

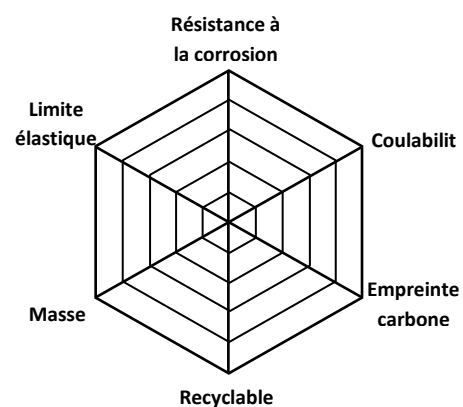
1- Critères de choix d'un matériau

Le choix d'un matériau dépend de plusieurs critères :

- caractéristiques mécaniques : limite élastique, masse, dureté, résilience ...
- caractéristiques physico-chimiques : comportement à la corrosion, vieillissement
- caractéristiques de mise en œuvre : usinabilité, soudabilité, trempabilité ...
- caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle ...
- impact environnemental : toxicité, empreinte carbone, recyclabilité

Parfois, pour comparer différents matériaux, on utilise un diagramme qui fait apparaître les indices de performance relatifs des matériaux avec une échelle de notation de 0 à 5, du centre vers l'extérieur du diagramme :

Notes	0	1	2	3	4	5
	Mauvais	Faible	Médiocre	Acceptable	Bon	Excellent



2- Types de matériaux

2.1 Les métaux

Les métaux sont issus de l'extraction de minerais. Généralement, ils ne sont pas utilisés à l'état pur, mais mélangés à d'autres composants afin d'améliorer leurs caractéristiques (résistance à la corrosion, résistance aux chocs...). Ils sont alors appelés « alliages ».

Exemple → Voici quelques alliages fréquemment utilisés:

- fonte = fer + carbone (plus de 2,1 % de carbone) ;
- acier = fer + carbone (moins de 2,1 % de carbone) ;
- bronze = cuivre + étain ;
- laiton = cuivre + zinc.

2.2 Les céramiques

Les céramiques sont des matériaux obtenus à partir de la fusion du quartz contenu dans du sable ou dans de l'argile. Elles sont très dures, très rigides.

Résistantes à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion, elles sont cependant fragiles, car elles cassent facilement lorsqu'elles sont soumises à un choc.

Exemple → Les céramiques sont utilisées dans la fibre optique (silicium), les outils de coupe (carbures), les joints d'étanchéité, les isolants électriques, les filtres...

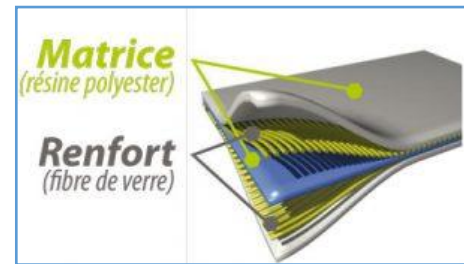
2.3 Les matériaux composites

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles. Le nouveau matériau ainsi élaboré possède des performances supérieures à celles des éléments pris séparément.

Exemples → Les cadres de raquettes de tennis sont souvent réalisés avec de la fibre de verre et de la résine polyester. Ils sont ainsi plus souples et plus légers que lorsqu'ils sont réalisés en acier.

Le béton armé est composé de béton et de tiges en acier.

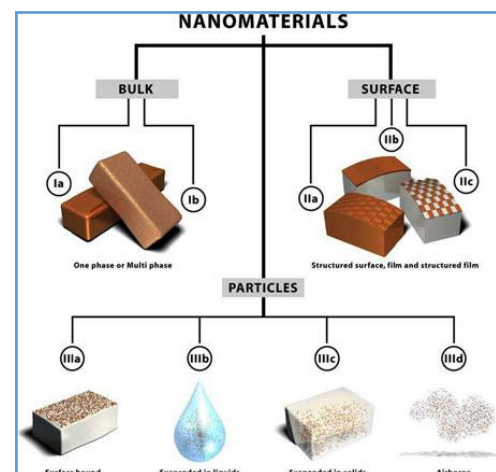
Les emballages pour les briques alimentaires (lait, sauces...) sont composés de carton, de plastique et d'aluminium.



2.4 Les nanomatériaux

Un nanomatériau est un matériau possédant des propriétés particulières à cause de sa taille et/ou de sa structure nanométrique.

