

ETUDE DES DISPOSITIFS
DE CONTROLE DU TYPE BI-LAME
Docum. U.S.A. (Product Engineering 8/50)

ETUDE DES DISPOSITIFS DE
CONTROLE DU TYPE " BI - METAL "

par U. Savolainen
Ingénieur à la Metals and Controls Corp.
(Product Engineering, 8/50)

Les multiples combinaisons bi-métalliques dont on dispose à l'heure actuelle permettent de réaliser l'étude de dispositifs plus économiques et de rendement meilleur. L'article ci-dessous traite des applications, étude, formules et données ou caractéristiques de divers types d'éléments thermostatiques.

—————

Dans l'étude d'un élément thermostatique destiné à être utilisé avec un thermomètre, un thermostat ou tout autre dispositif commandé par la chaleur, le problème consiste, a priori, dans la détermination du type de matériau le plus économique et dans celle de la meilleure forme à donner à l'élément pour obtenir un rendement optimum. De plus, cet élément doit présenter la caractéristique thermique -déplacement ou cambrure en fonction des variations de température- nécessaire, ou bien une combinaison des deux facteurs : déplacement et force. On choisit généralement le matériau présentant la caractéristique thermique maximum précitée, celle-ci s'appliquant sur la gamme des températures de fonctionnement. Cette méthode ne se révèle toutefois pas toujours comme étant la plus satisfaisante, car si un thermostat est appelé à fonctionner sur une gamme de températures assez étendue, il est quelquefois préférable d'utiliser un matériau à caractéristiques thermiques peu élevées. Lorsque l'élément thermostatique doit correspondre à une longueur déterminée pour une gamme de températures donnée, il est peut-être indiqué d'utiliser un matériau de faible épaisseur et présentant des caractéristiques thermiques plutôt faibles, et l'augmentation de l'épaisseur d'un élément bi-métallique peut être une solution efficace en diminuant le déplacement d'un élément à caractéristique thermique

Indépendamment des caractéristiques thermiques, il existe également d'autres facteurs tels que: corrosion (résistance à la -), conductivité thermique et résistance électrique, qui viennent exercer une certaine influence sur la détermination du choix des matériaux constitutifs et sur l'étude de l'élément thermostatique.

Un élément bi-métallique consiste en une bande laminée formée par deux alliages présentant des coefficients de dilatation thermique différents. Lorsqu'il se produit une élévation de température, l'alliage qui présente le coefficient de dilatation (appelé également expansion) le plus élevé se dilate plus que l'autre, mais comme il est accolé à ce dernier, une telle dilatation linéaire se trouve freinée et il en résulte des tensions internes qui provoquent une courbure plus ou moins marquée de l'ensemble. Lorsque la température est répartie de façon uniforme dans la bi-lame, la courbure résultante aura la forme d'un arc de cercle.

Pour une variation donnée de température, la courbure d'une bi-lame dépend des divers facteurs suivants: différence des coefficients de dilatation ($\alpha_2 - \alpha_1$); rapport de l'épaisseur des alliages (h_1 / h_2); et enfin du rapport des modules d'élasticité des deux alliages (E_1 / E_2). La figure 1 en fournit un schéma explicatif et donne la formule permettant le calcul du rayon de la courbure. En supposant que l'épaisseur de chacun des alliages constituant la bi-lame soit équivalent, c'est-à-dire que $h_1 = h_2$, et que les modules d'élasticité soient également de même valeur ($E_1 = E_2$), dans ce cas $m = 1$, et $n = 1$, et la formule de détermination de la courbure se trouve réduite à :

$$\frac{1}{R} = \frac{3}{2} \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T}{t}$$

Cette formule démontre que la courbure est directement proportionnelle à la différence entre les coefficients de dilatation linéaire, ainsi qu'à la variation de température; par contre, elle est inversement proportionnelle à l'épaisseur totale de la bi-lame. Cette formule simplifiée peut être appliquée de façon assez courante, au

fait que la plus grande partie des dispositifs thermostatiques du type bi-lame présentent des éléments d'épaisseur équivalente. En utilisant $n = 1$, comme valeur du rapport des modules d'élasticité, on obtient une courbure maximum, et de légères variations de ce rapport ne sauraient avoir de répercussion sérieuse sur la courbure de l'élément bi-métallique.

Lorsque les valeurs des modules d'élasticité des deux alliages présentent une différence sensible, on peut apporter une modification au rapport d'épaisseur "m", de façon à compenser pour obtenir un rendement optimum. Le rapport d'épaisseur le plus favorable correspondant à divers rapports d'élasticité est indiqué par la courbe, figure 2. L'importance de ce graphique peut être soulignée par un cas dans lequel $E_1 / E_2 = 4,0$, modifiant le rapport d'épaisseur en le faisant passer de 1 à 0,35, augmente de 27% le travail exécuté par une bi-lame, pour une variation de température donnée. Ce travail est proportionnel au carré de la constante de déflexion multiplié par la constante de couple ou de force.

