

TECHNOLOGIE DE BASE

(VHS 22h30, Cours : 1h30)

Objectifs de l'enseignement : Cet enseignement permettra aux étudiants d'acquérir des connaissances sur les procédés d'obtention et de fabrication de pièces et des techniques de leur assemblage

Ch I : Les matériaux :

Introduction

L'homme préhistorique n'utilisait que les cailloux pour satisfaire ses besoins matériels, c'est l'âge de la pierre : ensuite il découvrit l'argile, matériau plus mou et malléable qui était transformable après cuisson en matériau indéformable. Vint ensuite l'âge du fer et du bronze qui forme l'âge des métaux. Les métaux occupent aujourd'hui une place importante comme auparavant du fait qu'ils se prêtent à tous les usages (outils, armes, pièces mécaniques, divers équipement etc...).

L'utilisation des métaux purs possède beaucoup d'inconvénients tels que les faibles propriétés mécaniques physiques, chimiques, électriques, coûts très élevés etc...

Déjà au 15^{ème} siècle on préparait empiriquement les alliages binaires qui sont faciles à travailler : comment durcir un métal en le trempant ou en le forgeant. Le dernier siècle est caractérisé par l'apparition de beaucoup d'alliages, des matériaux réfracteurs des matériaux de construction et surtout les composés organiques (plastiques, caoutchouc, colles, goudron etc...) ; on a surtout vu évoluer en force dans le domaine de la haute technologie les céramiques techniques et les matériaux composites ; outre cela il y a amélioration de la qualité des matériaux, réduction du poids des pièces mécaniques et leur prix de revient.

Malgré ces nouveautés dans le domaine du matériau, l'acier et la fonte demeurent les métaux les plus utilisés dans l'industrie.

1.1. - Métaux et alliages et leurs désignations :

Le mot métal désigne à la fois un élément chimique et un matériau. De plus un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne en vue d'un usage spécifique. L'élément chimique est caractérisé par une forte conductivité thermique et électrique, une bonne aptitude à la réflexion de la lumière (les métaux sont opaques et ont un éclat métallique et une aptitude relativement élevée à la déformation plastique)

La plupart des métaux sont rarement utilisés à l'état pur en raison de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques difficilement utilisables à l'industrie. L'addition volontaire ou non à un métal pur d'un ou plusieurs éléments (métal ou métalloïde) peut modifier profondément cette propriété. Les mélanges obtenus s'appellent alliage. Un alliage est dit binaire ternaire ou quaternaire suivant le nombre d'élément qu'il renferme (1, 2,3 ou 4 éléments).

1.1.1.- Propriétés des Métaux

Pour le choix d'un alliage en vue d'une ou plusieurs applications on doit considérer:

- 1- Les propriétés physiques: masse volumique, couleur, dilatation et conduction**
- 2- Les propriétés chimiques: résistance à l'action des divers produits chimiques et agents atmosphériques appelée corrosion**
- 3- Les propriétés mécaniques définies par les essais mécaniques.**

4- Les propriétés de mise en forme:

- coulée
- par déformation plastique (laminage, estampage etc. ...)
- par soudage
- par usinage à l'aide d'outils coupant (tournage, fraisage, ajustage)

Le choix d'un alliage dépend de plusieurs critères:

- des caractéristiques mécaniques: limites ; masse, dureté, résilience...
- des caractéristiques physico-chimiques: comportement à la corrosion, vieillissement.
- des caractéristiques de mise en œuvre: usinabilité, soudabilité, imperméabilité.
- des caractéristiques économiques: prix disponible, expérience industrielle....

Avant l'extraction du métal de son minerai, ce dernier subit une préparation au préalable qui consiste au:

1.1.2.- Extraction des métaux

Pour extraire des métaux des minerais on applique des traitements thermiques ou chimiques.

L'utilisation de l'une ou de l'autre dépend de la composition chimique du minerai et de la nature de sa gangue. En générale les traitements se font dans des fours à haute température.

L'opération consiste à assurer d'une part la fusion de minerai et d'autre l'élimination des éléments non désirables grâce à son contact avec des agents ajoutés volontairement. Les périodes les plus importantes de l'opération sont:

A-La réduction appliquée aux minerais du type oxyde. Sous l'effet de la chaleur, le carbone et l'oxyde se combinent en libérant le métal et le gaz carbonique; par exemple dans le cas du fer:



b- le grillage qui consiste à chauffer à pair les minerais de type sulfure. Au moyen de cette opération, les sulfures se transforment en oxyde

c- la calcination qui consiste à chauffer à l'abri de l'air les minerais de type carbonate. Cette opération a la vertu de transformer les carbonates en oxyde; par exemple:



Les oxydes obtenus par les méthodes de grillage et de calcination sont ensuite traité par la méthode de réduction afin d'extraire le métal.

1.1.3.- Minerai de fer

Généralement tous les métaux ne se trouve pas à l'état natif (pur) dans la nature mais sous forme de roche, terre appelée minerai (Au, Ag, Hg,) qui se trouve à l'état libre. Le minerai est une combinaison d'un métal ou de plusieurs avec d'autre élément tels que (O₂, N₂, P, S etc...)

