

CHAPITRE 1 : Matériaux

1.1. Introduction

Un matériau désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large. Ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique.

Matériaux définis dans ce cours :

- Aciers
- Fontes
- Aluminium et ses alliages
- Cuivre et ses alliages
- Thermoplastiques
- Thermodurcissables
- Elastomères
- Céramiques
- Matériaux composites.

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

1.2. Métaux et alliages et leurs désignations

1.2.1. Métal: définition

Définition du dictionnaire Larousse: «Élément chimique caractérisé par une forte conductivité thermique et électrique, un éclat particulier dit « éclat métallique », une aptitude à la déformation et une tendance marquée à former des cations ».

1.2.2. Les propriétés métalliques

Propriété	Précision
Éclat métallique	L'élément est brillant et reflète bien la lumière.
Conducteur de chaleur et d'électricité	L'élément laisse passer la chaleur et conduit bien l'électricité.
Réagit aux acides	L'élément est effervescent (émet des bulles) lorsqu'on le met en contact avec un acide.
Malléabilité	L'élément peut se déformer sans se casser et sans reprendre sa forme initiale.

Autres propriétés communément admises

- Densité importante: leur densité par rapport à l'eau est en général supérieure à 2 pour les métaux les plus utilisés, et est fréquemment supérieure à 7.
- Ils sont en général présent dans la nature sous forme de minerai, qu'il faut transformer en métal (métallurgie primaire).

1.2.3. Les propriétés non-métalliques

Autres propriétés communément admises

- Densité importante: leur densité par rapport à l'eau est en général supérieure à 2 pour les métaux les plus utilisés, et est fréquemment supérieure à 7.
- Ils sont en général présent dans la nature sous forme de minerai, qu'il faut transformer en métal (métallurgie primaire).

Propriété	Précision
Aspect terne	L'élément est mat et ne réfléchit pas la lumière.
Ne conduit pas la chaleur ni l'électricité	L'élément ne laisse pas passer la chaleur et conduit très peu ou pas l'électricité.
Ne réagit pas aux acides	L'élément n'a aucune réaction aux acides; il demeure inerte.
Non malléable	L'élément est cassant, friable ou reprend sa forme initiale après avoir été déformé.

1.2.4.Métal: définition au sens chimique

Les éléments alliant les précédentes propriétés sont classés dans le tableau périodique comme suit. Ils constituent 91 des 118 éléments.

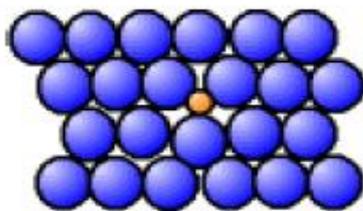
	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	IB	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIA	VIIA
1	non-métaux																		
2	Li	Be	métaux										B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo	
			* lanthanides																
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			** actinides																
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

1.2.5. Alliages

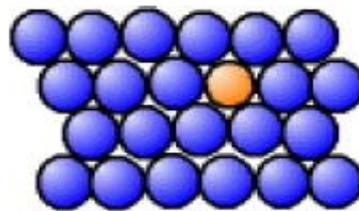
Un alliage est la combinaison d'un élément métallique avec un ou plusieurs autres éléments chimiques (métalliques ou non). Un métal pur a des caractéristiques mécaniques qui sont la plupart du temps relativement faibles. Le fait d'ajouter d'autres éléments permet d'augmenter ces caractéristiques mécaniques.

Les alliages peuvent être sous plusieurs formes:

Un élément d'addition qui forme une solution solide avec le métal de base peut être localisé soit à la place des atomes du métal majoritaire, on parle alors de « substitution », soit entre les atomes de l'élément majoritaire, on parle alors d'« insertion ».

