

Matériaux



Samir BOUCHARIT

Un ingénieur matériaux ?



Nous répondons aux questions suivantes :

Qu'est ce qu'un matériau ?

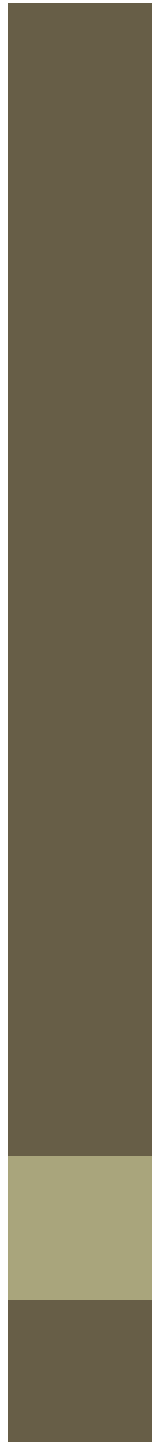
Quelles sont les catégories de matériaux ?

Quelles utilités pour les matériaux ?

Quelles sont les caractéristiques recherchées d'un matériau pour chaque utilisation ?

Sommaire

1. Qu'est ce qu'un matériau ?
2. Familles des matériaux
3. Choix des matériaux
4. Propriétés des matériaux



Qu'est ce qu'un matériau ?

Le terme « matériau » désigne la substance dont sont faits les objets manufacturés.

Il est plus restreint que le terme « matière », qui désigne les liquides, les gaz et les solides en général.

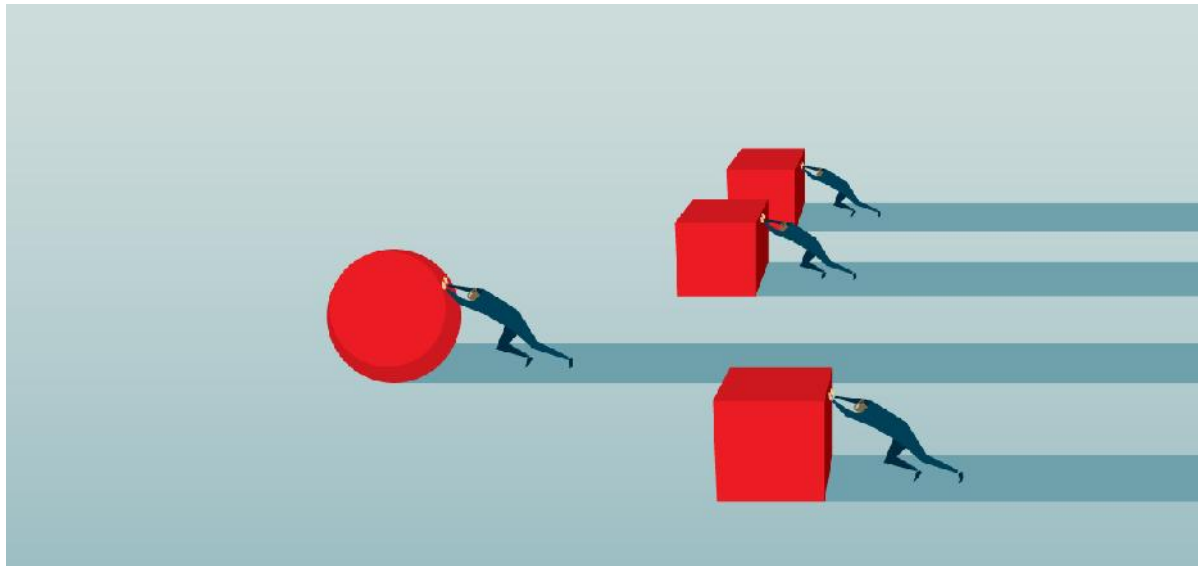
La science des matériaux étudie la matière qui constitue les objets : métaux, polymères, céramiques, ...

Qu'est ce qu'un matériau ?

- *La science des matériaux est par essence pluridisciplinaire : physique, chimie, physico-chimie, mécanique, ...*
- *Elle est au cœur de beaucoup des grandes révolutions techniques : en génie mécanique, électronique, nanosciences, nanotechnologies, ...*

Qu'est ce qu'un matériau ?

