

Chapitre I: Matériaux

I Introduction

Depuis l'âge de pierre, les matériaux font partie du quotidien et de l'histoire de l'Homme. Au fil du temps, ils sont devenus plus résistants, plus intelligents pour conférer aux objets qui nous entourent de nouvelles fonctionnalités. Découvrez les grandes familles de matériaux, la démarche scientifique associée à la conception d'un nouveau matériau et les enjeux des matériaux dans les domaines de l'environnement, de l'énergie, de la santé et des technologies de l'information et de la communication.

Qu'est-ce qu'un matériau ?

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'Homme utilise et/ou conçoit pour fabriquer des objets, construire des bâtiments ou des machines.

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

I.1 Définition

Les alliages à base de fer, à de rares exceptions près, contiennent tous du **carbone** comme élément d'alliage et en proportions diverses. Ainsi, les **aciers** titrent moins de **2%** de carbone ; les **fontes**, au contraire, contiennent plus de **2%** de carbone. Dans ces deux cas peuvent être ajoutés d'autres éléments d'alliage en quantités très diverses, sous réserve que l'élément fer reste le plus important.

Dans un souci de clarté destiné à faciliter le choix des utilisateurs, les différentes familles d'aciers ont été classées en fonction de deux critères, l'un de composition et l'autre de niveau de qualité. Ainsi, on distingue :

- Selon l'analyse chimique : les aciers non alliés ($\leq 1\%$ d'alliage), faiblement alliés (teneur de chaque élément d'alliage $\leq 5\%$) ; et fortement alliés (cette dernière distinction n'est pas normalisée).

- Selon le niveau de précision et de sévérité, apporté au garanties des propriétés d'usage : les aciers de qualité et spéciaux.

Les aciers spéciaux sont son constitués de quatre familles suivantes :

- Les aciers de construction utilisés en particulier en construction mécanique, pour la réalisation de machines ou de mécanismes très variés ; ils peuvent être alliés ou non alliés ; à cette famille ont été associés les aciers pour appareils à pression.
- Les aciers à outils choisis pour la fabrication de tous les outillages : usinage, mise en forme, ils sont non alliés ou alliés.
- Les aciers inoxydables résistant à la corrosion et toujours très alliés ; leur ont été associés les aciers réfractaires ;
- Les aciers spéciaux divers.

Les fontes sont classées uniquement selon leur structure micrographique et plus précisément celle du carbone ou des carbures précipités : Fonte à graphite lamellaire, à graphite sphéroïdal, fontes blanches etc.

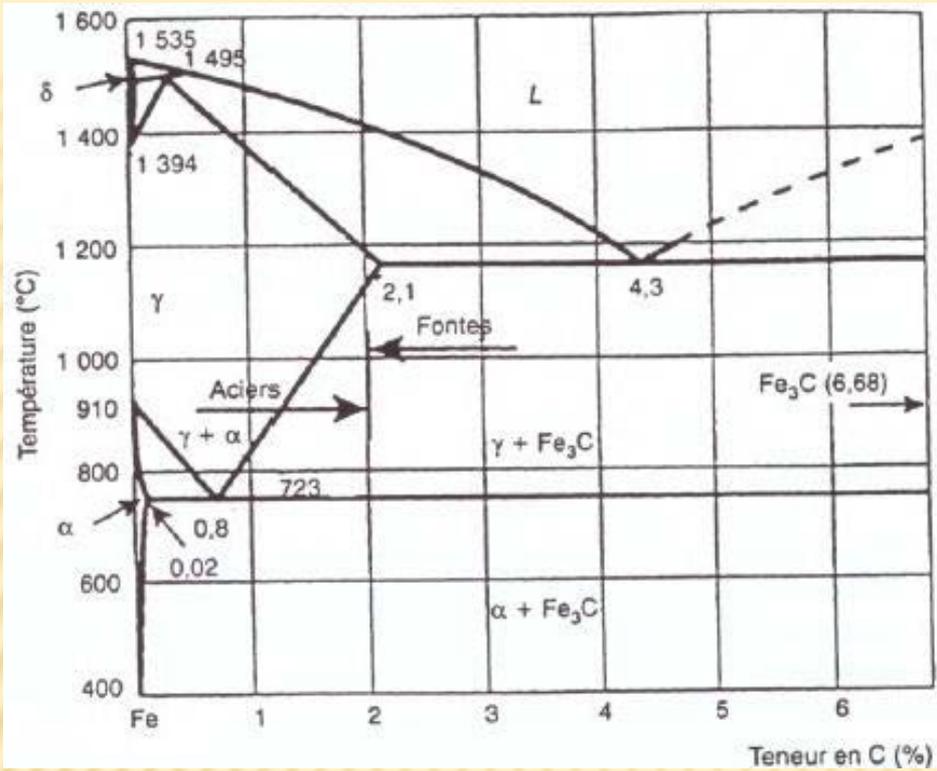


Figure I.1 : Diagramme Fer-Carbone

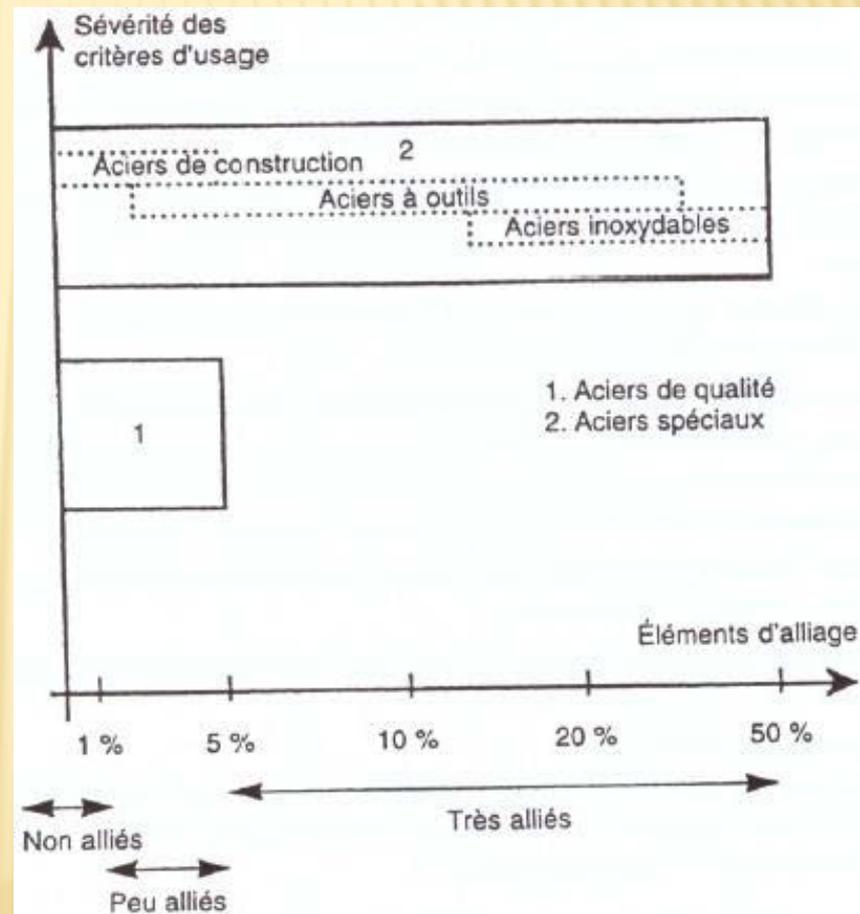


Figure I.2 : Principales classes d'acier

I.2 Désignation des aciers (NF EN 10027)

Les aciers sont désignés selon deux systèmes équivalents.

I.2.1 Désignation symbolique des aciers (NF EN 10027-1)

a. Aciers désignés à partir de leurs applications et de leurs caractéristiques mécaniques

- Une lettre précise le domaine d'application ;

S = acier de construction

P = pour appareils de pression ;

L = acier pour tubes ;

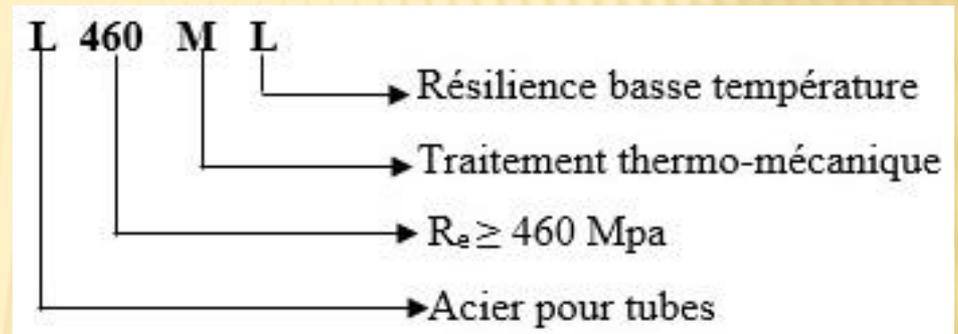
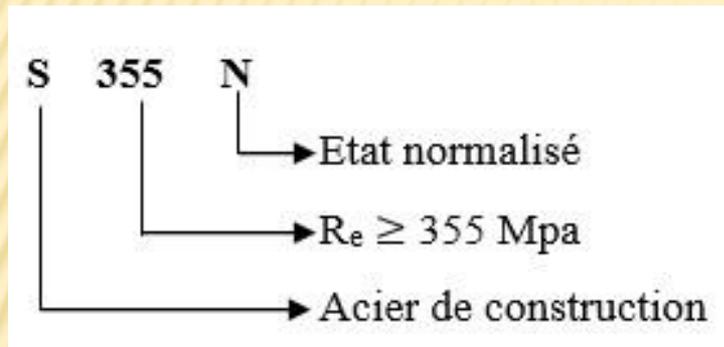
E = acier de construction mécanique ;

Etc.

