

Propriétés mécaniques et physiques des solides

1. Propriétés mécaniques des solides, essai de traction

Principe de l'essai

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive.

Lors d'un essai de traction, une force uniaxe (dans une seule direction) est produite dans un échantillon de matériau. Cette force est provoquée par une charge extérieure appliquée à l'échantillon dans le sens de la longueur. On dit que la répartition des contraintes normales est homogène dans la section de l'échantillon.

La contrainte normale est donnée par la relation :

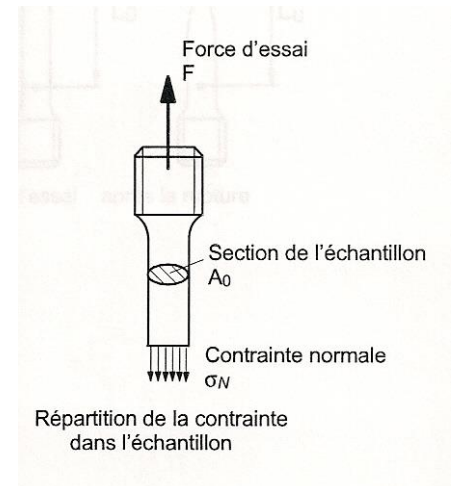
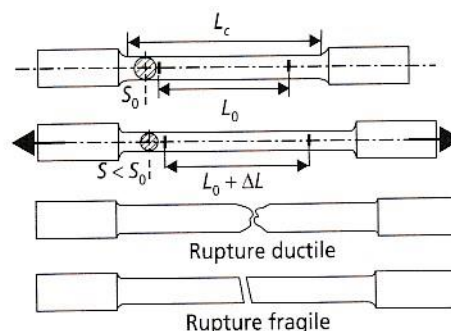
$$\sigma_N = \frac{F}{A_0}$$

Sous cette contrainte, le matériau va s'allonger et passer de la longueur L_0 au départ à la longueur L . On en déduit la déformation par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

On obtient ainsi une courbe intrinsèque du matériau, indépendante des dimensions de l'éprouvette utilisée.

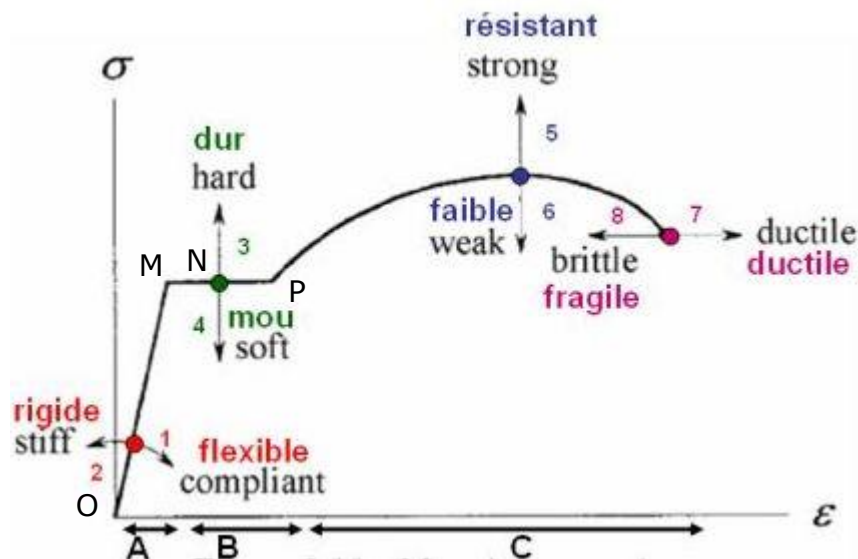
Le schéma suivant représente l'évolution d'une éprouvette de traction cylindrique au cours de l'essai :



Courbe de traction

L'essai de traction est un essai très utilisé dans l'industrie. Il permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau. Une courbe de traction représente la contrainte en fonction de l'allongement $\sigma=f(\varepsilon)$. Elle comporte en général trois domaines :

- Un domaine élastique (A)
- Un domaine plastique (B) + (C) :
(B) déformation plastique permanente
(C) déformation plastique homogène.