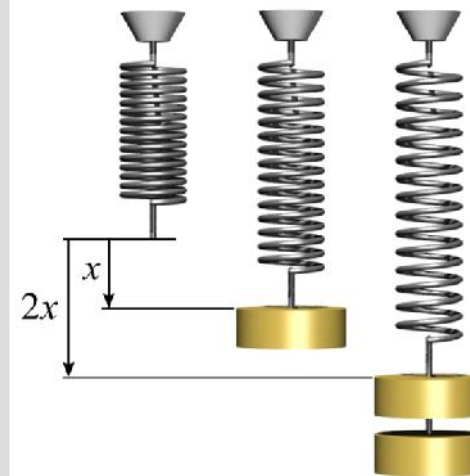
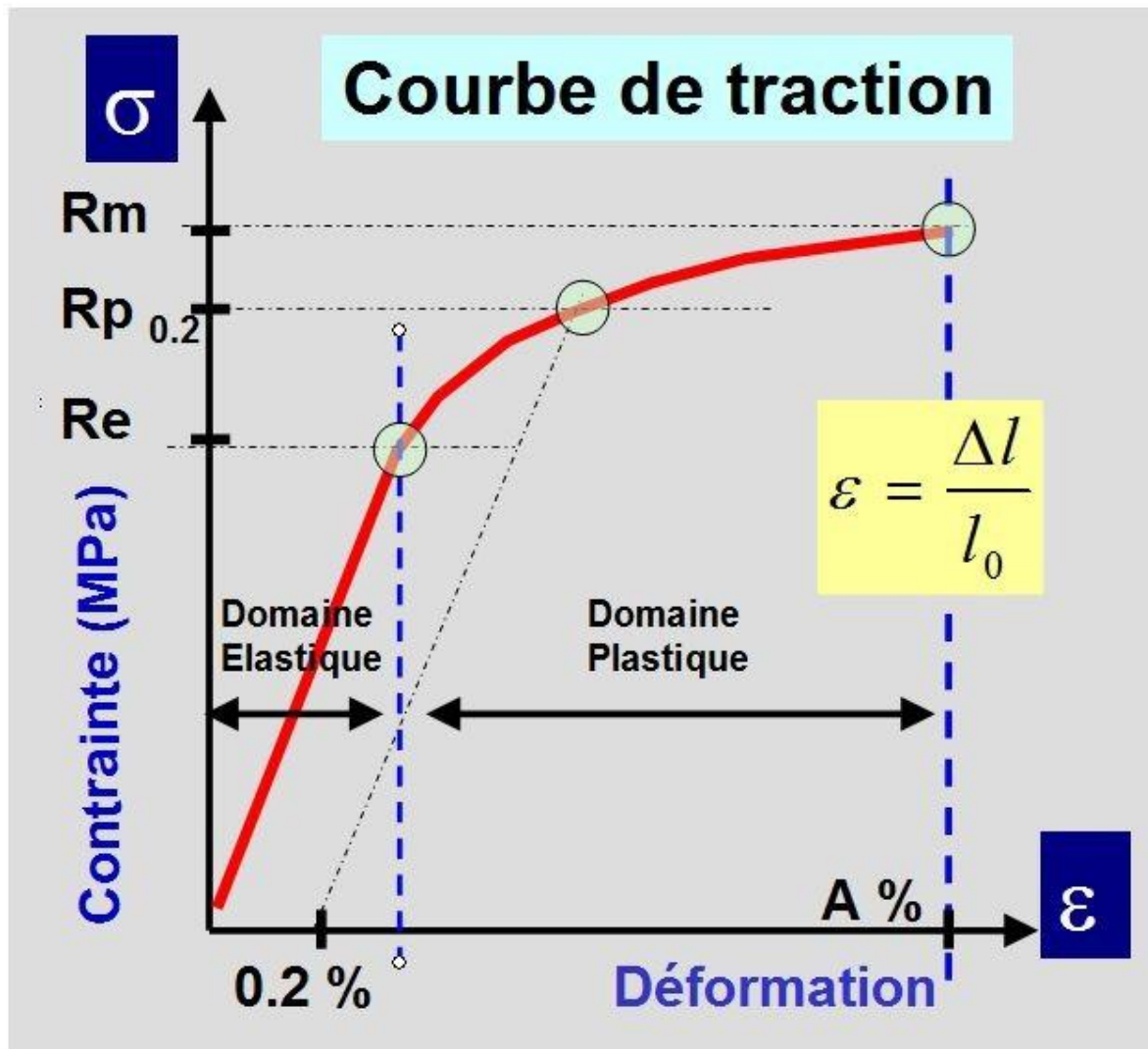
- Depuis l'âge de pierre, les matériaux font partie du quotidien et de l'histoire de l'Homme
- Au fil du temps, ils sont devenus plus résistants, plus intelligents



Qu'est ce qu'un matériau ?

- Les matériaux sont différenciés selon leur **provenance** (issus d'êtres vivants par exemple) et leurs **propriétés**, qu'elles soient mécaniques (flexibilité ou rigidité...), chimiques (perméabilité ou imperméabilité à l'eau...) ou encore physiques (conductivité de l'électricité ou de la chaleur...).

Qu'est ce qu'un matériau ?



Qu'est ce qu'un matériau ?

- Loi de hook

Loi de Hooke

Déformation dans le domaine élastique, allongement

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

: Contrainte en N/mm².

E : module d'élasticité longitudinale ou module de Young (MPa)

ε : allongement unitaire exprimé en %, ou l est la longueur de la poutre sous charge et l_0 la longueur initiale. ε est utilisable en traction-compression pour révéler l'allongement ou la diminution de la longueur de la pièce soumis à des efforts extérieurs.

Exemple de moduel de young :

Aciers: 200 000 MPa Nanotubes de carbone: 1 100 000MPa.

Fontes: 100 000 MPa Fibre de carbone HR : 240 000 MPa.

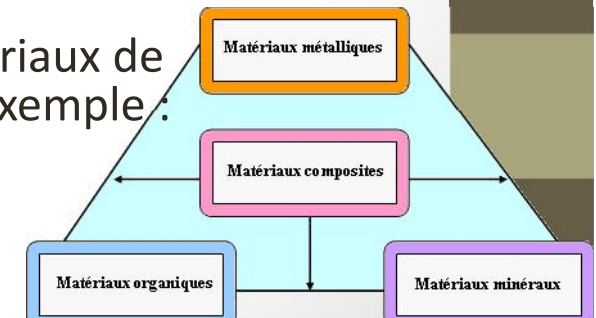
Alliages de cuivre: 80 000 MPa Nylon : 5 000 MPa.

