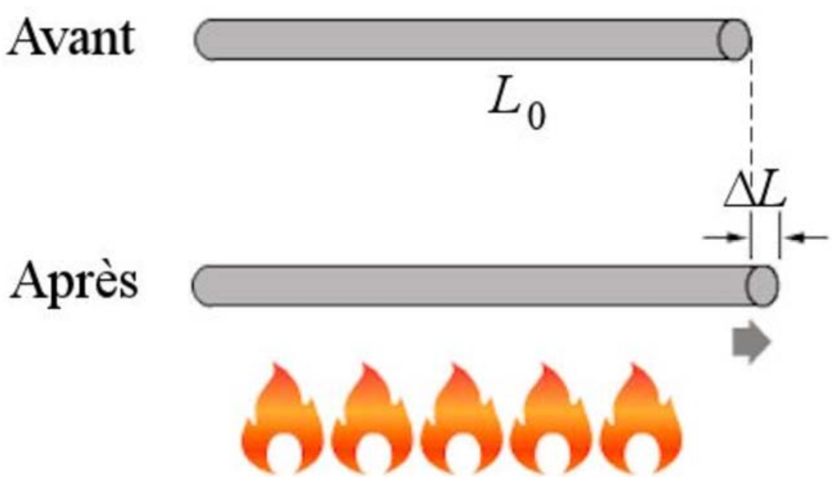
# 11 LA DILATATION THERMIQUE

## 11.1 LA DÉFORMATION UNITAIRE SELON LA VARIATION DE TEMPÉRATURE

### La formule de la dilatation thermique

Quand on change la température d'un corps, les dimensions de ce dernier changent. Généralement, les objets prennent de l'expansion quand la température augmente. Par exemple, cette tige de métal devient plus longue quand on la chauffe.




global.kyocera.com/fcworld/charact/heat/thermaexpan.html

(Notez que toutes les dimensions, dont le diamètre, augmentent aussi.)

Les études ont montré que la variation de température et la variation de longueur de l'objet sont reliées par la formule suivante

**Déformation unitaire selon la température**

$$\varepsilon = \alpha\left(T - T_0\right)$$

où $\varepsilon$ est la déformation unitaire et $\alpha$ est le coefficient de dilatation thermique. Le tableau suivant vous donne la valeur de ce coefficient pour quelques substances.

| Substance | Coefficient de dilatation thermique (°C$^{-1}$) |
|---|---|
| Acier AISI 1020 (faible % de carbone) | 1,17 x 10$^{-5}$ |
| Acier AISI 1045 (% moyen de carbone) | 1,17 x 10$^{-5}$ |
| Acier AISI 1095 (% élevé de carbone) | 1,17 x 10$^{-5}$ |
| Acier AISI 4140 | 1,17 x 10$^{-5}$ |
| Acier Inoxydable 304 (Stainless steel 304) | 1,73 x 10$^{-5}$ |
| Acier inoxydable 316L (stainless steel 316L) | 1,73 x 10$^{-5}$ |
| Fer forgé | 1,15 x 10$^{-5}$ |
| Fonte classe 20 | 1,13 x 10$^{-5}$ |
| Fonte classe 40 | 1,13 x 10$^{-5}$ |
| Fonte classe 60 | 1,13 x 10$^{-5}$ |
| Aluminium 3003-H14 | 2,32 x 10$^{-5}$ |
| Aluminium 6061-T6 | 2,36 x 10$^{-5}$ |
| Aluminium 7075-T6 | 2,36 x 10$^{-5}$ |
| Titane Alliage TI-6AL-4V | 8,6 x 10$^{-6}$ |
| Titane Pure, Grade I | 8,9 x 10$^{-6}$ |
| Cobalt-Chrome MP35N 0 % cold reduction | 1,28 x 10$^{-5}$ |
| Cuivre | 1,66 x 10$^{-5}$ |
| Laiton (70/30 brass) (260 Brass OS 15 Temper) | 1,99 x 10$^{-5}$ |
| Bois (valeur moyenne) (dur et sec, parallèle au grain) | 5,5 x 10$^{-6}$ |
| Nylon Type 66 | 1,25 x 10$^{-4}$ |
| Copolymère Acétal | |
| Polycarbonate (Acrylonitrile Butadiene Styrene = ABS) | 9,6 x 10$^{-6}$ |
| Polyméthylmetacrylate (Acrylic) (PMMA) (plexiglas) | 7,3 x 10$^{-5}$ |

*Signe de $\varepsilon$*

Avec la dilatation thermique, le signe de $\varepsilon$ est important.