Les divers types de Bi-lames

Ces éléments thermostatiques peuvent être réalisés sous des formes diverses, que l'on peut représenter sous six types de base figurant au tableau I. Ce tableau présente les éléments en deux groupes différents, suivant le déplacement produit par la bi-lame: linéaire ou angulaire. Les bandes droites (a), (b) et (c) fournissent un déplacement linéaire en fonction de faibles variations de température. Les enroulements (spirales et hélicoïdaux): "e" et "f", produisant une rotation et par conséquent un déplacement angulaire, sont donc plus particulièrement indiqués pour l'utilisation dans les thermomètres et les appareils à cadran. La spirale représente la bi-lame du type le plus compact.

L'enroulement hélicoïdal double (d) s'allonge ou diminue de longueur en fonction de l'augmentation de température, suivant le sens de l'enroulement primaire et secondaire et suivant également que l'élément présentant le coefficient de dilatation thermique le plus élevé se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur. Négligeant un léger

déplacement angulaire, on peut considérer que ce type de bi-métal fournit un parfait déplacement linéaire. Par suite de la longueur importante de la bande métallique constituant l'enroulement, cet élément possède un taux élevé de caractéristique thermique (vitesse de réponse) et une résistance électrique relativement élevée. Il représente la réalisation la plus compacte, pour une longueur donnée de bande bi-métallique, permettant d'obtenir un déplacement linéaire. Le tableau I fournit les formules nécessaires pour le calcul de la déflexion et de la force, correspondantes à chaque type d'élément thermostatique. Les types (a) et (b), montés en porte-à-faux, représentent la construction la plus simple pour obtenir un déplacement linéaire; la spirale (c) représente l'élément le plus simple pour réaliser un déplacement angulaire. Pour une longueur et une section données, le type de bi-lame (a) monté en porte-à-faux, permet d'obtenir un déplacement deux fois plus élevé que celui réalisé avec le type (c), et quatre fois celui correspondant à une bi-lame en U (b). Toutefois, il y a lieu de préciser que la relation force est inversement proportionnelle au déplacement obtenu. Le travail total effectué par chacun des trois premiers types serait identique. Dans les applications où l'espace est assez limité, l'emploi de l'enroulement hélicoïdal double présente des avantages assez intéressants, puisque ce type permet une longueur plus importante de l'élément bi-métallique, il est toutefois plus compliqué au point de vue forme. Dans le cas d'applications avec déplacement angulaire, le choix entre les éléments (c) et (f) ne saurait être dicté que par les considérations d'espace disponible, puisque les formules sont identiques pour ces deux types.

T e n s i o n s i n t e r n e s

La courbure que présente un élément bi-lame soumis à la chaleur est la résultante des tensions internes créées par la dilatation thermique d'un élément, freiné par l'autre. En plus, on peut rencontrer également des contraintes résultant de charges mécaniques. Ces deux facteurs doivent par conséquent être pris en considération, si l'on veut obtenir un rendement sûr et durable de l'organe. Les tensions

résiduelles imputables au procédé de fabrication utilisé : laminage, collage, martelage, traitements thermiques, ne peuvent être calculées et par conséquent, on en tiendra compte sous forme d'une valeur de contrainte admissible assez faible.

La figure 3 indique les tensions thermiques internes produites dans une bi-lame simple. Si celle-ci est chauffée de façon uniforme et s'il n'existe pas de restriction à la dilatation, sa déformation sera d'une valeur correspondante à celle que l'on obtient avec la formule du tableau I (c). La figure 3 (A) indique l'importance et la distribution de ces tensions internes. S'il y a restriction totale à la dilatation de la bi-lame, comme indiqué en figure 3 (B), les tensions internes se trouvent modifiées suivant les indications portées. Avec un dispositif thermostatique monté en porte-à-faux, freiné mécaniquement à l'extrémité libre, la tension interne maximum se situe près du support, voir figure 3 (C). Il est à remarquer que l'importance de la tension au plan de joint est identique dans les deux cas.