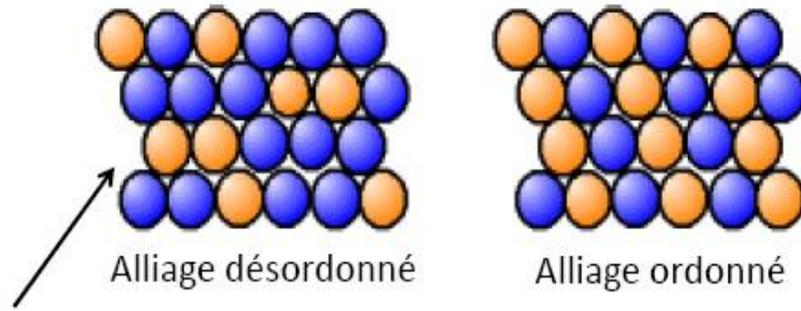


Solution solide interstitielle



Solution solide par substitution

Une substitution peut conduire soit à un alliage ordonné, soit à un alliage désordonné



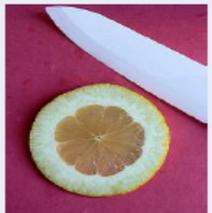
Les atomes occupent des positions aléatoires

- Quand l'élément d'alliage n'est pas un métal, sa teneur reste généralement faible (jusqu'à quelques % massique). Ainsi, dans un acier la concentration en carbone est inférieure à 2 % massique. Elle est inférieure à 7 % massique dans le cas de la fonte, alors qu'il est possible de faire un alliage cuivre-zinc (communément appelé laiton) avec 50 % de chacun des éléments.
- Quand l'élément d'alliage n'est pas un métal, sa teneur reste généralement faible (jusqu'à quelques % massique). Ainsi, dans un acier la concentration en carbone est inférieure à 2 % massique. Elle est inférieure à 7 % massique dans le cas de la fonte, alors qu'il est possible de faire un alliage cuivre-zinc (communément appelé laiton) avec 50 % de chacun des éléments.
- Les alliages peuvent être classés en alliages ferreux ou non ferreux.

1.2.5.1. Alliages ferreux

Un alliage ferreux est un alliage dont le principal constituant est le fer. Le fer est un élément très présent dans la nature. Il s'agit d'un matériau malléable et magnétique.

Ceci étant, ses caractéristiques mécaniques ne sont pas optimales et il ne résiste pas à la corrosion. Afin d'améliorer ses caractéristiques, il est possible de le mélanger avec d'autres éléments, notamment du Carbone. Les différentes proportions de Fer et de Carbone définiront les propriétés de l'alliage.

Alliages ferreux	Composition et description	Propriétés mécaniques	Exemples d'utilisation
Fonte	-Mélange de fer et de carbone (entre 2% et 7% massique) -Couleur blanc brillant ou gris	Fragilité, dureté, lourdeur	Etaux, haltères 
Acier inoxydable	-Mélange de fer, de carbone (moins de 1,5%), de chrome et d'étain -Couleur gris métallique	Résistance à la corrosion, résistance mécanique, dureté	Ustensiles de cuisine 

Alliages ferreux	Composition et description	Propriétés mécaniques	Exemples d'utilisation
Acier doux	Mélange de fer et de carbone (à peine 0,2%)	Faible résistance à la corrosion, dureté	Chaines 
Fer blanc	Tôle mince d'acier doux recouverte d'une couche d'étain sur les deux faces	Facilité de pliage et de coupe, résistance à la corrosion	Boîtes de conserve 

Exemple de propriétés mécaniques

Propriété	Fer	Acier 304 (usage nucléaire)	Acier Inconel 718 (boulonnerie à haute résistance)
Masse volumique (Kg/m ³)	7870	7930	8220
Module d'élasticité longitudinal (GPa)	211	200	200
Coefficient de dilatation (10 ⁻⁶ , 1/K)	11.2	15.3	12.78
Limite d'élasticité à 0.2% (MPa)	168	190	1034
Résistance à la traction (MPa)	310	490	1275

1.2.5.2. Alliages non ferreux

Un alliage non ferreux ne contient pas de fer, mais combine plutôt d'autres métaux. Ces alliages ne sont pas magnétisés.

Alliages non ferreux	Composition et description	Propriétés mécaniques	Exemples d'utilisation
Laiton	-Mélange de zinc et de cuivre -Couleur variant du rose au jaune selon la teneur des différents métaux	Ductilité, malléabilité, lourdeur, résistance à la corrosion, bonne conductibilité	Composants électriques, instruments de musique 
Bronze	-Mélange de cuivre et d'étain -Couleur variant du jaune au brun	Dureté, malléabilité, lourdeur, résistance à la corrosion, bonne conductibilité	Hélice de bateau, robinetterie 

Alliages non ferreux	Composition et description	Propriétés mécaniques	Exemples d'utilisation
Titanium	-Mélange de titane et d'aluminium -Couleur gris argenté	<u>Légèreté, grande dureté,</u> malléabilité, résistance à la corrosion,	Pièces d'avion, pièces de bicyclette, pièces électroniques, prothèses orthopédiques 

1.3.Exemple d'alliage :

1.3.1.Les aciers (Fer + 0.08 à 1% de Carbone) :

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone avec éventuellement des éléments d'addition.