Alliages d'aluminium: 70 000 MPa Or : 78 000 MPa.

Familles des matériaux

Ils sont généralement classés en **différentes grandes familles** :

- **Les matériaux métalliques** qui regroupent les métaux : fer, cuivre, bronze et les alliages métalliques : acier inoxydable
- **Les matériaux organiques** qui sont issus d'êtres vivants, plantes ou animaux (bois, coton, papier...)
- **Les matériaux minéraux ou inorganiques** : roche, céramique, verre.
- **Les matériaux plastiques**, qui, en général proviennent de combustibles dits fossiles se trouvant dans le sol, comme le pétrole par exemple.
- **Les matériaux composites** qui combinent plusieurs matériaux de famille différente pour obtenir de multiples propriétés (exemple : fibre de carbone).



Familles des matériaux

- Les principales caractéristiques des différentes familles de matériaux

MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

- Résistance mécanique
- Résistance aux torsions
- Conductivité électrique et thermique

MATÉRIAUX ORGANIQUES

- Facilité de mise en forme
- Biodégradable

MATÉRIAUX COMPOSITES

Les propriétés des matériaux composites dépendent des matériaux rentrant dans sa composition et des moyens de réalisation

Exemple :

Le béton armé combine la résistance mécanique du béton (minéral) à la capacité de résistance aux torsions de l'acier (métallique).

MATÉRIAUX MINÉRAUX OU INORGANIQUES

- Rigidité
- Dureté
- Résistance mécanique
- Fragilité aux torsions
- Résistance chimique

MATÉRIAUX PLASTIQUES

- Facilité de mise en forme
- Elasticité

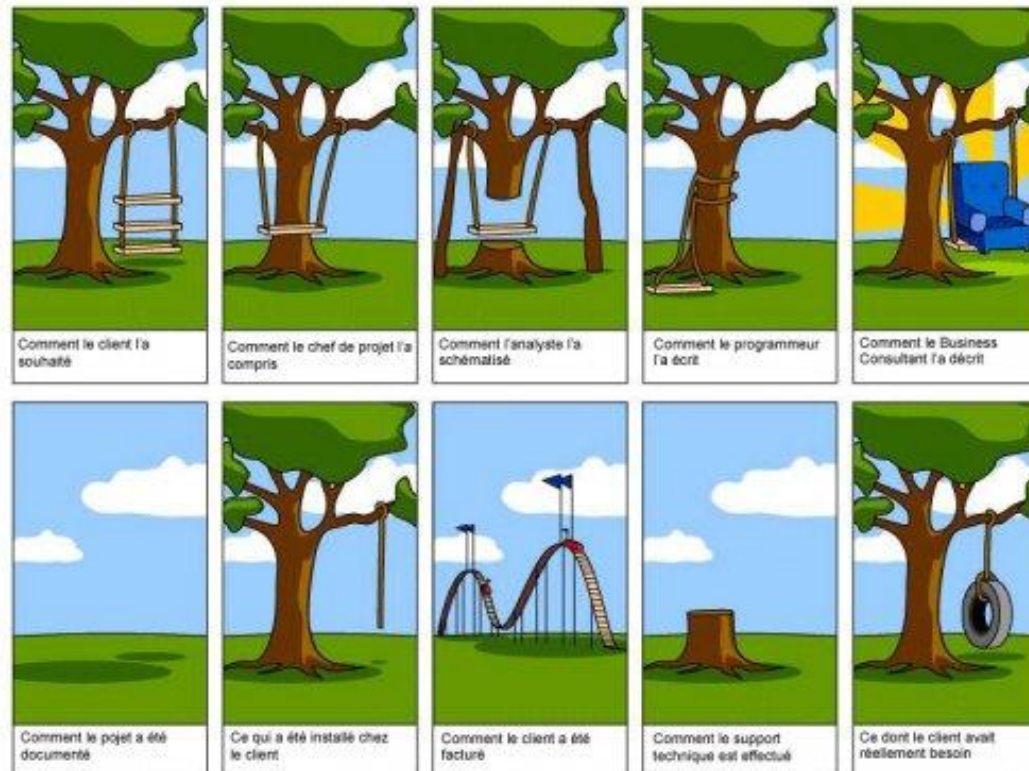
Choix des matériaux

- Le choix des matériaux qui constituent un objet dépend des besoins et propriétés voulues pour l'objet.
- La combinaison de certains matériaux permet de combiner plusieurs propriétés. Ainsi, le béton armé, constitué de béton et d'acier, permet de réaliser des constructions qui pourront supporter d'importantes charges (caractéristique du béton) mais aussi des efforts de traction (caractéristique de l'acier).



Choix des matériaux

- Le choix implique en particulier des notions de gestion de projet, le choix des solutions technologiques et donc du matériau faisant intervenir, outre des critères techniques, des critères économiques (prix, disponibilité).



Choix des matériaux

- Remplir le tableau ci-dessous avec les symboles
- -- : pas du tout ou très peu) ;
- - : peu) ;
- + : beaucoup ;
- ++ : très.

Le choix des matériaux qui constituent un objet dépend des besoins et propriétés voulues pour l'objet.