Une bande bi-lame en porte-à-faux, de section régulière n'est pas d'un bon rendement, puisqu'elle n'est soumise à un maximum de contraintes qu'à son extrémité assujettie. C'est pourquoi une bi-lame légèrement conique permet d'obtenir, avec un volume égal de métal thermostatique, une force de contact 33% plus élevée alors que les contraintes diminuent de 43%. Au point de vue économie, ce type donne également de meilleurs résultats, en raison de la distribution uniforme des contraintes sur toute la longueur. Un autre avantage que présente les bi-lames coniques réside dans leur aptitude à diminuer les vibrations du fait que la masse est concentrée plus près du support.

Les tensions résultant de charges mécaniques peuvent être calculées en considérant la bi-lame comme un matériau simple ou isotropique et en utilisant les formules courantes. Au point de vue théorique, ceci n'est peut-être pas absolument exact, mais on s'en sert généralement pour toutes applications pratiques. Les modules et valeurs pour les différentes combinaisons bi-métalliques et qui figurent au tableau III, ont été déterminés expérimentalement et peuvent être utilisés dans toute application. Puisque la contrainte à laquelle un élément bi-lame peut être soumis, sans qu'il en résulte

une déformation permanente est fonction de la température et de certains facteurs antérieurs résultant du laminage, formage, traitements thermiques, etc..., il est nécessaire d'utiliser des facteurs de sécurité élevés pour le calcul des contraintes admissibles. Ces valeurs figurent au tableau II.

Force exercée par rapport à la déflexion

Les éléments thermostatiques sont utilisés suivant trois méthodes principales: (1) avec déflexion libre, sans contrainte; (2) force exercée, avec contrainte totale; (3) combinaison des deux méthodes précédentes, force et déflexion étant déterminées. Les formules du tableau I peuvent être utilisées pour le calcul des deux premiers cas (1) et (2); le cas (3) nécessitant quelques explications complémentaires.

La variation de température étant le facteur déterminatif de la déflexion ou force, on peut l'utiliser pour la solution du problème dans lequel la déflexion et la force se trouvent impliquées en même temps. On peut y arriver en considérant qu'une partie de la variation de température s'applique à la déflexion, et que le reste est utilisé pour créer la pression. Toute fraction quelconque de la température, ou plutôt de la variation, peut être affectée à l'un ou à l'autre, la dimension de l'élément thermostatique dépendant des proportions utilisées. Toutefois, pour obtenir la meilleure conception et un rendement maximum, il serait indiqué d'utiliser 50% de la variation de température pour obtenir la déflexion, l'autre moitié servant à obtenir la force nécessaire.

Thermostats électriques

On fabrique une quantité sans cesse accrue de dispositifs tels que: relais thermiques, interrupteurs, dispositifs de protection des moteurs contre les surcharges, etc... dans lesquels la chaleur produite par le passage d'un courant électrique à travers un élément en matériau thermostatique fait fonctionner le dispositif. Ces applications nécessitent toute une variété de matériaux thermo-

couvrant une gamme étendue de résistances électriques. Auparavant, tous ces dispositifs étaient exécutés avec le même type de bi-métal, les caractéristiques nécessaires de fonctionnement étant obtenues en variant la forme et les dimensions de la bi-lame. Les fabricants ont préféré produire des interrupteurs en série, ceux-ci étant de mêmes dimensions, mais constitués par des matériaux divers. A cet effet, on a étudié une série de matériaux thermostatiques permettant de contrôler la puissance par paliers uniformes, des valeurs inférieures aux valeurs supérieures.

Les caractéristiques thermiques d'un courant électrique peuvent s'exprimer par :

$$H = \frac{r i^2 t}{4.18}$$

formule dans laquelle :

H = calories

t = élévation de température, °F

i = intensité, ampères

t = temps, secondes

L'augmentation de température (en négligeant les pertes thermiques) d'une résistance s'exprime par la formule suivante :

$$T = \frac{0.43 r i^2 t}{M S}$$

dans laquelle :

T = élévation de température, °F

M = masse, en grammes

S = chaleur spécifique

Il est à remarquer que l'effet calorifique est proportionnel à i^2 qui correspond à l'intensité homologuée d'un interrupteur, et r correspondant à la résistance électrique d'un matériau thermostatique utilisé. Sur toute une série d'interrupteurs, l'effet calorifique, proportionnel à i^2 , doit présenter une valeur constante pour un temps de déclenchement uniforme. En conséquence, pour un élément

bi-métallique donné, la série des matériaux thermostatiques doit, au point de vue résistance électrique, varier suivant le carré de l'intensité nominale de l'interrupteur. La formule suivante est utile pour l'étude d'une série d'interrupteurs, puisque après avoir déterminé expérimentalement le type de matériau à utiliser pour une opération, on peut calculer les autres de façon approximative par la formule:

$$I^2 R = \text{Constante}$$

dans laquelle:

I = Intensité nominale de l'interrupteur

R = résistance du matériau thermostatique.

