

Cours MP-1 : Présentation générale des matériaux

Compétences attendues: justifier le choix d'un matériau pour une pièce constitutive d'un système.

Contenu associés :

Matériaux des produits et systèmes.

Caractéristiques :

structure,

propriétés physicochimiques (conductibilité, masse volumique, résistance à la corrosion),

propriétés mécaniques (résistance, dureté, résilience).

Classes de matériaux : désignation, domaine d'utilisation.

1 Généralités

Les matériaux se classent en 4 catégories :

- les métaux



Les matériaux métalliques, comme leur nom l'indique, comportent des liaisons essentiellement métalliques, c'est-à-dire en partie assurées par des électrons délocalisés. Ils sont généralement solides à température ambiante et organisés sous forme de cristaux.

exemples : acier, fontes, aluminium, cuivre.

- les plastiques : naturels ou synthétiques



Les matériaux plastiques sont constitués de polymères organiques (Carbone + Hydrogène). Les macromolécules (taille de l'ordre du micron) sont liés par des liaisons faibles. Ils sont d'origine naturelle ou synthétique (à partir du pétrole notamment).

exemples : bois, cuir, PVC, polystyrène, polyamide, caoutchouc.

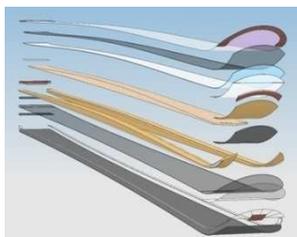
- les céramiques



Les céramiques sont caractérisées par des liaisons iono-covalentes qui sont des liaisons fortes. Ils sont généralement constitués de cristaux.

exemples : roche, béton, verre, diamant, carbure, ...

- les composites



Les matériaux composites sont des associations entre les matériaux précédents dont ils cumulent les avantages. Leur structure est une matrice qui constitue l'essentiel du matériaux dans laquelle sont inclus les renforts.

exemples : ski (plastique + métal), béton armé (céramique + métal), coques fibrées (plastique + céramique).

2 Choix d'un matériau

2.1 Paramètres de choix

Le choix d'un matériau peut être complexe car les paramètres sont très nombreux :

- les propriétés physicochimiques :
 - o masse volumique,
 - o conductibilité électrique et thermique (souvent liées),
 - o résistance à la corrosion,
- les propriétés mécaniques :
 - o résistance élastique, résistance à la traction ou à la compression,
 - o dureté,
 - o résilience (résistance au choc),
- le procédé d'obtention envisagé (fonction du seuil de rentabilité et des formes souhaitées),
- l'environnement économique (coût de production, qualité perçue, marché potentiel).

2.2 Comparatifs des matériaux

L'ordre de grandeur de ces paramètres en fonction des matériaux employés (sources CES Edupack) est donné dans le tableau ci-dessous :

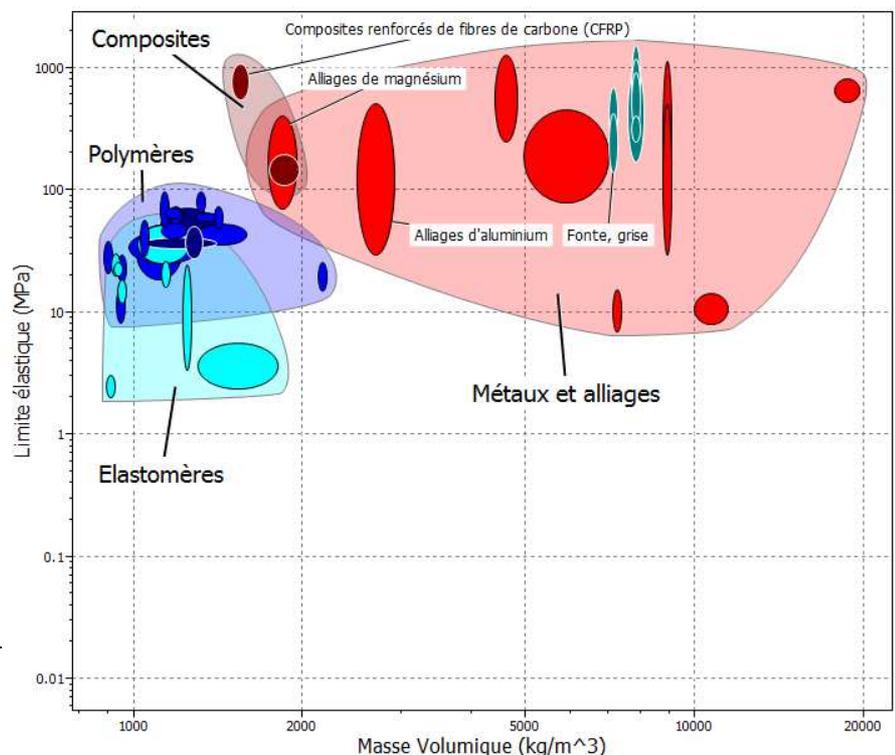
matériau	Acier faiblement allié	Aluminium	Polyamide	Béton
Masse volumique	7900 Kg/m ³	2700 Kg/m ³	1120 Kg/m ³	2400 Kg/m ³
Résistivité électrique	bon conducteur: 1 μΩ.cm	bon conducteur 1 μΩ.cm	bon isolant : 10 ²⁰ μΩ.cm	mauvais isolant 1,810 ¹² μΩ.cm
Conductibilité thermique	bon conducteur: 40 W/(m°.C)	bon conducteur 120 W/(m°.C)	bon isolant : 0,24 W/(m°.C)	mauvais isolant 2 W/(m°.C)
Résistance à la corrosion	rouille	souvent inox	bon	bon
Résistance élastique	400 – 1500 MPa	50-300 MPa	50-100 MPa	2 MPa en traction 14-50 MPa en compression
Dureté Vickers	140 – 700 HV	60-150 HV	26 HV	6 HV
Résilience	bonne	bonne	bonne	fragile
Procédé	usinage, forgeage	usinage moulage	usinage moulage	moulage
Coût	1 €/Kg	2 €/Kg	3 €/Kg	0,03 €/Kg