Quand la courbe de traction se déplace dans le sens de la flèche :

1. Le matériau est dit : flexible
2. Le matériau est dit : rigide
3. Le matériau est dit : dur
4. Le matériau est dit : mou
5. Le matériau est dit : résistant
6. Le matériau est dit : faible
7. Le matériau est dit : ductile
8. Le matériau est dit : fragile

Questions

1. Où se trouve sur le schéma la limite de contrainte élastique σ_{limite} ?
2. Si on étire le matériau jusqu'au premier point, le point rouge, que se passe-t-il lorsqu'on relâche la contrainte ?
3. Quelle est l'unité d'une contrainte ?
4. Si on étire le matériau jusqu'au deuxième point, le point vert ou N, que se passe-t-il lorsqu'on relâche la contrainte ?
5. Dans ce cas, repérer sur le schéma l'allongement résiduel sur le schéma.

6. Que se passe-t-il au cours d'une nouvelle remise en charge ?
7. En quel point apparaît le phénomène de striction (réduction de section localisée) ?
8. Où se trouve sur le schéma le point de rupture E ?

Domaine élastique et module d'Young

En deçà de la limite élastique, il y a proportionnalité entre contrainte et déformation. La loi de Hooke caractérise cette propriété et s'écrit :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

E est appelé le module de Young, son unité est le N/mm² ou Pa (Pascal). Généralement on utilise le Giga Pascal GPa. 1GPa=10⁹ Pa.

Quelques valeurs de E :

	E (GPa)	ρ (kg/m ³)
Béton E20	20	2400
Bois (contreplaqué)	5,5	800
Acier au carbone	210	7800
Aluminium (7075)	72	2810

Un matériau dont le module de Young est très élevé est dit rigide. L'acier, le diamant sont des matériaux très rigides, l'aluminium ou le plomb le sont moins. Les matières plastiques sont généralement peu rigides.

Origine physique de l'élasticité

Si on rapproche deux atomes initialement très loin l'un de l'autre, ils vont dans un premier temps subir une force d'attraction (forces de Van der Waals) et s'attirent mutuellement, de plus en plus fort quand leur distance diminue. Puis lorsqu'ils sont très proches, la situation s'inverse et la répulsion augmente très vite s'ils continuent de se rapprocher.

Alors, il existe une distance pour laquelle les deux effets se compensent et pour laquelle les atomes se trouvent dans une position d'équilibre stable. Si les deux atomes se rapprochent ou s'éloignent l'un de l'autre une force de rappel tend à les ramener dans leur position d'équilibre. Ils peuvent donc osciller autour de leur position d'équilibre et y sont toujours ramenés.

Ainsi, quand une sollicitation extérieure modérée est appliquée à un échantillon, les distances entre atomes sont modifiées et la force de rappel tend à les ramener dans leur position d'équilibre. C'est pour cela que les matériaux possèdent un