Si l'objet s'allonge, $\Delta L$ et $\varepsilon$ sont positifs. C'est ce qui se passera si on chauffe l'objet. Dans ce cas, on augmente sa température, ce qui signifie que $T - T_0$ sera positif. Puisque $\alpha$ est positif, la formule nous donnera un $\varepsilon$ positif, ce qui signifie que l'objet s'allonge.

Si l'objet rapetisse, $\Delta L$ et $\varepsilon$ sont négatifs. C'est ce qui se passera si on refroidit l'objet. Dans ce cas, on diminue sa température, ce qui signifie que $T - T_0$ sera négatif. Puisque $\alpha$ est positif, la formule nous donnera un $\varepsilon$ négatif, ce qui signifie que l'objet rapetisse.

## Exemple 11.1.1

Un tuyau de cuivre a une longueur de 3 m quand il est à une température de 20 °C. Quelle sera sa longueur si on augmente sa température à 60 °C ?

La déformation unitaire sera de

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \alpha\left(T - T_0\right)\\ &= 1,66\times 10^{-5} {}^\circ C^{-1}\left(60^\circ C - 20^\circ C\right)\\ &= 6,64\times 10^{-4}\end{aligned}$$

On a donc

$$\begin{gathered}\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}\\ 6,64\times 10^{-4} = \frac{\Delta L}{3m}\\ 6,64\times 10^{-4}\cdot 3m = \frac{\Delta L}{3m}\cdot 3m\\ 6,64\times 10^{-4}\cdot 3m = \Delta L\\ \Delta L = 0,001992m\\ \Delta L = 1,992mm\end{gathered}$$

Comme le tuyau allonge de 1,992 mm, la longueur du tuyau est maintenant de 3,001992 m.

## Exemple 11.1.2

Une tige de béton a une longueur de 5 m quand la température de la tige est de 20 °C. Quelle doit être la température de la tige pour qu'elle rapetisse de 3 mm ?

Avec un $\Delta L$ de -0,003 m, la déformation unitaire est

$$\begin{gathered}\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}\\ \varepsilon = \frac{-0,003m}{5m}\\ \varepsilon = -6\times 10^{-4}\end{gathered}$$

On trouve ensuite la température avec la formule de dilatation

$$\varepsilon = \alpha (T - T_0)$$
$$-6\times10^{-4} = 1,99\times10^{-5}°C^{-1}(T - 20°C)$$

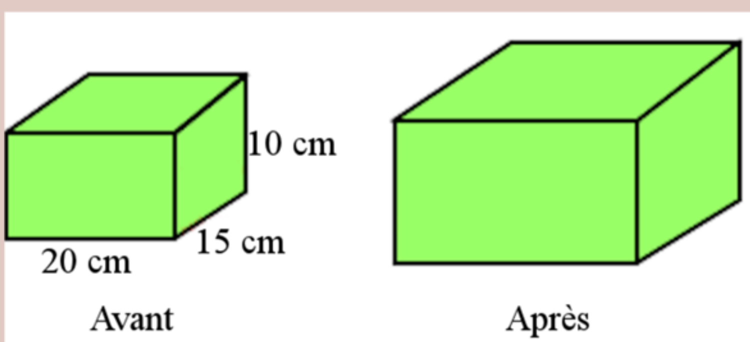
Il ne reste qu'à isoler la température

$$-6\times10^{-4} = 1,99\times10^{-5}°C^{-1}(T - 20°C)$$
$$\frac{-6\times10^{-4}}{1,99\times10^{-5}°C^{-1}} = \frac{1,99\times10^{-5}°C^{-1}(T - 20°C)}{1,99\times10^{-5}°C^{-1}}$$
$$\frac{-6\times10^{-4}}{1,99\times10^{-5}°C^{-1}} = T - 20°C$$
$$-30,15°C = T - 20°C$$
$$-30,15°C + 20°C = T - 20°C + 20°C$$
$$-30,15°C + 20°C = T$$
$$T = -10,15°C$$

L'exemple suivant nous rappelle que ce sont toutes les dimensions de l'objet qui changent avec la température.