2.3 Critères de choix

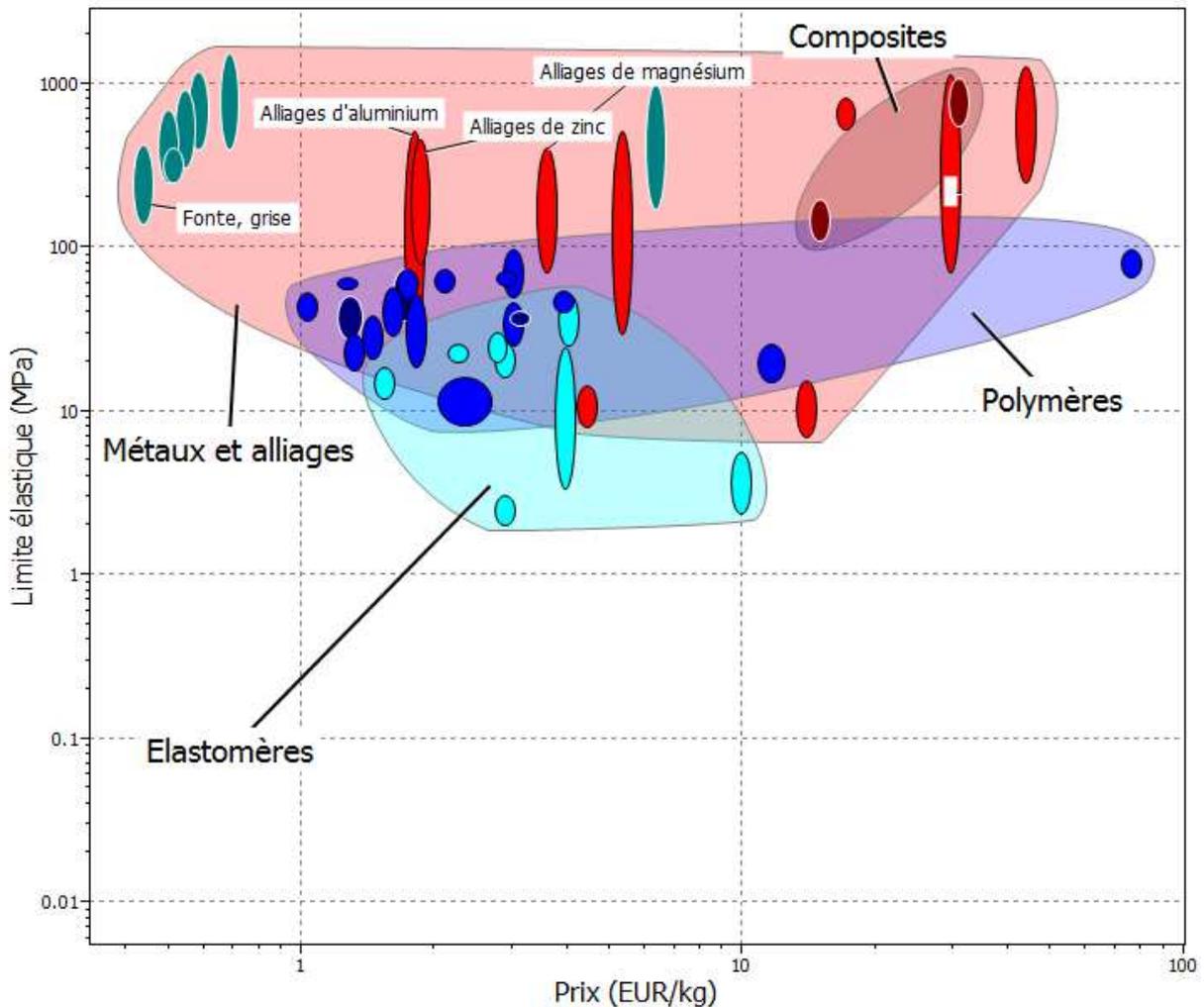
Le choix des matériaux se fait à partir d'une valeur limite d'un critère ou par compromis entre paramètres.

On peut par exemple choisir un matériau selon le compromis **résistance-masse volumique** (pour les véhicules notamment) :

Pour des résistances élastiques supérieures à 100MPa, on voit qu'il reste le choix des métaux ou matériaux composites (il s'agit en fait d'alliage de magnésium ou composite en fibre de carbone).



Un autre compromis classique est le compromis **résistance-coût** :



On voit cette fois que pour des matériaux ayant une résistance supérieure à 100MPa, ce sont les fontes qui sont bien placés.

Enfin si l'on croise les 2 études avec une prédominance sur le coût au Kg, on choisira l'aluminium.

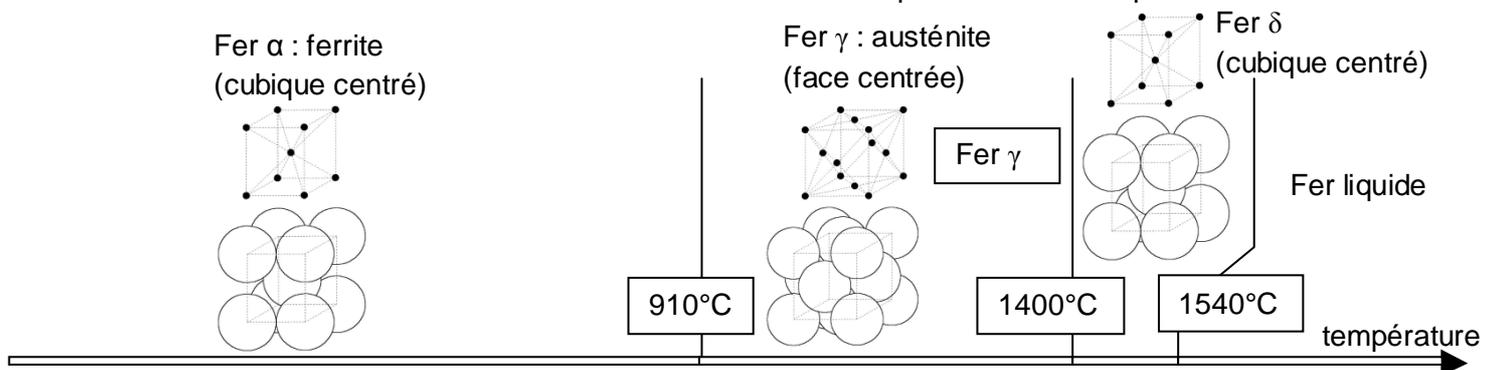
Reste à valider l'adéquation coût-matériau-procédé.