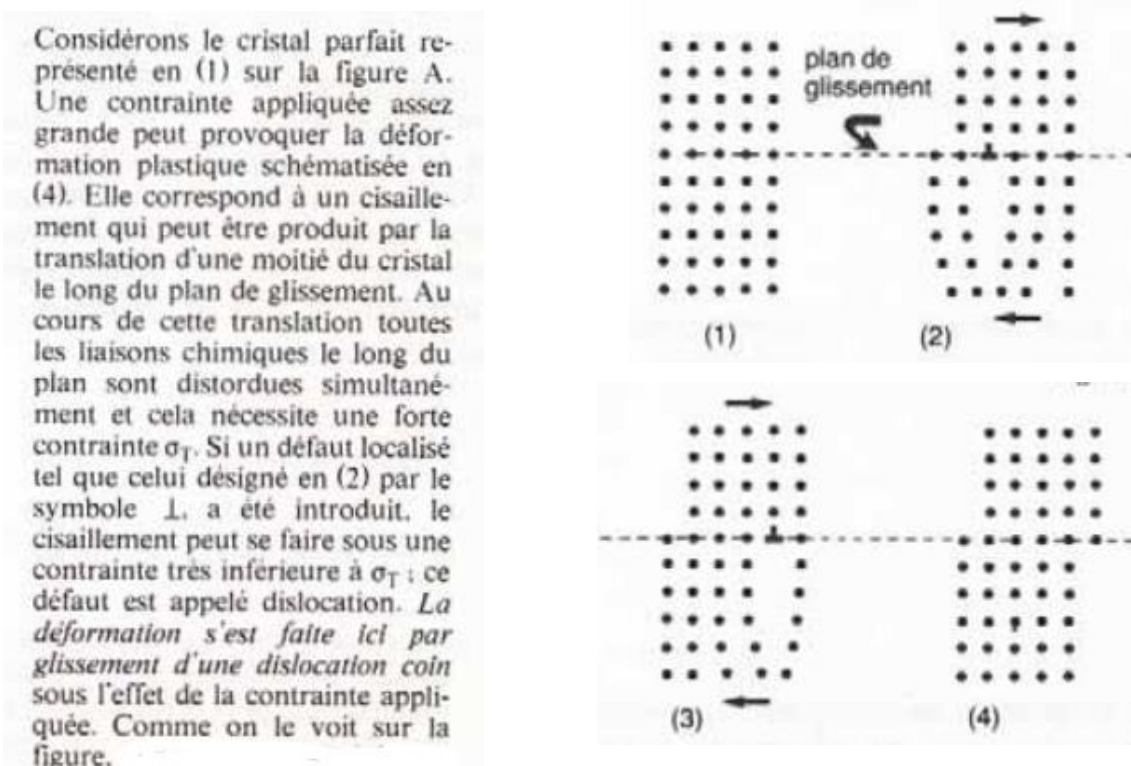
certain domaine élastique, si on relâche la contrainte, le matériau retrouve son aspect initial.

Domaine plastique des solides

Au-delà de la limite élastique, lorsqu'un matériau est soumis à une force, il ne retrouve pas sa forme lors de l'arrêt de la force. On parle de déformation plastique. La forme du solide est modifiée de façon permanente. Ce phénomène est utilisé pour la mise en forme de matériaux.

Voici un exemple de déformation plastique par glissement extrait du site :

<http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/Archives-1975-1989/1984/1984%20-47-51.pdf>



2. Propriétés physiques des solides

Propriétés électriques

Certains matériaux n'ont pas la capacité de laisser passer un courant électrique, on les appelle des isolants. D'autres au contraire, peuvent laisser passer un courant électrique on les appelle des conducteurs. Cette propriété est due à la capacité des électrons présents dans le matériau de se mouvoir lorsqu'une différence de potentiel est appliquée de part et d'autre de celui-ci. Tous les matériaux ne se comportent pas de la même manière et leur aptitude à laisser passer un courant se caractérise par la grandeur appelée conductivité électrique σ ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) ou par son inverse la résistivité électrique ρ ($\Omega \cdot m$).

Elle est liée à la résistance R d'un conducteur de longueur l et de section S par la relation :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

La résistivité augmente avec la température en raison de l'augmentation de l'agitation thermique et des chocs des électrons sur les éléments du réseau. Lorsque la température s'abaisse la résistivité tend vers une valeur finie. Cependant pour certains matériaux dits supraconducteurs, la résistivité s'annule en dessous d'une température limite (quelques Kelvin).

