

Matériaux

1 - Métaux et alliages métalliques

1.1 - Alliages à base de fer

Les alliages à base de fer (aciers et fontes) jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance : les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse, ils sont bon marché et on peut les acquérir sous des formes très variées grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition. Ils ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique.

Nous pouvons distinguer :

- les aciers d'usage général ;
- les aciers de traitement thermique ;
- les aciers à outils ;
- les aciers inoxydables ;
- les fontes.

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2 % de ce dernier élément. La fonte contient, quant à elle, de 2 à 5 % de carbone. Contrairement à cette dernière, l'acier est un métal ductile² : il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid. Il est caractérisé par une propriété fondamentale : il « prend la trempe », c'est-à-dire qu'il est susceptible d'acquérir une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande.

Un des défauts majeurs des aciers ordinaires est l'altération par l'action de l'atmosphère et, plus encore, par l'action des divers produits au contact desquels ils peuvent se trouver. La rouille est la première manifestation de cette altération, mais des attaques beaucoup plus profondes peuvent se produire par l'action de gaz ou de liquides plus réactifs.

1.1.1 - Aciers d'usage général (S355, E335)

Ces aciers sont définis principalement par leurs propriétés mécaniques. Leur résistance mécanique est de l'ordre de **500 MPa** pour la rupture et de **350 MPa** pour la limite élastique ; ils sont ductiles puisque leur teneur en carbone est faible (elle ne dépasse pas 0,2 %) ; l'allongement relatif avant rupture est de l'ordre de **25 %**. Ces aciers sont produits sous la forme de profilés (produits longs) ou sous la forme de tôles (produits plats) en fonction de leur utilisation.

Les produits longs comprennent les poutrelles, les profilés de sections diverses, les fers marchands, les tubes, les fils, les câbles et les rails.

Les produits plats comprennent les tôles fortes, les plaques (épaisseurs supérieure à 5 mm), les tôles minces pour l'emboutissage.

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

¹ Haut fourneau au coke du Creusot, 1865 environ.

² ductile : qui peut être déformé de façon permanente sans se rompre

Les propriétés des 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. Ces derniers sont responsables des bonnes propriétés de conductivité thermique et électriques des métaux. Les métaux sont généralement paramagnétiques voire ferromagnétiques. Leur température de fusion et de vaporisation sont en général élevées. Les métaux sont pour la plupart ductiles et relativement tenaces et l'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme. Par contre, après mise en forme, on peut facilement donner aux alliages métalliques une bonne résistance mécanique par des traitements thermiques appropriés grâce à la précipitation de phases durcissantes (durcissement structural). Du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes et ils sont de plus souvent sensibles à la corrosion. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses ce qui est parfois un handicap.

Toutes les étapes de la fabrication nécessitent des outils dont les conditions d'utilisation peuvent être 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.

1.1.3 - Les 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, les traitements dans la masse (trempe³, revenu⁴, austénisation⁵) et les traitements de surface (trempe superficielle, nitruration, cémentation). 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, Mn et Si), soit des aciers alliés contenant en proportions variables, un ou plusieurs éléments d'addition (Cr, Ni, Mo, V, ...); le chrome favorise le durcissement et augmente la résistance à la corrosion; le nickel augmente la ténacité⁶ à basse température; le molybdène augmente la résistance mécanique et la dureté ainsi que la résistance au fluage⁷, ...

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

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion généralisée. Toutefois, bien qu'on les qualifie d'inoxidables, ces aciers ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. Par exemple, les aciers inoxydables austénitiques (les plus courants), présentent dans certains cas le phénomène de corrosion intergranulaire, quand ils sont maintenus 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 intergranulaire. 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 utilise ce type d'acier en visserie, pour les ressorts, pour les arbres de pompes, la coutellerie, les soupapes ...