3 Alliages à base de fer

Les alliages de fer représentent l'essentiel des métaux dans les systèmes industriels.

3.1 Structure du fer en fonction de la température

Le fer est constitué de cristaux. Les structures d'atomes dépendent de la température:



La résistance élastique sera d'autant plus grande et le matériau plus ductile (déformable) que les cristaux seront petits.

Une méthode pour obtenir de petits grains est de refroidir brusquement (la trempe) ou d'ajouter des éléments supplémentaires (carbone ou autre métal).

Dans le cas de la trempe, la petite taille des cristaux s'accompagne de fragilité par les tensions internes et les structures qu'elle génère. Ces tensions sont fortement atténuées par un recuit à 600°C.

Les atomes plus petits que les atomes de fer peuvent s'intercaler entre les atomes de fer : le plus courant est l'atome de carbone C.

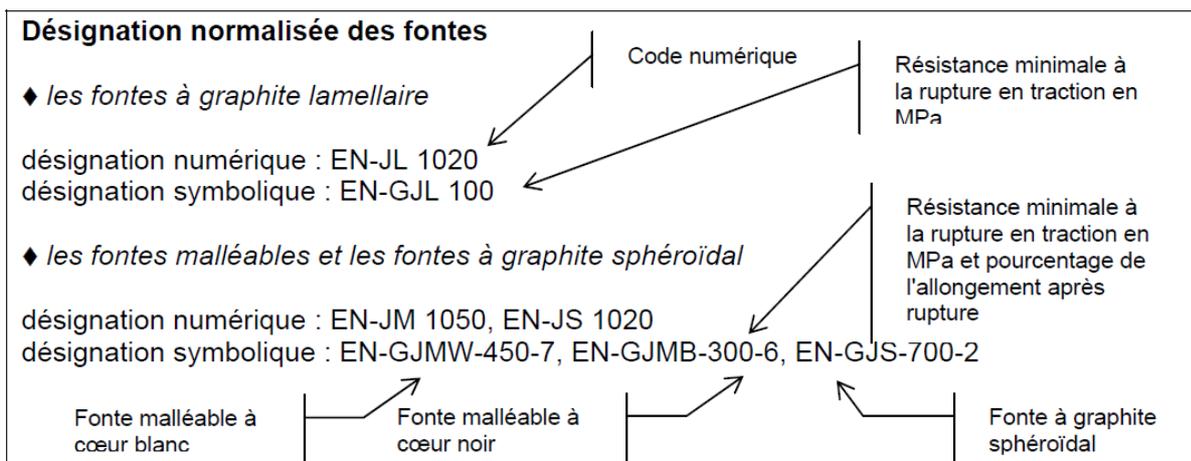
La présence de carbone va permettre d'accroître la résistance élastique du fer et donne :

- **de l'acier de construction si $\%C < 0,2\%$** : quantité maximum absorbée par le fer α ,
- **de l'acier allié si $\%C < 2\%$** : quantité maximum absorbée par le fer γ ,
- **de la fonte si $2\% \leq \%C < 5\%$** : fer mélangé avec du carbure de fer Fe_3C (très dur).

Lorsque les atomes sont plus gros, ils se substituent à un atome de fer dans le cristal (chrome, nickel, vanadium,...)

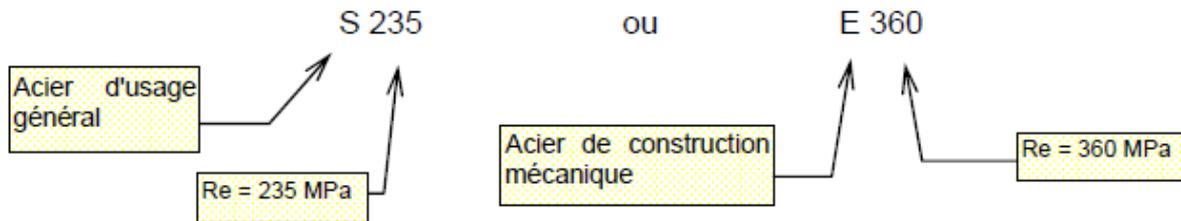
La présence de manganèse (Mn) est également favorable car il permet notamment en s'associant au soufre (Mn S) d'en réduire l'effet néfaste.

3.2 Désignations des alliages de fer



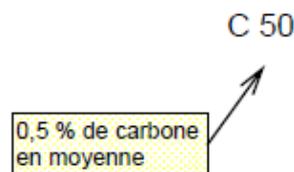
DESIGNATION DES ACIERS (norme NF EN 10025)

Classification par emploi



Classification par composition chimique

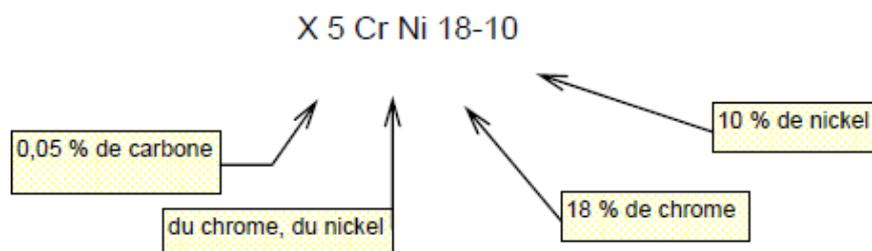
◆ **Les aciers non alliés** (teneur en manganèse inférieure à 1 %)



◆ **Les aciers faiblement alliés** (teneur en manganèse supérieure à 1 %, teneur de chaque élément d'alliage inférieure à 5 %)



◆ **Les aciers fortement alliés** (teneur d'au moins 5 % pour un élément d'alliage)



3.3 Emploi des différentes nuances de fer

3.3.1 Aciers d'usage général (S355, E335)

Ces aciers sont définis par leur résistance élastique minimum.

Ils sont ductiles puisque leur teneur en carbone est faible (elle ne dépasse pas 0,2 %) ;

Deux types de produits se distinguent :

- produits longs : poutrelles, profilés de sections diverses, les fers marchands, les tubes, les fils, les câbles et les rails.
- produits plats comprennent les tôles fortes, les plaques (épaisseurs supérieure à 5 mm), les tôles minces pour l'emboutissage.

3.3.2 Aciers à outils (35 Cr Mo 4, 100 Cr 6)

Les outils ont des conditions d'utilisation très variées : chocs, tranchant, dureté.