Les valeurs de la résistivité s'étalent sur plusieurs ordres de grandeur, depuis $10^{-8} \Omega \cdot m$ pour les plus conducteurs jusqu'à $10^{17} \Omega \cdot m$ pour certains polymères.

Exercice

Pour limiter l'échauffement d'un conducteur dans lequel doit circuler un courant de 10 A, on désire limiter la résistance à $0,002 \Omega$ par mètre de conducteur. Pour du cuivre, on a $\rho_e = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.

1. Calculer la section nécessaire du fil.
2. Que se passe-t-il si la section est trop faible ? Quel est l'effet mis en jeu ?
3. Indiquer quelles peuvent être les propriétés du cuivre qui en font un bon matériau pour les fils électriques.



Remarque

Certains matériaux possèdent la propriété de se polariser sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique, on les appelle des matériaux piézoélectriques. Par exemple, dans un allume gaz, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles.

Le piézoélectrique le plus connu est le quartz, utilisé dans les montres pour créer des impulsions d'horloge.

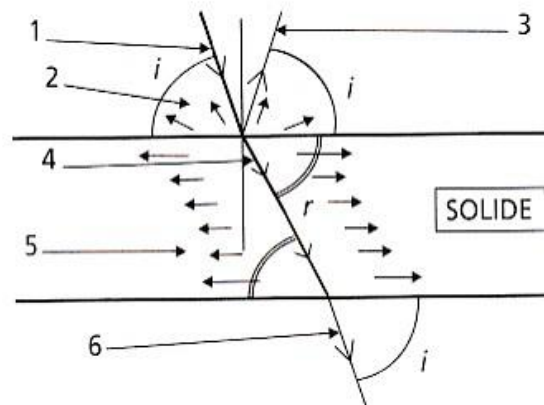


Propriétés optiques

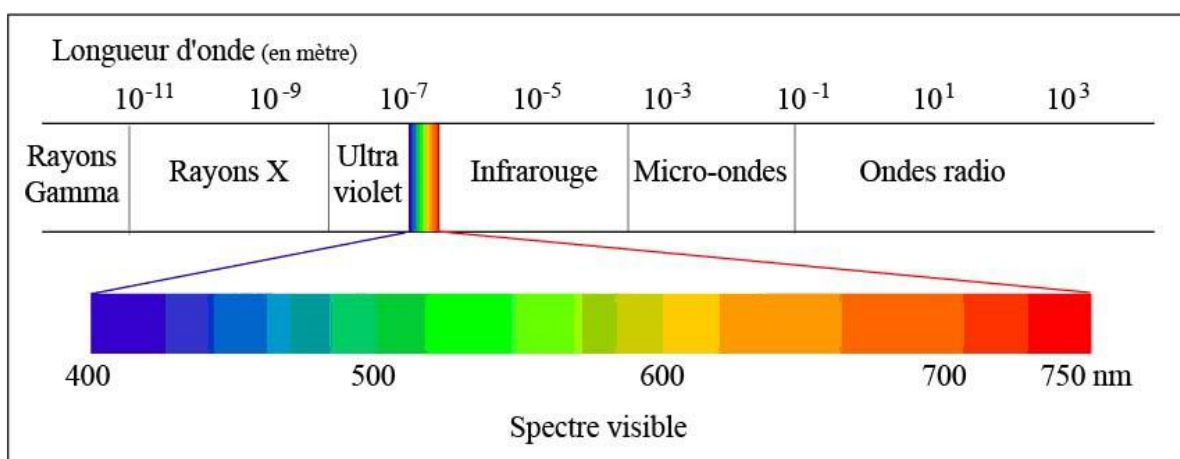
La lumière se propage en ligne droite dans les matériaux homogènes, isotropes et transparents. On peut la modéliser par un rayon, c'est-à-dire par une ligne droite. Un milieu transparent est caractérisé par un indice n qui est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière C dans le vide et de la vitesse de la lumière dans le matériau. C'est donc un nombre sans dimension :

$$n = \frac{C}{V}$$

Lorsqu'un rayon lumineux arrive sur la surface d'un matériau, l'énergie qu'il transporte peut soit être réfléchiée, diffusée, réfractée, transmise ou absorbée. Sur le schéma suivant, associer un numéro à un des phénomènes physiques précédemment cités :