- Une valeur numérique indique soit la limite d'élasticité, soit une propriété physique garantie.

- Eventuellement d'autres symboles donnent d'autres propriétés ou les conditions de fabrication.

Exemples



Remarque

L'ancienne désignation française (NFA 02.025) utilisait des symboles précisant eux aussi, selon les cas, les domaines d'utilisation et/ou les principales caractéristiques du produit :

S355N, ancienne désignation : E355R

P235GH, ancienne désignation : A37FP

b. Aciers désignés selon composition

- Aciers non alliés avec Mn < 1% ou aciers peu alliés dont aucun élément n'est supérieur à 5%

- Un premier chiffre précise la teneur en carbone multipliée par 100. Les lettres qui suivent, selon les abréviations chimiques, indiquent dans l'ordre de concentration les principaux éléments d'alliage. Le ou les chiffres suivants donnent leur teneur multipliée par 4 ou 10, etc..., selon les familles précisées au tableau I.1

Tableau I.1 : Coefficient multiplicateur des éléments d'alliage pour les aciers peu alliés

Norme	Élément d'alliage	Coefficient multiplicateur
EN Ex NF A	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W C, K, M, N, S, W	4
EN Ex NF A	Al, Be, Cu, Mo, Nb, PB, Ta, TI, V, Zr A, Be, U, D, Nb, Pb, Ta, T, V	10
EN	N, S, P, Ce	100
EN	B	1000

Exemple

- 10 Cr. Mo 9-10 : Acier peu ou non allié titrant 0,10% de carbone, $\frac{9}{4}$ soit 2,25% de Chrome, et $\frac{10}{10}$ soit 1% de molybdène.
- 100 Cr 6 = acier peu ou non allié titrant 1% de carbone et 1,5% de chrome.

c. Aciers très alliés dont au moins un élément a une teneur supérieure à 5%

- Une première lettre X est suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. Les lettres suivantes précisent les principaux éléments d'alliage suivis de leurs teneurs en pourcentage

Exemple

X 6 Cr Ni 18.9 = acier fortement allié titrant 0,06% de carbone, 18% de chrome et 9% de nickel.

d. Aciers rapides

Les aciers rapides sont désignés par le symbole HS suivi de trois ou quatre chiffres donnant dans l'ordre les concentrations en pourcentage des éléments W, Mo, V, Co.

Exemple

HS 6-5-2 = acier rapide contenant 6% de tungstène, 5% de molybdène, 2% de vanadium, 0% de cobalt.

I.3 Aciers d'usage général

I.3.1 Aciers de base: Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- Il n'y a pas de prescription concernant la qualité ;
- Aucun traitement thermique n'est prescrit, à l'exception du recuit (détente, adoucissement ou normalisation) ;
- La résistance minimale est ≤ 600 Mpa ;
- La résilience K_v en long à + 20°C est ≥ 27 J ;
- Les teneurs maximales en soufre et en phosphore sont $\leq 0,045\%$;
- La teneur maximale en carbone est $\leq 0,10\%$;
- Il n'existe pas de prescription concernant les éléments d'alliage.

I.3.2 Aciers de qualité

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Aucun traitement thermique n'est prescrit, à l'exception du recuit (détente, adoucissement ou normalisation) ;
- Il n'y a pas de prescription concernant la pureté inclusionnaire ;
- Il y a possibilité de prescriptions particulières quant à la résistance à la rupture fragile, l'aptitude à la déformation ;
- Lorsqu'ils sont alliés, ces aciers de qualité peuvent comporter des additions d'éléments d'alliage dans les limites suivantes :

$Mn \leq 1\%$ $Cr \leq 0,5\%$ $Ni \leq 0,5\%$ $Mo \leq 0,1\%$ $Cu \leq 0,5\%$ $Nb \leq 0,08\%$ $V \leq 0,12\%$

I.3.3 Aciers spéciaux: Ils ont les caractéristiques suivantes :

- Généralement, ils apportent une réponse régulière aux traitements thermiques ;
- Il existe avec eux des possibilités de prescription particulières quant à ;

- L'état inclusionnaire ;
- Les teneurs maximales en soufre et en phosphore ;
- La résistance à la rupture fragile ;
- La soudabilité ;
- La formabilité à froid : emboutissage, frappe, extrusion, tréfilage ...

En fin, on peut dire que les aciers d'usage général sont des aciers qui possèdent leurs caractéristiques d'emploi à la sortie de l'usine du producteur.

I.4 Classement des produits

Les aciers d'usage général, étant livrés près à l'emploi, le sont donc sous de formes géométriques correspondant aux besoins des utilisateurs et que l'on peut définir comme suit, selon la norme NF EN 10079, laquelle a remplacé la norme NF A 40-01.

I.4.1 Produits plats

<https://www.youtube.com/watch?v=cK7n305h-zI&t=378s>

Leur section droite est presque rectangulaire, la largeur étant très supérieure à l'épaisseur. Parmi eux, on distingue :

A. Les produits plats laminés à chaud non revêtus comportant :

- Les tôles minces (épaisseur < 3 mm) ;
- Les tôles fortes (épaisseur ≥ 3 mm) ;
- Les larges plats (épaisseur > 4 mm, largeur > 150 mm, livrés à plat) ;
- Les bandes livrées en bobines (large bande à chaud si la largeur est ≥ 600 mm, feuillard à chaud si la largeur est < 600 mm).

B. Les produits plats laminés à froid non revêtus

(obtenus par réduction de section supérieure à 25% réalisée par laminage à froid de produits préalablement laminés à chaud) comportant :

- Les tôles (largeur > 600 mm) ;
- Les bandes livrées en bobines (large bande à froid si la largeur est ≥ 600 mm, feuillard à froid si la largeur est < 600 mm).

C. Produits longs laminés à chaud : ce sont les produits suivants :

- Les fils machine, produits de dimension nominale supérieure à 5 mm enroulés à chaud en couronnes à spires non jointives ;
- Les barres : ronds, carrés, hexagones, octogones, plats ;
- Les profilés laminés à chaud : rails, palplanches, pieux, poutrelles, et autres profilés (cornières, U, T, plats à boudin) ; - Les profilés soudés ;
- Les profilés longs formés à froid ;
- Les produits tubulaires.

D. Produits spéciaux :

Ils sont destinés à des emplois particuliers ou à subir des transformations ultérieures. Ils comportent :

- Les armatures passives pour le béton : barres droites ou couronnes à surface lisse ;
- Les palplanches : laminées à chaud ou profilées à froid ;
- Le matériel de voies ferrées : rails, traverses, éclisses, etc... ;

- Les profilés à froid formés par pliage ou en continu de produits plats ;
- Le fil machine : produit à section droite, circulaire, ovale, rectangulaire, hexagonal ou autre.

I.5 Rappel de données métallurgique de base

I.5.1 acier à structure ferrito-perlitique

La très grande majorité des aciers d'usage général est livrée et employée à l'état ferrito-perlitique. Ceci signifie qu'ils sont constitués de grains de ferrite juxtaposés avec des pseudo-grains de perlite- agrégat constitué lui-même de particules de ferrite et de particules de carbure de fer Fe_3C .

✓ Ferrite

La ferrite est constituée essentiellement de fer α qui ne peut contenir en solution solide d'insertion qu'au maximum 0,02 % de carbone, vers 725°C.

✓ Perlite

La perlite contient pratiquement tout le carbone de ces aciers sous forme de carbures précipités. L'agrégat perlitique est ainsi constitué d'une juxtaposition de petites particules de ferrite et de carbure.

I.5.2 Autres éléments constitutifs

Les aciers d'usage général sont des aciers au carbone ; ils contiennent toutefois quelques éléments autres, présents pour différentes raisons tel que le soufre, le manganèse, l'azote, le soufre, le phosphore. Comme ils peuvent recevoir dans certains cas des additions particulières d'éléments tel que le nickel, le chrome et molybdène, le nobium et vanadium, le cuivre.