La teneur en carbone est en général assez élevée (de l'ordre de 0,6 à 1 %) sauf pour les outils travaillant aux chocs (moule d'injection pour matière plastique).

Ce sont en général des aciers fortement alliés de chrome (entre 5 et 12 %) pour éviter la corrosion.

Ils doivent posséder la dureté la plus élevée possible, une très bonne résistance à l'usure et une grande ténacité.

3.3.3 Aciers de traitement thermique (C 32, 20 Ni Cr 6, 35 Ni Cr Mo 16)

On distingue 3 grands types de traitement thermique :

- les recuits (après des déformations plastiques importantes par exemple),
- les traitements dans la masse (austénisation, trempe, revenu)
- les traitements de surface (trempe superficielle, nitruration ou cémentation : ajout de composants en surface).

Ces aciers sont définis par leur composition chimique. Celle-ci détermine le type de traitement qu'on peut leur appliquer.

Les aciers de traitement thermique sont :

- soit des aciers au carbone (sans autre élément d'addition que les éléments d'accompagnement, Manganèse : Mn et Silicium : Si),
- soit des aciers alliés contenant en proportions variables, un ou plusieurs éléments d'addition (Chrome : Cr, Nickel : Ni, Molybdène : Mo, Vanadium : V, ...);
Le chrome favorise le durcissement et augmente la résistance à la corrosion.
Le nickel augmente la ténacité à basse température.
Le molybdène augmente la résistance mécanique et la dureté ainsi que la résistance au fluage (fluage= déformation sans augmentation de la charge)

3.3.4 Aciers inoxydables (X 30 Cr 13, X 8 Cr Ni 18-12)

Le chrome est l'élément essentiel qui, à des teneurs supérieures à environ 12 % rend l'acier inoxydable en favorisant, en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface.

On qualifie, ces aciers d'inoxidables mais cela n'est pas vrai dans toutes les conditions. Par exemple, dans certains cas peut se produire le phénomène de corrosion inter-granulaire, quand l'acier est maintenu au contact prolongé de certains réactifs. Celui-ci provient d'une déchromatisation des régions voisines des frontières des grains provoquée par la formation de carbures de chrome et de fer dans les joints inter-granulaires.

On utilise ce type d'acier en visserie, pour les ressorts, pour les arbres de pompes, la coutellerie, les soupapes ...

3.3.5 Fontes (EN-GJL 150, EN-GJS 400-18)

Les fontes sont des alliages fer-carbone de très forte teneur en carbone (> 2 %), ce qui les rend fragiles et interdit toute déformation plastique. On les utilise donc principalement en fonderie.

En fonction de leur teneur en silicium, on distingue 4 types de fontes:

- Les **fontes blanches** sont dures et fragiles mais résistent bien à l'usure.
- Les **fontes grises**, moins dures et moins fragiles, amortissent les vibrations et sont souvent utilisées pour les bâtis.
- Les **fontes malléables** sont utilisées pour la petite quincaillerie, les raccords de plomberie ...
- La **fonte à graphite sphéroïdale** possède des propriétés mécaniques (résistance, ténacité) comparables à celles des aciers et résistent mieux à l'usure que ceux-ci. C'est pour cette raison que l'on utilise les fontes à graphite sphéroïdale pour la fabrication des carters de pompes, des vannes, des vilebrequins, des engrenages ...

4 Alliages non ferreux

Les alliages non ferreux sont utilisés pour certaines de leurs propriétés spécifiques : masse volumique faible, propriétés électriques, résistance à la corrosion et à l'oxydation, facilité de mise en œuvre.

Ces avantages l'emportent dans certaines applications, malgré le coût de revient plus élevé de ces alliages. Nous nous limiterons aux alliages de l'aluminium, du cuivre et du zinc.

Structure des métaux : la majeure partie des matériaux métalliques ont une structure cristalline constituée de réseau d'atomes organisés en cube ou en cylindre hexagonal.

4.1 Aluminium et ses alliages

Les alliages d'aluminium présentent tous les avantages recensés ci-dessus :

- point de fusion de l'aluminium, notamment, est bas (~ 660 °C) ce qui le rend particulièrement apte aux opérations de fonderie (surtout avec ajout de silicium Si)
- très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique (laminage, filage à la presse, étirage,...),
- l'ajout de cuivre améliore les qualités des pièces usinées,
- masse volumique est de 2700 kg/m³, soit près de trois fois moins que l'acier
- résistent assez bien à la corrosion grâce à la formation d'une couche d'oxyde Al₂O₃ en surface,
- tenue mécanique au-delà de 150 °C pose problème ainsi que la tenue en fatigue et en corrosion sous contrainte,
- difficile à souder,
- relativement chers.

Il existe de nombreux alliages d'aluminium que se soit des alliages corroyés (= forgés) ou des alliages de fonderie.

Compte tenu de ces avantages, c'est un alliage principalement utilisé en aéronautique, dans l'industrie alimentaire et cryogénique, pour les articles de sport et les structures utilisées en atmosphère marine.

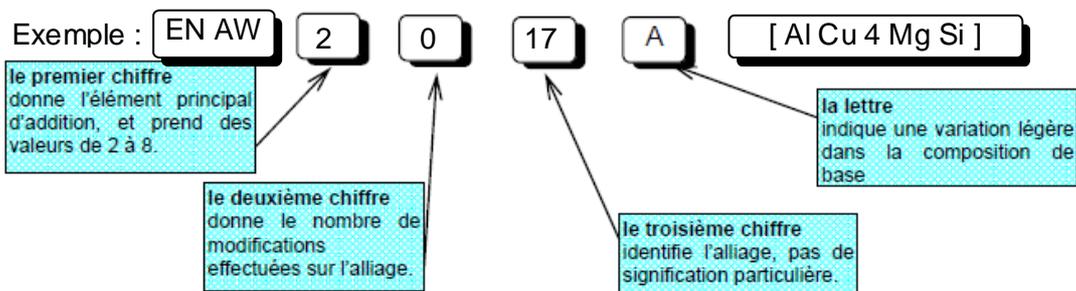
La désignation des alliages d'aluminium de fonderie

La norme NF EN 1780 impose une désignation numérique des alliages d'aluminium de fonderie qui peut être éventuellement suivie d'une désignation par symboles chimiques.