En plus il contient l'eau de l'hydratation les minerai qu'on rencontre dans la nature sont sous forme d'oxydes (Fe₂O₃), carbonate(CaCO₃) sulfure (PbS) ou silicateAl₄(SiO₄).

On distingue quatre groupes essentiels de minerais de fer

1. **Hématite:** dans ce minerai de fer, le fer se trouve sous forme Fe₂O₃, .Ce minerai est très riche en fer: son taux varie de 45 – 65 %; ces minerais sont facilement réductibles.
2. **Magnétite:** dans ce minerai, le fer existe sous forme Fe₃O₄; ce minerai est riche en fer 40-70 %.Ce dernier est difficilement réductible.
3. **Oxyde hydraté:** dans ce minerai, le fer existe sous forme d'un composé chimique (mFe₂O₃, nH₂O);ce minerai est pauvre en fer 25-50% et est facilement réductible.
4. **Sidérite:** ce minerai contient le fer sous forme FeCO₃; il est pauvre en fer de l'ordre de

20-40%. Facilement réductible, on l'utilise rarement. Il contient beaucoup de gangue.

Outre le minerai de fer, on ajoute dans le haut fourneau l'aggloméré au lieu du minerai de fer.

L'aggloméré est un minerai de fer fritté, très souvent ajouté dans le lit d'agglomération la castine (CaCO_3), qui se décompose pendant l'aggloméré auto-fondant. C'est-à-dire contient une grande quantité de CaO (chaux vive)

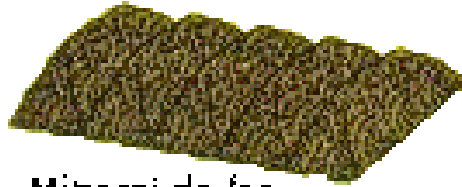


Fig.1 : Minerai de fer

1.1.4. Classification des métaux

Il existe deux catégories de métaux: métaux ferreux et métaux non ferreux

a- métaux ferreux:

L'élément principal qui les compose est le fer: la fonte et l'acier sont en fait des alliages de fer et de carbone +/-2%. La fonte est fragile et dure, tandis que l'acier est tenace, ductile et élastique. Ils ont la particularité d'être attirés par un aimant.

b- métaux non ferreux:

Sont ceux qui ne contiennent pas de fer. Il en existe plusieurs sortes: le cuivre et ses alliages (laiton et le bronze), le plomb, le zinc, le nickel.

1.1.4.1. -Fabrication des métaux ferreux

La métallurgie est une branche de l'industrie lourde qui s'occupe de la production des métaux. Les processus physico-chimiques nécessaires pour la fabrication des métaux sont des processus métallurgiques

Tous les métaux ferreux sont divisés en deux groupes principaux: la fonte et l'acier

1- Les fontes

La fonte est un alliage fer - carbone dont la teneur en carbone dépasse 2%. D'habitude les fontes les plus répandues contiennent (3.5 – 4.2) % c; outre le carbone, elles contiennent d'autres impuretés, tels que le silicium, le manganèse, soufre, phosphore. Concernant la teneur des impuretés, le carbone constitue (5-8) %c, le reste c'est le fer à (92-95) % . On le fabrique dans les hauts fourneaux et dans les fours à induction.

2- Les aciers

L'acier est un alliage fer carbone dont la teneur en carbone ne dépasse pas les 2 % c; les aciers les plus répandus se trouvent à la limite (0.05 -0.5)%c; les impuretés sont le silicium, le manganèse, le soufre et le phosphore. La teneur totale de ces impuretés est inférieure à 1% dans les aciers ordinaires, et le reste est le fer à 99% . On fabrique l'acier dans les convertisseurs (Bessemer, Thomas à oxygène, four martin et four électrique)

1.1.4.2.- Processus d'élaboration de la fonte

L'élaboration de la fonte se fait au niveau des hauts fourneaux. Ce métal est obtenu à partir des matières premières qui sont les minerais de fer; ces minerais sont des mélanges naturels des oxydes de fer avec d'autres impuretés FeO_3 , FeO_4 , FeO (partie essentielle SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO (partie impureté ou gangue)). L'élaboration de la fonte se fait dans le haut-fourneau ; la charge introduite dans le gueulard se compose de minerai de fer, de coke métallurgique et d'un fondant. Sous l'action de leur propre poids, ils descendent peu à peu en se réchauffant jusqu'à la fusion. Le métal fondu composé de la fonte et du laitier s'écoule dans le creuset. Par suite d'une différence sensible entre les masses spécifiques de la fonte et du laitier, ce dernier s'accumule à la surface de la fonte; il est évacué à travers le trou de coulée du laitier situé plus haut que celui de la fonte.