## Exemple 11.1.3

À gauche, on peut voir les dimensions d'un objet en aluminium 7075-T6 quand il est à -10 °C. À droite, on peut voir le même objet à 100 °C. De combien a augmenté le volume de l'objet ?



www.physicstutorials.org/home/heat-temperature-and-thermal-expansion/thermal-expansion-and-contraction

Le volume à -10 °C est

$$V_0 = 20cm \times 10cm \times 15cm = 3000cm^3$$

Avec une telle variation de température, la déformation unitaire est de

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \alpha\left(T - T_0\right)\\ &= 2,36\times10^{-5}{}^\circ C^{-1}\left(100^\circ C - -10^\circ C\right)\\ &= 2,36\times10^{-5}{}^\circ C^{-1}\left(110^\circ C\right)\\ &= 2,596\times10^{-3}\end{aligned}$$

Le changement de largeur est de

$$\begin{gathered}\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}\\ 0,002596 = \frac{\Delta L}{20cm}\\ 0,002596\cdot 20cm = \frac{\Delta L}{20cm}\cdot 20cm\\ 0,002596\cdot 20cm = \Delta L\\ \Delta L = 0,05192cm\end{gathered}$$

Ce qui nous donne une nouvelle largeur de 20,05192 cm.

Le changement de hauteur est de

$$\begin{gathered}\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}\\ 0,002596 = \frac{\Delta L}{10cm}\\ 0,002596\cdot 10cm = \frac{\Delta L}{10cm}\cdot 10cm\\ 0,002596\cdot 10cm = \Delta L\\ \Delta L = 0,02596cm\end{gathered}$$

Ce qui nous donne une nouvelle largeur de 10,02596 cm.

Le changement de profondeur est de

$$\begin{gathered}\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}\\ 0,002596 = \frac{\Delta L}{15cm}\\ 0,002596\cdot 15cm = \frac{\Delta L}{15cm}\cdot 15cm\\ 0,002596\cdot 15cm = \Delta L\\ \Delta L = 0,03894cm\end{gathered}$$

Ce qui nous donne une nouvelle largeur de 15,03894 cm.

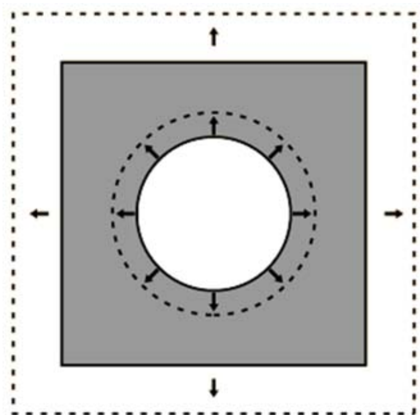
Le nouveau volume est alors de

$$V = 20,05192cm \times 10,02596cm \times 15,03894cm = 3023,4cm^3$$

L'augmentation de volume est donc de

$$\begin{aligned}\Delta V &= V - V_0 \\ &= 3023,4cm^3 - 3000cm^3 \\ &= 23,4cm^3\end{aligned}$$

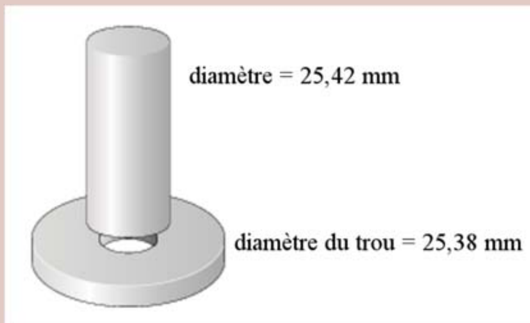
Notez que cela signifie aussi que les trous deviennent plus grands quand l'objet prend de l'expansion.



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/thexp2.html

## Exemple 11.1.4

Voici une tige et un anneau en acier inoxydable à 15 °C. Dans ce cas, la tige n'entre pas dans le trou. À quelle température doit-on chauffer l'anneau pour que la tige puisse entrer dans le trou ?




www.bbc.co.uk/bitesize/ks3/science/chemical_material_behaviour/behaviour_of_matter/revision/2/

Le diamètre du trou doit passer de 25,38 mm à 25,42 mm. La déformation unitaire de l'anneau doit donc être de

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\Delta L}{L_0}\\ &= \frac{0,04mm}{25,38mm}\\ &= 0,001576\end{aligned}$$

On trouve ensuite la température avec la formule de dilatation thermique.