Exemple : EN AB 44 200 [Al Si 12]

La désignation des alliages d'aluminium corroyés

La norme NF EN 573 définit les règles de désignation des produits destinés à être transformés par corroyage⁸. La désignation des alliages d'aluminium comprend un nombre de 4 chiffres et une lettre dont la définition est donnée ci-après :



PRINCIPAUX ELEMENTS D'ADDITION

2 : cuivre	4 : silicium	6 : magnésium	7 : zinc
3 : manganèse	5 : magnésium & silicium	8 : autres	

4.2 Cuivre et ses alliages

Les principales caractéristiques du cuivre sont :

- une très bonne conductibilité électrique et thermique,
- une résistance convenable à l'usure,
- sensibilité à la corrosion : le vert de gris,
- chers.

Le cuivre peut être allié avec le Zinc : Zn, l'aluminium : Al, le nickel : Ni, l'étain : Sn et le plomb : Pb pour donner les 4 alliages suivants :

noms	désignation	R (MPa)	remarques
Laitons	Cu Zn20	200-260	bonnes qualités de frottement - mise en œuvre aisée
	Cu Zn23 Al4	500	excellentes caractéristiques mécaniques - fonderie
Cupro-aluminiums	Cu Al11 Ni5 Fe5	740-800	excellente résistance à la corrosion - inoxydable à haute θ°
	Cu Al9	500	utilisé en construction navale
Cupro-nickels	Cu Ni10 Fe1 Mn	300-350	utilisé en construction navale
Bronzes	Cu Sn 5	340-390	très bonne tenue aux frottements
	Cu Sn7 Pb6 Zn4	220	aptitude à l'étanchéité - excellentes propriétés de fonderie

Domaines d'application du cuivre :

- la moitié de la production mondiale de cuivre pour du matériel électrique (conducteur, transformateur, moteurs électriques...).
- le reste de la production est principalement utilisé pour les tuyaux à eau, la plomberie, les pompes et les vannes...
- Associé à l'étain ou à l'aluminium, il possède de bonnes propriétés de surface (résistance à l'usure et au frottement), on l'utilise comme palier de guidage, comme pignon...

Désignation : code numérique (exemple : CW453K) ou symboles chimiques (Cu Sn 8)

Température de fusion : 1 080 °C,

Masse volumique : 8 900 kg/m³

4.3 Zinc et ses alliages

Les principales caractéristiques des alliages de zinc sont :

- leur faible température de fusion (~420 °C) et leur excellente coulabilité. Ils sont donc principalement destinés à la fonderie, ce qui permet d'obtenir des pièces de forme très complexe et d'épaisseur très mince (~ 0,4mm).
- faible coût de revient, permet de concurrencer les alliages d'aluminium ou de cuivre et même souvent les matières plastiques.

On utilise largement les alliages de zinc dans l'automobile (carburateur, pompe à essences...), dans l'électroménager, en quincaillerie et en mécanique de précision (appareils photographiques, horlogerie...)

Les principaux alliages de zinc sont les **zamaks** qui contiennent 4 % d'aluminium, 0,04 % de magnésium et 1 % de cuivre ou pas du tout.

Exemple de désignation

du zamak 3 : Z - A4G,

du zamak 5 : Z - A4 U1 G.

Masse volumique du zinc : 7 100 kg/m³

4.4 Titane et ses alliages

Bien que le titane soit un élément fort abondant dans l'écorce terrestre, ce n'est que vers 1950 qu'on a commencé à l'utiliser sous forme métallique.

Ceci découle des difficultés liées à sa métallurgie extractive et des problèmes posés par sa mise en œuvre.

Les caractéristiques tout à fait particulières du titane en font un métal de choix pour de nombreuses utilisations, notamment dans les domaines aéronautiques et aérospatial et dans l'industrie chimique :

- La masse volumique du titane (4540 kg/m^3) se situe entre celle de l'aluminium et du fer .
- Le rapport résistance mécanique sur masse volumique des alliages de titane est nettement supérieur à celui des autres métaux.
- La résistance à la corrosion du titane et de ses alliages est excellente (le titane est passivable grâce à la formation d'un film protecteur de TiO_2) ; elle est supérieure à celle des aciers inoxydables.
- Les alliages de titane peuvent manifester une bonne tenue mécanique à chaud (jusque vers $700 \text{ }^\circ\text{C}$) et une bonne résistance à l'oxydation ; cependant, à des températures plus élevées, ils risquent de se charger en impuretés (oxygène, hydrogène), ce qui altère leurs propriétés mécaniques.

Température de fusion : $1\ 670 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.5 Alliages réfractaires

Pour de très nombreuses applications, il a fallu mettre au point des alliages qui, sans qu'ils se dégradent par oxydation, conservent des propriétés mécaniques acceptables à haute température : il s'agit des alliages réfractaires employés à des températures pouvant s'échelonner de 700 à $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, selon le cas.

A des températures inférieures, on peut recourir à certains aciers inoxydables. Il existe trois principales classes d'alliages réfractaires :

- les alliages à base de fer et de nickel (contenant au moins 25% de nickel),
- les alliages à base de nickel (une centaine de compositions différentes),
- les alliages à base de cobalt (la résistance à la corrosion due au gaz de combustion est beaucoup plus élevée que pour les deux types précédents) ; on appelle souvent ces alliages des « superalliages ».

Les utilisations des alliages réfractaires sont multiples ; parmi celles-ci, citons les suivantes :

- résistances électriques chauffantes,
- soupapes d'échappement des moteurs à combustion interne,
- fours industriels et équipements de traitements thermiques, ...

5 Polymères : matières plastiques

Les polymères sont constitués d'un grand nombre d'unités fondamentales, appelées monomères. Ce sont des molécules organiques dont le noyau est essentiellement constitué d'un atome de carbone (ou de silicium dans le cas des polymères siliconés).

Les propriétés caractéristiques des polymères

- généralement un faible module d'élasticité,
- une limite élastique d'autant plus faible qu'ils seront portés à plus haute température,
- faciles à mettre en forme.
- une bonne résistance à l'usure.
- faciles à assembler
- bonne tenue à la corrosion.
- légers
- peuvent être très bon marché.

On distingue les polymères issus d'éléments naturels tel que le latex, le bois, le coton... et les polymères obtenus par synthèse à partir d'éléments tels que le charbon, les hydrocarbures, l'eau, le sable...