	Métaux	Céramiques	Polymères
Rigidité			
Ductilité			
Conductivité électrique			
Conductivité thermique			
Stabilité chimique			
Impact environnemental			

Réfractaire : capacité à résister à de très hautes températures (typiquement plus de 500 °C)

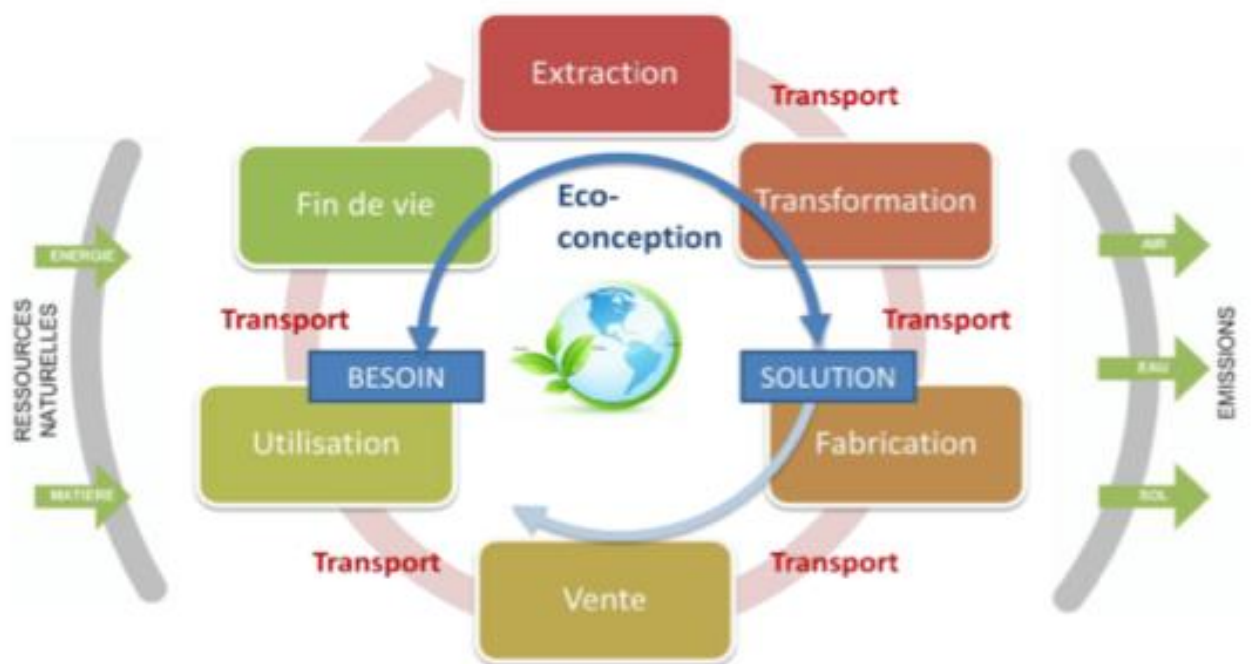
Ductilité : capacité à être mis en forme, allongé, tordu, ...

Choix des matériaux

	Métaux	Céramiques	Polymères
Rigidité	+ (rigides)	++ (très rigides)	- (souples)
Ductilité	+ (en général ductiles, voire mous)	-- (dures, fragiles)	++ variable, mais en général très ductile, ce qui permet des moulages complexes
Conductivité électrique	++ (conducteur)	-- (isolant)	-- (isolant)
Conductivité thermique	++ (conducteur)	-- (isolant et réfractaire)	- (isolant mais fond ou se dégrade)
Stabilité chimique	- (corrosion)	++ (inerte chimiquement)	+ (inerte, mais altération par l'humidité, les UV)
Impact environnemental	-- (recyclable, réparable)	- (peu recyclable, mais fabrication en général peu polluante)	++ (produits du pétrole)
Aspect	brillant (éclat métallique) lorsqu'il est poli	variable : granuleux et opaque sauf le verre et les gemmes (lisse et transparent)	transparent, translucide ; formes, couleurs et aspect variable selon les additifs et le mode de fabrication

Propriétés des matériaux

- Pour choisir un matériau, il faut d'abord s'intéresser aux fonctions que doit remplir le produit. Une fois ceci fait, il faut indiquer un critère d'adéquation : le matériau permet-il au produit de remplir la fonction ou pas ?



Propriétés des matériaux

C'est à ce critère d'adéquation que nous nous intéressons maintenant. Comme tout objectif, une fonction doit être « smart » :

- spécifique (adaptée) ;
- mesurable (quantitatif) ;
- accessible (possible) ;
- réalisable dans le temps imparti (délais de conception, d'approvisionnement, de mise en œuvre, selon les moyens disponibles).



Propriétés des matériaux

Être lourd ou léger

- La masse volumique est la masse d'une pièce divisée par son volume. Elle est désignée par la lettre grecque ρ (rhô), et s'exprime en kilogramme par mètre cube.