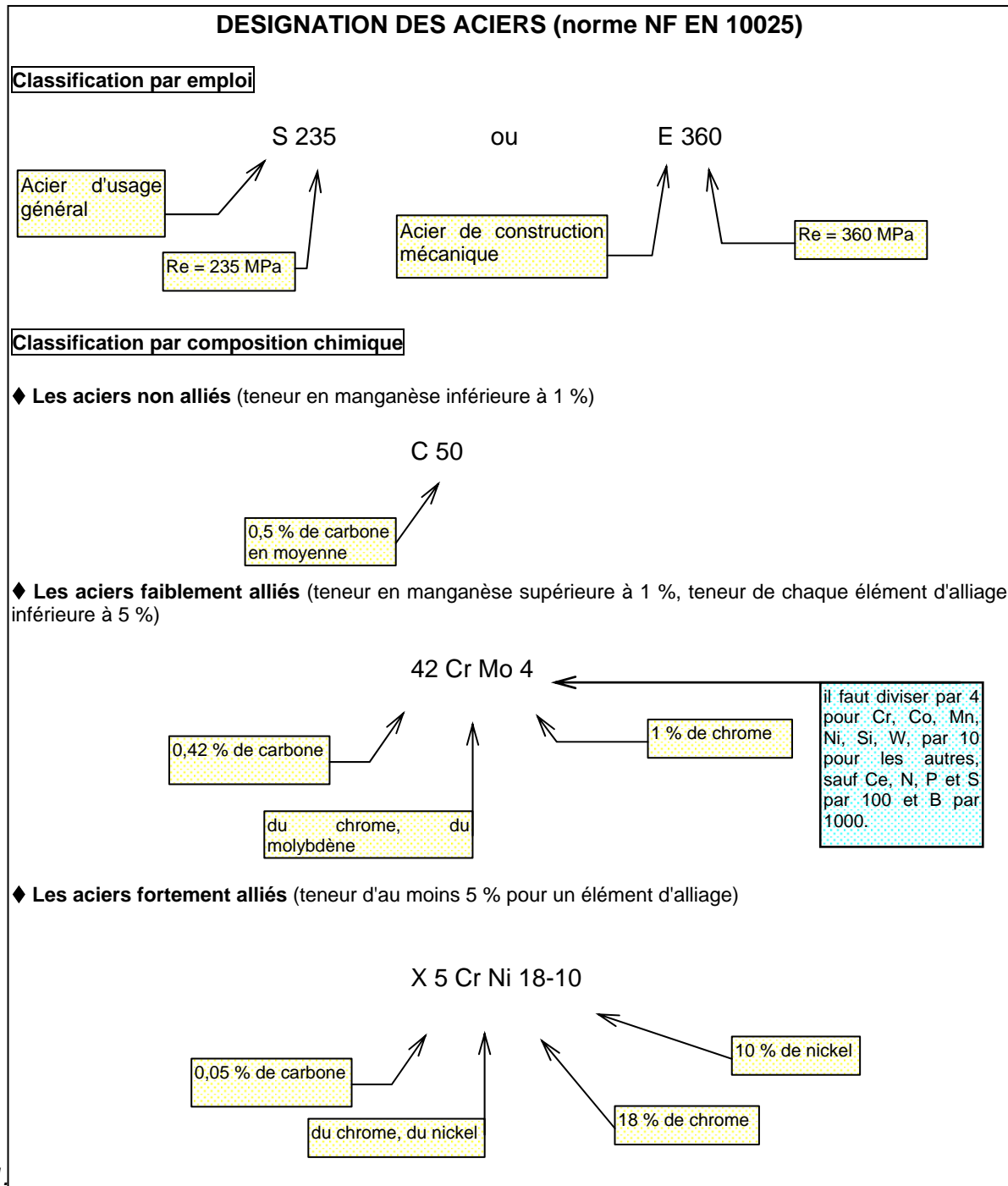
³ trempe : traitement thermique consistant à chauffer à une certaine température de transformation structurale et à refroidir plus ou moins rapidement pour obtenir un état hors d'équilibre.

⁴ revenu : traitement thermique consistant à un réchauffage régulier suivi d'un refroidissement lent, après trempe, ayant pour fonction d'augmenter la résistance aux chocs (résilience).