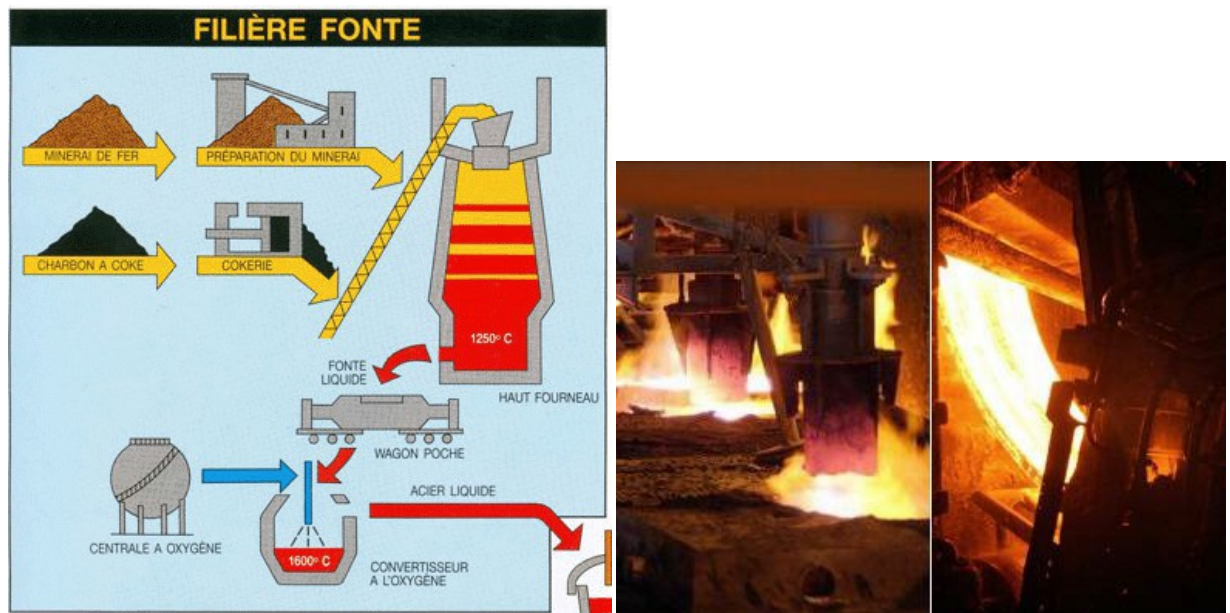


Fig. 2 Filière Fonte

1.1.4.3.. Le haut fourneau

Le haut-fourneau est le symbole de la sidérurgie. C'est un appareil de grandes dimensions, garni intérieurement d'un revêtement réfractaire, dans lequel le minerai est chauffé à des températures élevées. Les matières premières préparées sont chargées par le haut dans le haut fourneau.

La coke, ajoutée dans le mâchefer, apporte la chaleur nécessaire à la fusion du minerai et élimine l'oxygène contenu dans la matière en produisant des oxydes de carbone.

Le fer pur libéré se combine au carbone du coke et produit de la fonte en se dégageant des autres constituants (impuretés). Celle-ci contient alors 96 % de fer, 3 à 4 % de carbone et 1 à 2 % d'autres éléments (phosphore, soufre, silicium, manganèse, etc.).