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \alpha\left(T - T_0\right)\\ 0,001576 &= 1,73\times 10^{-5}{}^\circ C^{-1}\left(T - 15^\circ C\right)\end{aligned}$$

Si on isole $T$, on a

$$0,001576 = 1,73\times 10^{-5}{}^\circ C^{-1}\left(T - 15^\circ C\right)$$
$$\frac{0,001576}{1,73\times 10^{-5}{}^\circ C^{-1}} = \frac{1,73\times 10^{-5}{}^\circ C^{-1}\left(T - 15^\circ C\right)}{1,73\times 10^{-5}{}^\circ C^{-1}}$$
$$\frac{0,001576}{1,73\times 10^{-5}{}^\circ C^{-1}} = T - 15^\circ C$$
$$91,1^\circ C = T - 15^\circ C$$
$$91,1^\circ C + 15^\circ C = T - 15^\circ C + 15^\circ C$$
$$91,1^\circ C + 15^\circ C = T$$
$$T = 106,1^\circ C$$

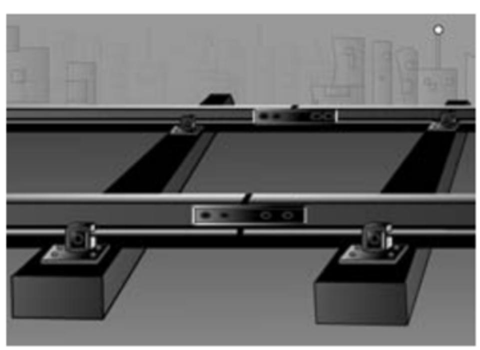
## Quelques conséquences de la dilatation thermique

Avec la température qui augmente, les objets prennent de l'expansion. Toutefois, certains objets prennent plus d'expansion que d'autres, ce qui peut occasionner quelques maux de tête aux ingénieurs.

Ainsi, les rails de chemin de fer prennent plus d'expansion que le sol, ce qui fait qu'à haute température, elles peuvent devenir trop longues, ce qui occasionnera des déformations comme celles montrées sur la figure.

www.reddit.com/r/pics/comments/ips0t/this_happened_last_weekendthermal_expansion_can/

Pour éviter de tels problèmes, on place des joints d'expansion. Ce sont des coupures dans le rail. En laissant un espace entre les rails, on laisse ainsi de la place pour que le rail puisse prendre de l'expansion quand il y a dilatation thermique.



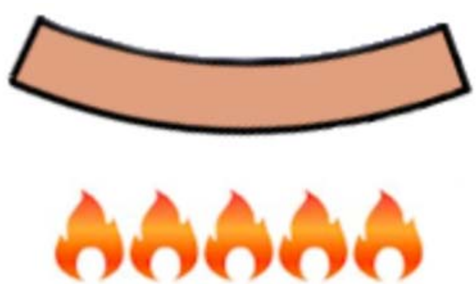
www.goalfinder.com/product.asp?productid=58

Il y a aussi de tels joints d'expansion sur les ponts. Ces joints ressemblent à ceux-ci.

www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/temperature-and-kinetic-theory-12/thermal-stresses-108/thermal-stresses-387-10943/

## Des déformations

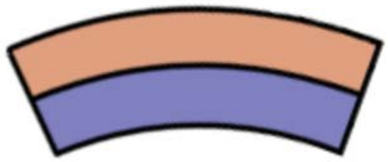
Si on chauffe seulement un côté d'un objet, il n'y aura que ce côté qui prendra de l'expansion. Cela peut amener des déformations telles qu'illustrées sur cette figure.



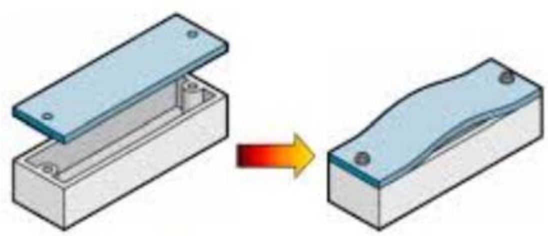
Avec un côté de l'objet qui prend de l'expansion alors que l'autre côté garde sa longueur initiale, l'objet se déforme en devenant courbé.