⁵ austénite : solution solide d'insertion de carbone dans le fer γ (structure CFC).

⁶ ténacité : résistance au choc.

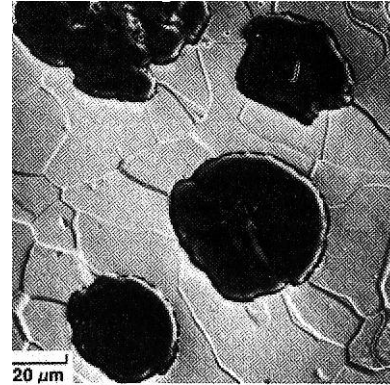
⁷ fluage : déformation plastique évoluant dans le temps.



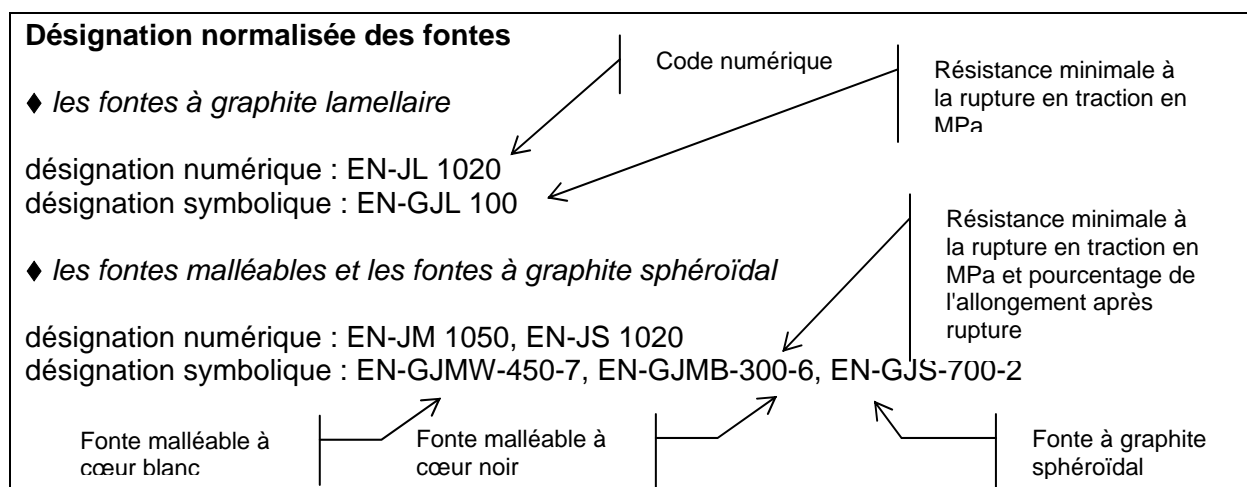
Les fontes sont des alliages fer-carbone de très forte teneur en carbone (> 2 %), ce qui les rend fragiles et interdit toute déformation plastique. On les utilise donc principalement en fonderie. On distingue les fontes blanches, grises, malléables et à graphite sphéroïdale en fonction de leur teneur en silicium. 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 ...



Microstructure d'une fonte blanche



Microstructure d'une fonte à graphite sphéroïdal



1.2 - Alliages non ferreux

Bien que ne représentant que 10 % des matériaux métalliques utilisés industriellement, les alliages non ferreux n'en restent pas moins 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.

1.2.1 - Aluminium et ses alliages

Les alliages d'aluminium présentent tous les avantages recensés ci-dessus. Le point de fusion de l'aluminium, notamment, est bas (~ 660 °C) ce qui le rend particulièrement apte aux opérations de fonderie. L'aluminium étant par ailleurs très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique (laminage, filage à la presse, étirage,...). Ils ont de bonnes propriétés mécaniques spécifiques (leur masse volumique est de 2700 kg.m^{-3} , soit près de trois fois moins que l'acier) et résistent assez bien à la corrosion grâce à la formation d'une couche d'oxyde Al_2O_3 en surface, mais leur tenue mécanique au-delà de 150 °C pose problème ainsi que leur tenue en fatigue et en corrosion sous contrainte. Ils sont de plus difficile à souder et relativement chers. Il existe de nombreux alliages d'aluminium que se soit des alliages corroyés 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.