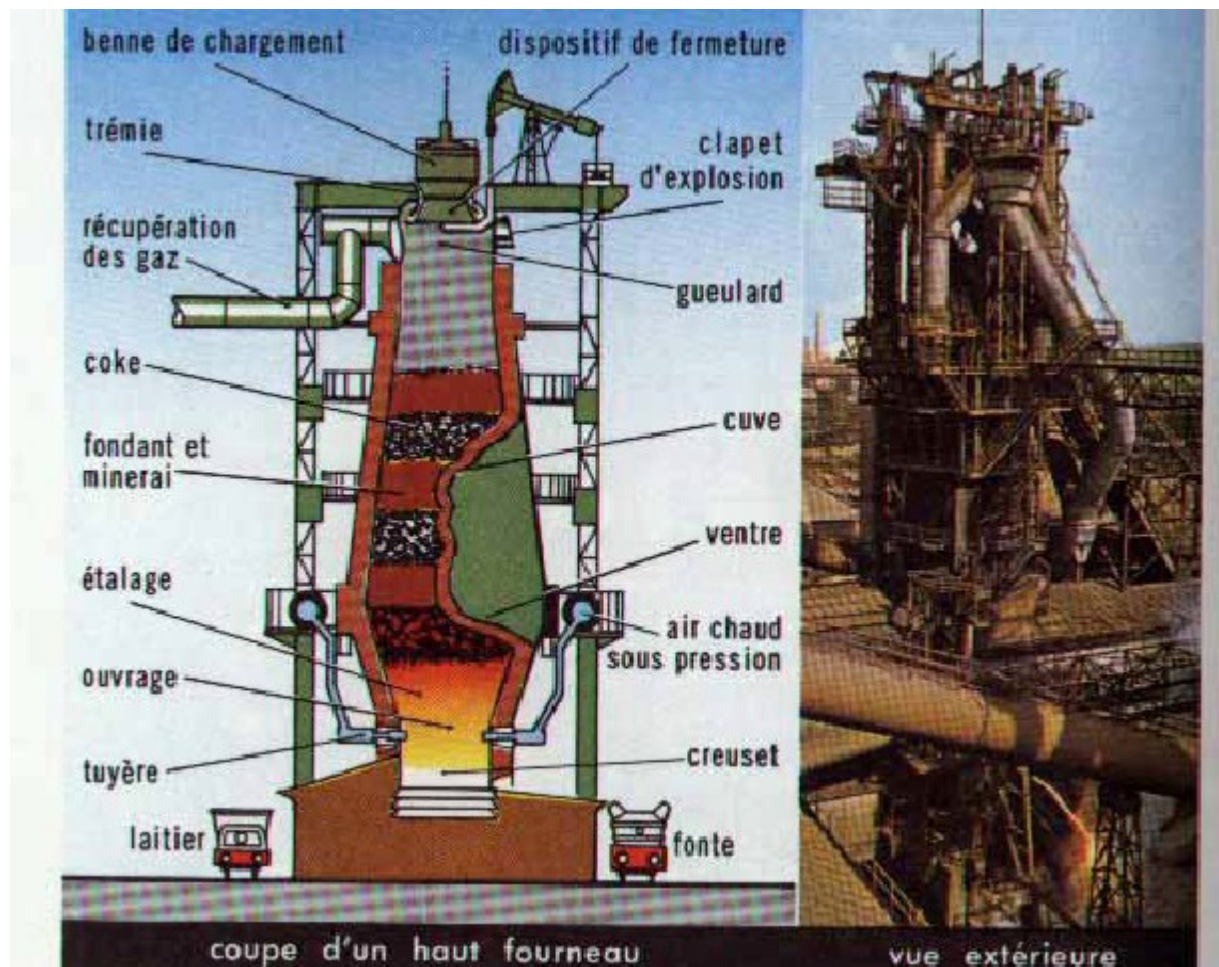


Fig.3 Coupe d'un haut fourneau et sa vue extérieure

La fonte du haut-fourneau est divisée suivant la destination en trois groupes :

Fonte d'affinage, Fonte de moulage, Alliage ferro -métallique.

- Plus de 80% de la production totale est composée de la fonte blanche d'affinage, essentiellement employée pour la fabrication de l'acier (le fer est à l'état de Cémentite Fe_3C).

- La fonte de moulage grise est employée pour l'obtention des coulées façonnées.

- Les alliages ferro-métalliques et la fonte de moulage constituent près de 20%. Les alliages contiennent beaucoup de silicium et de manganèse

1.1.5. Élaboration de l'acier

La conversion de la fonte en acier liquide est réalisée dans un convertisseur à oxygène.

De l'oxygène est insufflé dans le bain de fonte liquide et permet d'éliminer par combustion des éléments indésirables (carbone, silicium, soufre, phosphore, etc.) qui se fixent à la chaux présente dans la fonte pour former des scories. Ces sous-produits de la fabrication de l'acier trouveront divers usages. La combustion provoque une élévation de la température de $1250^{\circ}C$ (fonte liquide) à $1600^{\circ}C$ et transforme la fonte en acier.



Fig.4 la fonte coulée dans une aciérie

Ce qui distingue le fer, de la fonte et de l'acier est la teneur en carbone. Le fer est un métal pur. Il ne contient pas de carbone. L'acier a un taux de carbone qui se situe entre 0,15 et 1,7%.

Dans la réalité industrielle, il dépasse rarement 1%. La fonte est riche en carbone. Son taux est de 2,5 à 6%.

Cette présence de carbone influe par ailleurs sur les caractéristiques du métal comme propriété cassante, ainsi que sur sa dureté et sa résistance. Plus la teneur en carbone est élevée plus l'acier est dur et résistant. Moins il y a de carbone, plus l'acier est plastique et malléable.

Les traces de carbone présentent dans l'acier font que les sidérurgistes réservent l'appellation "alliage" aux aciers qui incorporent d'autres éléments que le carbone.

1. l'affinage liquide, qui fournit la quasi - totalité de l'acier employé, le métal reste liquide à la fin de l'opération.

2. L'affinage solide, qui donne un produit solide, à l'état pâteux à la fin de l'opération.

1.1.5.1. Affinage liquide

- Affinage par l'air dans le convertisseur de Bessemer et Thomas

La fonte liquide arrivant du mélangeur est versée dans le convertisseur, à travers duquel on souffle un intense courant d'air qui brûle les impuretés de la fonte. Cette combustion dégage en même temps la chaleur nécessaire pour élever la température du bain depuis celle de la fonte en fusion 1200° C jusqu'à celle de l'acier à 1600° C.

Le convertisseur de Thomas diffère de Bessemer par son revêtement réfracteur, qui est basique (chaux) au lieu d'être acide comme dans le Bessemer (silice). Le procédé acide ou Bessemer, permet de traiter les fontes non phosphoreuses riches en silice (1.5÷2%). Le procédé basique ou Thomas, permet de traiter les fontes phosphoreuses (1.7÷2%) avec peu de silice (0.4÷0.6%) ; la durée du traitement varie entre 15 et 30 minutes.