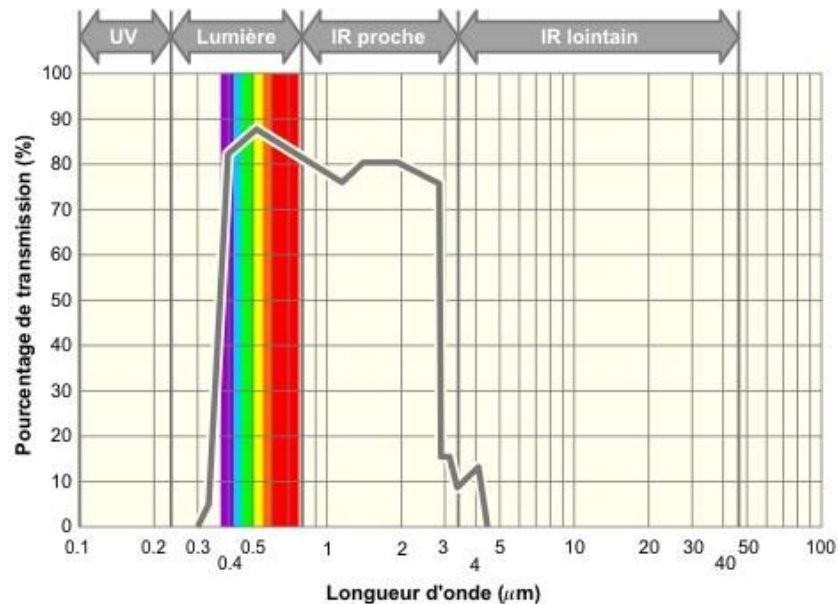
La lumière visible est un rayonnement électromagnétique périodique qui se propage dans l'espace. On caractérise un tel rayonnement par sa longueur d'onde λ exprimée en mètre :



L'interaction entre un matériau et la lumière dépend essentiellement de la nature des atomes concernés. Par exemple, les électrons des éléments métalliques absorbent tous les rayonnements électromagnétiques incidents (depuis les ondes radio jusqu'au proche ultra-violet). Ils réémettent ensuite cette énergie en la diffusant et en la réfléchissant ce qui leur donne une couleur caractéristique. Cette

interaction s'effectue complètement sur une profondeur de pénétration qui n'excède pas 0,1 μm .

Voici un autre exemple, celui du verre. Sur le graphique suivant, on peut lire le pourcentage de transmission d'un verre clair en fonction de la longueur d'onde :



1. Indiquer quelles sont les longueurs d'ondes transmises à travers ce verre.
2. Laisse-t-il passer la totalité du spectre visible ?
3. Sachant que le bronzage est dû aux UV B (entre 290 et 320 nm), est-il possible que la peau bronze derrière ce verre ?

Propriétés thermiques

Capacité thermique massique

Un matériau est capable d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer en fonction de la température du milieu avec lequel il interagit. On appelle capacité thermique massique la quantité d'énergie nécessaire pour élever, la température d'un échantillon de 1 kg, de 1 $^{\circ}\text{C}$.

On note C cette grandeur, elle s'exprime en $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

La quantité d'énergie échangée Q , en Joules, lorsqu'un matériau de masse m voit sa température varier de T_i à T_f s'écrit :

$$Q = m.C.(T_f - T_i)$$

Par exemple, l'eau a une capacité thermique massique $C=4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. On suppose que l'on porte à ébullition un volume de 2,0L d'eau initialement à 20°C.

