Les matériaux fragiles, à faibles amplitudes de déformation plastique, sont donc plus vulnérables au choc thermique et cela d'autant plus que leur conductivité thermique est faible.

D'une façon générale, les principaux facteurs d'endommagement sont la température supérieure du cycle et l'étendue du gradient thermique.

Les conditions de travail peuvent devenir plus complexes durant le refroidissement si des transformations de phases sont enclenchées. Ces transformations de phases, accompagnées de changement de volume et de propriétés physiques et mécaniques, produisent, dans les couches superficielles, des contraintes internes et modifient l'endurance du système. C'est ainsi que la formation de martensite dans une matrice austénitique abaisse l'endurance à la fatigue thermique. De façon générale, les modifications de structures se produisant au cours des cycles vont modifier dans un sens ou dans l'autre l'endurance selon leur effet sur la ductilité du matériau.

III. Bilans.

Même si la dilatation thermique est parfois mise à profit comme avec le thermomètre mais également avec les bilames pour mesurer la température, contrôler une installation ou encore pour protéger des dispositifs électriques, les contraintes internes générées par les variations de température sont la plupart du temps néfastes. Des solutions sont alors

**«Gestion des risques industriels »****NEWS 58 - Mai 2022**

recherchées pour compenser ses effets qui existent aussi bien en milieu naturel dans le génie civil que dans le monde industriel.

Nous avons pu constater qu'il existait de nombreux problèmes associés aux phénomènes de dilatation /rétreint :

- les rails qui ne sont pas soudés les uns contre les autres sont alors taillés à leurs extrémités en biais ou possèdent des joints de dilatation éclissés
- les deux extrémités d'un pont ne sont pas scellées dans la maçonnerie mais reposent sur des galets de roulement.
- entre les bâtiments existent des joints de dilatation, lorsque des conduites sont soumises à des échauffements importants, il faut prévoir des raccords souples en forme de U (col de cygne).
- dans une installation de chauffage central ou dans le circuit de refroidissement du moteur d'une voiture, il faut prévoir un vase d'expansion.
- pour un gaz, on peut avoir risque d'explosion (bouteille de gaz au soleil, aérosol jeté dans un feu)

Ils existent de nombreuses astuces pour lutter contre les phénomènes de dilatation : les joints de dilatation, des accommodations géométriques, la mise en place de contre contrainte par bridage, voire l'utilisation de matériaux métalliques à très faibles coefficient de dilatation que nous avons déjà évoqué dans le 2^{ème} article de notre saga sur les risques industriels et les conditions extrêmes.

On peut également ajouter qu'on utilise de plus en plus d'outils de simulation en conception pour prévoir le comportement d'un matériau soumis à des variations de température.

Alexandre FLEURENTIN
Expert Matériaux Métalliques & Traitements Associés

BIBLIOGRAPHIE

- [Wong 2008] J. Wong, « Analyse de l'endommagement par fatigue thermique et modélisation du comportement thermomécanique de couples disques-garnitures de type TGV », Thèse école Centrale de Lille, 29/01/2008.
- [LEVE 1988] R. Leveque, JC Saint Ignan, « La fatigue thermique de l'acier Z45CDV5 influence d'un traitement de surface », Revue Traitement Thermique N°217, 1988.
- [SUISSE XX] SuisseMontre.com, Compensation des effets des variations de température sur la marche d'une montre.

Contact : alexandre.fleurentin@metallocorner.fr - 07.81.47.10.07 - www.metallocorner.com