Cette formule est également intéressante pour déterminer si la conception, ou dessin, de la série d'interrupteurs correspond bien à l'utilisation optimum de la gamme des résistances électriques des matériaux dont on dispose. La valeur d'homologation la plus élevée devrait utiliser le matériau présentant la résistance la plus faible et vice-versa.

Avant la venue de séries spéciales, la gamme des résistances électriques des matériaux thermostatiques pouvait se classer comme suit:

Métal thermostatique	Résistance électrique à 75°F (24°C) Ohms par cir.mil ft
W.....	90
X.....	95
Y.....	345
Z.....	500

Les matériaux thermostatiques spéciaux étudiés pour correspondre à ces caractéristiques ont été basés sur des métaux thermostatiques standard, tel que le type "Z" du tableau ci-dessus. On a obtenu une variation de résistance en y incorporant une couche d'épaisseur variable, composée d'un troisième métal à faible résistance, ce qui a permis de couvrir la gamme de 125 à 470 Ohms/circ.mil



de 20 à 100 ohms par cmf utilisait pour cette troisième couche, des alliages de cuivre à haute conductivité. La résistance d'un tel élément peut être aisément calculée, si l'on considère les trois couches comme un circuit parallèle:

$$\frac{x}{r_1} + \frac{y}{r_2} + \frac{z}{r_3} = \frac{100}{R}$$

formule dans laquelle:

x, y, z = épaisseur des éléments constitutants, exprimée en % de l'épaisseur totale des trois.

r_1, r_2, r_3 = résistance des trois éléments

R = résistance de l'ensemble, en ohms par cir mil ft.

Les courbes du graphique 4 indiquent la résistance électrique en fonction de la température pour un certain nombre de métaux thermostatiques, dont les résistances à 75°F (24°C) couvrent la gamme de 20 à 850 ohms/cir mil ft. Cette indication - donnée de la résistance en fonction de la température - est importante pour les travaux d'études, du fait qu'elle fournit les éléments suivants: 1° la résistance à la température de fonctionnement. 2° le taux d'accroissement en fonction de l'augmentation de température (coefficient de résistance) et 3° la résistance à température ambiante.

Caractéristiques importantes des Alliages

Dans le choix des organes métalliques d'un thermostat il y a lieu de ne pas perdre de vue divers facteurs, si l'on veut obtenir un appareil précis, économique et d'excellent rendement. Premièrement, puisque le taux de la caractéristique thermique de l'organe est proportionnel à la différence entre les coefficients de dilatation des deux composants, on doit choisir des matériaux présentant des caractéristiques de dilatation maxi. et mini., c'est-à-dire l'un, très élevé, l'autre très bas. Le taux de variation des dilatations doit également être tel qu'il permette d'obtenir la linéarité nécessaire ou la déviation nécessaire de celle-ci, dans le déplacement résultant de la variation thermique et ceci sur toute la gamme des températures de fonctionnement.



On utilise généralement une bi-lame présentant un coefficient de dilatation constant; quoique pour certaines applications, on fait appel à des coefficients de dilatation variables pour obtenir le déplacement nécessaire.

Le tableau III présente un état des matériaux bi-métalliques les plus typiques. On y trouvera également les données nécessaires pour la solution des formules de calcul de la force et de la déflexion, qui figurent au tableau I. Comme les valeurs de flexibilité de même que les constantes qui figurent dans ce tableau s'appliquent à une gamme de températures de 50 à 200°F (10 à 93°C), il est indispensable d'avoir des données complémentaires pour les températures supérieures, et à cet effet, on utilisera les courbes du graphique 5.

Mesure de la Caractéristique thermique

Cette caractéristique, ou "flexitivité" suivant son appellation dans les normes ASTM, constitue un des plus importants facteurs dans les bi-lames. On peut la définir comme " la variation de courbure de l'axe longitudinal de l'élément, par unité de variation de température, par unité d'épaisseur. Elle est donnée par la formule de la figure 6. Si l'élément bi-lame est absolument rectiligne initialement, c'est-à-dire si $I / R_1 = 0$, la formule se réduit à:

$$\text{Flexitivité, } F = \frac{\left(\frac{I}{R} \right) t}{\Delta T}$$

On a aujourd'hui la possibilité d'obtenir des bi-lames possédant presque toutes les caractéristiques nécessaires, et les indications particulières peuvent être obtenues chez le fabricant de bi-métaux. Néanmoins, les données du tableau III sont celles qui s'appliquent aux alliages les plus importants.