1.3.1.1.Classification par emplois :

La désignation commence par la lettre « **S** » pour les aciers d'usage général et par la lettre « **E** » pour les aciers de construction mécanique. Le nombre qui suit indique la valeur minimale de limite élastique en Méga Pascals.



Exemples :

S235 (acier d'usage général, de limite élastique 235MPa)

E320 (acier de construction mécanique, de limite élastique 320MPa)

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « **G** ».

1.3.1.2.Classification par composition chimique :

a)Aciers non alliés :

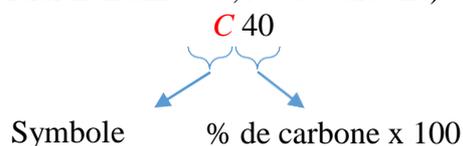
Teneur en manganèse inférieure à 1%.

La désignation se compose de la lettre **C** suivie du pourcentage de la teneur moyenne en carbone multiplié par 100.

S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre **G**.



Exemple de désignation : C 40 (Acier non allié – 0,4% de carbone)



b)Aciers faiblement alliés :

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse. **Utilisation :**

ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance. **Désignation :**

Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone,

Les symboles chimiques des éléments

d'addition dans l'ordre des teneurs

décroissantes,

Les teneurs des principaux éléments d'addition

multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 (**voir tableau ci-**

contre) éventuellement, des indications

supplémentaires concernant la soudabilité

(S), l'aptitude au moulage (M), ou à la déformation

:

élément	Symbole chimique	Symbole métallurgique	Facteur Multiplicateur
Aluminium	Al	A	10
Azote	N	N	100
Bore	B	B	1000
Chrome	Cr	C	4
Cobalt	Co	K	4
Cuivre	Cu	U	10
Magnésium	Mg	G	10
Manganèse	Mn	M	4
Molybdène	Mo	D	10
Nickel	Ni	N	4
Phosphore	P	P	100
Plomb	Pb	Pb	10
Silicium	Si	S	4
Soufre	S	F	100
Titane	Ti	T	10
Tungstène	W	W	4
Vanadium	V	V	10

35 Cr Mo 4S (acier avec 0.35% de Carbone, 1% de chrome, moins de 1% de Molybdène. Cet acier est soudable)

c) Aciers fortement alliés :

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse 5% en masse.

Utilisation : ces aciers sont réservés à des usages particuliers. Par exemple,

dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier

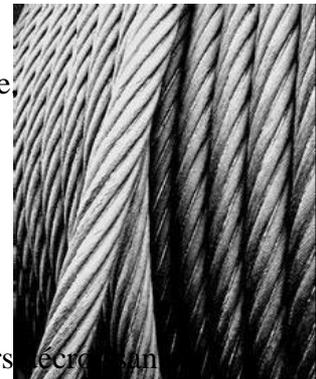
fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%) **Désignation :**

- La lettre « X »,

- Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone,

- Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes,

- Dans le même ordre, les teneurs des principaux éléments.



Exemple :

X6 Cr Ni Mo Ti 17-12 (acier fortement allié avec 0.06% de Carbone, 17% de Chrome, 12% de Nickel, du Molybdène et du Titane (moins de 12%)).

X4 Cr Mo S 18 (acier fortement allié avec 0.04% de Carbone, 18% de Chrome, du Molybdène et du Soufre (moins de 18%)).

1.3.2. Les fontes (Alliage de fer avec 1.67% à 6.67% de Carbone) :

Les fontes sont alliages de fer et de carbone. Elles ont une excellente coulabilité. Elles permettent donc d'obtenir des pièces de fonderie (pièces moulées) aux formes complexes. Elles sont assez fragiles (cassantes), difficilement soudables et ont une bonne usinabilité.