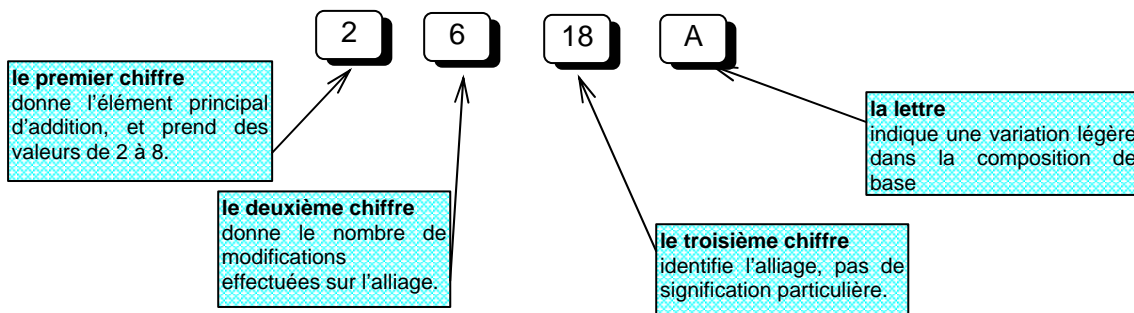
La désignation des alliages d'aluminium de fonderie

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

1.2.2 - Cuivre et ses alliages

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

Quelques alliages de cuivre

Les principales qualités du cuivre sont : une très bonne conductibilité électrique et thermique, une résistance convenable à l'usure. Ils sont cependant sensibles à la corrosion et sont chers. Ses domaines d'application exploitent directement ces propriétés puisqu'on utilise presque la moitié de la production mondiale de cuivre pour du matériel électrique (conducteur, transformateur, moteurs électriques...). Le reste de la production est

⁸ corroyage : forgeage à chaud de barres ou de tôles

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...

Température de fusion : 1 080 °C,
Masse volumique : 8 900 kg.m⁻³.

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

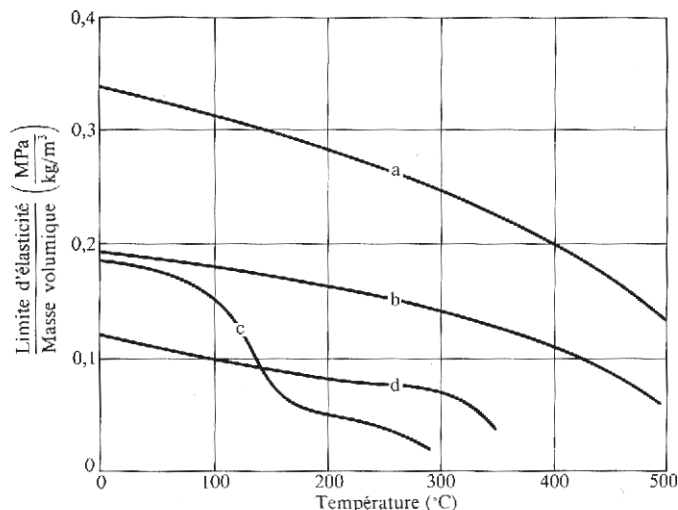
1.2.3 - Zinc et ses alliages

Les principaux avantages 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 (~ 0,4 mm). Leur 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, et du zamak 5 : Z - A4 U1 G.

Masse volumique du zinc : 7 100 kg m⁻³.