Après détermination du type de matériau à utiliser, il y a lieu de définir la forme de la bi-lame, de sorte que son déplacement corresponde exactement au fonctionnement que l'on en attend et qu'il puisse s'adapter dans l'espace disponible.

Tolérances de Fabrication

Dans le calcul des dimensions des éléments bi-lames, on peut utiliser des valeurs d'épaisseurs très diverses. Pour les facilités de calcul, le tableau IV fournit les tolérances de fabrication applicables.

Figure 1 - Le rayon de courbure d'un élément bi-métal, constitué par une bande droite et étroite, se calcule aisément par la formule suivante :

$$\frac{1}{R} = \frac{6 (\alpha_2 - \alpha_1) (\Delta T) (1+m)^2}{t [3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn})]}$$

dans laquelle :

R = rayon de courbure

α_1 = coefficient inférieur de dilatation linéaire, pouces/pouces/°F

α_2 = Supérieur

ΔT = variation de température, °F

$m = \frac{h_1}{h_2}$, rapport d'épaisseur des alliages

t = épaisseur totale de l'élément, pouces

$n = \frac{E_1}{E_2}$, rapport des modules d'élasticité

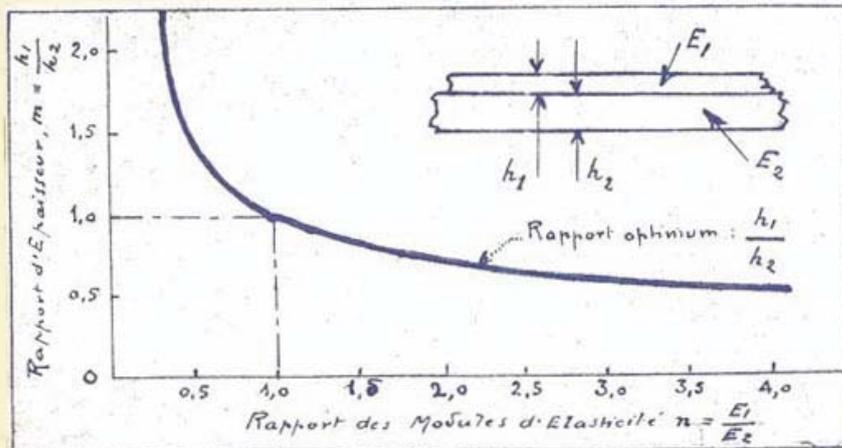
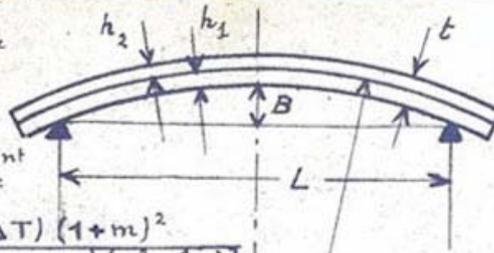


Figure 2
Il y a lieu de modifier l'épaisseur des alliages constitutifs d'un élément bi-métal, lorsque les modules d'élasticité présentent des différences importantes. La courbe indique les variations d'épaisseur à adopter, en fonction des variations du rapport des modules d'élasticité.

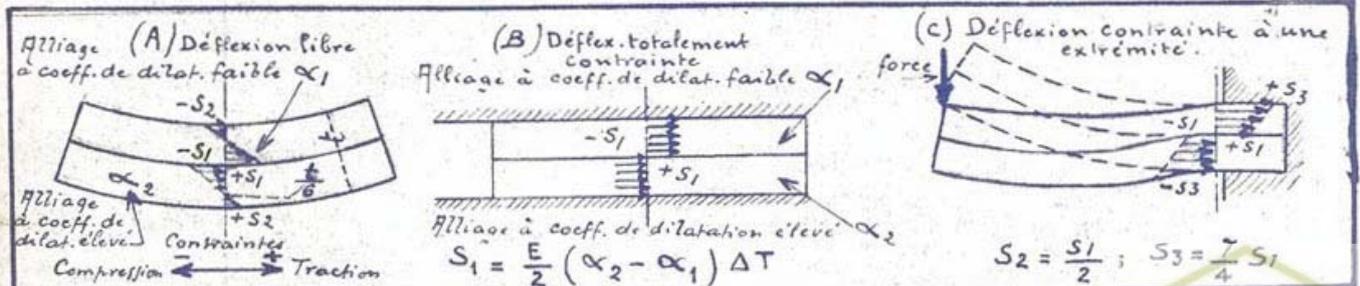


Figure 3 - Répartition des Tensions internes et la répercussion exercée sur l'élevation de température, la différence entre les coefficients de dilatation et les contraintes à la déflexion : (A, bande sans contrainte, présente un arc régulier de courbure ; B : contraintes totales ; C : contraintes à l'extrémité.