Tableau I.2 : Normes générales des aciers d'usage général

Norme	Nuances	Observations
NF EN 10025, Décembre 1993 : Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés.	S235, S275 et S355	Acier au C-Mn
NF EN 10113-1 et 2, Juin 1993 : Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins.	S275 N, S355 N, S420 N et S460 N	Aciers micro-alliés normalisés

<p>NF EN 10113-1 et 3, Juin 1993 : Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins.</p>	<p>S275 M, S355 M, S420 M et S460 M</p>	<p>Aciers micro-alliés thermomécaniques</p>
<p>NF EN 10137, Décembre 1995 : Tôles et larges plats en aciers de construction à haute limite d'élasticité à l'état trempé ou revenu ou durci par précipitation (Ancienne norme NF A 36-204) Partie 2 : Aciers à l'état trempé et revenu. Partie 3 : Aciers durcis par précipitation.</p>	<p>S460 Q, S500 Q S550 Q, S620 Q S690 Q, S890 Q et S960 Q S500 A, S550 A, S620 A et S960 A</p>	<p>Aciers traités</p>
<p>NF EN 10162, Octobre 1977 : Profilés formés à froid d'usage courant en acier.</p>	<p>S235, S275, S255 (NF EN 10025) 1C, 3C, 3CT (NF A 36-301) C01RR à C10RR (NF A 36-102) FeP01 à FeP06 (NF ENN 10130)</p>	<p>Aciers au C et C-Mn (s'appliquent aussi à des aciers galvanisés)</p>

Tableau I.3 : Aciers d'usage général pour transformation

Norme	Nuances	Observations
<p>Tôles NF EN 10149, Décembre 1995 : Produits plats laminés à chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid.</p>	<p>S315 MC, S355 MC, S420 MC, S460 MC, S500 MC, S550 MC, S600 MC, S650 MC, S700 MC, S260 NC, S315 NC, S355NC, S420 NC,</p>	<p>Aciers micro-alliés</p>
<p>NF EN 10268, Juin 1992 : Produits plats laminés à froid en aciers micro-alliés soudables à haute limite d'élasticité pour formage à froid.</p>	<p>H240 M, H260 M, H280 M, H315 M, H355 M,</p>	<p>Aciers micro-alliés</p>
<p>NF EN 10111, Juin 1992 : Tôles et bandes laminées à chaud en continu, en aciers pour emboutissage ou pliage à froid.</p>	<p>1C, 3C, 3CT</p>	<p>Aciers non alliés à bas C</p>

<p>NF EN 10130, Juillet 1991 : Produits plats laminés à froid, en aciers doux pour emboutissage ou pliage à froid.</p>	<p>FeP01 à FeP06</p>	<p>Aciers non alliés à bas C</p>
<p>Bandes et Feuillards</p> <p>NF A 36-102, Septembre 1993 : Bandes laminées à chaud en continu en aciers non alliés et alliés pour relaminage à froid.</p> <p>NF EN 10139, Décembre 1997 : Feuillards non revêtus laminés à froid en acier doux pour formage à froid (remplace NF A 37-501)</p>	<p>C01RR à C125RR</p> <p>DC01, DC03, DC04, DC05, DC06,</p>	<p>Aciers non alliés</p> <p>Aciers non alliés</p>
<p>Barres et fils</p> <p>NF A 35-049, décembre 1984 : Barres et fils machine en acier d'usage général destiné à l'étirage.</p> <p>NF EN 10016, Aout 1995 : destiné au tréfilage et au laminage à froid.</p> <p>NF A 35-053, Juin 1984 : Fils machine en acier non allié pour fabrication réalisée par formage à chaud ou à froid.</p>	<p>E28, E36, A37, A50, A60, A70</p> <p>C4D à C92D : 30 nuances</p> <p>FB5 à FB18</p>	<p>Aciers au C-Mn</p> <p>Aciers au C-Mn</p> <p>Aciers au C-Mn</p>

Tableau I.4 : Aciers d'usage général pour emploi particuliers

Norme	Nuances	Observations
<p>Tôles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bouteilles à gaz <p>NF EN 10120, Avril 1997 : Tôles et bandes pour bouteilles à gaz soudées en acier (remplace NF A 36-211).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chaudières et appareils à pression <p>NF EN 10207, Mars 1992 : Aciers pour appareils à pression simple</p> <ul style="list-style-type: none"> - Conditions techniques de livraison des tôles, bandes et barres. <p>NF EN 10028-1 et 2, Décembre 1992 :</p>	<p>P245 NB, P265 NB, P310 NB, P355 NB</p> <p>SPH 235, SPH 265, SPH 275,</p> <p>P235 GH, P265 GH, P295 GH, P355 GH,</p>	<p>Aciers non alliés</p> <p>Aciers non alliés</p> <p>Aciers non alliés</p>

<p>Produits plats en acier pour appareils à pression - Aciers non alliés et alliés avec caractéristiques spécifiques à température élevées.</p> <p>NF EN 10028-1 et 3, Décembre 1992 : Produits plats en acier pour appareils à pression - Aciers soudables à grains fins normalisés.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Constructions marines NF EN 102225, Juillet 1985 : Tôles destinées à la fabrication d'éléments de plates-formes et de structures marines. 	<p>P275 N, P275 NH, P275 NL1, P275 NL2, P355 N, P355 NH, P355 NL1, P355 NL2, P460 N, P460 NH, P460 NL1, P460 NL2</p> <p>PF24, PF28, PF36,</p>	<p>Aciers micro-alliés</p> <p>Aciers au C-Mn ou micro-alliés</p>
<p>Fils et barres</p> <ul style="list-style-type: none"> • Armatures pour béton armé NF A 35-016, Octobre 1996 : Armatures pour béton armé - Barres et couronnes soudables à verrous de nuance FeE500- Treillis soudés constitués de ces armatures. NF A 35-019, Octobre 1996 : Armatures pour béton armé – armatures constituées de fils soudables à empreintes. (remplace avec NF A 35-016 d'octobre 1996, la norme NF A 35-019 de Juillet 1984). Partie 1 : Barres et couronnes Partie 2 : Treillis soudés. 	<p>FeE500</p> <p>FeE500-2</p>	<p>Aciers non alliés</p> <p>Aciers non alliés</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Ressorts NF A 35-057, Décembre 1979 : Fils machine en acier non allié destiné à la fabrication des fils pour ressorts mécaniques à haute endurance formés à froid. NF A 47-301, Mars 1976 : Fils ronds en aciers durs non alliés patentés, tréfilés pour ressorts. 	<p>FMR62 à FMR86 : 10 nuances</p> <p>Voir NF A 35-051</p>	<p>Acier au C</p> <p>Acier au C</p>

Tableau I.5 : Aciers d'usage général pour emploi face à la corrosion

Norme	Nuances	Observations
<p>NF EN 10155, Septembre 1993 : Acier de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique.</p>	<p>S235...W, S355...WP, S355...W,</p>	<p>Aciers faiblement alliés au Cr, Cu et éventuellement Ni et/ou P.</p>
<p>• Produits revêtus Voir les normes des produits revêtus de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zinc (NF EN 10142, NF EN 10147, NF EN 10152) - Plomb (NF A 36-330) - Aluminium (NF A 36-345) - Aluminium + Silicium (NF EN 10154) - Aluminium + Zinc (NF EN 10215) - Zinc + Aluminium (NF EN 10214) - Fer chromé (NF EN 10202) - Etain (NF EN 10203) - Matières organiques (NF EN 10169) 		
<p>• Protection provisoire NF EN 10238, Décembre 1996 : Produits en aciers de construction grenillés et prépeints par traitement automatique.</p>	<p>Aciers des normes NF EN 10025 et NF EN 10113-2</p>	<p>Doivent être peints après mise en œuvre</p>
<p>• Une situation particulière NF A 36-250, Juin 1987 : Tôles plaquées.</p>	<p>Aciers des normes NF EN 10028</p>	<p>Placage en aciers inoxydables ou réfractaires</p>

I.6 Applications

Les aciers d'usage général sont tout d'abord employés pour la construction métallique et notamment pour la réalisation des structures suivantes :

- Charpentes ;
- Ponts ;
- Pylônes ;
- Réservoirs et appareils à pression ;
- Charpentes pour appareils de levage et manutention ;
- Trémies et silos.

Ils sont également utilisés pour divers autres usages tels que les ouvrages d'art et plateformes marines et peuvent aussi constituer des éléments de structures mobiles dans le matériel ferroviaire roulant, l'automobile, le machinisme agricole, ainsi que des ensembles supports (bâtis) de construction mécanique.

I.7 Aciers spéciaux de construction mécanique

Selon la norme européenne NF EN 10020, un acier spécial est, la plupart du temps, destiné à un traitement thermique (trempe et revenu, trempe superficielle, etc...). De ce fait, il se caractérise par une réponse régulière à ce traitement. Sa composition, ajustée dans le cadre d'une élaboration particulière, lui confère une bonne propreté inclusionnaire, des facilités de façonnage et des aptitudes particulières à l'emploi. Il peut être allié ou non.

Selon la même norme, un acier a généralement une teneur en carbone inférieure à 2 %, cette valeur marquant la limite courante entre les aciers et les fontes.

En utilisant les traitements thermiques industriels de durcissement pour les aciers spéciaux de construction, on garantit un compromis judicieux entre les caractéristiques de résistance et celles de ductilité.