Il peut aussi y avoir des déformations si on chauffe un objet fait de plusieurs matériaux ayant des coefficients de dilatation thermique très différents. Prenons un exemple simple pour illustrer : imaginons qu'on a un objet fait de deux matériaux placé l'un à côté de l'autre. Supposons qu'à une certaine température, les deux matériaux ont la même longueur.

Si on chauffe et que le matériau du dessus prend plus d'expansion, on pourrait se retrouver avec la déformation suivante.

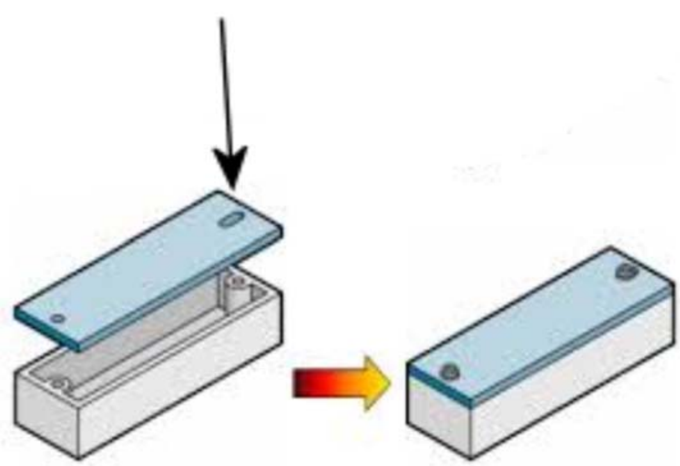


Ainsi, si le couvercle de cette boite prend plus d'expansion que la boite avec l'augmentation de température, on pourrait se retrouver avec la situation suivante.



www.mapeng.net/templets/map/Plastic-Part-Design-Checklist/thermal_expansion.html

On peut éviter cette déformation en permettant à un bout du couvercle de se déplacer un peu par rapport à la boite en laissant un trou allongé pour la vis.

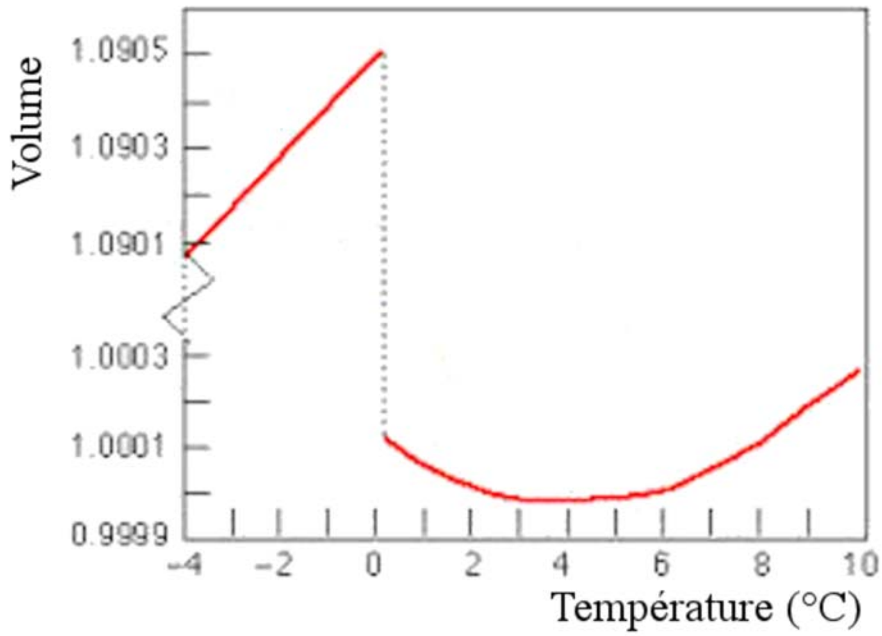


www.mapeng.net/templets/map/Plastic-Part-Design-Checklist/thermal_expansion.html

## Des exceptions

*L'eau*

La principale exception à l'expansion thermique est la glace. Voici un graphique montrant le volume de l'eau en fonction de la température.