1.2.4 - Titane et ses alliages



Comparaison entre les rapports limite d'élasticité/masse volumique pour divers alliages : a) : Ti 6 Al 4 V, b) : 30 Cr Ni Mo 8, c) : aluminium 7075-T6, d) : alliage de magnésium haute 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 TiO₂) ; elle est supérieure à celle des aciers inoxydables. Les alliages de titane peuvent manifester une bonne tenue mécanique à chaud (jusque vers 700 °C) et une bonne résistance à l'oxydation ; cependant, à des températures plus élevées,

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 et de ses alliages 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 ; toutefois, le rapport résistance mécanique sur masse volumique des alliages de titane est nettement supérieur à celui des autres métaux. La résistance

ils risquent de se charger en impuretés (oxygène, hydrogène), ce qui altère leurs propriétés mécaniques.

Température de fusion : 1 670 °C.

1.2.5 - 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 °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, ...

2 - Polymères : matières plastiques

Les propriétés des polymères

Les polymères sont constitués de macromolécules à squelette covalent, liées entre elles par des liaisons faibles (liaisons de Van der Waals ou liaisons hydrogène). Leurs propriétés dépendent fortement du comportement de ces liaisons faibles, et évoluent considérablement avec la température. Ils auront généralement un faible module d'élasticité, et une limite élastique d'autant plus faible qu'ils seront portés à plus haute température. Ils seront donc faciles à mettre en forme. Ils ont aussi malgré leur bonne déformabilité, une bonne résistance à l'usure. Ils sont faciles à assembler et ont une bonne tenue à la corrosion. Enfin, ce sont des matériaux légers et ils peuvent être très bon marché.

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). 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...

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).

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.

Selon le mode de polymérisation, la structure des polymères peut prendre plusieurs formes. La polymérisation par addition entraîne la formation de macromolécules linéaires qui peuvent se ramifier, alors que la polymérisation par condensation peut engendrer en général un réseau tridimensionnel. Le comportement des matières plastiques dépend en grande partie du type de structure obtenue et de son degré de réticulation⁹. En général, on classe les matières plastiques en trois groupes, les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

Différents types de matières plastiques**• 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_g^{10} 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.

• Matières thermodurcissables

Les matières plastiques obtenues par condensation de monomères sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ce sont des matériaux amorphes¹¹ 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.

• 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

⁹ réticulation : transformation d'un polymère linéaire en polymère tridimensionnel par création de liaisons transversales.

¹⁰ glass en anglais.

¹¹ amorphe : opposé à cristallin.

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 vulcanisation¹², en vue de lier les chaînes les unes aux autres.

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.

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 :

	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

- *Thermoplastiques* comparaison des productions d'aciers et de matières plastiques en France en 1995

familles	désignations	utilisations
les vinyliques	PVC rigide PVC souple	tubes, profilés, bouteilles revêtements de sol, joints, isolants
les polyoléfinés	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*

Thermoplastiques de grande diffusion

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

¹² vulcanisation : opération consistant à incorporer du soufre au caoutchouc afin d'améliorer sa résistance en lui conservant son élasticité.

grands marchés comme l'électricité, l'électrotechnique, l'automobile, l'électroménager, l'outillage et les loisirs.

familles	désignations	utilisations
les polycarbonates	PC	vitrage, lanterne, 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	aéronautique, électrotechnique, robinetterie
	PPS	pièces techniques, matériel médical, pompes
les polyoxyméthylènes	POM	pièces mécaniques, engrenages
les polyfluorés	PTFE, PVDT	anti-corrosion, lubrification, glissement, isolation électrique

• Plastiques thermostables

Thermoplastiques techniques

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

Principaux thermodurcissables et leurs emplois

Thermostables

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...

3 - Céramiques

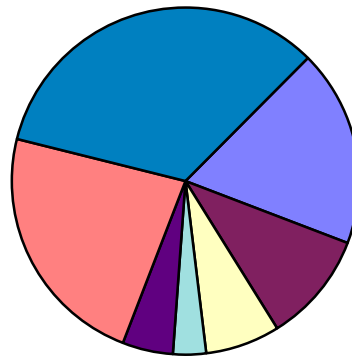
Les céramiques englobent tous les matériaux à liaisons iono-covalentes, ce qui regroupe pêle mêle : les roches, les bétons, les verres, les carbures, les nitrures... Le mot « céramique » longtemps associé à la poterie, aux porcelaines caractérise aujourd'hui une famille plus vaste de matériaux et les utilisations modernes ne sont plus limitées aux domaines traditionnels puisqu'on les emploie en électrotechnique et en construction mécanique. Nous nous limiterons cependant dans ce cours aux céramiques dites « techniques ». Le graphique de la page suivante indique pour le premier fabricant mondial de céramiques la répartition des activités.