I.7.1 Principe du durcissement des aciers

Au voisinage de la température ambiante, le fer présente des caractéristiques de résistance assez faibles (R_e de l'ordre de 110 N/mm² à 120 N/mm²). Pour les augmenter, il faut leur apporter des durcissements tels que le durcissement par écrouissage, durcissement par les éléments en solution solide, durcissement par les joints de grains, durcissement par des précipités.

I.8 Définitions, notions de base et classification des fontes

Les alliages de fonderie constituent un ensemble de matériaux métalliques permettant la réalisation de pièces par moulage. Les propriétés des pièces qui en résultent dépendent étroitement des facteurs suivants :

- L'élaboration et le traitement du métal liquide ; -
- La solidification et le refroidissement dans le moule ; -
- Les conditions de démoulage et de refroidissement ; -
- Les traitements thermiques complémentaires éventuels.

Parmi les alliages de fonderie, les fontes ont une grande importance, elles forment une famille de matériaux ferreux.

I.8.1 Définition métallurgique des fontes

Une fonte, qu'elle soit produite dans une usine sidérurgique pour être transformée en acier ou qu'elle soit élaborée dans une fonderie, afin de couler des pièces dans des moules, peut se définir comme un alliage **à base de fer et de carbone**, dont la teneur en carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produisent dans un intervalle de température nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1100 et 1350 °C.

I.8.2 Composition chimique

En dehors du fer et du carbone, quatre autres éléments entrent principalement dans la composition des fontes non alliées :

- Le silicium (1 à 3 %) ;
- Le manganèse (0,1 à 1 %) ;
- Le soufre (jusqu'à 0,15 %) ;
- Le phosphore (jusqu'à 0,15 %) (jusqu'à 1,3 %).

Toute fonte industrielle contient aussi, parfois volontairement ajoutés, des éléments à l'état de traces utiles, eu égard à la qualité recherchée.

Les propriétés peuvent être améliorées ou ajustées en vue de certaines applications grâce à des éléments d'alliage, les principaux sont les suivants :

- Le nickel (jusqu'à 35 %) ;
- Le chrome (jusqu'à 30 %) ;
- Le molybdène (jusqu'à 3 %) ;
- Le cuivre, l'étain, le vanadium, l'aluminium,

I.8.3 Classification industrielle

Selon les considérations métallurgiques, les fontes sont classées en six grandes familles :

1. Fontes grises à graphite lamellaire

Ces alliages sont connus sous le nom de fontes ordinaires car ce sont les plus anciennes utilisées en construction mécanique. Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelles. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- La résistance à la traction ne dépasse jamais 400 Mpa mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion ;
- Leur dureté est modérée (200-280 HB) ;
- Elles sont très facilement usinables et résistent particulièrement bien à l'usure ;
- Elles amortissent bien les vibrations ;
- Elles résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur ;
- Elles peuvent recevoir couramment des revêtements protecteurs : émaillage, bleuissage.

En revanche, elles cassent sans déformation plastique apparente, ce qui les fait considérer comme **fragiles**.

2. Fonte à graphite sphéroïdal (FGS)

Dites aussi parfois fontes ductiles, sont obtenues par un **traitement spécifique du métal liquide** qui provoque au moment de la solidification un graphite non pas en lamelle mais sous forme de particules quasi sphériques (10 à 100 μm de diamètre).

3. Fonte à graphite vermiculaire

C'est une variété de fontes qui se développe lentement dans un champ d'application limité où l'on a besoin de propriétés combinant celles de fontes grises et celles de fontes graphite sphéroïdal.

Les microstructures dites « vermiculaire » ou « compacte » du graphite composé de particules non sphériques, de forme allongée, mais beaucoup moins ramifiées que les lamelles des fontes grises, est obtenue par un traitement sur métal liquide dérivé de celui des fontes à graphite sphéroïdal.

4. Fontes blanches et fontes trempées

- Fontes blanches

Les fontes blanches sont caractérisées par l'**absence complète du graphite** car le carbone, en excès, est combiné au fer sous forme de carbures métastables. Les fontes blanches sont dures mais sont fragiles, résistent à l'usure abrasive mais elles ne sont pas usinables à l'outil coupant.

- Fontes trempées

On appelle « fontes trempées » des fontes coulées au contact d'éléments refroidissants constituant le moule ou toute autre partie, ainsi les couches corticales solidifiées dans ces conditions sont en fonte blanche sous l'effet d'une **trempe primaire**, tandis que le cœur et d'autres parties de la même pièce se solidifient en fonte grise ou à graphite sphéroïdal.

5. Fontes malléables

Par un recuit approprié, on peut industriellement décomposer les carbures primaires d'une fonte blanche suivant la réaction : $\text{Fe}_3\text{C} \longrightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ (graphite) Ici le graphite précipite, alors que la matrice, à l'état solide est sous forme de particules non sphériques. Parmi ce type de fonte, il existe les fontes malléables à « cœur noir », les fontes à « cœur blanc ».

6. Les fontes spéciales alliées

La métallurgie de fontes permet d'améliorer leurs propriétés en vue d'application définies et selon les mêmes principes que la métallurgie des aciers : apport d'éléments d'alliage, traitements thermiques. Ainsi, malgré les spécificités des fontes, on retrouve le type de classification : Fontes peu alliées et modérément alliées.

I.9 Désignation rationnelle d'une fonte

Dans les relations industrielles et commerciales, il convient évidemment d'utiliser, en priorité, quand elles existent, les définitions et classifications normalisées.

La norme NF EN 1560 précise la désignation des différentes familles de fontes. Cette désignation symbolique est constituée des six indications suivantes :

- **Indication n°1** obligatoire : les lettres EN précisent qu'il s'agit d'une nuance normalisée ;
- **Indication n°2** obligatoire : les lettres G (produit moulé) et J (fonte) ;
- **Indication n°3** optionnelle : une lettre précisant, si nécessaire, la structure du graphite selon les correspondances suivantes :

L = lamellaire;

S = sphéroïdal;

M = malléable;

V = vermiculaire;

N = sans graphite;

Y = structure spéciale

➤ **Indication n°4** optionnelle : une lettre précisant, si nécessaire, la structure micro - ou macrographique selon les correspondances suivantes :

A = austénite; F = ferrite; P = perlite; M = martensite; L = ledéburite;
Q = trempe; T = trempe et revenu; B = cœur noir; W = cœur blanc

➤ **Indication n°5** obligatoire en a ou b :

a. Si elles sont classées selon leurs propriétés mécaniques :

- La résistance à la traction en Mpa, l'allongement en %, la résilience. On peut préciser le style d'échantillonnage par une des lettres S (coulée séparément), V (essai attenant), ou C (prélevé sur pièce) ;

Exemple : EN GJS-400-18S.

b. Si elles sont classées selon leurs compositions chimiques, la lettre X est suivie des principaux éléments d'alliage et de leurs teneurs en ù.

Exemple : EN GJL-XNi Mn 13-7

➤ **Indication n°6** optionnelle : des exigences complémentaires peuvent être préconisées :

D = brute de fonderie;

H = ayant subi un traitement thermique, etc...

Tableau I.6 : Classification des fontes

Symboles	Anciens symboles français	Classifications	
EN GJL...	FGL	Fontes grises à graphites lamellaires	Non alliées
EN GJS...	FGS	Fontes à graphite sphéroïdal – ou ductiles ou fontes GS -	Non alliées
EN GJV...	FGV	Fontes à graphite vermiculaire	Non alliées
EN GJN...	FBC	Fontes blanches – carburiques sans graphite -	Non alliées
EN GJMB...	FMN	Fontes malléables à cœur noir – avec graphite en nodules -	Non alliées
EN GJMW...	FMB	Fontes malléables à cœur blanc – décarburées sur quelques millimètres – Fontes spéciales alliées – nickel, chrome, molybdène, vanadium, étain, silicium, aluminium, ...	Non alliées Modérément ou fortement alliées

Tableau I.7 : Structures possibles des fontes industrielles normales

Matrice Graphite	Perlite	Perlite + Ferrite	Ferrite	Austénite	Martensite	Bainite, constituants de trempe et revenu,...
Lamellaire	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Sphéroïdal ou vermiculaire	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
En nodules de recuit	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Pas de graphite - Carbures -	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui

I.10 normalisation des fontes

Un long et important effort a été conduit par l'AFNOR et le bureau de normalisation de la fonderie BNIF de développer et tenir à jour les normes de fonderie, particulièrement celles qui permettent de définir et de classer en « nuances ou en « qualités » les matériaux constituant les pièces moulées en fonte.

I.10.1 Symbolisation normalisée des fontes

La norme NF EN 1560 (mai 1989) : Produits de fonderie - Désignation conventionnelle des fontes de toutes catégories peut être résumée en ce qui suit :

Tableau I.8 : Symboles des principales familles de fontes

Nouvelle symbolisation Française	Type de fonte	Nouvelle symbolisation Française
EN GJL	Fonte grise à graphite lamellaire	EN FGL
EN GJS	Fonte à graphite sphéroïdal	EN FGS
EN GJV	Fonte à graphite vermiculaire	EN FGV
EN GJMB	Fonte malléable à cœur noir (graphite nodulaire)	EN FMN
EN GJMW	V Fonte malléable à cœur blanc	EN FMB
EN GJN	Fonte blanche (carbure)	EN FBC
EN GJF	Fonte blanche spéciale à matrice ferritique	EN FBF

Ces lettres sont suivies de chiffres précisant la valeur minimale de la résistance à la traction R_m (en Mpa) et, le cas échéant, de l'allongement de rupture ou une valeur nominale de dureté ; dans ce dernier cas, le nombre est précédé de HB. Des indications sur les teneurs en éléments d'alliages - composition normalisée ou non – figurent à la suite s'il y a lieu.