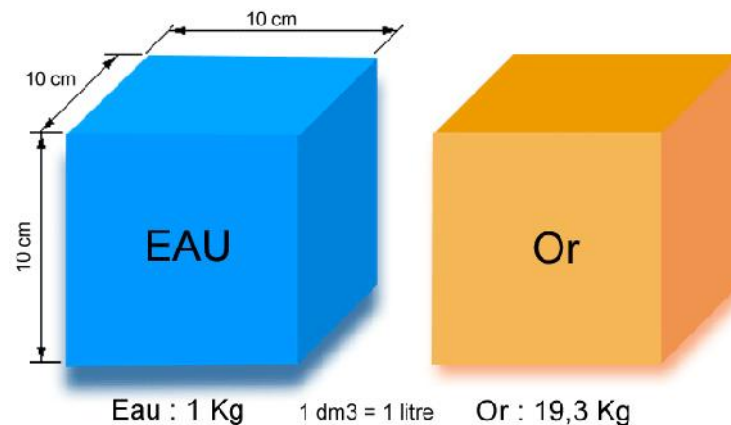
Masse volumique

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}.$$

Propriétés des matériaux

Être lourd ou léger

- La masse volumique est importante pour déterminer :
 - le dimensionnement de la structure supportant le produit (coût) ;
 - l'inertie du produit, donc la puissance des actionneurs (moteurs, vérin, ressorts,...) ;
 - le coût de transport, la capacité à être manutentionné ;
 - la vitesse de propagation des ondes mécaniques (résonance).



Propriétés des matériaux

Être lourd ou léger

- Ci-dessous quelques masses volumiques typiques pour des grandes classes de matériaux, classé du moins dense au plus dense

Matériau	ρ (kg/m ³)
Bois	450 – 1 170
Alcool	789
Huile	900
Eau	1 000
Polymères	850 – 1 410
Roches, verre, béton, céramiques	1 250 – 2 800
Métal	1 750 – 23 000

Propriétés

- MATÉRIAU CONDUCTEUR D'ÉLECTRICITÉ OU ISOLANT ?
- MATÉRIAU POUVANT ÊTRE ATTIRÉ PAR UN AIMANT ?
- MATÉRIAU PERMETTANT LA PROPAGATION DES ONDES ?
- MATÉRIAU RÉSISTANT À LA TEMPÉRATURE ?
- MATÉRIAU CONDUCTEUR DE CHALEUR OU ISOLANT ?

25 minutes de travail en groupe
Présentation de 10 minutes

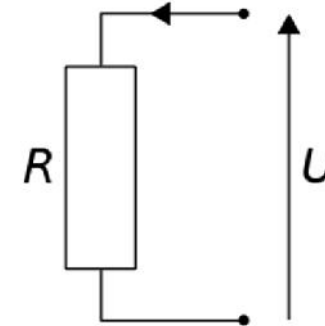
Propriétés des matériaux

Conduire l'électricité ou isoler

La loi fondamentale de la conduction de l'électricité est la loi d'OHM :

$$U = R \times I$$

avec



- U : tension appliquée aux extrémités de la pièce, en volts (V) ; on parle parfois de « voltage » ;
- R est la résistance de la pièce, exprimée en ohms (Ω) ;
- I : intensité du courant, exprimée en ampères (A) ; c'est le nombre de charges traversant la section droite de la pièce par seconde, on parle parfois d'« ampérage ».

Propriétés des matériaux

Conduire l'électricité ou isoler

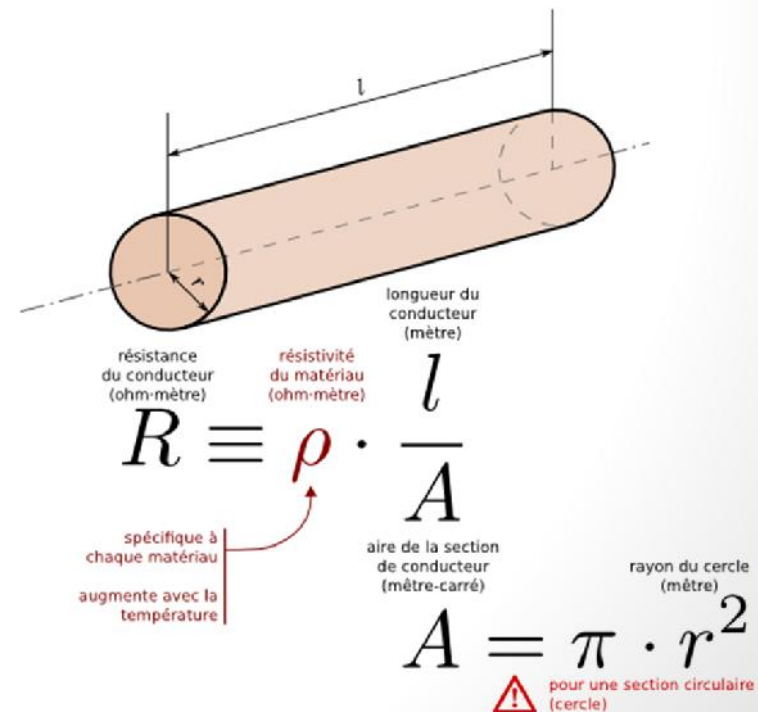
Résistivité et conductivité : La résistance électrique R d'une pièce dépend de sa forme et du matériau.

▲ Résistance d'un barreau et résistivité ρ

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

avec

- ρ : résistivité, en $\Omega \cdot m$, dépend du matériau ;
- L : longueur de la pièce
- S : aire de la section de la pièce



Propriétés des matériaux

Conduire l'électricité ou isoler

On a donc :

- facteur dépendant du matériau : ρ (rhô) ;
- facteur dépendant de la forme : L/S
 - plus une pièce est longue, plus sa résistance est grande,
 - plus sa section est grande, plus sa résistance est faible, c'est pour cela que plus le courant est fort, plus la section du câble doit être grande.
- On définit aussi la conductance G , exprimée en siemens (S) :

$G = 1/R$. ainsi que la conductivité σ (sigma) par :  Conductivité σ

$$G = \sigma \frac{S}{L}$$

avec $\sigma = \frac{1}{\rho}$

en siemens par mètre ($S \cdot m^{-1}$)

Propriétés des matériaux

Conduire l'électricité ou isoler

- On a donc des matériaux plus ou moins conducteurs selon la valeur de ρ ou σ :
 - ρ faible, σ élevé : matériau bon conducteur d'électricité ;
 - ρ élevé, σ faible : matériau isolant.

