

Dilatations thermiques

MED 3 1122

Assistant : Yoan Cangemi, Lucie Caulier

Introduction

Tous les matériaux ne réagissent pas de la même façon face à un changement de température. Lorsque la température augmente certains vont se dilater tandis que d'autres vont se contracter. Lorsqu'un échantillon libre n'est composé que d'un seul matériau homogène, cela ne va pas poser de problème. La nouvelle dimension de l'échantillon peut se calculer en fonction de son coefficient de dilatation et du changement de température avec l'équation suivante :

$$l_{T_1} = l_{T_0} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)) \quad (1)$$

$$\Delta l = l_{T_0} \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

Dans le cas où deux matériaux en contact sont laissés libres, aucune contrainte ne va se créer et l'échantillon ne va pas changer de forme.



Figure 1 : Dilatation de deux matériaux libres ayant un coefficient de dilatation différent

Dans la vie de tous les jours, les objets que nous utilisons et/ou concevons sont souvent des assemblages de différents matériaux. Tant que les changements de température sont minimes peu de problèmes thermiques peuvent apparaître.

Si l'on prend une table de salon en verre avec un cadre en acier, on peut dire que les différences de dilation de cet assemblage sont faibles. Prenons maintenant les mêmes matériaux pour un four de cuisine : si on suppose que la température maximale du four est de 250 °C, il y aura une variation de température d'environ 230 °C. Ainsi les contraintes peuvent être assez grandes (environ 100 MPa) et pourraient atteindre la limite de résistance d'un des composants. Pour éviter ce genre de soucis, il suffit de d'assembler le verre et le métal mais sans figer l'assemblage et pour garantir l'étanchéité de notre four un joint va permettre au verre de se dilater librement.

Le travail de l'ingénieur concepteur est de prendre en compte ce genre de comportement et de choisir des matériaux qui vont se dilater dans les mêmes proportions ou trouver des astuces pour permettre aux composants de se dilater librement (comme dans le cas de notre four de cuisine) comme par exemple faire des corrections géométriques sur certaines pièces afin que lorsqu'elles sont déformées elles aient les bonnes dimensions.

Il arrive parfois que le coefficient de dilatation ne soit pas connu et on aimerait le mesurer. Il existe plusieurs méthodes pour le faire dont la mesure au laser par interférences (de type Michelson) qui est un équipement précis mais couteux et pas forcément facile d'utilisation. En pratique dans un laboratoire où les moyens sont souvent limités, il est plus facile d'utiliser la méthode du bilame.

Le bilame est un échantillon composé de deux matériaux différents collés ensemble. Dans ce cas les dilatations propres à chaque constituant ne sont pas libres et des contraintes internes apparaissent. Les différents constituants de l'échantillon vont alors se déformer (comme prévu par le coefficient de dilatation thermique) et prendre une forme d'arc de cercle dont la **courbure** dépend des épaisseurs et des modules des deux constituants du bilame. On peut utiliser la formule suivante :

$$\kappa = \frac{6E_A E_B (h_A + h_B) h_A h_B \Delta \varepsilon}{E_A^2 h_A^4 + 4E_A E_B h_A^3 h_B + 6E_A E_B h_A^2 h_B^2 + 4E_A E_B h_A h_B^3 + E_B^2 h_B^4} \quad (3)$$

Où : $\Delta \varepsilon = (\alpha_B - \alpha_A) \Delta T$
 h_a et h_b sont les hauteurs des deux matériaux
 E_a et E_b sont les modules des deux matériaux

Si les épaisseurs sont identiques on peut la simplifier comme ceci

$$\kappa = \frac{12\Delta \varepsilon}{h(E_* + 14 + 1/E_*)} \quad (4)$$

Où : $E_* = E_A / E_B$

La formule ne prend pas en compte le film de colle à l'interface mais c'est une très bonne approximation. En revanche, la mesure du rayon de courbure (n'est pas égal à la courbure) est plus délicate. Un rayon de courbure idéal tant au niveau des contraintes internes que de l'erreur de la mesure se situe entre 300 et 2000 [mm].