Exemple → Des nanoparticules d'oxyde de cérium sont utilisées comme additifs pour augmenter les performances du diesel. Des membranes de polymères nanostructurées sont utilisées pour la purification de l'eau.



2.5 Les matériaux organiques

La matière organique est la matière fabriquée par les êtres vivants : végétaux, animaux, champignons...

Exemple → Le bois, le coton, le cuir et le papier sont des matériaux organiques. On sait fabriquer des matières plastiques à partir de matériaux organiques.

2.6 Les plastiques

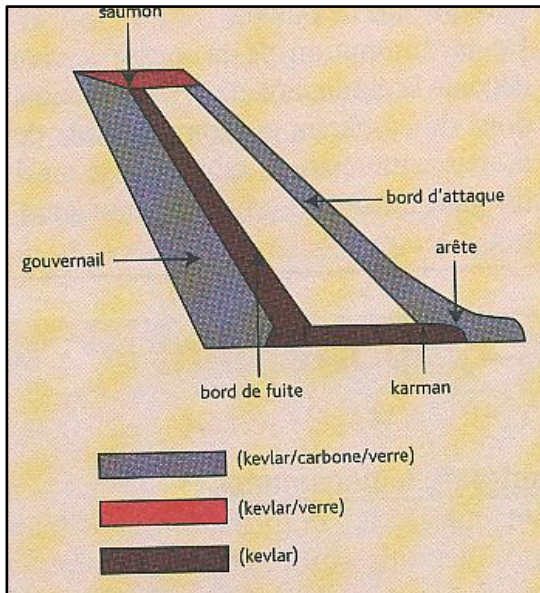
Les plastiques, ou matières plastiques, sont des substances polymères. Une matière plastique est souvent obtenue par la transformation du pétrole. Les matières plastiques ne laissent pas passer le courant électrique, elles sont légères, généralement étanches... Leurs utilisations sont très vastes.

Il existe deux catégories de matières plastiques :

- les thermoplastiques, qui fondent sous l'effet de la chaleur et se solidifient sous l'effet d'un refroidissement ;
- les thermodurcissables, dont la transformation est irréversible. Une fois formé, le plastique ne se déforme plus.

Exercice : Justifier l'utilisation de matériaux

Le schéma ci-dessous détaille la composition de la dérive d'un avion moderne. Par rapport à une dérive métallique, le nombre de rivets et d'éléments formant cette dérive est divisé par 20.



Q1 : A quelles catégories appartiennent les matériaux constituant cette dérive ?

Q2 : Pourquoi la diminution des éléments constituant la dérive présente-t-elle un intérêt pour le constructeur ?

Q3 : Pourquoi le saumon de dérive ne contient-il pas de carbone ?

Q4 : La masse volumique moyenne des matériaux utilisés pour cette dérive est $\rho = 1.8 \text{g.cm}^{-3}$. Pourquoi cette valeur influe-t-elle sur le gain en masse lorsque l'avion est chargé ?

$$\rho_{\text{acier}} = 7.8 \text{g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{aluminium}} = 2.7 \text{g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{kevlar}} = 1.4 \text{g/cm}^3$$

3- Caractéristiques des matériaux

Masse volumique de quelques matériaux

Matériaux	Acier	Alliage d'aluminium	Bronze	Nylon	Fibres de verre	Fibres de carbone
en kg/m^3	7800	2700	8900	1000	2500	1750


Propriétés électriques de quelques matériaux :

Type de matériau	Résistivité en $\Omega \cdot \text{m}$	Comportement électrique
Polystyrène Nylon Verre	10^{20} $5 \cdot 10^{12}$ 10^{17}	ISOLANT
Alliages ferreux Aluminium Cuivre	$9.8 \cdot 10^{-8}$ $2.8 \cdot 10^{-8}$ $1.7 \cdot 10^{-8}$	CONDUCTEURS

Propriétés thermiques de quelques matériaux :

Type de matériau	Conductivité W/(m/K)	Comportement thermique
Laine de verre	0.04	ISOLANT
Béton	1	
Nylon	0.25	
Verre	1,2	
Fer	80	CONDUCTEURS
Aluminium	237	
Cuivre	390	

Résistance à la corrosion de quelques matériaux :

or	aluminium	acier inoxydable	cuivre	zinc	acier
					Le plus sensible à la corrosion

Impact environnemental des matériaux

Chaque étape du cycle de vie a un impact environnemental selon le type de matériau.