I.11 Métaux et alliage non ferreux

I.11.1 Aluminium et alliage d'aluminium

<https://www.youtube.com/watch?v=hvOpSnWxswA>

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854 et il est actuellement le premier métal non ferreux en tonnage. L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolite fondue à environ 1000 °C.

Pour obtenir une tonne d'aluminium, il faut :

- 1900 kg d'alumine ;
- 380 kg de coke ;
- 100 kg de brai ;
- 15 kg de produits cryolithiques;
- 13000 kWh d'énergie électrique.

I.11.2 Désignation des alliages d'aluminium

L'aluminium liquide, éventuellement allié avec différents éléments d'addition, afin d'obtenir l'alliage désiré, est coulé par les procédés suivants:

- Coulée semi-continue sous forme de plaques pour laminage ou de billettes pour filage ou forgeage;

- Coulée et laminage continu sous forme de fil machine de diamètre de 7 à 25 mm. –
- Directement dans des lingotières afin d'obtenir des lingots en aluminium ou alliage de moulage.

L'aluminium et ses alliages se prêtent particulièrement bien aux différents modes de transformation. On distingue les deux grandes classes d'alliages d'aluminium suivants :

- 1- Les alliages corroyés, produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le:
- 2- Filage, le laminage ;
- 3- Les alliages de moulage, obtenus directement par fonderie.

La désignation de ces alliages set faite suivant des règles très précises.

I.11.2.1 Désignation des alliages corroyés

La désignation conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dont le premier chiffre indique la famille (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium (tableau I.9)

Tableau I.9 : Familles d'alliages d'aluminium corroyés

Eléments d'alliage	Famille
Aucun	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
Silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium et Silicium	6000
Zinc (et cuivre)	7000

Remarque

La lettre A (ou B) peut suivre les quatre chiffres de la désignation numérique, par exemple 2017A.

I.11.2.2 Etat de livraison

Ils sont conformes à la norme Afnor NF EN 515 qui désigne :

- L'état métallurgique de base par une lettre F, O, H ou T (tableau I.11)
- Le **moyen principal d'obtention** par un ou plusieurs **chiffres** complémentaires.

I.10 : Désignation des états métallurgique de base

Symbole	Etat métallurgique
F	Brute de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui et éventuellement restauré ou stabilisé
T	Durci par traitement thermique

Les états F et O ne comprennent pas de subdivision. Les états H et S comprennent les subdivisions suivantes :

➤ Subdivision de l'état H :

- Le premier chiffre indique le moyen principal d'obtention du produit.

H1 : Ecouissage ;

H2 : Ecouissage puis restauration ;

H3 : Ecouissage puis stabilisation.

- Le second chiffre indique le niveau de dureté du métal.

2 : Etat quart dur ;

4 : Etat demi dur

6 : trois quart dur ;

8 : Etat dur ;

9 : Etat extra dur

➤ Subdivision de l'état T

Tableau I.11 : Tableau simplifié des traitements thermiques et/ou mécaniques courants avec leurs symboles respectifs

Traitements généraux (processus de base)		Symbole
Traité thermiquement avec mise en solution séparée	Sans écrouissage complémentaire { - Mûri - Revenu - Sur- revenu	TT4 T6 T7
	Avec écrouissage complémentaire { - Ecroui puis mûri - Ecroui puis revenu - Revenu puis écroui	T3 T8 T9
Traité thermiquement sans mise en solution séparée	Sans écrouissage Complémentaire { - Mûri - Revenu	T1 T5
	Avec écrouissage complémentaire { - Ecroui puis mûri - Ecroui puis revenu	T2 T10
Traitements particuliers et complémentaires		Symbole
Revenu	Revenu « doux »	T51-T61
	Revenu « dur »	T56-T66
	Sur-revenu	T7
Relaxation	Par traction	Tx51
	Par compression	Tx52
	Par traction et compression	Tx54

I.12 Les métaux précieux et leurs alliages

I.12.1 Notions de base

I.12.1.1 Désignation

Le terme « métaux précieux » s'applique à des métaux qui se distinguent par des propriétés exceptionnelles. On désigne traditionnellement par « métaux précieux » l'or (Au), l'argent (Ag) et le platine (Pt). Il faut y ajouter l'ensemble des métaux dits de « la mine de platine », c'est-à-dire le palladium (Pd), le rhodium (Rh), l'iridium (Ir) ; le ruthénium (Ru) et l'osmium (Os) qui, avec le platine forment la famille des six platinoïdes.

Tableau I.13 : Ressources minières

Métal	Origine	Pays producteurs
Argent	Sous-produits des mines de cuivre, plomb, zinc	Mexique, Pérou, Amérique du nord, Australie, Chili
Or	Mines d'or	Afrique du sud, Australie, Amérique du nord, chine
Platine	Mine de platine	Afrique du sud, Russie, Amérique du nord
Palladium	Mine de nickel, mine de platine	Afrique du sud, Russie, Amérique du nord
Rhodium	Mine de platine	Afrique du sud, Russie, Amérique du nord
Iridium	Mine de platine	Afrique du sud
Ruthénium	Mine de platine	Afrique du sud
Osmium	Mine de platine	Afrique du sud

I.13 Alliage à mémoire de forme

<https://www.youtube.com/watch?v=oDZwTyaqEMI>

<https://www.youtube.com/watch?v=zMZdy7b2ZSc>

La dénomination alliages à mémoire de forme (AMF) regroupe un ensemble d'alliages métalliques présentant la particularité de reprendre leur forme initiale après avoir été déformés au-delà du domaine élastique usuel.

I.14 Matières plastiques (Polymères)

I.14.1 Définitions

<https://www.youtube.com/watch?v=QMy56PLAmx8>

On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes.

Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire.

Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère. La polymérisation est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules.

Les noyaux des monomères sont le plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de silicium (polymères siliconés). Un homopolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères tous identiques.

Un copolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes.

Les polymères peuvent être d'origine naturelle (animale ou végétale) ou d'origine synthétique. Les macromolécules naturelles sont les caoutchoucs, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines... Les macromolécules synthétiques sont représentées par exemple par le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le PVC, le PTFE, les polyesters, les polycarbonates, les polysiloxanes, les polyimides...

I.14.2 Structure des polymères

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement, cristallisés.

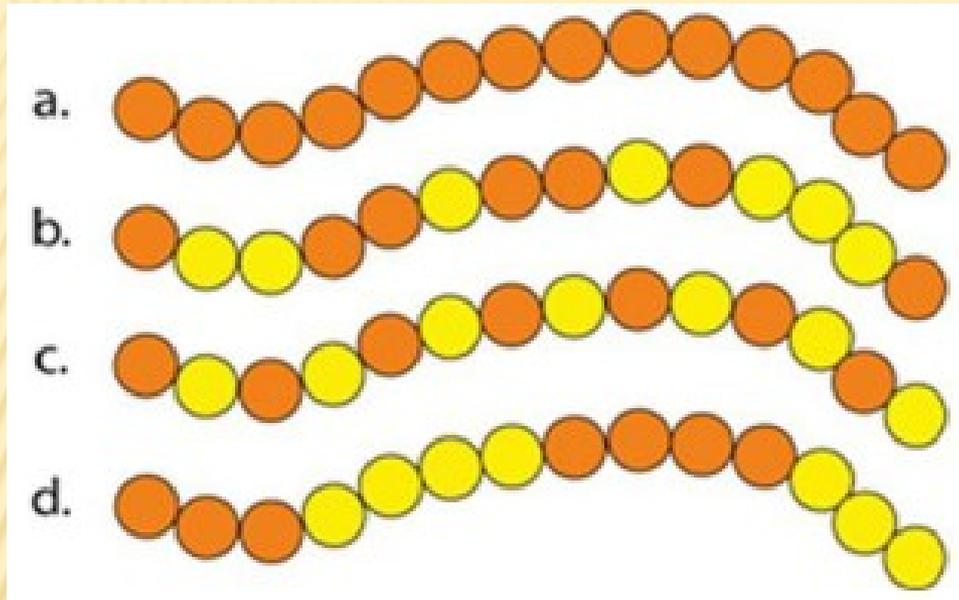
I.14.2.1 Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide.

Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux.

La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse. La transition vitreuse correspond à l'apparition de mouvements de longs segments de chaîne et marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique.

La figure I.3 donne différents exemples de polymères linéaires.



a : homopolymère

b : copolymère statistique

c : copolymère alterné

d : copolymère séquencé

Figure I.3 : polymères linéaires

Les propriétés mécaniques des copolymères varient en fonction du type et de la disposition des monomères. Les rotations de la chaîne sont facilitées ou au contraire rendues plus difficiles en fonction de la nature, de la disposition et de l'encombrement de chacun des monomères.