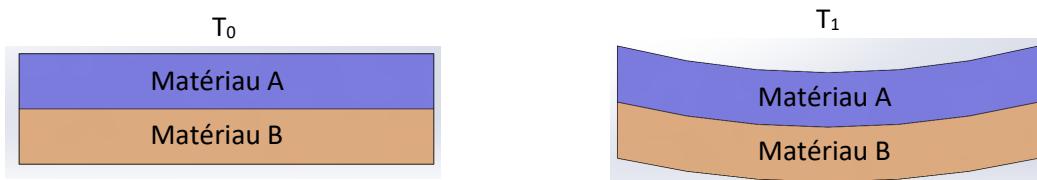


Figure 2 : Dilatation de deux matériaux non libres

Par convention, si l'échantillon "sourit" (comme sur la Figure 2), la courbure est positive ($(\alpha_B - \alpha_A) \Delta T > 0$) et si l'échantillon "pleure", elle sera négative ($(\alpha_B - \alpha_A) \Delta T < 0$). La mesure du rayon de courbure ne peut pas se faire de façon physique. La moindre force sur l'échantillon va le déformer et la mesure sera faussée. Le meilleur moyen pour être précis est la méthode optique. Il s'agit de prendre en photo l'échantillon dont on veut mesurer le rayon de courbure avec une règle et de faire une analyse d'image. En mesurant L et e on peut calculer **le rayon de courbure** :

$$R^2 - (R - e)^2 = (L/2)^2 \quad (5)$$

$$R = \frac{1}{2} * \left(L^2 / 4e + e \right) = \left| \frac{1}{\kappa} \right| \quad (6)$$

Le rayon de courbure est une valeur strictement positive tandis que la courbure peut être négative, positive ou nulle.

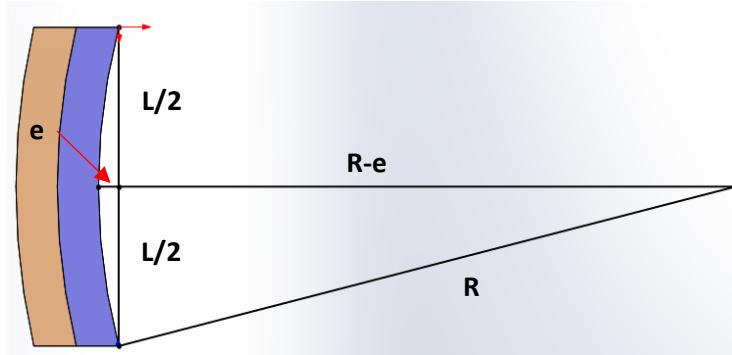


Figure 3 : Mesure du rayon de courbure

Méthode expérimentale

Lors de ce TP il vous sera demandé de :

- Mesurer le rayon de courbure de quelques échantillons
- Calculer le coefficient de dilatation de trois matériaux : un composite fibre de carbone/époxy (dans le sens des fibres et dans le sens transverse), un plastique de type polycarbonate et un métal de type acier inconnu
- Déterminer le type d'acier utilisé

Préparation des échantillons

Pour préparer un bilame il faudra préparer 2 morceaux de matériaux dont on veut comparer les coefficients de dilatation (dimension d'environ 10 [mm] X 100 [mm]) et les nettoyer à l'acétone (ou l'alcool si l'acétone dégrade le matériau).

Pour coller les échantillons, une colle bi-composant est utilisée. Ce sont des colles époxy faciles à mélanger et à appliquer grâce à un mélangeur. La colle dépend des matériaux assemblés, la fiche technique de trois colles vous sera fournie. La colle est étalée sur une des pièces puis la deuxième est placée par-dessus. Une pression est appliquée avec les mains pendant quelques secondes pour éviter que les pièces ne glissent pendant le serrage. Les échantillons sont placés entre deux plaques et mis au four à 120 °C pendant une demi-heure.

Les deux grandes faces latérales sont polies si besoin pour avoir une meilleure image et une meilleure lecture du rayon de courbure.

Mesure du rayon de courbure

Pour mesurer les rayons de courbure, il faut prendre une photo de chaque échantillon avec votre smartphone et importer cette image dans ImageJ (logiciel libre et disponible sur toutes les plateformes, nécessite Java).

1. Importer l'image dans ImageJ
2. Tirer une ligne sur l'échelle (par exemple 5 cm)
3. Dans Analyze -> Set Scale indiquer la longueur en [mm] de votre ligne dans «known distance »
4. Dessiner un rectangle de distance L et de largeur e (cf. Figure 3)
5. Vous obtiendrez les dimensions de votre rectangle dans Analyze -> Measure

La façon de dessiner le rectangle par l'opérateur a une grande importance. La façon de prendre la photo également.