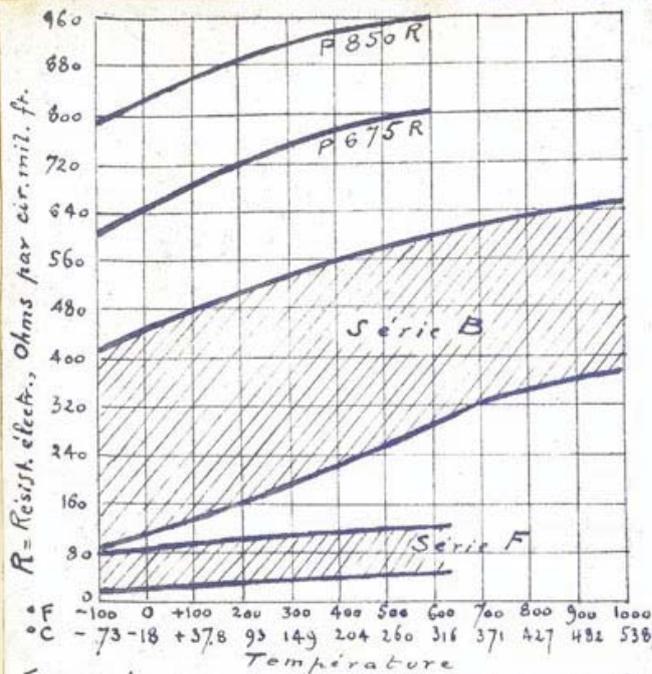


Fig. 4.- Le choix d'un Bi-Métal se trouve simplifié dans les Applications électriques, par une gamme étendue de résistances électriques qui peuvent être utilisées sur une échelle importante de températures.

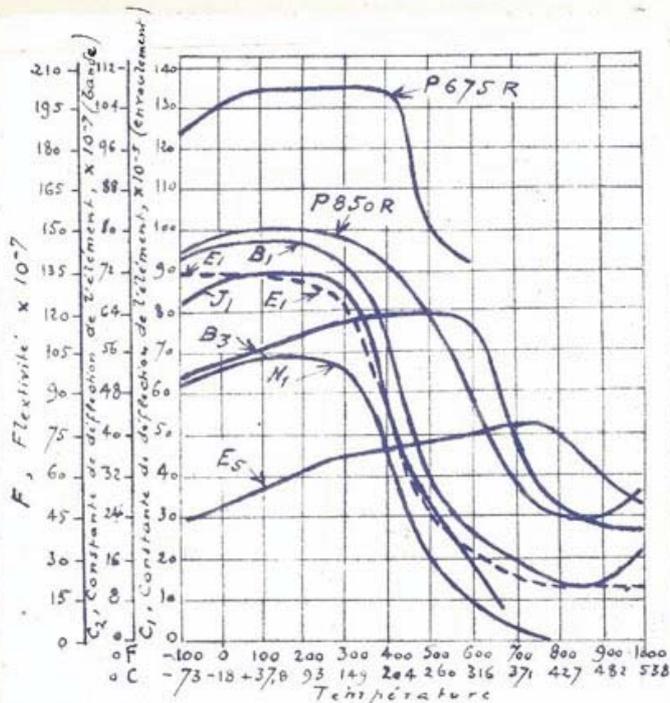
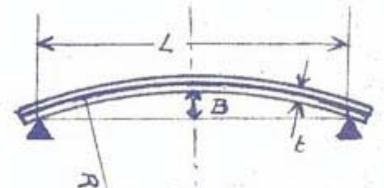


Figure 5.- Le choix d'un bi-métal est basé d'après ses caractéristiques de réaction en condition de température de fonctionnement. Les courbes ci-dessus indiquent les constantes de réaction thermique instantanées pour divers bi-métalliques.



$$F = \frac{\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) t}{\Delta T}$$

$F =$ flexibilité (caract. de réaction therm.)
 $R_1 =$ courbure initiale, pouces
 $R_2 =$ courbure secondaire, à la suite d'une variation de température, ΔT
 $\Delta T =$ variation de température, $^{\circ}\text{F}$

La courbure peut être déterminée par

$$\frac{1}{R} = \frac{8B}{L^2 + 4Bt + 4B^2}, \text{ où,}$$

$L =$ longueur de l'élément, pouces
 $B =$ déflexion de l'élément, pouces
 $t =$ épaisseur, pouces