Résistivité et conductivité selon la classe de matériau

Matériau	ρ ($\Omega \cdot m$)	σ ($S \cdot m^{-1}$)
plastique	10^{20}	10^{-20}
verre	10^{17}	10^{-17}
eau distillée	10^9	10^{-9}
métaux	10^{-8} à 10^{-5}	10^5 à 10^8

Propriétés des matériaux

Être attiré par un aimant, être aimanté

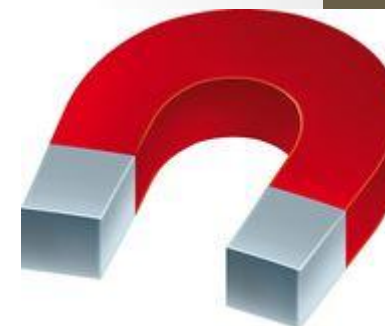


Certain matériaux ont des propriétés magnétiques. On distingue :

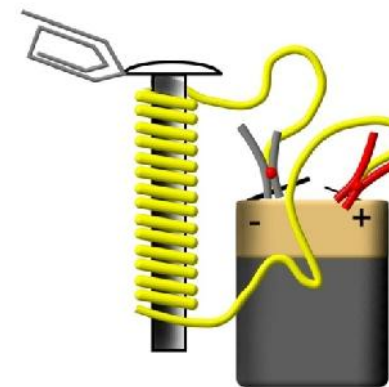
- le **ferromagnétisme** : les matériaux sont attirés par les aimants et gardent une aimantation rémanente, ils peuvent constituer des aimants permanents : Fe α (ferrite), Co, Ni, certains alliages Fe-Ni-Mo,
- Le **ferrimagnétisme** : les matériaux sont des aimants naturels : magnétite Fe₃O₄ ;
- Le **paramagnétisme** : les matériaux sont attirés par les aimants mais mal, ils s'aimantent sous l'effet d'un champ magnétique, mais ne conservent pas leur aimantation : Fe γ (austénite, plupart des inox), Al, Ca, Pt, Na, U ;
- Le **diamagnétisme** : les matériaux ne sont pas attirés par un aimant, ils ne s'aimantent pas ; c'est le cas de la très grande majorité des matériaux.

Propriétés des matériaux

Être attiré par un aimant, être aimanté



- Le passage d'un courant électrique provoque un champ magnétique induit (électroaimant). La présence à proximité d'un matériau plus ou moins ferro-ou paramagnétique va modifier ce champ magnétique.
- Par exemple, on utilise des noyaux dans les électroaimants ou les transformateurs de courant pour améliorer leurs performances, et on utilise des « ferrites » autour des câbles électriques (renflement cylindrique) pour éviter de perturber les appareils électroniques.



Propriétés des matériaux

Être attiré par un aimant, être aimanté

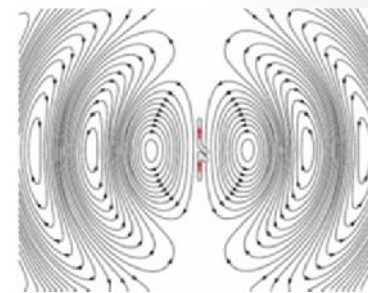


On définit deux paramètres pour un matériau :

- La perméabilité magnétique relative μ_r (sans dimension), qui indique la manière dont le matériau modifie un champ magnétique extérieur :
 - $\mu_r \leq 1$: matériau diamagnétique,
 - $\mu_r \geq 1$: matériau paramagnétique,
 - $\mu_r \gg 1$ (200 à 10 000) : matériau ferromagnétique ;
- La susceptibilité magnétique χ (sans dimension), qui est la capacité à s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique extérieur :
 - $\chi \leq 0$ (env. -10^{-5}) : matériau diamagnétique,
 - $\chi \geq 0$ (env. 10^{-3}) : matériau paramagnétique,
 - $\chi \gg 0$ (50 à 10^5) : matériau ferromagnétique.

Propriétés des matériaux

Propager les ondes radio



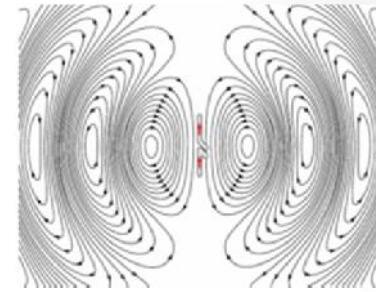
Si un matériau est conducteur, il empêche la propagation des ondes électromagnétiques. On a une atténuation du signal qui dépend de l'épaisseur du matériau.

Ainsi, les métaux empêchent la propagation des ondes électromagnétiques, et en particulier des ondes radio ; par exemple, les bâtiments en structure acier empêchent les communications radio,

Lors des attentats contre le World Trade Center le 11 septembre 2001, les sapeurs-pompiers dans le bâtiment n'ont pas reçu les consignes d'évacuation à cause de ce problème.