Les propriétés des 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.

- *Céramiques dans l'automobile*

Les céramiques employées dans l'automobile ne le sont que sur des prototypes. Cette utilisation se réduit à des composants du moteur. Leurs buts sont d'améliorer l'isolation thermique, la résistance à l'usure par frottement, d'alléger les pièces en mouvement. L'isolation thermique est l'un des points forts des céramiques, ainsi la préchambre de combustion (moteur diesel), la tête de piston et les soupapes d'échappement sont revêtues d'écrans thermiques en céramique. Pour améliorer le rendement du turbocompresseur, certains fabricants ont envisagé la conception du conduit d'échappement ainsi que la turbine en céramique.



chiffre d'affaire de Kyoto Ceramics

On utilise pour ces applications des inserts en zircon (ZrO₂) et de titanate d'aluminium (Al₂TiO₅). La résistance à l'usure par frottement est une des propriétés remarquables des céramiques. Ainsi les culbuteurs, les guides et les sièges de soupapes sont en céramique (association de zircon et de nitrure de silicium (Si₃N₄)). Par souci d'allègement des masses en mouvement, on peut utiliser du nitrure de silicium pour les axes des pistons, les soupapes... Reste le problème de la tenue aux chocs, dans les pays où les habitudes de conduite sont assez nerveuses.

Plus généralement en construction mécanique, on rencontre les céramiques dans les applications à très hautes vitesses de rotation (broches de machines outils, moteurs à turbines...). Des billes, voire des cages de roulements en céramique permettent d'augmenter les vitesses maximales d'utilisation.

- *Céramiques pour les outils de coupe*

Dans le cas des outils de coupe, on utilise principalement les propriétés de dureté et de tenue à haute température. Ainsi l'usinage des fontes, des aciers et des superalliages à base de nickel et de cobalt peuvent être exécutés avec des plaquettes en céramique. Pour les premiers, on utilisera l'alumine (Al₂O₃), pour les seconds le nitrure de silicium. Le taux d'enlèvement est nettement amélioré (2 à 5 fois par rapport aux plaquettes carbures) même si le volume enlevé reste du même ordre. Le tournage continu est résolu par l'utilisation des céramiques mais le fraisage pose le problème des chocs.

- *Céramiques en biomécanique*

La chirurgie et l'art dentaire font de plus en plus appel aux nouveaux matériaux pour une bonne bio-compatibilité, une bonne tenue à la fatigue et une résistance élevée à la corrosion. Les céramiques utilisées comme remplacement des tissus durs (os, dents) peuvent être classées en trois groupes selon leur réaction avec le milieu physiologique :

- les céramiques inertes ou biodégradables (alumine),
- les céramiques bioactives (bioverres...) qui permettent une liaison entre le tissu et l'implant,
- les céramiques biorésorbables (phosphate de calcium) qui permettent la repousse des tissus.

- *Céramiques dans le nucléaire*

Dans le nucléaire, les céramiques sont utilisées comme combustible : céramiques à base d'uranium, produits remplaçant l'uranium métallique pour les réacteurs à haute puissance. On les utilise aussi comme barre de contrôle. Matériau très absorbant neutronique, il sert à contrôler la réaction de fission nucléaire. Les céramiques servent globalement à la protection thermique et neutronique.

4 - Matériaux composites

La recherche permanente des performances techniques jointe au besoin d'optimisation et d'allègement de certaines structures, a motivé l'utilisation puis le développement de matériaux spécifiques dont la composition et les caractéristiques ont été adaptées à la solution technologique des problèmes à résoudre.