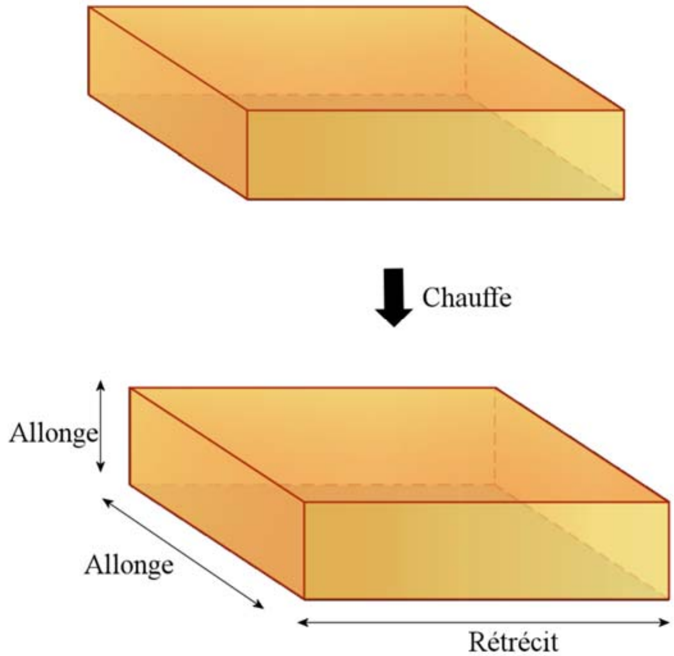

dev.physicslab.org/Document.aspx?doctype=3&filename=ThermalPhysics_ThermalExpansion.xml

Pour des températures inférieures à 0 °C et supérieures à 4 °C, on voit bien que le volume augmente avec la température, ce qui normalement ce qui arrive avec la dilatation thermique. Cependant, l'eau agit différemment pour des températures entre 0 °C et 4 °C. Dans ce cas, le volume de l'eau diminue quand la température augmente.

*Quelques plastiques*

Certains types de plastiques sont formés de longues chaines de molécules tout alignées dans une direction. Ces plastiques peuvent alors prendre de l'expansion de façon différente dans une direction (la direction d'alignement des molécules, appelée la direction longitudinale) que dans les autres directions (appelées les directions transversales). On donne alors des coefficients d'expansion différents selon la direction.

Parfois même, il peut y avoir une contraction dans une direction alors qu'il y a une contraction dans l'autre. C'est le cas entre autres du caoutchouc.




www.ck12.org/geometry/Surface-Area-of-Rectangular-Prisms/lesson/Surface-Area-of-Rectangular-Prisms/

# 11.2 LES FORCES GÉNÉRÉES PAR LA DILATION THERMIQUE

Quand un objet qui se dilate ou qui se contracte sous l'effet des variations de température est fixé entre deux supports qui l'empêche de se dilater ou de se contracter, l'objet peut exercer des forces importantes sur les supports.

Par exemple, supposons que nous avons une tige de 5 m qui entre tout juste entre deux murs séparés de 5 m.

Si on chauffe la tige, elle devrait prendre de l'expansion. Toutefois, elle ne peut le faire parce que les murs empêchent la tige de grandir. Il doit donc y avoir une force de compression qui vient annuler la dilatation thermique. Cette force est faite par les murs. Il y a une telle force de compression parce qu'en grandissant, la tige pousse sur les murs. Or, selon la troisième loi de Newton, les murs poussent sur la tige si la tige pousse sur les murs. C'est cette force faite par les murs sur la tige qui feront une compression qui viendra exactement annuler la dilatation thermique pour que la tige garde la même longueur.

La tige garde alors la même longueur parce que la déformation unitaire créée par la dilatation thermique sera annulée par la déformation unitaire générée par la force de compression de la tige.

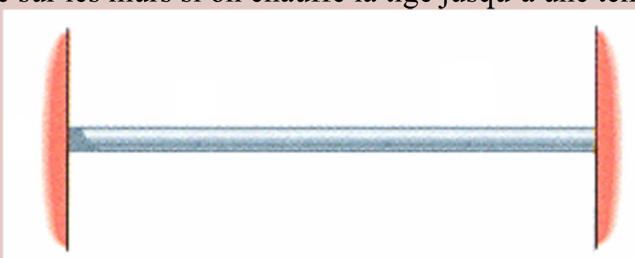
$$0 = \varepsilon_{thermique} + \varepsilon_{forces}$$
$$\varepsilon_{forces} = -\varepsilon_{thermique}$$

Dans cette formule, les déformations unitaires sont positives si l'objet grandit (force de tension ou dilatation thermique) et elles sont négatives si l'objet rétrécit (force de compression ou contraction thermique).