I.14.2.2 Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires.

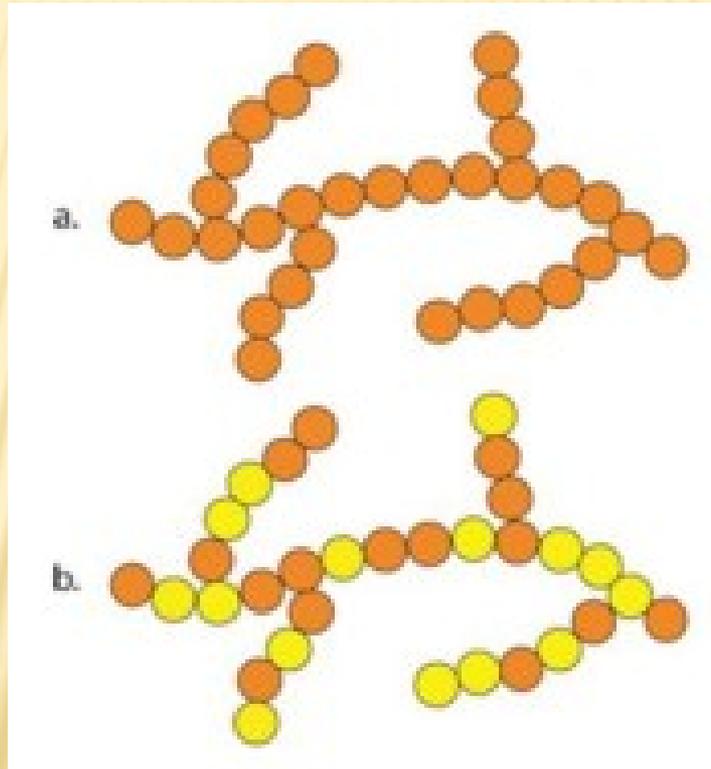


Figure I.4 : Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.

I.14.2.3 Polymères amorphes et polymères cristallisés

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituent ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide « figé », sans ordre moléculaire à grande distance.

Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles. Elles peuvent être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : l'aptitude du matériau à diffracter les rayons X selon des angles définis.

Ces structures peuvent aussi être objectivables en lumière polarisée. Dans un polymère, les deux états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline.

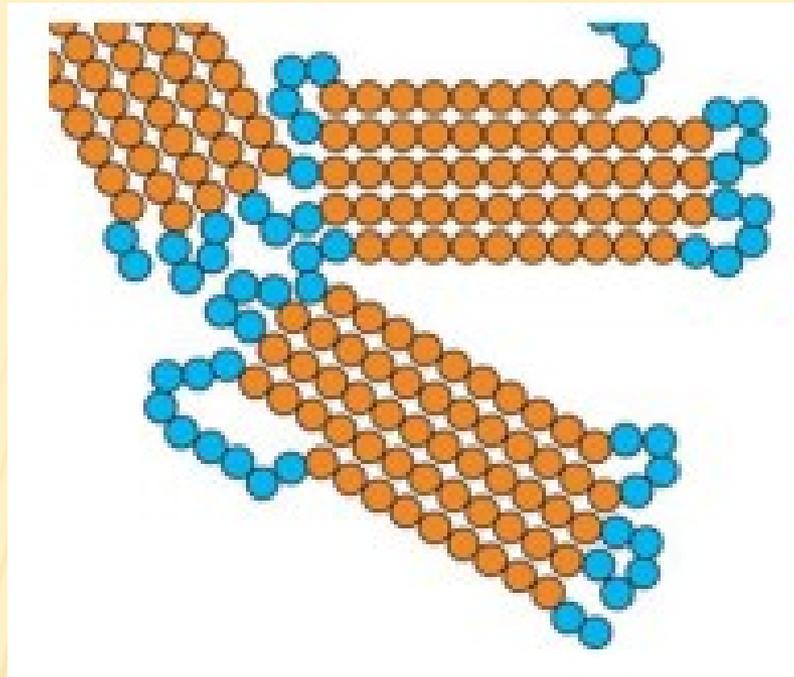


Figure I.5 : Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé

I.14.3 Propriétés des polymères

Les polymères présentent des caractéristiques mécaniques propres. Ils présentent un comportement vitreux lorsqu'ils sont amorphes, des caractéristiques de fibres lorsqu'ils sont cristallisés mais également un comportement visco-élastique (voir chapitre propriétés physiques, rhéologie).

Ces différents états dépendent principalement de la nature chimique du polymère et de la température. La nature chimique des macromolécules est liée à leur origine qui est soit naturelle, soit synthétique. Leur structure, leur masse moléculaire, leur caractère linéaire ramifié ou non, réticulé ou non déterminent fortement leurs propriétés physico-chimiques.

Le paradoxe des macromolécules est que des chaînes très différentes par leur composition chimique peuvent avoir des propriétés physiques analogues. Certains polyesters ou silicones présentent des propriétés viscoélastiques analogues à certains hydrocarbures insaturés. À l'inverse, des polymères à chaînes chimiquement identiques peuvent avoir des propriétés physiques totalement différentes.

Un même composé peut être hautement élastique ou complètement amorphe en fonction de la température et de l'arrangement macromoléculaire.

I.14.4 Polymères thermoplastiques, thermodurcissables

Dans le cadre des résines constituées de macromolécules pour réaliser des matières plastiques, deux types de comportement très différents sont décrits en fonction de la nature et de la structure des polymères les constituant :

- Une résine thermoplastique est constituée de chaînes linéaires ou ramifiées à liaisons covalentes. Ces chaînes sont liées entre elles par des liaisons faibles de type Van der Waals et hydrogène par exemple. Les thermoplastiques peuvent être dissous dans certains solvants et se ramollissent à la chaleur d'où le terme « thermoplastique ».
- Une résine thermodurcissable est constituée de chaînes linéaires réticulées entre elles. Les chaînes sont liées dans l'espace par des liaisons fortes de type covalent. Nous sommes donc en présence d'un réseau tridimensionnel insoluble et infusible

I.15 Matériaux composites

<https://www.youtube.com/watch?v=MWUxhC6q0c&list=PLRfs9VR1IUwO7BkHLpcaeHO13k2j1ffbn&index=2>

Un matériau composite est un assemblage entre deux composants complémentaires : une matrice de résine et des fibres de renfort. Parfois, des additifs ou des charges y sont ajoutés pour modifier certaines caractéristiques du matériau.

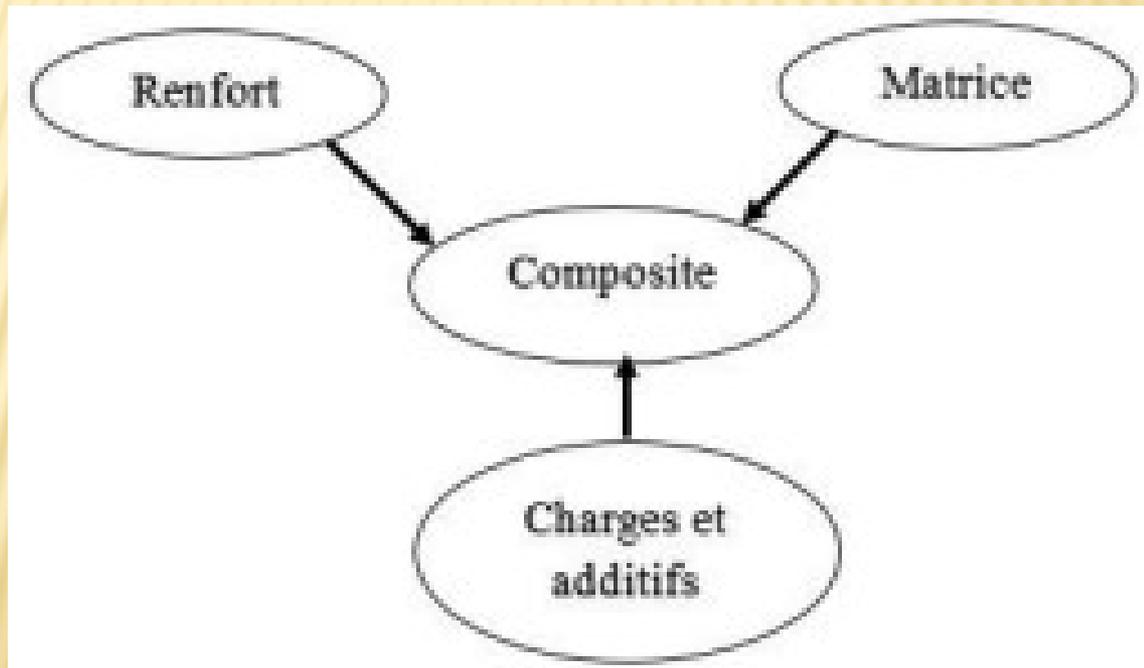


Figure I.6 : Principe d'un matériau composite

I.15.1 Quelques définitions

- ✓ **Renfort** : Phase discontinue et souvent filamentaire à très hautes caractéristiques mécaniques qui assure le principal des contraintes mécaniques du composite (résistance, rigidité, tenue aux chocs ...)
- ✓ **Matrice** : Phase continue qui assure la cohésion, transfère et répartit les contraintes, protège des agressions extérieures les renforts et commande la mise en œuvre. La matrice peut être constituée de :
 - **Résines thermodurcissables**
 - Durcissement définitif lors du cycle de polymérisation : transformation irréversible ;
 - Résines époxy notamment les résines thermoplastiques sous forme de polymères mis en forme par chauffage et durcissement au cours du refroidissement : Transformation réversible.
 - Autres matrices : Métalliques, Céramiques.