Propriétés des matériaux

Propager les ondes radio



- Par contre, il faut une épaisseur importante de matériau isolant pour atténuer un signal radio : on reçoit la radio dans un bâtiment, mais pas sous un long tunnel.
- Les matériaux conducteurs ont donc un effet écran. L'onde ne s'y propage qu'en surface (onde évanescente).



Propriétés des matériaux

Résister à la température



- la température de fusion se note T_f et s'exprime en kelvins (K) ou en degrés celsius ($^{\circ}\text{C}$) : en dessous de cette température, le matériau est à l'état solide, au dessus, il est à l'état liquide. Les matériaux à température de fusion élevée sont dits « réfractaires ».
- On s'aperçoit que le matériau « s'amollit » lorsque l'on se rapproche de la température de fusion. À l'inverse, le matériau se fragilise à basse température, il devient cassant.

Propriétés des matériaux

Résister à la température



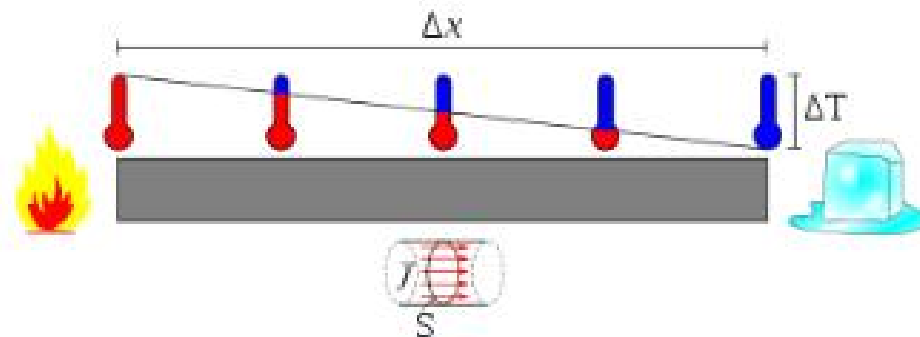
On utilise un matériau à basse température de fusion :

- lorsque l'on veut une pièce moulée
- pour de la brasure : soudure avec un matériau d'apport à basse température de fusion
- lorsqu'on veut qu'il soit liquide à la température d'utilisation, par exemple
 - mercure pour des contacts électriques tournants (pas d'usure) ou pour supporter des objets lourds sans avoir de frottement (poussée d'ARCHIMÈDE, par exemple coupole d'observatoire astronomique) ; ceci est limité par la toxicité des vapeurs de mercure et de certaines de ses formes,
 - liquide caloporteur : sodium liquide (réacteurs nucléaires à neutrons rapides ou surgénérateurs) ;
- Lorsque la température d'utilisation est basse
- À l'inverse, on peut devoir abaisser la température en dessous de la température de fusion pour pouvoir travailler un matériau.

Propriétés des matériaux

Conduire la chaleur ou isoler

- Si l'on met l'extrémité d'un objet au contact d'une source chaude, par exemple une cuiller dans une soupière ou un tisonnier dans le feu, la température va augmenter progressivement dans l'objet. C'est le phénomène de conduction thermique. Certains matériaux conduisent bien la chaleur : ils s'échauffent vite. D'autres, au contraire, s'échauffent très lentement, ce sont les isolants.



Conduction de la chaleur dans un barreau en régime stationnaire : le flux de chaleur j est proportionnel au gradient de température $\Delta T/\Delta x$

Propriétés des matériaux

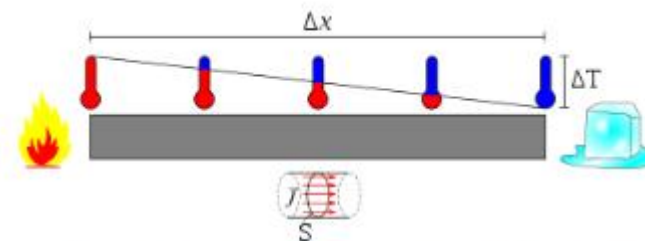
Conduire la chaleur ou isoler

- La conductivité thermique se note λ (lambda) ; elle s'exprime en watt par mètre par kelvin ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Si λ est élevé, le matériau est conducteur de chaleur ; si elle est faible, le matériau est isolant.
- La densité de flux de chaleur j est la chaleur qui traverse une surface unité, exprimée en watt par mètre carré ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Il est relié au gradient de température — variation de température par unité de longueur — par la loi de FOURIER

Loi de FOURIER

$$j = -\lambda \times \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

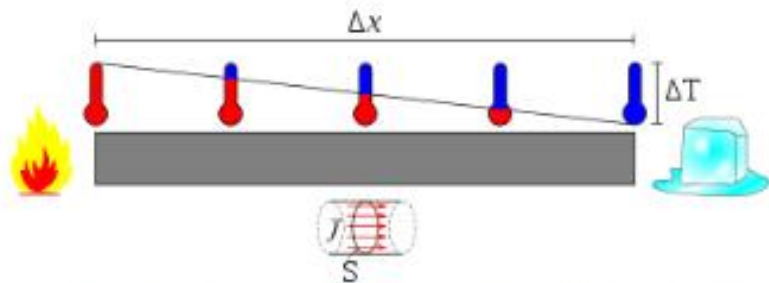
- j : densité de flux de chaleur ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ;
- λ : conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ;
- $\Delta T/\Delta x$: gradient de température ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$).