1.3.2.1. Les fontes à Graphite Lamellaire

Les fontes à graphite lamellaire, appelées « fontes grises » sont très utilisées car elles :

- ❖ Sont économiques,
- ❖ Amortissent bien les vibrations,
- ❖ Ont une bonne coulabilité et usinabilité,
- ❖ Sont peu oxydables,
- ❖ Ont une bonne résistance à l'usure par frottement,
- ❖ Résistant bien aux sollicitations de compression.



Utilisation : carters, bâtis, blocs moteur, pièces aux formes complexes, ...

Désignation : après le préfixe « EN », les fontes sont désignées par le symbole « GJL » suivi de la valeur en MPa (méga Pascals) de la résistance minimale à la rupture par extension.

Exemple :

EN-GJL-300 (fonte à graphite lamellaire de résistance $Re_{mini} = 300\text{MPa}$)

1.3.2.2. Les fontes malléables à Graphite Sphéroïdale :

Les fontes à graphite sphéroïdale sont obtenues par adjonction d'une faible quantité de magnésium avant moulage. Elles sont plus légères et ont une meilleure résistance mécanique que les fontes grises.



Utilisation : étriers de freins, culbuteurs, vilebrequins, tuyauteries soumises à hautes pressions

Désignation : après le préfixe EN, les fontes sont désignées par le symbole (GJMW, GJMB, GJS) suivi de la valeur en méga Pascals de la résistance minimale à la rupture par extension et du pourcentage de l'allongement après rupture.

EN-GJS-400-18 (fonte à graphite sphéroïdale de résistance $Re_{mini} = 400\text{MPa}$ et d'allongement $A\% = 18$)

1.3.2.3. Fontes blanches

La désignation des fontes blanches comprend le symbole FB suivi des symboles chimiques des éléments d'alliage avec indication de leur teneur.

Exemple : FB Cr12 Mo Ni : fonte blanche à 12% de chrome et contenant de molybdène et du nickel.

1.3.3. Métal non allié

La désignation se compose du symbole abrégé du métal de base suivie de représentée par un chiffre et dont la valeur augmente lorsque la pureté croît.

1.3.3.1. L'aluminium et ses alliages

L'aluminium est obtenu à partir d'un minerai appelé bauxite. Il est léger (densité = 2.7), bon conducteur d'électricité et de chaleur. Sa résistance mécanique est faible, il est ductile et facilement usinable. Il est très résistant à la corrosion.

Utilisation : aéronautique du fait de sa légèreté

Désignation : la désignation utilise un code numérique. Il peut éventuellement être suivi par une désignation utilisant les symboles chimiques.

Exemple : **EN-AW-2017 (Al Cu 4 Mg Si)** (alliage d'aluminium avec 4% de cuivre, du Magnésium et du Silicium (moins de 4%))



1.3.3.2. Le cuivre et ses alliages

Il existe de très nombreux alliages de cuivre dont les plus connus sont : les bronzes, les laitons, les cupro-aluminiums, les cupronickels et les maillechorts.

cuivre + zinc	=	LAITON
cuivre + étain	=	BRONZE
cuivre + aluminium	=	CUPRO-ALUMINIUM
cuivre + nickel	=	CUPRONICKEL
cuivre + nickel + zinc	=	MAILLECHORT

Les laitons : sont faciles à usiner et ont une bonne résistance à la corrosion. Ils peuvent être moulés ou forgés. Ils sont utilisés pour les pièces décolletées, tubes, ...

Les bronzes : ont une bonne résistance à la corrosion, un faible coefficient de frottement et sont faciles à mouler. Ils sont utilisés pour réaliser, entre autre, les coussinets et bagues de frottement.

Désignation : c'est un code numérique. Il peut éventuellement être suivi par une désignation utilisant les symboles chimiques.

Exemple : **CW612N (Cu Zn 36 Pb 3)** (alliage de cuivre avec 36% de Zinc et 3 % de Plomb)

1.4. Les polymères ou matières plastiques

Un plastique est un mélange dont le constituant de base est une résine ou polymère, à laquelle on associe des adjuvants (plastifiants, antioxydants, ...) et des additifs (colorants, ignifugeants).

1.4.1. Les thermoplastiques

Très nombreux, ils sont les plus utilisés. Ils ramollissent et se déforment à la chaleur. Ils peuvent être refondus et remis en œuvre un grand nombre de fois.

Exemples : ABS, PMMA, PTFE, PP

1.4.2. Les thermodurcissables

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créés, il n'est plus possible de les remodeler par chauffage.