Étape du cycle de vie	Matériaux	Impact sur l'environnement
Extraction de la matière première	Bois	Déforestation
	Métaux, verre	Construction de carrières
	Plastiques	Installation de plateformes pétrolières
Transport	Tous types	Émissions de gaz à effet de serre produits par les véhicules de transport
Fabrication/Production	Tous types	Émissions de gaz à effet de serre produits par les usines
Utilisation	Tous types	Émissions de gaz à effet de serre produits par le produit lui-même
Fin de vie	Tous types	Pollution atmosphérique et visuelle, pollution de l'eau produite par les déchets

La valorisation d'un objet consiste à le recycler ou le réutiliser. Il existe trois types de valorisation :

- la **réutilisation** : l'objet est encore utilisable en remplaçant éventuellement certains composants ;
- le **recyclage** : à partir d'un matériau usagé, on crée de la matière qui va entrer dans la constitution d'un produit (par exemple, le recyclage du verre) ;
- la **valorisation énergétique** : on brûle le matériau et on récupère l'énergie de la combustion pour produire de la chaleur.

4- Résistance des matériaux

La résistance des matériaux a trois objectifs principaux :

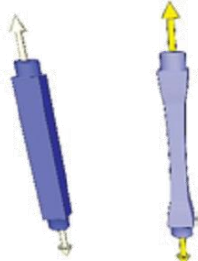
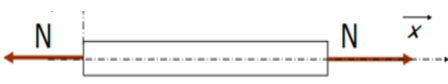
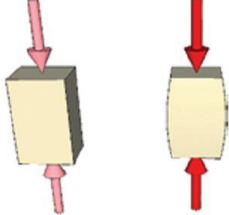

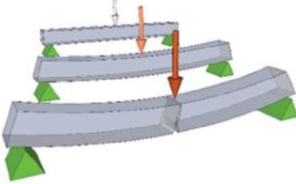
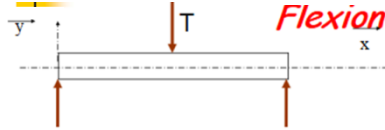
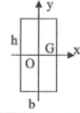
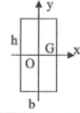
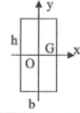
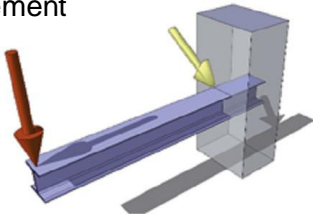
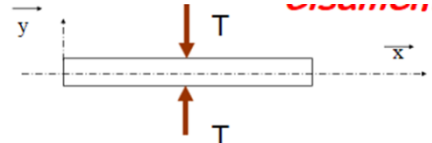
- la connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux (comportement sous l'effet d'une action mécanique),
- l'étude de la résistance des pièces mécaniques,
- l'étude de la déformation des pièces mécaniques.

Ces études permettent de choisir le matériau et les dimensions d'une pièce mécanique en fonction des conditions de déformation et de résistance requises.

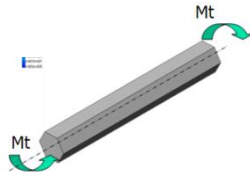
Sollicitations simples

Lorsqu'une pièce est soumise à des efforts extérieurs, pour mettre en évidence les efforts transmis par la matière, nous effectuons une coupure imaginaire par un plan perpendiculaire à la ligne moyenne de la pièce.

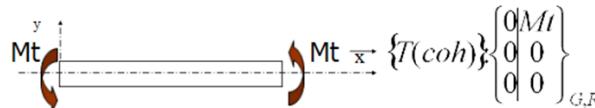
L'identification des efforts intérieurs exercés entre les deux tronçons au niveau de la coupure permet d'écrire le tenseur de cohésion.