La plus utilisé est la résine en polyuréthane ; très demandé dans l'industrie du transport, plus précisément dans le secteur ferroviaire, le polyuréthane est utilisé comme résine pour obtenir un matériau composite plus léger qui permet une réduction de coûts conséquente.

En effet, le polyuréthane permet aux industries de réduire fortement leur consommation de carburant et les émissions de CO₂. Le polyuréthane est également un excellent isolant thermique et un matériau des plus durables.

✓ **Charges et additifs** : Adhérence fibre/matrice, pigments de coloration agents anti UV.

Plusieurs familles de composites sont produites et chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renforts sont employés.

Le composant le plus important dans la fabrication des matériaux composite est le renfort qui se trouve sous forme de fibres de :

1- Fibre de verre

Très populaire, la fibre de verre est fréquemment utilisée dans l'industrie du transport. Généralement associée avec les polymères, la fibre de verre est un matériau composite très léger qui est particulièrement apprécié pour la réduction de poids qu'il apporte sans aucune perte de performance, bien au contraire. De plus, la fibre de verre contient des propriétés d'inertie chimique, de résistance aux chocs et d'isolation très élevées.

Remplaçant l'acier et réduisant considérablement le poids des matériaux, la fibre de verre est un choix de prédilection pour toutes les industries qui souhaitent obtenir un matériau plus performant aux propriétés inégalées à un coût moins dispendieux.

2- Fibre de carbone

Très fines, les fibres de carbone constituent de nombreux matériaux composites dans l'industrie aéronautique, aérospatiale et automobile. La fibre de carbone détient d'excellentes propriétés mécaniques, tout en étant légère et flexible.

Les industries bénéficient ainsi d'un matériau composite résistant à la traction et la compression, offrant une bonne conductivité électrique et thermique et étant rigide. Ces caractéristiques font de ce matériau composite une excellente option pour les industries à la recherche d'un matériau très léger et performant, mais reste une solution plus dispendieuse que la fibre de verre.

3- Fibre de Kevlar

La fibre d'aramide, aussi appelée la fibre de Kevlar, est également un matériau composite utilisé dans l'industrie du transport, aéronautique et aérospatiale.

Détenant une forte résistance à la chaleur, une bonne absorption des vibrations et faisant preuve d'une haute performance mécanique, la fibre de Kevlar est un matériau très apprécié des industries malgré un coût plus élevé

I.16 Quelques procédés de fabrication de structures composites

I.16.1 Moulage au contact

Le procédé consiste à déposer sur la forme : - une couche de surface (gel coat) ; - des couches successives de renforts imprégnées au rouleau d'une résine polymérisant à l'ambiante

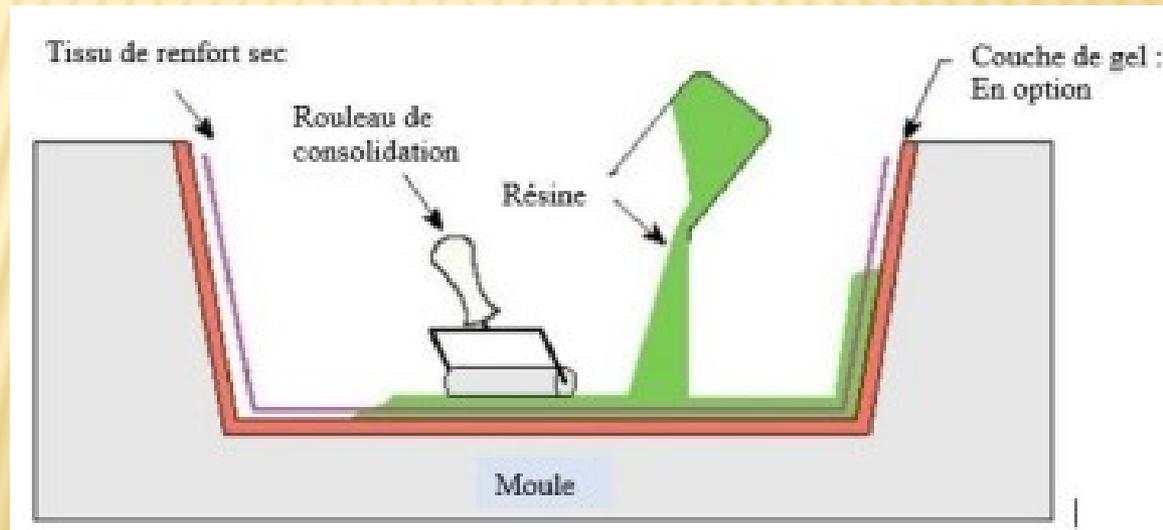


Figure I.7 : Moulage au contact des composites

I.16.2 Moulage par projection

La résine catalysée et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme.

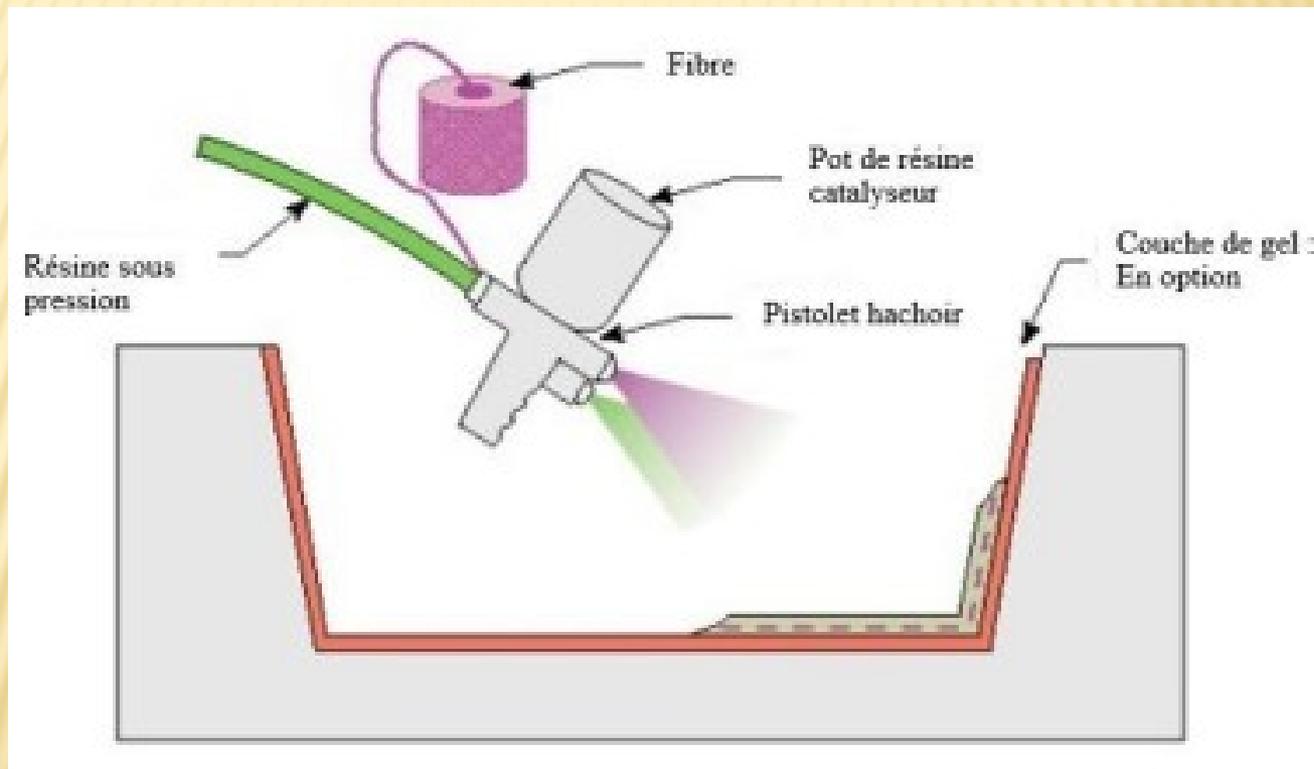


Figure I.8 : Moulage par projection des composites

I.16.3 Moulage sous vide ou «au sac »

Principe :

1. Dépose des tissus ou nappes pré-imprégnés (phase de drapage) ;
2. Couverture de l'ensemble par une membrane souple et étanche ;
3. 1 bar (vide), 7 bars ou plus en autoclave.