Conduction de la chaleur dans un barreau en régime stationnaire : le flux de chaleur j est proportionnel au gradient de température $\Delta T/\Delta x$

Propriétés des matériaux

Conduire la chaleur ou isoler



Conduction de la chaleur dans un barreau en régime stationnaire : le flux de chaleur j est proportionnel au gradient de température $\Delta T/\Delta x$

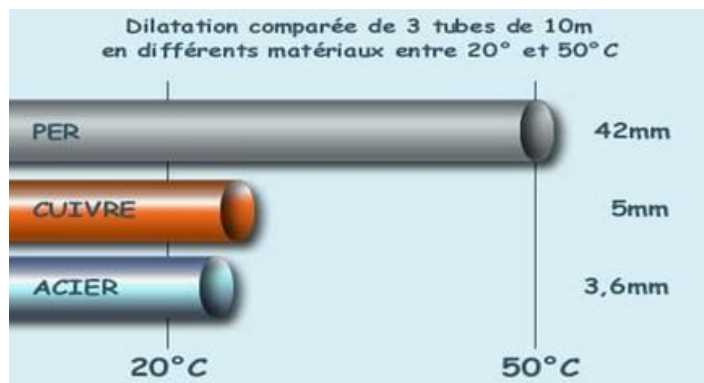
Conductivité thermique de quelques matériaux à 20 °C

Matériau	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
air	0,03
bois	0,15 à 0,36
plastique plein	0,4
eau	0,6
métal	20 à 418

Propriétés des matériaux

Se dilater ou se contracter

Le coefficient de dilatation linéaire α (alpha) donne la variation relative de longueur en fonction de la variation de température.



Loi de la dilatation linéaire

pour les faibles variations de température :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \times \Delta T$$

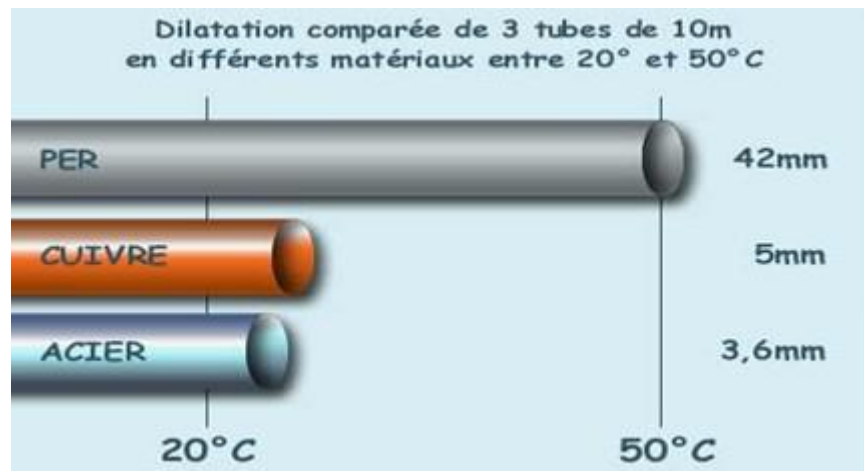
$$L = L_0(1 + \alpha \times \Delta T)$$

(α est en K^{-1}) avec

- ΔL : variation de longueur ;
- L_0 : longueur initiale ;
- ΔT : variation de température ;
- T_0 : température initiale.

Propriétés des matériaux

Se dilater ou se contracter



Coefficient de dilatation linéaire de quelques matériaux

Matériau	α (10^{-6} K^{-1})
Invar ^[3]	1
verre	9
métal (sauf Li)	8 -29
lithium	51,2
soufre	79
polystyrène	80
nylon	150

Propriétés des matériaux

Résister aux agressions extérieures (corrosion)

- La corrosion, relativement complexe, sera abordé plus tard. Il s'agit d'une dégradation chimique, c'est-à-dire par réaction avec l'environnement et non pas par sollicitation mécanique. La corrosion concerne essentiellement les métaux, mais tous les matériaux sont susceptibles de se dégrader selon l'environnement.
- De manière globale, les métaux tendent à revenir à leur état « naturel » d'oxyde (minerai), sauf les métaux natifs (or, argent, platine). Cela donne la rouille du fer et de ses alliages (acier, fonte) et le vert-de-gris du cuivre et de ses alliages (bronze, laiton).



Propriétés des matériaux

Résister aux agressions extérieures (corrosion)

- Par ailleurs, les métaux se dissolvent dans l'acide, et l'acide accélère la corrosion. Par exemple, dans une cuisine, les pièces métalliques en contact avec des vapeurs de vinaigre (couvercle de bocal de cornichons, gond d'un placard contenant du vinaigre) rouillent plus vite que les pièces similaires.
- À haute température, les métaux s'oxydent avec l'air ou les gaz environnants et se dégradent (calamine).
- On peut quantifier la corrosion par le taux de corrosion, c'est-à-dire la proportion (en pour cent) de métal qui s'est transformé en oxyde durant un essai normalisé. L'essai consiste à soumettre le matériau à un environnement donné pendant un temps donné, comme par exemple une projection de saumure (eau salée) dans le cas du test de brouillard salin.

Comportement mécanique des matériaux (Introduction)

- Allongement
- Coefficient de Poisson
- Contrainte de cisaillement
- Contrainte maximum admissible
- Déformation d'un matériau
- Ductilité
- Dureté
- Fatigue
- Facteur d'amortissement
- Limite d'élasticité
- Limite à la fatigue
- Module d'élasticité
- Module de flexion
- Module de cisaillement
- Module spécifique
- Poids spécifique