<p>Traction</p> 	<p>La traction provoque un allongement pouvant entraîner la rupture du matériau</p>  $\{T(coh)\}_{G,R} = \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$						
<p>Compression</p> 	<p>La compression provoque un raccourcissement pouvant entraîner une pulvérisation du matériau</p>  $\{T(coh)\}_{G,R} = \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$						
<p>Flexion</p> 	<p>La flexion provoque un fléchissement pouvant entraîner la rupture du matériau</p>  $\{T(coh)\}_{G,R} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ 0 & Mfz \end{Bmatrix}$ <p>Le moment de flexion: Mf, se calcul en utilisant le moment quadratique de la section. Le moment quadratique (en mm^4) caractérise la forme de la surface.</p> <table border="1" data-bbox="1002 1503 1396 1653"> <thead> <tr> <th></th> <th>I_{ex}</th> <th>I_{ey}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>$\frac{bh^3}{12}$</td> <td>$\frac{hb^3}{12}$</td> </tr> </tbody> </table>		I_{ex}	I_{ey}		$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{hb^3}{12}$
	I_{ex}	I_{ey}					
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{hb^3}{12}$					
<p>Cisaillement</p> 	<p>Le cisaillement est souvent rencontré quand il y a des porte-à-faux (un balcon par exemple). Il provoque une fissure pouvant entraîner la rupture du matériau</p>  $\{T(coh)\}_{G,R} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ T_z & 0 \end{Bmatrix}$						

Torsion



La torsion est souvent rencontrée sur les arbres de transmission.



Pour mener des études de résistance des matériaux, il est nécessaire de poser des hypothèses sur le matériau. Fréquemment, les hypothèses posées sont les suivantes :

- **le matériau est isotrope** : il possède les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions. Cette propriété n'est pas vérifiée pour les matériaux tels que le bois, les matériaux composites, ...
- **le matériau est homogène** : il a la même composition en tout point.
- **Le matériau est continu** : il ne présente pas de fissures

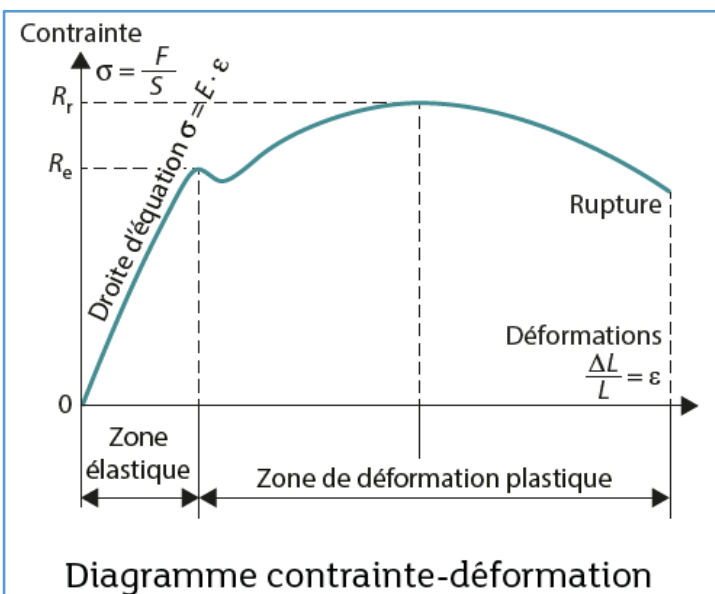
Déformation élastique, déformation plastique

Lorsque l'on applique un effort sur une pièce, celle-ci commence par se déformer de manière réversible (déformation élastique), c'est à dire que ses dimensions changent mais que la pièce reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation s'arrête. Certains matériaux, dits fragiles, cassent dans ce mode de déformation.

Pour les matériaux dits ductiles, lorsque l'on augmente la sollicitation, on déforme de manière définitive la pièce. Lorsque l'on arrête la sollicitation, la pièce reste déformée.

La longévité et le bon fonctionnement des mécanismes imposent que les pièces restent dans le domaine élastique.

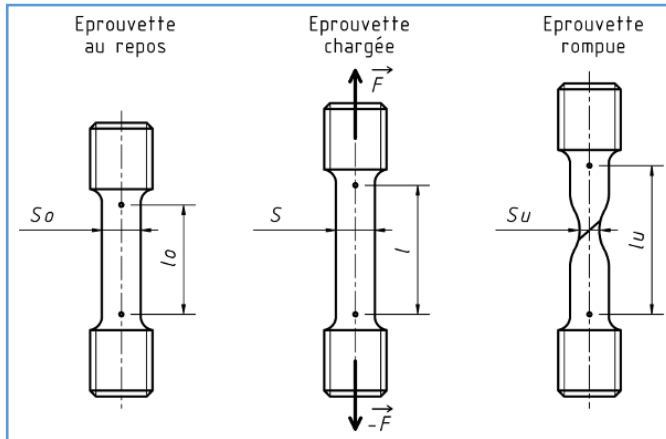
Comportement des pièces en traction



Les caractéristiques des différents matériaux sont définies à partir d'essais. Le plus classique est l'essai de traction qui permet d'établir, pour le matériau testé, la courbe de l'évolution de la déformation en fonction des contraintes appliquées à la pièce.