Malgré un ralentissement dû aux effets des chocs pétroliers et à la récession économique qui s'en est suivie, la production mondiale de matières plastiques n'a cessé de croître. Ce domaine demeure porteur.

	production pondérale (milliers de t)	densité moyenne	production volumique (milliers de m ³)
acier	18 000	7,8	2 400
plastiques	4 400	1,1	4 000

5.1 Obtention et structure des polymères

Les polymères, substances organiques macromoléculaires, sont obtenus par l'assemblage des monomères de base. Cette opération s'appelle *la polymérisation*.

On en distingue deux principaux types :

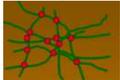
Polymérisation par addition,

Les monomères présentent une double liaison carbone-carbone (C = C), celle-ci peut s'ouvrir pour devenir (- C - C -), et à laquelle d'autres monomères peuvent se lier. Il est possible d'ajouter des molécules de même nature, dans ce cas on obtient un *homopolymère*, le polyéthylène par exemple, ou de nature différente pour donner un *copolymère*, le polystyrène-butadiène-acrylonitrile par exemple. On obtient ainsi par ce procédé, une macromolécule linéaire qui croît par addition des monomères. C'est une réaction en chaîne dont la cinématique peut être très rapide et qu'on peut contrôler par des additifs (retardateurs).

La polymérisation par addition entraîne la formation de macromolécules linéaires qui peuvent se ramifier. 

Polymérisation par condensation,

Alors que dans la polymérisation par addition, tous les atomes des monomères se retrouvaient dans le polymère, la polymérisation par condensation entraîne des réactions chimiques qui produisent la formation de sous-produits. Les réactions de polycondensation sont des réactions par étapes. Les deux monomères en présence donnent naissance à une molécule intermédiaire, laquelle constitue l'élément fondamental qui se répète dans la macromolécule.

La polymérisation par condensation engendre en général un réseau tridimensionnel 

Le comportement des matières plastiques dépend en grande partie du type de structure obtenue et de son degré de réticulation (réticulation : création de liaison transversale dans le polymère linéaire qui devient tridimensionnel).

En général, on classe les matières plastiques en trois groupes: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

5.1.1 Matières thermoplastiques

Dans les polymères linéaires, ou ramifiés, obtenus par addition, les macromolécules ne sont liées entre elles que par des liaisons de faible intensité (liaisons de Van der Waals). Le comportement global du matériau dépend alors de la mobilité des chaînes les unes par rapport aux autres et de la rotation autour des liaisons C - C. L'élévation de température facilite le déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres, le comportement d'abord vitreux, devient caoutchoutique entre la température de transition vitreuse (T_{g10} ou T_v) et la température de fusion T_f. La réversibilité de comportement permet la mise en forme de ces matières à l'état fondu ou caoutchoutique.

5.1.2 Matières thermodurcissables

Les matières plastiques obtenues par condensation de monomères sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ce sont des matériaux amorphes et infusibles, il ne peut y avoir aucun déplacement de chaînes les unes par rapport aux autres. Lorsque la température augmente, le matériau ne devient pas visqueux, mais il conserve sa rigidité

jusqu'au moment où il se dégrade. On appelle ces plastiques thermodurcissables car, en général, une élévation de température favorise la réaction de polymérisation et le degré de réticulation, donc la rigidité.

5.1.3 Élastomères

Les élastomères sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et à chaînes linéaires. Le déplacement de leurs chaînes les unes par rapport aux autres n'étant limité que par une légère réticulation, on peut obtenir de grandes déformations élastiques totalement réversibles. Lorsque la contrainte est nulle, ces matériaux sont amorphes, leurs chaînes tendant toutefois à s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité. Pour obtenir un tel comportement, il faut utiliser ces matériaux à une température supérieure à leur température de transition vitreuse.

Les propriétés des élastomères dépendent de leur degré de réticulation ; c'est ainsi que les propriétés du caoutchouc varient en fonction de la quantité de soufre utilisée lors de la vulcanisation (vulcanisation : procédé consistant à intégrer du soufre dans le caoutchouc), en vue de lier les chaînes les unes aux autres.

5.2 Domaine d'emploi et désignation des polymères

5.2.1 Principaux thermoplastiques et leurs emplois

La rapidité de mise en œuvre des thermoplastiques (injection et extrusion notamment), et la possibilité de réutiliser les déchets ont favorisé leur emploi dans tous les cas où on les utilise à des températures inférieures à 100 °C. Ils ont donc souvent, dans ces domaines, remplacé les thermodurcissables, dont la transformation est plus longue. On distingue principalement deux types de thermoplastiques :

Thermoplastiques de grande diffusion

familles	désignations	utilisations
les vinyliques	PVC rigide PVC souple	tubes, profilés, bouteilles revêtements de sol, joints, isolants
les polyoléfines	PEbd PEhd PP	gaines, films, sacs pièces moulées, films fils, films, pièces moulées
les styréniques	PS PSC choc PSE expansé SAN ABS	emballages thermoformés ou injectés, ameublement, TV, HIFI, électroménager isolation thermique pièces moulées pièces moulées
les acryliques	PMMA PAN	plaques transparentes, feux de position corps creux pour cosmétiques

Thermoplastiques techniques

familles	désignations	utilisations
les polycarbonates	PC	vitrage, lanternerie, CD, matériel médical
les polyamides	PA	roues dentées, paliers, ventilateurs
les polyesters saturés	PET, PBT	électrotechnique, électroménager, bouteilles, films, barquettes pour micro-ondes
les polyoxydes de phénylène	PPO	automobiles, micromécanique, carters
les polysulfurés	PSU PPS	aéronautique, électrotechnique, robinetterie pièces techniques, matériel médical, pompes
les polyoxyméthylènes	POM	pièces mécaniques, engrenages
les polyfluorés	PTFE, PVDT	anti-corrosion, lubrification, glissement, isolation électrique

Ils sont nommés ainsi à cause de leurs facultés à remplir les fonctions techniques autrefois réservées aux métaux. Ils se regroupent autour de certaines caractéristiques :

– facilité de mise en œuvre,

- bonnes propriétés mécaniques et diélectriques,
 - ratio « propriétés/densité » très avantageux,
 - inertie chimique, absence de corrosion,
 - bonne conservation des propriétés en température et en fonction du temps.
- On les retrouve soit discrètement dissimulés dans un appareil électroménager (engrenages), soit au contraire bien visibles (feux arrières d'une automobile). Ils sont présents sur les grands marchés comme l'électricité, l'électrotechnique, l'automobile, l'électroménager, l'outillage et les loisirs.