Méthode optionnelle

Une autre méthode existe plus précise, mais est un peu plus longue. Il s'agit de prendre une série de points le long de l'éprouvette (plus de 20 pour une meilleure précision) et de tracer la courbe de tendance (avec son équation). Avec ImageJ, il faut utiliser l'outil « Multi-point » et ensuite cliquer sur « Measure » dans l'onglet « Analyze ». Lorsque que les coordonnées sont affichées dans « Results », il faut tracer le graphique. Une fois que la courbe est affichée dans l'onglet « Data » il faut ajouter le « Fit » avec le bon degré polynomial.

Avec ses dérivées première et seconde, la courbure dépend de x et devient alors :

$$\kappa(x) = \frac{f(x)''}{(1 + f(x)'^2)^{3/2}} \quad (7)$$

Données

Ci-dessous sont données quelques valeurs de certains matériaux utilisés pour les bilames.

Vous trouverez en Annexe 1 un diagramme d'Ashby représentant l'expansion thermique des matériaux en fonction de leur module d'Young.

	E [GPa]	$\alpha [10^{-6} \cdot K^{-1}]$	Température [°C]
Acier 1.2312	205	12.8	[20;200]
Acier Inox 1.4310	200	17.5	[20;300]
Aluminium 6082	70	23.1	[20;200]
Composite Carbone 0°	170	-	
Composite Carbone 90°	9	-	
Polycarbonate	2.3	-	[-40;149]
Caoutchouc butyl	$2.6 \cdot 10^{-3}$	-	[20;150]

Tableau 1 : Valeurs de dilations thermiques et de modules de différents matériaux

Bibliographie

1. <http://www.doitpoms.ac.uk/tplib/thermal-expansion/bimaterial-strip.php>

Exercices

Objectif : déterminez le type d'acier proposé (1.2312 ou Inox 1.4310).

Q1. Donnez 2-3 exemples de la vie courante où les contraintes thermiques posent problème et quelles sont les solutions pour accommoder ces dilatations. Donnez 1 exemple de la vie courante où les contraintes thermiques sont utilisées comme un avantage.

Q2. A quoi est dû le phénomène de dilatation thermique ? Que se passe-t-il si l'on chauffe un gaz dans une bouteille fermée et quel est son lien avec la dilatation thermique ? Expliquez.

Q3. La méthode de fabrication des bilames vous est présentée dans la partie expérimentale. Comment peut-on préparer les matériaux pour améliorer l'adhésion de la colle ? Pourquoi faut-il nettoyer les échantillons avant d'appliquer la colle ? Dans le cas du polycarbonate, que pensez-vous de l'acétone pour nettoyer l'échantillon ?

Q4. Les fiches techniques de trois colles (3M DP 190 , Loctite 9466, Loctite HY 4090) vous ont été fournies avec les échantillons. Quelle colle est selon vous adaptée pour réaliser les bilames acier/aluminium, acier/polycarbonate (polymère) et acier/caoutchouc (élastomère) ? Justifiez vos choix.