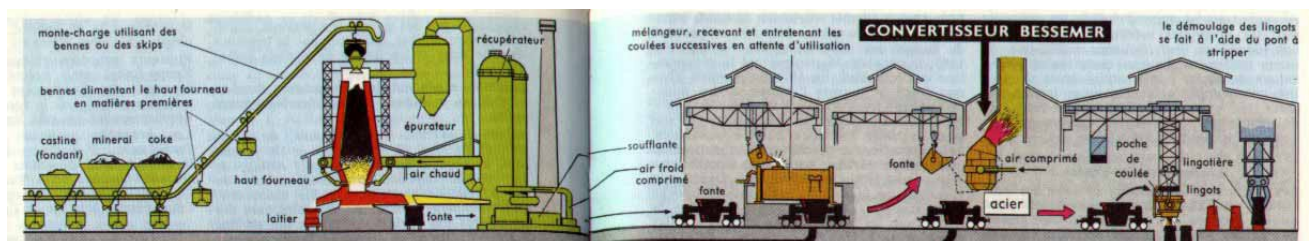


fig5. Convertisseur de Bessemer

- Affinage au four Martin

Dans le four Martin acide, l'affinage porte uniquement sur le carbone, le silicium et le magnésium ; le soufre et le phosphore restent intacts. En revanche, dans le four Martin basique, l'affinage peut aussi porter sur ces deux derniers éléments.

En qualité de combustible, on utilise le gaz et parfois les déchets de fer et d'acier .La durée de fusion est de 4 à 8 heures .Pendant ce temps, on prend systématiquement des échantillons pour analyse chimique. Quand on obtient la composition requise de l'acier, le métal est déchargé dans la poche à coulée et de là dans les lingotières.

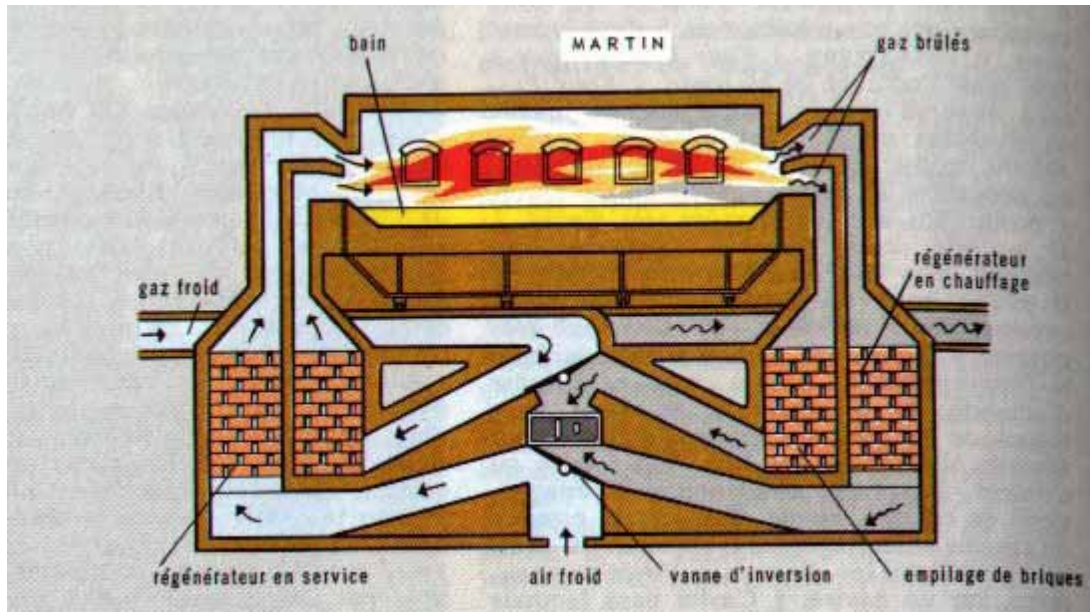


Fig5. Four Martin

- Affinage au four électrique

Ce procédé permet d'obtenir un affinage très poussé du métal ; il est réservé à l'élaboration de l'acier de qualité, le chauffage est assuré par un arc électrique jaillissant entre des électrodes de carbone et les matières placées dans le four .Ce procédé utilise à coté de la fonte liquide, des déchets métallurgiques appelés riblon