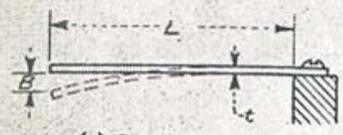
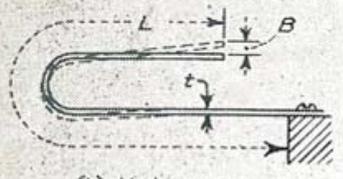
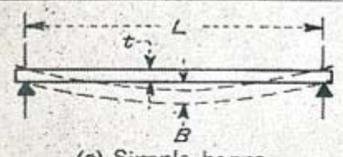
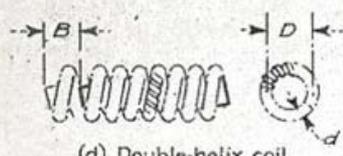
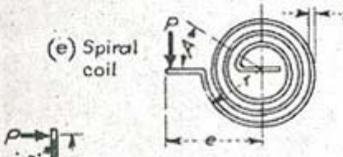
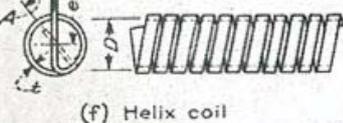
Figure 6

La "flexibilité" ou caractéristique de réaction thermique se détermine en mesurant la déflexion d'un élément bi-métal soumis à une variation de température.



ULTIMHEAT®
UNIVERSITY MUSEUM

TABLE 1. - Formules pour la détermination de la force, déflexion et contraintes d'un élément thermostatique du type BI-MÉTAL

Voir table III pour la valeur spécifique des constantes	Déflexion libre sans restriction	Force restreinte	Rapport $\frac{P}{B}$	Contrainte
DEPLACEMENT LINÉAIRE				
 <p>(a) Cantilever strip</p>	$B = \frac{c_2(T_2 - T_1)L^2}{t}$	$P = \frac{b_2(T_2 - T_1)wt^2}{L}$	$\frac{P}{B} = \frac{a_2 wt^3}{L^3}$	$S = \frac{6PL}{wt^2}$
 <p>(b) U-shape</p>	$B = \frac{c_2(T_2 - T_1)L^2}{2t}$	$P = \frac{2b_2(T_2 - T_1)wt^2}{L}$	$\frac{P}{B} = \frac{4a_2 wt^3}{L^3}$	$S = \frac{3PL}{wt^2}$
 <p>(c) Simple beam</p>	$B = \frac{c_2(T_2 - T_1)L^2}{4t}$	$P = \frac{4b_2(T_2 - T_1)wt^2}{L}$	$\frac{P}{B} = \frac{16a_2 wt^3}{L^3}$	$S = \frac{3PL}{2wt^2}$
 <p>(d) Double-helix coil</p>	$B = \frac{c_3(T_2 - T_1)LD}{t}$	$P = \frac{b_3(T_2 - T_1)wt^2}{D}$	$\frac{P}{B} = \frac{a_3 wt^3}{LD^2}$	$S = \frac{3PD(D + \frac{d}{2})}{wt^3}$
DEPLACEMENT ANGULAIRE				
 <p>(e) Spiral coil</p>	$A = \frac{c_1(T_2 - T_1)L}{t}$	$P = \frac{b_1(T_2 - T_1)wt^2}{r}$	$\frac{P}{A} = \frac{a_1 wt^3}{Lr}$	$S = \frac{6P(r+t)}{wt^2}$
 <p>(f) Helix coil</p>				

t = épaisseur, pouces
 w = largeur, pouces
 L = long. effect. de la bande, pouces
 a_1 = constante de couple, spirale et hélic.
 a_2 = de force, bande et U
 a_3 = de force, hélic. double
 b_1 = Constante couple-tempér., spirale et hélic.
 b_2 = Const. force-température, bandes et U
 b_3 = de force, enroul. hélic. double
 c_1 = Const. déflex. therm., spirale et hélic.
 c_2 = de force, bande et U
 c_3 = de force, enroul. hélic. double
 B = déflexion, bande droite, pouces
 A = rotat. angul., spir. & hélic., deg.
 P = force, livres
 e = rayon au point d'appl. de P , pouces
 $(T_2 - T_1)$ = variation de temp. °F.
 S = contrainte, livres/pouce carré
 F = flexivité, valeur stand. 50-200°F
 r = rayon de l'enroul. extérieur, pouces

TABLEAU II - Contraintes maxi. de travail p/les éléments en alliage ferreux fonctionnant à diverses températures

Température maxi. de fonctionnement		Contrainte maxi. de travail	
°F	°C	p.s.i	Kg/cm
75 =	24	25.000 =	1750
300 =	149	23.000 =	1610
500 =	260	18.000 =	1260
700 =	371	13.000 =	910
900 =	482	5.000 =	350
1000 =	538	0 à 1.000 =	70

TABLEAU III - Caractéristiques thermostatiques des principaux Bi-M.