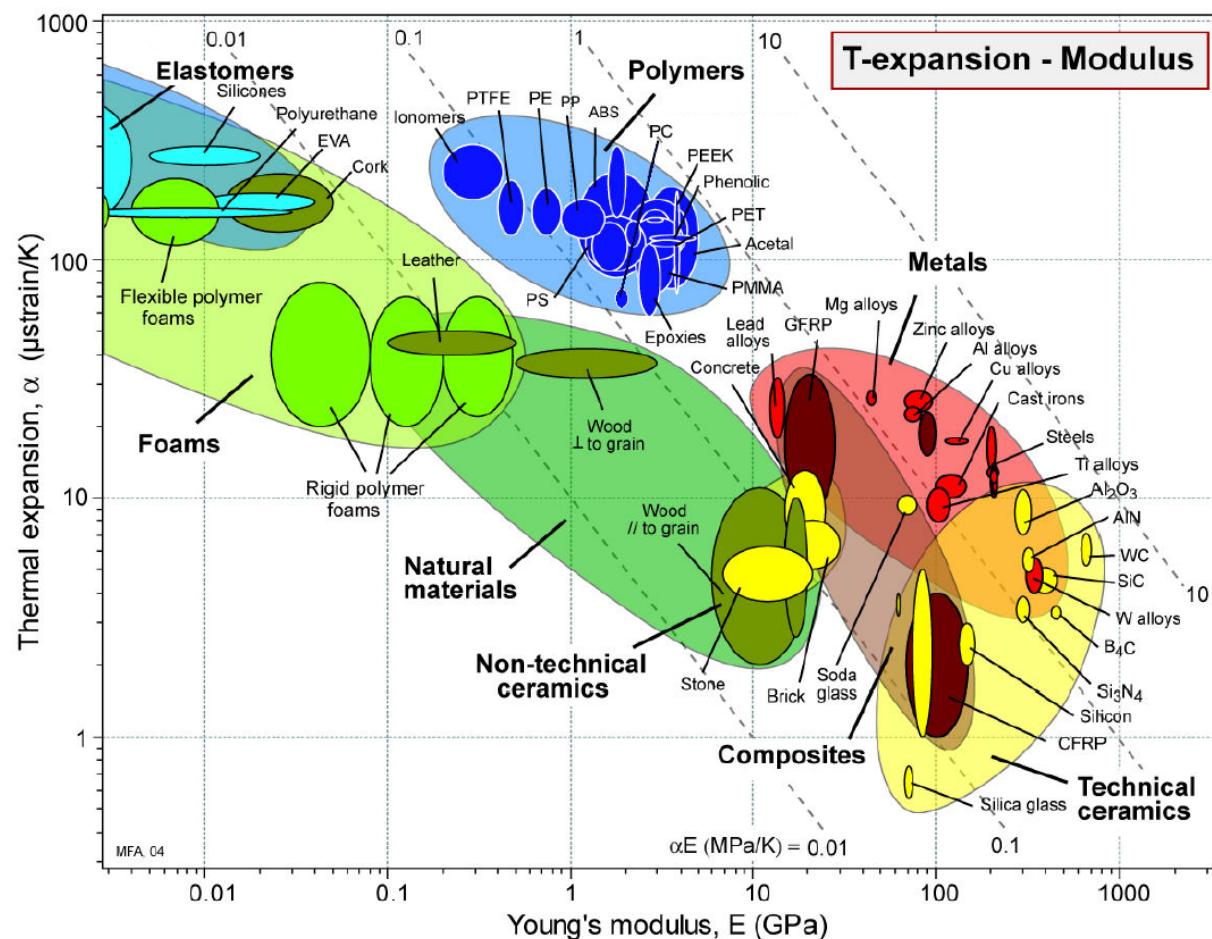
Q5. Vous disposez d'un échantillon d'acier mais vous ne savez pas quel est le grade de cet acier. Pour le déterminer, vous réalisez un bilame avec un autre matériau. Afin d'optimiser la précision des mesures, quel matériau est le plus adéquat à coller à l'acier parmi l'aluminium (métal), le polycarbonate (polymère) et le caoutchouc butyl (élastomère) ? Justifiez votre choix.

Q6. Discutez de la méthode et de la précision des mesures réalisées dans ce TP.

Dans le tableau ci-dessous remplissez les cases vides en fonction des mesures effectuées avec l'analyse d'image. (Faites bien attention au sens de courbure.)

Bilame							
Matériau 1	[mm]	Matériau 2	[mm]	N°	$\alpha_1 10^{-6} [K^{-1}]$	$\alpha_2 10^{-6} [K^{-1}]$	$\Delta T [^{\circ}C]$
Alu	0.9	Composite 0°	0.55	1	23.1		-100
				2	23.1		-100
				3	23.1		-100
					Moyenne		
Alu	0.9	Composite 90°	0.55	4	23.1		-100
				5	23.1		-100
				6	23.1		-100
					Moyenne		
Alu	0.9	Polycarbonate	1	7	23.1		-100
				8	23.1		-100
				9	23.1		-100
					Moyenne		
??? (Matériau à sélectionner)	?	Acier inconnu	0.4 ou 1	10			-100
				11			-100
				12			-100
					Moyenne		

Annexe 1 – Expansion thermique en fonction du Module d'Young



Annexe 2 – Procédure d’installation d’ImageJ

1. Téléchargez ImageJ Fiji : <https://imagej.net/Fiji/Downloads>
2. Décomptez Fiji.app
3. Lancez