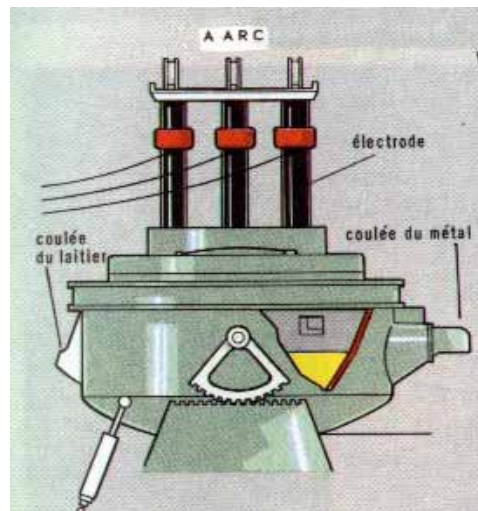


fig.6 four électrique

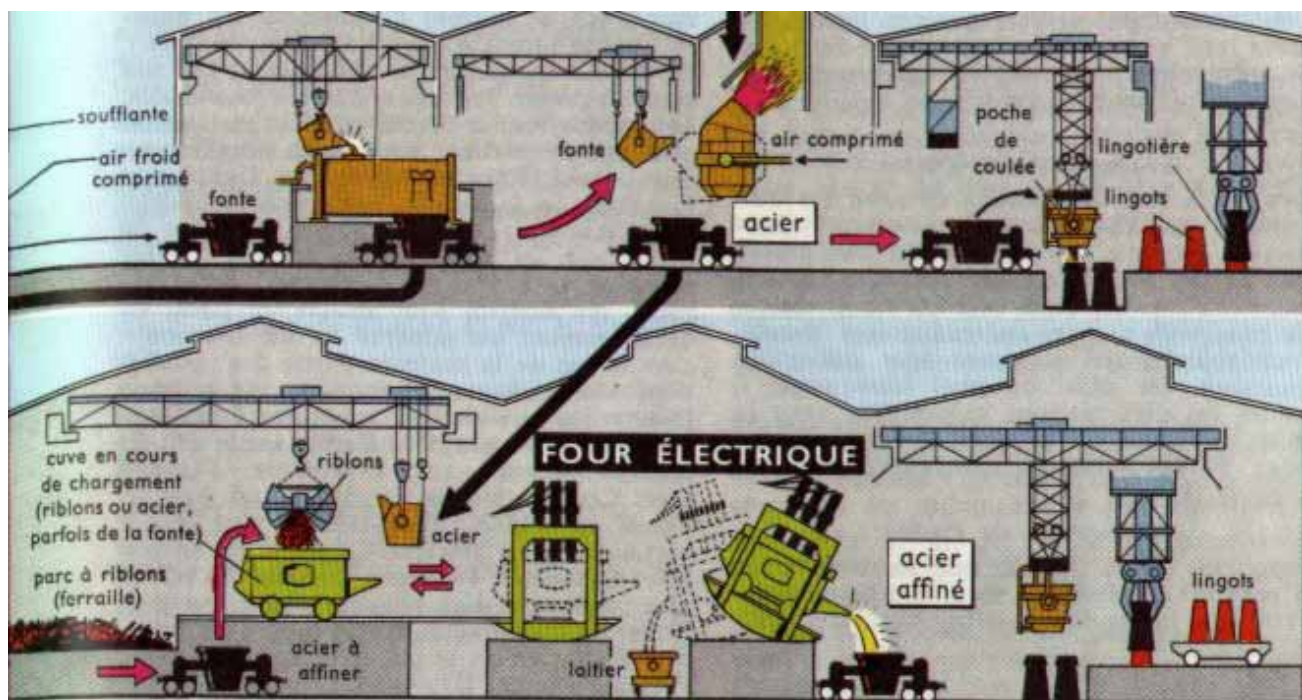


fig7. Affinage électrique

1.1.5.2. Affinage solide

Capable de fournir des fers à teneur en soufre et phosphore très bas et inférieur à tout ce que l'on peut obtenir par les procédés d'affinage liquide. Dans ce procédé, le combustible (charbon ou bois) est en contact avec la fonte. L'affinage réalisé par oxydation des impuretés nuisibles de la fonte, les faisant passer dans le laitier. Lorsque l'opération est terminée, on tire du four des loupes spongieuses de métal contenant de nombreuses scories. Ces loupes sont singlées pour éliminer le maximum de scories.

1.1.6.- Classification des aciers

D'après la composition chimique, les aciers sont divisés en aciers au carbone ou aciers non alliés et aciers alliés.

1.1.6.1.- Aciers aux carbonnes

Contiennent du carbone en proportion croissante, du magnésium en proportion supérieure au carbone et des traces de phosphores de silicium et de soufre.

Qualité	C (%)	Mn (%)	P(%)	Si (%)	S(%)	Lim. Rupt. (Mpa)	Allong. (%)	Observat..
Extradoux	0.15	0.4	0.04	0.03	0.02	400	30	Martin B
dDoux	0.25	0.4	0.04	0.03	0.02	500	25	Martin B
Mi-doux	0.35	0.4	0.06	0.15	0.03	600	20	Martin A
M-dur	0.45	0.5	0.06	0.20	0.03	700	15	-
Dur	0.55	0.6	0.06	0.25	0.03	800	10	-
Extra-dur	0.65	0.7	0.06	0.3	0.03	900	5	-

1.1.6.2. Aciers alliés

Composition variable suivant l'emploi. Les éléments alliés sont en proportion variant généralement entre 0 et 5%.

Eléments alliés	Ratio (%)	observations
carbone	0.2 ÷ 0.7	
silicium	0.1÷0.7 2÷4 (aciers spéciaux)	Ressort Tôle de transfo.
Magnésium	0.3-0.8 12÷14 (acier très dur)	Voies ferrées
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Molybdène	<0.1	

Les propriétés mécaniques des aciers au carbone sont moindres que les aciers alliés (voir tableau)

Nature de l'acier	Résistance à la traction (Mpa)	allongements %
acier au carbone	400-900	5- 30
acier allié	700- 1000	9 - 13

1.1.6.3. Aciers non alliés

1.1.6.3.1. Aciers non alliés d'usage général

Ils sont destinés à la construction soudée, à l'usinage, au pliage... On distingue:

- Le type S qui correspond à un usage général de base construction de bâtiment....
- Le type E qui est utilisé dans la construction mécanique.