Limite à la rupture R_r . Elle correspond à la contrainte maximale atteinte au cours de l'essai

Limite élastique R_e . Elle marque la fin du domaine élastique. Au-delà de cette valeur, la pièce se déforme plastiquement



Le module d'élasticité longitudinale E (ou module de Young) caractérise l'élasticité du matériau et correspond à la pente de la courbe dans le domaine élastique.

Plus E est grand et plus le matériau est rigide (et inversement)

Exemples : $E_{\text{acier}}=200\,000\text{N/mm}^2$, $E_{\text{caoutchouc}}=7.5\text{N/mm}^2$

La loi de Hooke traduit ce principe :

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

avec

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

et

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

σ : contrainte en N/mm^2 (MPa)

F : force en Newtons (N)

S : surface en mm^2

L : longueur de la pièce (mm)

ΔL : allongement de la pièce (mm)

ε : allongement relatif ($\Delta L/L$)

E : module de Young en N/mm^2 (MPa)

Exercice : Calcul du module de Young

Un échantillon de Kevlar a les dimensions suivantes : longueur 200mm, largeur 5cm, épaisseur 1mm. On l'étire (essai de traction) dans le sens de la longueur et on mesure la force F de traction en fonction de l'allongement Δl . On obtient le tableau suivant :

Allongement (mm)	0	3	6	10	15	18	20
Force de traction (kN)	0	101.25	202.5	335.5	506.25	607.5	675

Q1 : Représenter la force de traction en fonction de l'allongement. La déformation de cet échantillon est-elle dans le domaine élastique ?

Q2 : Calculer le module d'élasticité E du kevlar (module de Young).

Condition de résistance

La contrainte maximale ne doit pas dépasser la limite élastique du matériau : $\sigma_{Max} \leq R_e$

Pour tenir compte des incertitudes liées au matériau, à la simulation, à l'intensité des efforts, on applique fréquemment un coefficient de sécurité :

$$\sigma_{Max} \leq \frac{R_e}{s}$$

avec : R_e : résistance limite élastique (en MPa)

s : coefficient de sécurité ($s > 1$)

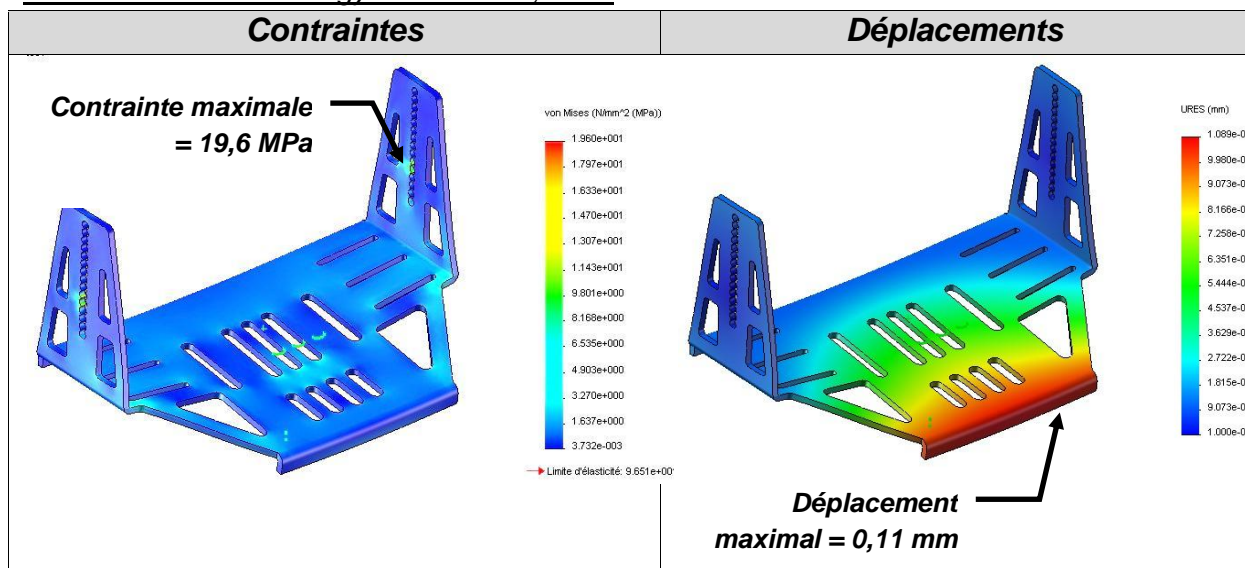
Pour calculer le coefficient de sécurité pour une pièce pour laquelle on connaît l'intensité maximal des contraintes, on applique la formule : $s = \frac{R_e}{\sigma_{Max}}$

Modélisation par éléments finis

Lorsqu'une pièce a une géométrie complexe, on utilise une modélisation par éléments finis pour identifier les zones et valeurs des contraintes maximales dans la pièce ainsi que la valeur des déformations.