1. Quelle est la température d'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique ?
2. Sachant que la masse volumique de l'eau est $\rho=1,0 \text{ kg/L}$, évaluer la masse d'eau à chauffer.
3. Calculer l'énergie nécessaire pour réaliser l'expérience.
4. Le chauffage est assuré par une plaque électrique qui fournit une puissance $P=2000\text{W}$ à l'eau. L'énergie est reliée à la puissance par la relation $E=P*\Delta t$. Δt est l'intervalle de temps en secondes.
Calculer le temps en minutes nécessaire pour réaliser cette expérience.
5. Dans une nouvelle expérience, on chauffe une masse 2 kg de fer de 20 à 100°C. La capacité thermique massique du fer est de $0,39 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Indiquer si la quantité d'énergie mise en jeu est plus grande ou plus petite que dans le cas de l'eau.

Dilatation thermique

Lorsque la température d'un matériau augmente, les atomes qui le constituent vibrent autour de leur position d'équilibre, on parle d'agitation thermique. On constate alors une augmentation du volume occupé par les atomes ce qui provoque une dilatation du matériau. Cette dilatation est en général proportionnelle à la variation de température.

Le coefficient de dilatation thermique linéaire α , qui s'exprime en K^{-1} , permet de calculer la longueur d'un matériau en fonction de la variation de température :

$$L=L_0.(1+\alpha.\Delta T)$$

Considérons un rail en acier profilé de 120 m de long. Supposons que celui-ci soit soumis à une amplitude thermique de $30^{\circ}C$ entre la nuit et le soleil au zénith.

Le fer a un coefficient de dilatation $\alpha=12.10^{-6} K^{-1}$.

1. Calculer la longueur du rail lorsque le soleil est au zénith.
2. En déduire l'allongement du rail.
3. Que risque-t-il de se passer pour la ligne de chemin de fer.
4. Comment remédier à ce problème ?

Exemples de joints de dilatation



Entre deux bâtiments



pour du carrelage



sur un pont

Remarque

Les solides se dilatent mais les liquides et les gaz aussi. Par exemple, introduisons de l'eau chaude à environ $80^{\circ}C$ dans une fiole jaugée de 100 mL. On la remplit précisément jusqu'au trait de jauge.

Observer ce qu'il se passe lorsque la température de l'eau diminue.



Début de l'expérience



Fin de l'expérience

Conductivité thermique

Tous les matériaux ne laissent pas passer l'énergie thermique (ou chaleur) de la même manière. Leur aptitude à laisser passer le transfert thermique de la zone la plus chaude à la zone la plus froide s'appelle la conductivité thermique, elle se note λ et s'exprime en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Par exemple, on chauffe l'extrémité commune de différents matériaux de même longueur. On place un petit morceau de cire à l'autre extrémité de chaque matériau. On observe alors la propagation du transfert thermique à travers les matériaux.



1. Qu'observe-t-on ?
2. Classer les matériaux du meilleur conducteur thermique au plus mauvais.
3. Les résultats sont-ils en accord avec le tableau proposé ?

Matériau	Coefficient de dilatation linéaire ($10^{-6}/\text{K}$)	Capacité thermique massique ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	Conductivité thermique ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)
Métaux			
Acier au carbone	10 à 15	0,48	47
Acier allié	12	0,51	13 à 48
Acier inoxydable	11 à 16	0,51	16 à 26
Aluminium	24	0,90	220 à 230
Aluminium, alliages	20 à 24	0,84	120 à 200
Cuivre	17	0,39	370
Cuivre, alliages	16 à 20	0,39	30 à 160
Étain	23	0,23	67
Fer	12	0,44	81
Fonte	10 à 11	0,27 à 0,46	44 à 53
Magnésium et alliages	25 à 27	1,02	80 à 156
Nickel	13	0,44	92
Nickel, alliages	10 à 19	0,48 à 0,50	11 à 30
Titane	8	0,52	22
Zinc	40	0,39	116