La désignation de ces aciers comprend la lettre indiquant le type d'acier, suivie de la valeur de la limite élastique (Re) exprimée en (MPa). Noter qu'il s'agit de la valeur à faible épaisseur, les résistances décroissant avec l'épaisseur.

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre G. La désignation peut être complétée par des indications supplémentaires (pureté, application dédiée...)

Exemples:

- S185 (anciennement A33), Re = 185 MPa
- S235 (anciennement A37, E24), Re = 235 MPa
- E295 (anciennement A50), Re = 295 MPa
- GE295, acier moulé, Re = 295 MPa
- S355 J2 WP (anciennement A52, E36), Re = 355 MPa,

1.1.6.3.2. Aciers non alliés spéciaux (type C)

Leur composition est plus précise et plus pure et correspond à des usages définis à l'avance.

Leurs applications courantes sont les forets perceuses, ressorts, arbre de transmission, matrices moules ...

Leur désignation comprend la lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. S'il s'agit d'un acier moulé, on précède la désignation de la lettre G.

Exemples:

- C45, acier non allié comportant un taux de 0,45 % de carbone:
- GC22, acier moulé non allié comportant un taux de 0,22 % de carbone.

1.1.6.3.3. Aciers faiblement alliés

Aucun élément d'addition ne dépassant 5 % , ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance.

Exemples de désignation normalisée:

- 35NiCrMo16: contient 0,35 % de carbone, 4 % de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur. Cet acier présente une bonne tenue aux chocs ainsi qu'une haute résistance mécanique jusque 600 °C:

- 100Cr6: 1% de carbone et 1,5 % de Chrome. C'est l'acier typique utilisé dans les roulements à billes

1.1.6.3.4. Aciers fortement alliés

Au moins un élément d'addition dépasse les 5% en masse, destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, très haute résistance, utilisés dans (l'aéronautique).

1.1.7. Symbolisation et Normalisation des Métaux et des Alliages

1.1.7.1. Symboles métallurgiques

On utilisait des symboles dits « métallurgiques » pour indiquer les éléments chimiques dans les alliages. Ces symboles étaient utilisés dans plusieurs normes, par exemple la norme NF A 02-004 pour les alliages d'aluminium ou la norme NF A 35-573/4 pour les aciers.

Elément	Aluminium	Bore	Chrome	Etain	Magnésium	Cobalt	Manganèse	Nickel	Silicium	Titane	Cuivre
Symbole chimique	Al	B	Cr	Sn	Mg	Co	Mn	Ni	Si	Ti	Cu
Symbole métallurgique	A	B	C	E	G	K	M	N	S	T	U

1.1.7.2. Symbolisation et Normalisation des aciers

La classification des aciers comporte d'abord cinq grandes catégories

- les aciers non-alliés d'usage général (construction);
- les aciers non-alliés spéciaux, pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables...;
- les aciers alliés d'usage courant
- les aciers faiblement alliés, pour trempe et revenu; les éléments d'alliage favorisent la trempabilité et permettent d'avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à hautes limites élastiques, pour les outils, les ressorts, les roulements...
- les aciers fortement alliés:
 - a- les aciers inoxydables,
 - b- les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forets.

1.1.7.3. Désignation des aciers :

L'acier est obtenu par décarburation de la fonte (oxydation du carbone) dans les hauts fourneaux, accompagnée d'une épuration en différents métalloïdes (souffre, silicium,...). Les aciers de qualité sont obtenus au four Martin.

Selon la normalisation française (Norme NF A-02-001), on classe les aciers selon leur pureté et les éléments d'alliages qu'ils contiennent et on les désigne par un symbole composé de lettres et

de chiffres. Lorsque les aciers sont définis par leurs caractéristiques mécaniques, ils appartiennent à la classe A.

	Charge de rupture R (daN/mm ²)	
	Minimum	Maximum
ADx	33	50
A33	33	40
A37	37	44
A42	42	50
A48	48	56
A56	56	65
A65	65	75
A75	75	86
A85	85	95
A95	95	105

Tableau 1.1: Nuance de la classe A

Indice de pureté	Teneur maximale en soufre (%)	Teneur maximale en phosphore (%)	Teneur maximale en soufre et en phosphore (%)
a	0.065	0.09	0.14
b	0.06	0.08	0.12
c	0.05	0.06	0.10
d	0.05	0.05	0.09
e	0.04	0.04	0.07
f	0.035	0.04	0.065
g	0.035	0.025	0.060

Tableau 1.2: Indices de pureté

Si les aciers sont définies par leur composition chimique, ils appartiennent à la classe C .on désigne par:

- C - les aciers non alliés de catégorie courante
- XC – les aciers fins non alliés

Ce symbole est suivi d'un nombre désignant la concentration en carbone, multiplié par 100 et d'une lettre minuscule qui définit la pureté chimique en soufre et en phosphore

Ainsi un acier indicé C 10 d est un acier ordinaire à 0,1 % de carbone dont la teneur en soufre et en phosphore ne dépasse pas 0,09 %.