Exemples: EP (araldite), UP (polyester).

1.4.3. Les élastomères ou "caoutchoucs"

On peut les considérer comme une famille supplémentaire de polymères aux propriétés très particulières. Ils sont caractérisés par une très grande élasticité.



1.4.4. Applications des polymères en Génie Civil

Géomembranes:

Produits adaptés au génie civil. Présenté sous forme de feuilles minces, souples, étanches aux liquides mêmes sous des sollicitations de service.

Ils peuvent servir à :

- L'étanchéité des bassins d'eau;
- L'étanchéité des bassins de rétention anti-pollution;
- Confinement de déchets liquides.



1.5. Les céramiques

Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion mais sont fragiles.

1.5.1. Céramiques traditionnelles

Elles regroupent les ciments, les plâtres, Et les produits à base de silice.

1.5.2. Céramiques techniques Elles sont soit fonctionnelles, à « usage électrique », soit structurales, à usage mécanique ou thermomécanique.

Utilisation : fibre optique (silicium), outils de coupe (carbures), joints d'étanchéité, isolants, filtres, ...

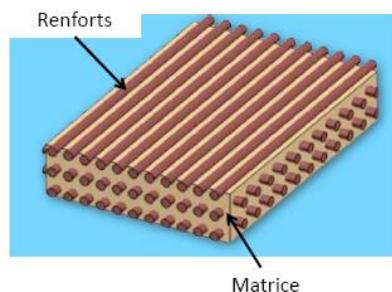


1.6. Les matériaux composites

Le matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles. Le matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments constitutifs seuls ne possèdent pas.

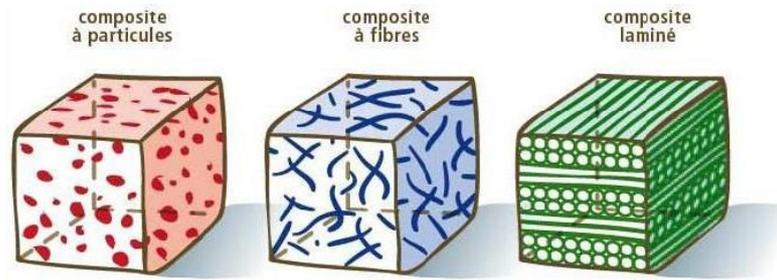
Il est constitué :

- d'une ossature appelée renforts, présentant diverses architectures, qui assure la tenue mécanique.
- d'une protection appelée matrice, assurant la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort. Cette matrice est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable).



Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant) renforcé par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau.

En renfort, on utilise la fibre de verre (économique), la fibre de carbone (plus coûteuse) et enfin les fibres organiques (kevlar).



1.6.1.Principe de fonctionnement

Les fibres travaillent efficacement en traction



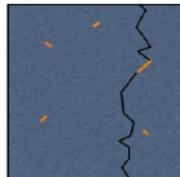
La matrice empêche (dans une certaine mesure) les fibres de flamber en compression et en cisaillement



4

Propagation de fissures ralentie

- Dans les matériaux classiques, des fissures peuvent s'amorcer sur le plus gros défaut et se propager sans obstacles.



- Dans les matériaux composites, la rupture d'une fibre est restreinte, elle ne se propage pas.