Les matériaux composites ont été développés dans cet état d'esprit.

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.

Les propriétés des 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. 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.

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 éventuellement complétés du coût des contrôles.

Les structures obtenues sont généralement de type à deux dimensions principales, localement plates et lamellaires, quasi-isotropes ou anisotropes. Les pièces peuvent présenter diverses surépaisseurs, points d'assemblages,... et peuvent être colorées dans la masse, revêtues ou peintes. **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.

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.

- *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) de différentes armatures, tissage à trois dimensions,...

avantages	limites d'utilisation
<ul style="list-style-type: none"> - rapport performances mécaniques/prix très intéressant. - disponible sous toutes les formes (fil, stratifil, 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) - $E_{\text{traction}} = 55\ 000 \text{ à } 85\ 000 \text{ MPa}$ - $\sigma_{\text{traction}} = 2\ 500 \text{ à } 4\ 400 \text{ MPa}$ - $d = 2,2 \text{ à } 2,5$

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. 	<ul style="list-style-type: none"> - prix élevé - précautions à prendre - tenue au choc faible. - tenue à l'abrasion limitée.

avantages et limitations des fibres de verre

- 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.

- mauvaise tenue chimique avec :
 * l'oxygène à partir de 400 °C
 * les acides oxydants à chaud
 * les métaux pouvant former des carbures (corrosion galvanique).

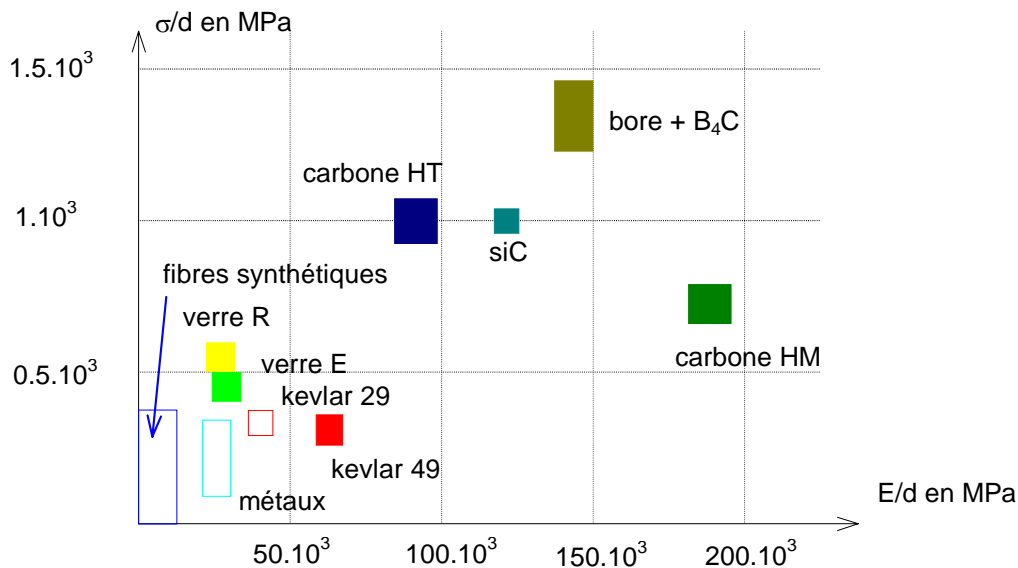
• les matrices utilisées

Les matrices constituent l'élément de liaison en **avantages et limitations des fibres de carbone** métallique, minérale ou organique, thermodurcissable, 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)
- mécaniques ;
- électriques ;
- thermomécaniques ;
- tolérances, cotes à la transformation.

Propriétés comparées des fibres utilisées dans le domaine des matériaux composites

– **Résistance ou durabilité :**

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



Léo. H. Baekeland

Chimiste né en Belgique (Gant) en 1863 et mort aux États-Unis en 1944. En 1907, il a développé le premier plastique complètement artificiel qu'il nomma bakélite