Exemple : support d'appareil photo

Extrait du bac « nacelle gyrostabilisée », 2014



5- Qualités thermiques des matériaux

Certaines fonctions techniques imposent de conduire la chaleur (radiateurs) et d'autres de bloquer le flux de chaleur: d'isoler thermiquement.

Le pouvoir d'isolation vient du matériau lui-même mais aussi parfois de la forme qu'on lui donne.

Exemple : l'air emprisonné dans les alvéoles des parpaings sert d'isolant.



Contraintes thermiques : dilatation-contraction

Un changement de température entraîne une modification de la longueur qui s'exprime avec la loi :

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \theta$$

Δl : variation de longueur (m)

l_0 : longueur initiale (m)

α : coefficient de dilatation linéaire (°C)⁻¹

$\Delta \theta$: variation de température (°C)

Exercice : Contrainte thermique

Une tige métallique de 15cm maintenant un pot d'échappement s'allonge de 0.25mm lorsque la température passe de 20°C à 90°C. Déterminer le coefficient de dilatation du matériau la constituant.

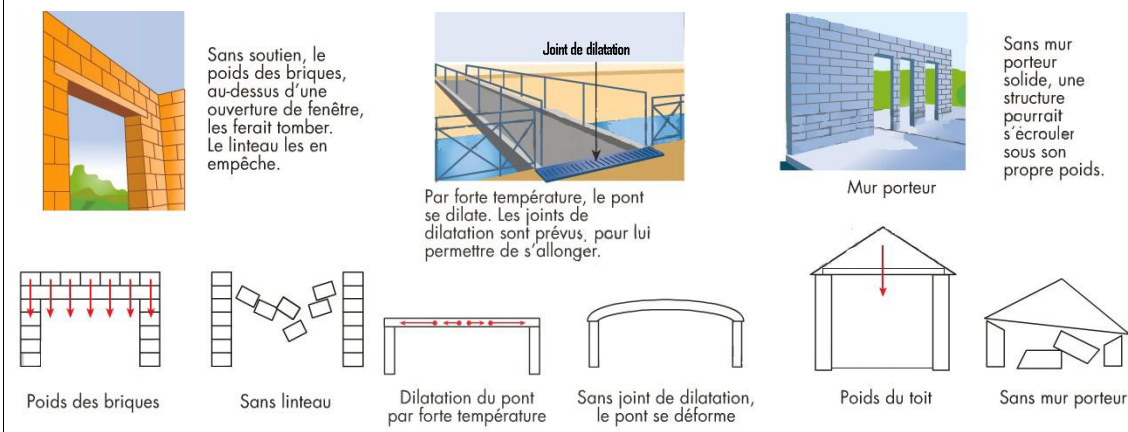


Exercice

Q1 : les matériaux utilisés pour les murs non porteurs sont-ils les mêmes que ceux des murs porteurs ?

Q2 : Comment se déforme un linteau s'il n'est pas assez solide ?

Q3 : Que se passe-t-il s'il n'y a pas de joint de dilatation sur un pont ?



6- Corrosion des matériaux

La corrosion sert à désigner l'altération d'un matériau par réaction chimique avec un oxydant. Les exemples les plus connus sont les altérations chimiques des métaux à l'air ou dans l'eau, telles la rouille du fer et de l'acier ou la formation de vert-de-gris sur le cuivre et ses alliages (bronze, laiton). Cependant, la corrosion est un domaine bien plus vaste qui touche toutes sortes de matériaux (métaux, céramiques, polymères) dans des environnements variables (milieu aqueux, atmosphère, hautes températures).

Au niveau de la conception, il faut donc choisir le matériau en fonction de l'environnement dans lequel il va être utilisé ou prévoir un moyen de protection du matériau (exemples: peinture, chromage, utilisation d'anodes sacrificielles)



Corrosion différenciée sur deux métaux plus et moins oxydables