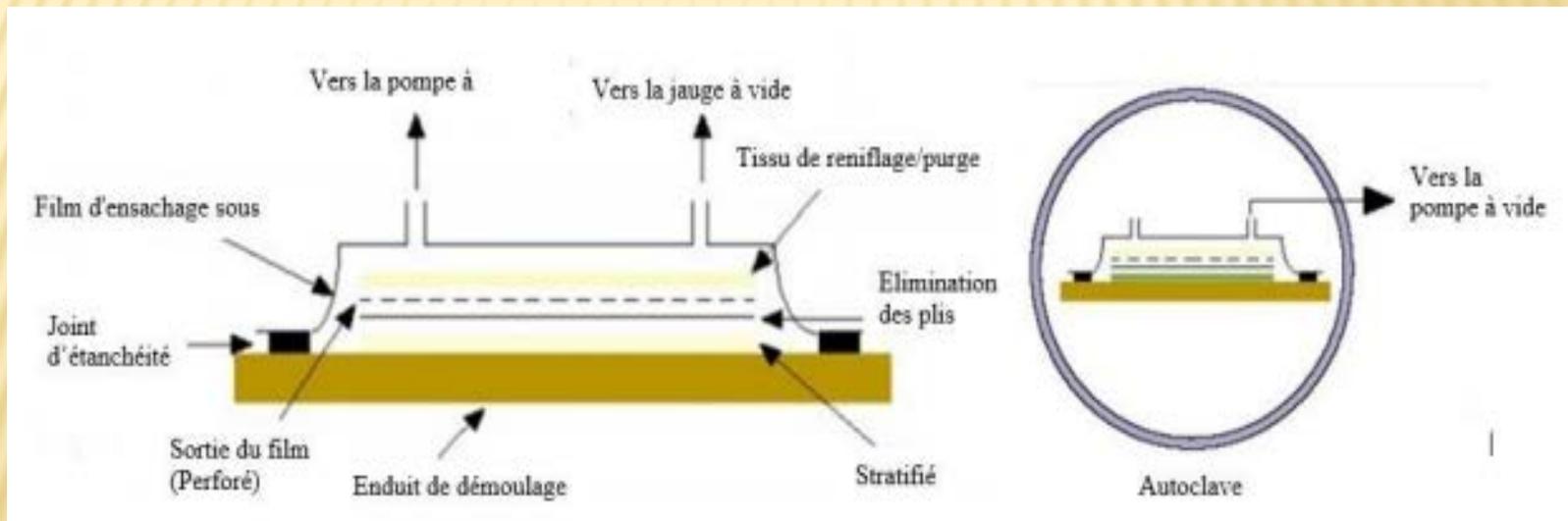


Figure I.9 : Moulage sous vide ou «au sac »

I.16.4 Enroulement filamentaire

- Adapté aux pièces de révolution ;
- Consiste à enrouler un renfort continu imprégné de résine sur un mandrin tournant ;
- taux fibres jusqu'à 85% en volume.

Applications : Mâts, cannes à pêches, shafts de golf.

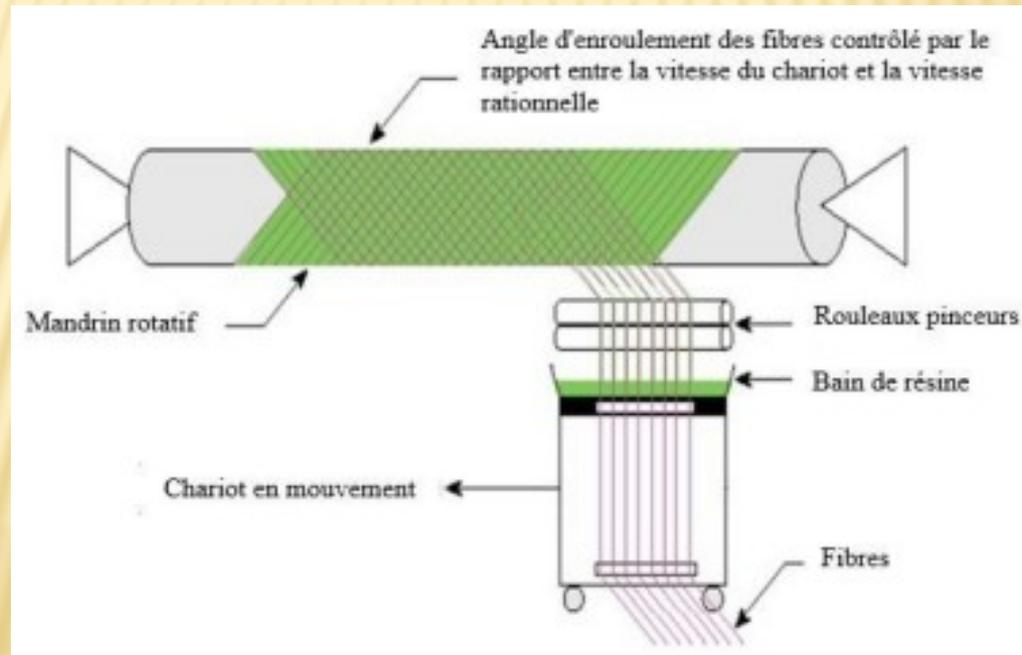


Figure I.10 : Enroulement filamentaire

I.16.5 RTM (Resin Transfer Moulding) : Moulage par transfert de résine

- Taux de fibres élevés ; Environnement « santé » (procédé en moule fermé, pas de dégagement de vapeurs nocives) ;
- Moules mâle et femelle : deux faces « propres » ;
- Devrait se développer grâce à l'amélioration des méthodes de simulation de l'injection de résine.

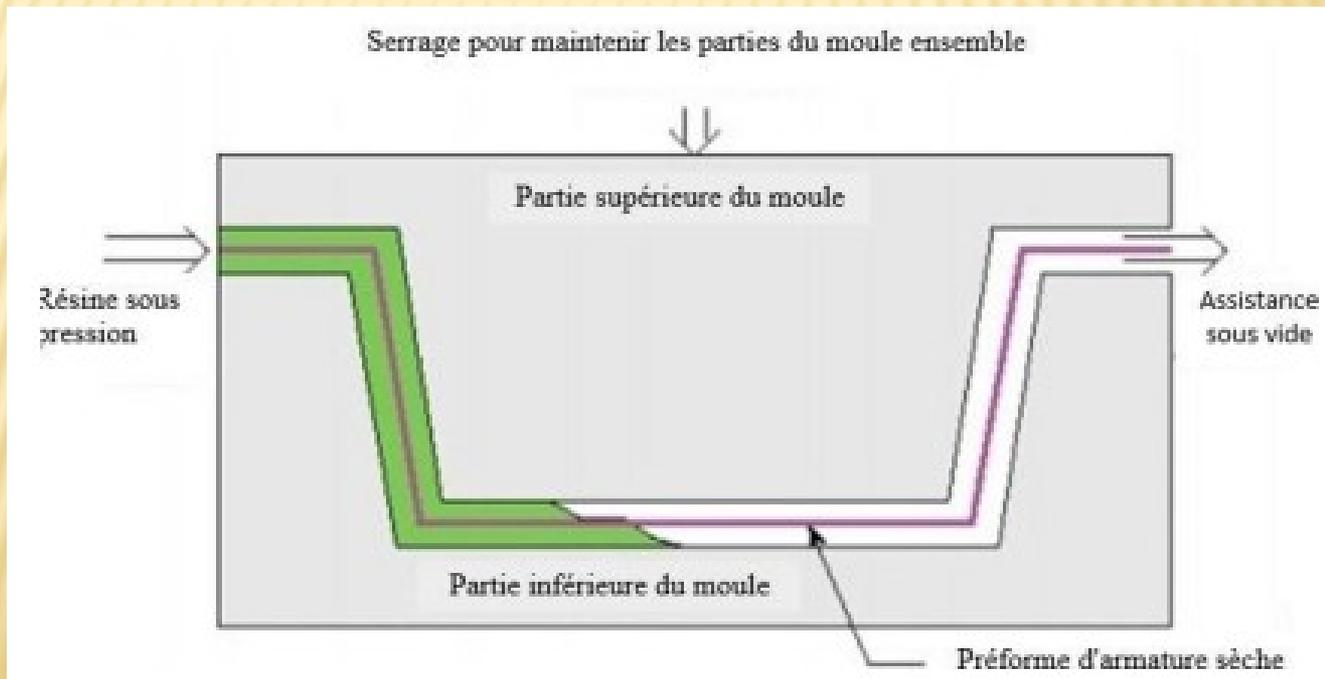


Figure I.11 : Moulage par transfert de résine

I.17 Conclusion

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

La conception de nouveaux matériaux répond à différents enjeux. En santé, ils sont utilisés pour suivre, diagnostiquer ou soigner les patients. Dans le domaine de l'énergie, ils permettent de récupérer, stocker et générer plus d'énergie. Dans le domaine des technologies de l'information, ils permettent une meilleure communication des objets entre eux.

Enfin, les matériaux s'inscrivent dans une démarche de développement durable en prenant en compte, dès leur conception, leur recyclage mais aussi en économisant de la matière et de l'énergie.