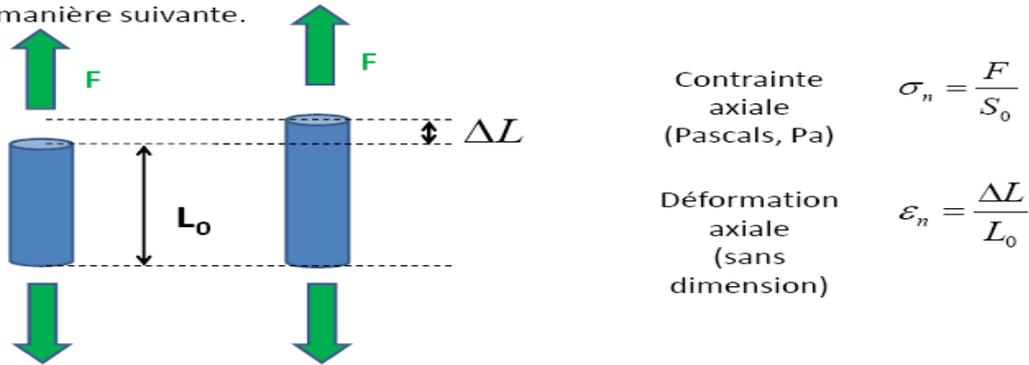


Quelques définitions concernant les matériaux

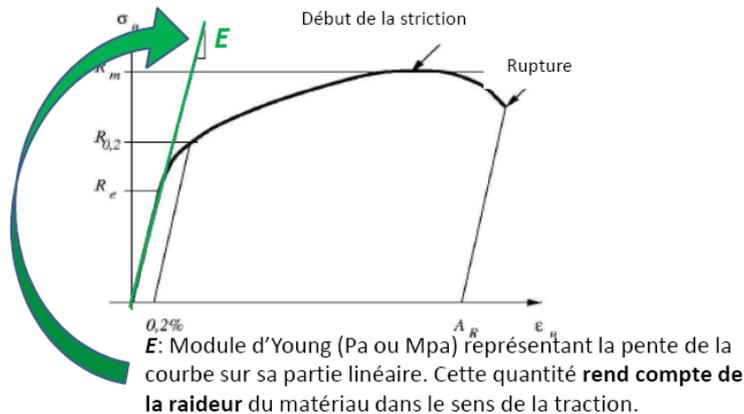
- **HOMOGENE:** Mêmes propriétés en tout point
- **HETEROGENE:** Propriétés différentes d'un point à un autre;
- **ISOTROPE:** Mêmes propriétés dans toutes les directions;
- **ORTHOTROPE:** Propriétés symétriques par rapport à 2 plans de symétrie;
- **ANISOTROPE:** Propriétés différentes selon les directions.

Un matériau composite est la plupart du temps **hétérogène et anisotrope**.

Lors d'un essai de traction uniaxial sur une éprouvette de section S_0 , les propriétés du matériau concerné peuvent être déterminées de la manière suivante.



La courbe de traction obtenue est donnée ci-dessous. Elle donne l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation.



1.6.2. Les matériaux composites possèdent des propriétés appréciables en industrie

1.6.2.1. Absence de corrosion

La corrosion est un problème majeur en construction navale. Elle génère des coûts de fabrication importants. Les navires sont également rendus indisponibles pendant de longues périodes pour des traitements de maintenance.

En outre, l'oxydation des métaux peut dans certains cas engendrer des problèmes de sécurité, comme par exemple dans les enceintes confinées.

Des incidents dramatiques ont malheureusement par le passé, illustré les risques liés à la consommation de l'oxygène dans des locaux telles que les soutes.

1.6.2.2. Légèreté

Les matériaux composites permettent de réaliser des structures bien plus légères pour une résistance équivalente. Cet allègement des structures est sans conteste un des arguments majeurs pour l'emploi des composites. Il permet : une amélioration de la stabilité, une réduction de consommation de carburant, une augmentation de la capacité d'emport ou de l'autonomie (aéronautique, naval)...

1.6.2.3.Résistance à la fatigue

Les composites à matrice organique présentent une résistance spécifique à la rupture en fatigue très supérieure à celle des matériaux métalliques, en général considérée comme 3 fois supérieure à celle des alliages légers d'aluminium et 2 fois supérieure à celle des aciers à haute résistance et des alliages de titane.

1.6.2.4.Amagnétisme

Application militaire: Le développement des mines à influence a conduit les concepteurs de navires à réduire la signature magnétique des coques de navires. Le challenge est d'autant plus important pour les navires anti-mines particulièrement exposés à ce risque. Les principales marines se sont donc tout naturellement orientées vers la réalisation de coques de navires anti-mines, d'abord vers le bois puis assez rapidement vers les composites à matrice organique qui sont par nature amagnétiques.

1.6.2.5.Tenue au feu

La tenue au feu des matériaux composites est problématique puisque les matériaux organiques sont inflammables. Les produits organiques (matrices) brûlent et peuvent dégager des fumées toxiques pour l'homme.

1.6.3.Application des composites en Génie Civil

Les matériaux composites peuvent être utilisés comme renforts dans les structures de génie civil, notamment pour les piliers.



Composites utilisés comme renforcement à la compression, à l'effort tranchant et à la flexion, directement collés sur les piliers.

1.6.4.Application des composites en Génie mécanique

A380 state of the art composites