Type	Constantes à utiliser dans les Formules du Tableau I.									Flexi-tivité F x 10 ⁻⁷	Résistance élect. r ohms/cir. mil ft	Mod. d'Élasticité E x 10 ⁶	Observations
	a ₁ x 10 ⁵	a ₂ x 10 ⁶	a ₃ x 10 ⁶	b ₁	b ₃	b ₅	c ₁ x 10 ⁻⁵	c ₂ x 10 ⁻⁷	c ₃ x 10 ⁻⁷				
A1	27.5	4.5	5.9	29.	37.5	43.5	105	83	74	156	90	18	Vitesse de déflexion élevée, mais temp. maxi. de fonction: 350°F (177°C)
B1	34.5	5.7	7.4	33.5	44.5	50.5	97.5	78	68	145	465	22.8	Vitesse de déflexion élevée, très utilisée, force élevée. } jusqu'à 1000°F (538°C) Vitesse moyenne de déflexion
B3	35.	5.75	7.5	25.	33.	38.5	72.	57.5	51.5	108	410	23.	
E1	34.5	5.7	7.4	31.	40.5	46.	90.	71.	62.5	135	500	22.8	Vitesse de déflex. élevée, utilisé à basse température - 100 à 300°F (-73 à 150°C) Très faible vitesse de déflexion. Utilisé à temp. élevées jusqu'à 1000°F (538°C) Utilisation: ferr., thermomètres.
E5	38.	6.2	8.15	15.	19.	22.	40.	31.	27.5	60	345	24.8	
G7	40.	6.55	8.6	16.5	21.5	25.	41.5	33.	29.5	62.	465	26.2	Résist. à la corrosion par vapeur, eau, humidité. Utilisation: jusqu'à 538°C Réaction thermique peu rapide
J1	29.	4.75	6.2	26.	33.5	3.9	90.	71.	63.	135.	135	19.	Usage général. Type de prix moyen. Temp. maxi: 625°F (330°C).
J7	34.	5.5	7.3	13.	16.5	19.5	38.	30.	26.5	57.	130	22.	Résiste à la corrosion. Similaire à G7 Utilisé dans les vannes de mélange (eau, vapeur)
N1	37.5	6.15	8.05	26.	33.5	3.9	69.	54.5	48.5	103	102	24.6	P/temp. élevées, jusqu'à 1000°F (538°C) P/disj. électriques instantanés, relés qu'interrupteurs.
FLOR	30.	4.9	6.45	27.	35.	40.5	90.	71.	63.	134	20	19.6	Faible résist. élect. Utilisé p/in. interrupteurs, avec courant relativement élevé.
F100R	30.	4.9	6.45	27.	35.	40.5	90.	71.	63.	134	100	19.6	
B125R	34.5	5.7	7.4	27.5	36.	41.5	80.	63.	56.	120	125	22.8	P/gamme intermédiaire et plus élevée de résist. élect. Même utilisation que pour séries "F"
B400R	34.5	5.7	7.4	33.5	44.	50.	97.5	77.5	68.	145	400	22.8	
P675R	27.	4.5	5.85	36.5	48.5	56.	135.	108	96	203	675	18.	Vitesse max. de déflex. therm. et résist. élect. élevée
P850R	27.	4.5	5.85	27.	36.	41.5	100	80	71.	150	850	18.	Résist. élect. maxi.
6010	35.	5.75	7.5	21.5	28.	32.5	62	49	43.5	93	208	23.	A utilisation spéciale. La vitesse de déflex. therm. s'inverse vers 500°F (260°C)

Note: Les constantes (b) et (c) sont basées sur une gamme de température de 50 à 200°F (10 à 93°C) tandis que les valeurs de (a) et de (r) correspondent à 70°F (21°C)

TABLEAU IV - Tolérances normalisées de fabrication concernant les Bi-M.

Épaisseur, ±		Largeur, ±	
inches ±	mm. ±	inches ±	mm. ±
0,005-0,01	0,00055	0,127-0,254	0,001
0,010-0,015	0,0004	0,254-0,381	0,001
0,015-0,02	0,0005	0,381-0,508	0,012
0,02 et +	2 1/2%	0,508 et +	2 1/2%
		Jusqu'à:	jusqu'à:
		1/2 : 0,004	12,7 : 0,101
		1/2 à 1 : 0,005	12,7-25,4 : 0,127
		1 à 3 : 0,006	25,4-76,2 : 0,152
		3 à 5 : 0,010	76,2-127 : 0,254
		5 à 8 : 0,015	127-203 : 0,380