Cela voudra dire que les contraintes et les forces de tension sont positives, alors que les contraintes et les forces de compression sont négatives.

## Exemple 11.2.1

Voici une tige d'aluminium 3003 H-14 de 5 m de long (à 0 °C) fixée entre deux murs distants de 5 m l'un de l'autre. La tige est une tige circulaire ayant un rayon de 2 cm. Quelle sera la force exercée sur les murs si on chauffe la tige jusqu'à une température de 50 °C ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/two-cylindrical-rods-identical-except-one-thermal-conductivity-k1-thermal-conductivity-k2--q1070578

La déformation unitaire due à la dilatation thermique est

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \alpha\left(T - T_0\right)\\ &= 2,32\times10^{-5}{}^\circ C^{-1}\left(50^\circ C - 0^\circ C\right)\\ &= 0,00116\end{aligned}$$

Une telle déformation unitaire voudrait dire que la tige s'allongerait de 5,8 mm. Puisque la tige garde la même longueur (5 m), cela signifie que la déformation unitaire faite par la dilatation thermique est annulée par la déformation unitaire faite par la compression de la tige. On doit donc appliquer une force de compression qui ferait rapetisser la tige de 5,88 mm, pour compenser l'augmentation de longueur due à la dilatation thermique. On a donc

$$0 = \varepsilon_{thermique} + \varepsilon_{forces}$$
$$\varepsilon_{forces} = -\varepsilon_{thermique}$$
$$\varepsilon_{forces} = -0,00116$$

On peut alors trouver la contrainte de tension

$$\varepsilon_{forces} = \frac{\sigma}{E}$$
$$-0,00116 = \frac{\sigma}{69 \times 10^9 Pa}$$
$$-0,00116 \cdot 69 \times 10^9 Pa = \frac{\sigma}{69 \times 10^9 Pa} \cdot 69 \times 10^9 Pa$$
$$-0,00116 \cdot 69 \times 10^9 Pa = \sigma$$
$$\sigma = -8,004 \times 10^7 Pa$$

Une valeur négative de la contrainte signifie ici qu'on est en compression.
On peut finalement trouver la force avec la formule de la contrainte.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$-8,004 \times 10^8 Pa = \frac{F}{A}$$

Puisque la section de la tige est un cercle, l'aire de la section est

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= \pi \cdot (0,01m)^2 \\ &= 3,1416 \times 10^{-4} m^2 \end{aligned}$$

On a donc

$$-8,004 \times 10^7 Pa = \frac{F}{3,1416 \times 10^{-4} m^2}$$
$$-8,004 \times 10^7 Pa \cdot 3,1416 \times 10^{-4} m^2 = \frac{F}{3,1416 \times 10^{-4} m^2} \cdot 3,1416 \times 10^{-4} m^2$$
$$-8,004 \times 10^7 Pa \cdot 3,1416 \times 10^{-4} m^2 = F$$
$$F = -25145 N$$

Une valeur négative signifie encore qu'on a affaire à une force de compression.

## Exemple 11.2.2

Une tige en aluminium 6061-T6 est fixée solidement entre deux murs distants de 5 m. À 25 °C, la tige n'exerce aucune force sur les murs. Jusqu'à quelle température doit-on refroidir la tige pour qu'elle casse sous l'effet de la tension faite par les murs ?

www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/two-cylindrical-rods-identical-except-one-thermal-conductivity-k1-thermal-conductivity-k2--q1070578

En refroidissant, la tige cherche à se contracter. Les murs vont alors tirer sur la tige pour la mettre en tension pour compenser cette contraction thermique. La tige va casser si la contrainte de tension dépasse la contrainte ultime de tension de l'aluminium.

Pour ce type d'aluminium, la contrainte ultime de tension est de 310 MPa. À une telle contrainte, la déformation unitaire de la tige serait de

$$\begin{aligned}\varepsilon_{forces} &= \frac{\sigma}{E} \\ &= \frac{310\times 10^6 Pa}{69\times 10^9 Pa} \\ &= 0,00449\end{aligned}$$

Si la tige est demeurée à la même longueur, c'est que cette déformation unitaire due à la tension est venue annuler la déformation unitaire due à la contraction thermique.

$$\begin{aligned}0 &= \varepsilon_{thermique} + \varepsilon_{forces} \\ \varepsilon_{thermique} &= -\varepsilon_{forces} \\ \varepsilon_{thermique} &= -0,00449\end{aligned}$$