Plastiques thermostables

Ces polymères ont vu le jour dès 1980. Ils permettent une meilleure tenue en température continue voisine de 200 °C. Ils résultent pour la plupart de combinaisons entre les groupes arylates, éthers, imides et sulfones.

PAI	polyamide-imide	PAA	polyaryl-amide
PEI	polyéther-imide	PSU	polysulfone
PEK	polyéther-cétone	PPS	polyphénylène-sulfone
PEEK	poléther-éther-cétone	PES	polyéther-sulfone

5.2.2 Principaux thermodurcissables et leurs emplois

Bien que les polymères thermodurcissables soient moins employés que les thermoplastiques, ils demeurent intéressants pour des températures d'utilisation comprises entre 100 et 200 °C. Ils subissent pendant leur transformation, une opération chimique de polymérisation de fixation (chaleur, pression, température). Leur durcissement est irréversible, les déchets ne sont donc pas réutilisables. On distingue :

Phénoplastes (PF, UF) et les aminoplastes (MF, MP)

Ces résines ont en commun les propriétés suivantes : faible prix, rigidité, tenue thermique, stabilité dimensionnelle dans le temps, qualités diélectriques, mais sont faibles en contraintes dynamiques.

On les utilise le plus souvent chargées de poudre minérale sous forme :

- de pièces moulées : isolants électriques, poignées de casseroles, vaisselle...
- de stratifiés : laminés décoratifs, circuits imprimés...
- de colles

Polyesters insaturés (UP)

Ils sont obtenus par polycondensation d'acides et d'alcool.

- les UP non renforcés sont utilisés comme laques, vernis, liants et adhésifs,
- les UP renforcés (90 % de l'emploi de ces matériaux) sont employés dans la fabrication des piscines, cuves, coques de bateaux, carrosseries...

Polyépoxydes (EP)

Ils sont obtenus par polycondensation d'épichlorhydrine et de biphénol. On les trouve sous forme liquide, pâteuse ou solide. Ils sont utilisés en :

- résines : articles de sport, coques, pièces pour l'aéronautique...
- adhésifs : collage de béton, de métaux, de plastiques...
- poudres à mouler : isolation électrique...
- peintures et vernis,
- composites hautes performances.

Silicones (Si)

Ce sont des composés organosiliciques. On les trouve sous forme de pâtes, graisses, fluides, résines ou d'élastomères. On les utilise dans les circuits imprimés, les joints d'étanchéité, les tétines de biberons, les agents de démoulage...

Polyimides (PI)

Ils sont obtenus par polycondensation de diamines aromatiques ou par polymérisation d'imides éthyléniques. Ils possèdent une très bonne tenue à la température (jusqu'à 250 °C). Ils sont utilisés sous forme de :

- films : isolants électriques, supports de jauges de déformations...
- poudres à mouler : cônes de réacteur, engrenages, allume-cigares...

Polyuréthanes (PUR)

Ils sont préparés directement par l'utilisateur à partir de pré-polymères. On procède par polyaddition de di-isocyanates et de polyols. Suivant la nature des isocyanates employés, on trouve toute une gamme de produits (résines, vernis, adhésifs, élastomères, mousses). La principale utilisation du polyuréthane est sous forme de mousses :

- les mousses rigides : isolation thermique,
- les mousses semi-rigides : accoudoir, appui-tête, chaussures,
- les mousses souples : sièges, matelas, joints...

6 Céramiques techniques

Les céramiques sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique.

La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants à l'usure.

Ces matériaux ont de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Les céramiques techniques de qualité ont tendance à être chères.

7 Matériaux composites

Les matériaux composites sont des matériaux qui associent deux ou plusieurs matières différentes, appartenant parfois à 2 classes distinctes, pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chacun.

7.1 Structure des composites

Les plus fréquemment utilisés sont les composites à **matrice polymère et à renfort fibreux** qui présentent des propriétés spécifiques exceptionnelles, directionnelles ou non suivant le tissage.

Les composites **céramique/céramique** qui sont moins fragiles que les céramiques massives sont très intéressantes pour leur tenue en température.

Les composites à **matrice métallique et renfort céramique** ont pour vocation de tirer partie à la fois de la ductilité des métaux et de la raideur du renfort céramique.

Enfin il convient de citer pour mémoire les matériaux tels que le bois, les ciments et bétons, les mousses polymères, céramiques ou métalliques, qui sont également des matériaux composites.

L'idée de base est d'associer dans une même masse des matériaux différents par leurs natures chimiques et géométriques afin d'augmenter les performances globales du point de vue mécanique, physique et/ou chimique ainsi que de faciliter la mise en œuvre.

Des charges à renforts fibreux ont ainsi été introduites et mélangées à des matrices métalliques, céramiques ou plastiques. Mais l'association matrice-élément renforçant ne peut être quelconque et dépend :

- de la compatibilité chimique des matériaux en contact ;
- du procédé de mise en œuvre choisi en relation avec la géométrie de la pièce et les séries envisagées ;
- de la résistance mécanique, chimique,... attendue ;
- des coûts de fabrication, produits de base, transformation et finition et coût des contrôles.

Les structures obtenues sont généralement de type à deux dimensions principales, localement plates et lamellaires, quasi-isotropes ou anisotropes.

Leur conception géométrique et leur dimensionnement doivent obéir à certaines règles, souvent résultat de l'expérience propre de chaque atelier et/ou bureau d'études, complétées de méthodes de dimensionnement plus élaborées.

7.2 Domaine d'utilisation et associations usuelles

Il est possible de distinguer deux grandes classes de matériaux composites :

- **Les composites « grandes diffusions »**, les plus courants qui, pour un coût modéré, apportent des propriétés mécaniques intéressantes mais restent – sauf cas d'espèce – inférieures à celles des métaux. Il s'agit pour l'essentiel de l'association renfort fibre de verre-résine polyester.
- **Les composites « hautes performances »**, qui apportent des caractéristiques mécaniques spécifiques supérieures à celles des métaux et utilisent généralement des renforts fibres de carbone ou d'aramide (kevlar) avec des résines époxydes. Les coûts de ces matériaux sont élevés.