On a donc

$$\begin{aligned}\varepsilon_{thermique} &= \alpha\left(T - T_0\right) \\ -0,00449 &= 2,36\times 10^{-5}{}^{\circ}C^{-1}\left(T - 25^{\circ}C\right)\end{aligned}$$

On peut finalement trouver la température de la tige.

$$-0,00449 = 2,36\times 10^{-5}{}^{\circ}C^{-1}\left(T-25^{\circ}C\right)$$

$$\frac{-0,00449}{2,36\times 10^{-5}{}^{\circ}C^{-1}} = \frac{2,36\times 10^{-5}{}^{\circ}C^{-1}\left(T-25^{\circ}C\right)}{2,36\times 10^{-5}{}^{\circ}C^{-1}}$$

$$\frac{-0,00449}{2,36\times 10^{-5}{}^{\circ}C^{-1}} = T-25^{\circ}C$$

$$-190,4^{\circ}C = T-25^{\circ}C$$

$$-190,4^{\circ}C+25^{\circ}C = T-25^{\circ}C+25^{\circ}C$$

$$-190,4^{\circ}C+25^{\circ}C = T$$

$$T = -165,4^{\circ}C$$

# RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

**Déformation unitaire selon la température**

$$\varepsilon = \alpha\left(T-T_0\right)$$

# EXERCICES

## 11.1 La déformation unitaire selon la variation de température

1. Quelle est la variation de longueur d'une tige d'aluminium 3003-H14 de 80 centimètres de long si l'on augmente sa température de 20ºC?

2. De combien faut-il chauffer une tige d'acier de 30 centimètres pour qu'elle s'allonge de 0,1 mm ?

3. Une tige de 40 cm s'allonge de 0,0179 mm quand la température augmente de 15ºC. Quel est son coefficient de dilatation thermique ?

4. Un nouvel alliage se contracte de 0,0045 % quand on le refroidit de 10ºC. Quel est son coefficient de dilatation thermique ?

5. Une partie d'une prothèse est faite en aluminium 7075-T6. S'il faut que cette partie, de 60 cm de long à 20 °C, demeure en tout temps entre 59,95 cm et 60,06 cm, quel est l'intervalle de températures dans lequel elle peut être utilisée ?

6. Le polypropylène alvéolaire (PPA) est un plastique ayant un coefficient de dilatation thermique longitudinal (dans la direction principale du plastique) de $20 \times 10^{-6}$ °C$^{-1}$ et un coefficient de dilatation thermique transversal (dans une direction perpendiculaire) de $60 \times 10^{-6}$ °C$^{-1}$. Quelles sont les nouvelles dimensions d'une plaque de PPA de 5,25 cm par 5,25 cm si l'on élève sa température de 52 °C ?

## 11.2 Les forces générées par la dilatation thermique

7. Une tige circulaire d'acier AISI 4140 est fixée à ses extrémités de manière à garder sa longueur constante lorsque la température varie.

   a) Quelle est la contrainte dans une tige de 30 cm de longueur et de 8 cm de diamètre lorsque la température diminue de 50 °C ?
   b) Cette contrainte est-elle en tension ou en compression ?
   c) Quelle force s'exerce à chaque extrémité de la tige ?
   d) La tige cassera-t-elle ?

8. Une tige circulaire d'acier AISI 4140 est fixée à ses extrémités de manière à garder sa longueur constante lorsque la température varie.

   a) Quelle est la contrainte dans une tige de 1,5 cm de longueur et de 10 cm de diamètre lorsque la température augmente de 50 °C ?
   b) Cette contrainte est-elle en tension ou en compression ?
   c) Quelle force s'exerce à chaque extrémité de la tige ?
   d) La tige cassera-t-elle ?

# RÉPONSES

## 11.1 La déformation unitaire selon la variation de température

1. 0.3712 mm
2. 28,49 °C
3. $2.98 \times 10^{-6}$ °C$^{-1}$
4. $4.50 \times 10^{-6}$ °C$^{-1}$
5. Entre -15,3 °C et 62,4 °C
6. 5,25546 cm par 5,26638 cm.

## 11.2 Les forces générées par la dilatation thermique

7. a) 121 MPa b) Tension c) 609 kN d) Non
8. a) 121 MPa b) Compression. c) 951 kN d) Non