On notera la faible part pondérale des composites hautes performances qui représentent 2% de l'ensemble des composites.

7.2.1 Fibres utilisées

Les fibres sont les éléments du matériau composite qui apportent les propriétés mécaniques intéressantes. Elles se présentent sous forme de filaments de plus ou moins grande longueur dont les qualités recherchées sont les suivantes :

- bonnes caractéristiques mécaniques ;
- légèreté ;
- résistance thermique ;
- compatibilité avec les résines ;
- adaptabilité aux procédés de mise en œuvre ;
- faible prix.

Elles constituent une fraction volumique comprise entre 30 et 70 % (rapport du volume de fibres au volume total du composite).

Deux grandes catégories peuvent être distinguées :

- **les fibres à hautes performances** : fibres de verre, de carbone, d'aramide, ou de bore qui ont une fonction mécanique prépondérante mais il existe également quelques fibres synthétiques qui ont d'excellentes propriétés thermiques.
- **les fibres à utilisation particulière** utilisées initialement comme renfort mécanique (avant le développement des fibres à hautes performances) et qui sont maintenant employées pour des applications très spéciales telles que revêtement thermique, isolant électrique, élément décoratif. Ce sont des fibres d'origine naturelle (bois, coton, papier...) synthétique (polyamide, polyester...) ou métallique.

Les présentations sont très variées, outre les différentes longueurs possibles, existent :

- des ensembles linéaires (fil, mèche) ;
- des ensembles surfaciques (tissu, mat) ;
- des ensembles multidimensionnels (tresse, tissu complexe).

Fibres de verre

avantages	limites d'utilisation
<ul style="list-style-type: none"> - rapport performances mécaniques/prix très intéressant - disponible sous toutes les formes (fil, stratifié, mat, tissu...) - possibilité de bonne adhérence avec toute résine (existence d'ensimages) - résistances intéressantes à température élevée (environ 50 % de la résistance conservée à 350 °C) - dilatation thermique faible - conductivité thermique relativement faible - bonnes propriétés diélectriques - bonne résistance à l'humidité et à la corrosion 	<ul style="list-style-type: none"> - performances mécaniques spécifiques moyennes (comparées à celles du carbone, par exemple) - $E_{traction} = 55\ 000$ à $85\ 000$ MPa - $\sigma_{traction} = 2\ 500$ à $4\ 400$ MPa - $d = 2,2$ à $2,5$

Fibres de carbone

avantages	limites d'utilisation
<ul style="list-style-type: none"> - excellentes propriétés mécaniques, elles apportent aux matériaux une résistance à la rupture importante aussi bien en traction qu'en compression, et une rigidité très grande. - très bonne tenue en température en atmosphère non oxydante. - bonne tenue chimique à la température ambiante. - dilatation thermique nulle, voire négative, dans le sens des fibres. - bonne conductibilité thermique et électrique (comparée aux autres fibres). - excellente résistance à l'humidité. - bonne usinabilité des matériaux renforcés avec ces fibres. - densité faible 1,8 à 1,9. - insensibilité aux rayures. 	<ul style="list-style-type: none"> - prix élevé. - précautions à prendre lors de la mise en oeuvre (fibres cassantes). - tenue au choc faible. - tenue à l'abrasion limitée. - mauvaise tenue chimique avec : <ul style="list-style-type: none"> * l'oxygène à partir de 400 °C * les acides oxydants à chaud * les métaux pouvant former des carbures (corrosion galvanique).

7.2.2 Matrices utilisées

Les matrices constituent l'élément de liaison entre les fibres et peuvent être de nature métallique, minérale ou organique, therm durcissable, thermoplastique ou élastomère. Pour leurs caractéristiques voir le chapitre précédent.

Il est possible de faire ressortir trois critères globaux de sélection d'une matrice :

– **l'accessibilité** concerne les aspects :

- prix matières ;
- polyvalence aux méthodes de transformation (polymérisation à froid, à chaud, nombre de procédés de transformation possible) ;
- cadence de production dans la méthode de production la plus rentable ;
- investissements.

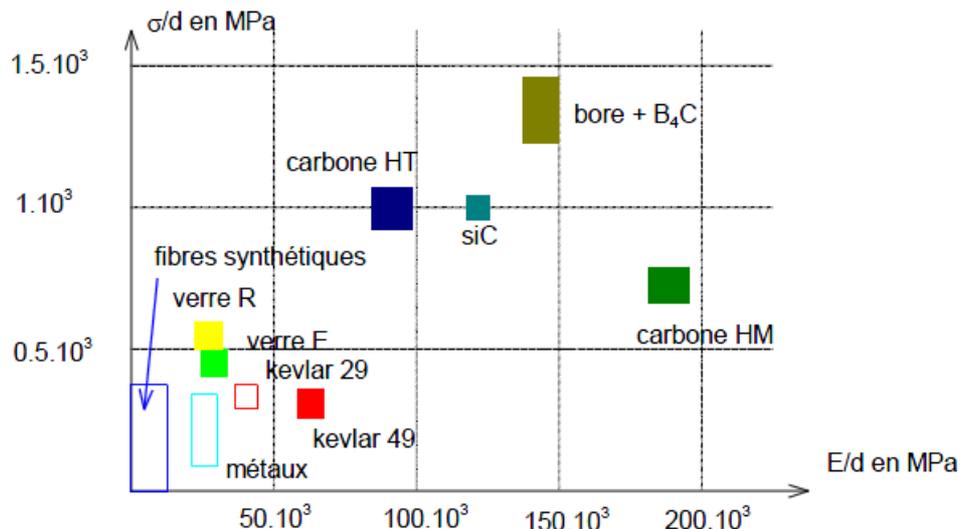
– **Propriétés** :

- physiques (densité, stabilité dimensionnelle, transparence,...) ;
- mécaniques ;
- conduction ;
- tolérances, cotes à la transformation.

– **Résistance ou durabilité** :

- au vieillissement extérieur (intempéries) ;
- au feu avec ses différents aspects (résistance à la combustion, fumées toxiques) ;
- au frottement ou à l'usure.

Propriétés comparées des différentes fibres :



Références :

<http://philippe.fichou.pagesperso-orange.fr/documents/Materiau2003.pdf>

<http://www.systemx.fr> (leçons de métallurgie appliquée de l'ESDEP : European Steel Design Education Program) logiciel CES EduPack 2011