Un acier indicé XC 32 f est un acier fin à 0,32 % de carbone dont la teneur en soufre et en phosphore ne dépasse pas 0,065 %.

Nuance	Caractéristiques mécaniques					
	Limite d'élasticité E (daN/mm ²)	Résistance à la traction R (daN/mm ²)	Dureté Brinell H (daN/mm ²)	Allongement A (%)	Striction ε (%)	Résilience K (J/cm ²)
C 10 d	21	33 – 40	116	31	65	
C 20 d	26	42 - 50	112	25	52	
C 35 d	32	56 - 66	112	19	55	80
C 45 e	35	33 - 40	114	16	52	
XC 10 f	21	45 - 52	116	31	65	
XC 18 f	27	56 – 62	112		55	
XC 32 f	32	56 – 62	112			
XC 48 f	40	70 - 77	114	8		
XC 80 f	50	95 - 105				

Tableau 1.3: Aciers au carbone destinés à la construction mécanique

Dans la désignation des aciers alliés d'usages spéciaux, ce symbole C n'apparaît plus, et les éléments d'alliages sont désignés par une lettre conventionnelle:

C- Chrome; D- Molybdène; M- Manganèse; N- Nickel; V- Vanadium; W- Tungstène

Les aciers faiblement alliés sont les aciers dont la teneur en chaque élément d'addition ne dépasse pas 5 %. Les lettres sont rangées dans l'ordre des teneurs décroissantes, et en cas d'égalité par ordre alphabétique.

Les éléments suivants ne sont pas mentionnés: le manganèse et le silicium si la teneur est inférieure à 1 %; le nickel si la teneur est inférieure à 0,5 %; le chrome si la teneur est inférieure à 0,25 %; le molybdène et le vanadium si la teneur est inférieure à 0,1 %.

Le symbole utilisé pour désigner un acier allié comprend:

- Un premier groupe de chiffres donnant la concentration en carbone x 100.
- Un groupe de lettres indiquant les éléments d'addition
- Un groupe de chiffres donnant la concentration de l'élément principal, celui-ci est multiplié par 4 pour Cr, Co, Mn, Ni, Si et par 10 pour Al, Mo, Ti, V, W.

Exemple: L'acier 100 C 4 contient: C = 1 %; Cr = 1 %,

L'acier 20 N C D 14 contient: C = 0,2 %; Ni = 3,5 %; Cr = 1 %; Mo = 0,3 %.

Nuance	Eléments d'addition	Caractéristiques mécaniques						Usage
		Limite d'élasticité E (daN/mm²)	Résistance à la traction R (daN/mm²)	Dureté Brinell H (daN/mm²)	Allongement A (%)	Striction ε (%)	Résilience K (J/cm²)	
30 U C 5	Cr 0,4 Cu 0,5 C 0,3	77	90		12		70	Construction mécanique
40 M 6	C 0,4 Si 0,1 Mn 1,5	57	72		20		200	Construction soudée
10 S 6	Mn 0,7 Si 0,5 C 0,1	135	145		8		50	Ressorts
40 N 14	C 0,4 Ni 3,5	59	77				200	Pièces cémentées, arbre à came, vilebrequins, fusées, axes, galets, engrenages
15 N 28	C 0,15 Ni 7	42 - 103	58 - 120		24 - 10		210 - 100	Pièces cémentées
30 N 20	C 0,3 Ni 5	60 - 98	74 - 118		10		120	Utilisation directe pour pièces mécaniques
10 N C 12	C 0,1 Ni 3 Cr 0,7	70	75		13		180	Construction mécanique
35 N C D 4	C 0,35 Ni 1 Cr 0,5	110	125		11		90	Construction mécanique

	Mo 0,15							
32 C N D 12	C 0,32 Ni 3 Cr 2,5 Mo 0,4	125	150		11		70	Construction mécanique

Tableau 1.4: Aciers spéciaux

1.1.8. Désignation normalisée des fontes

1.1.8.1. - Fontes à graphite lamellaire (non alliées)

Ex: EN-GJL-350

EN : (Norme Européenne)

GJL: Fonte à graphite lamellaire

350: Résistance minimale à la rupture par traction (Rr en MPa)

1.1.8.2. - Fontes à graphite sphéroïdal (non alliées)

Ex: EN-GJS-450-10

EN: (Norme Européenne)

GJS: Fonte à graphite sphéroïdal

450: Résistance minimale à la rupture par traction (Rr en MPa)

10 : Allongement après rupture en %

1.1.8.3.- Fontes malléables (non alliées)

Ex: EN-GJMB-550-4

EN: (Norme Européenne)

GJMB : Fonte malléable à coeur noir (Black)

550: Résistance minimale à la rupture par traction (Rr en MPa)

4: Allongement après rupture en%

Autre Ex: EN-GJMW-380-12

EN : (Norme Européenne)

- GJMW Fonte malléable à coeur blanc

380: Résistance minimale à la rupture par traction (Rr en MPa)

12: Allongement après rupture en%

1.1.8.4. - Fontes austénitiques (alliées)

Ex: EN-GJS Ni Cr 30-1

EN : (Norme Européenne)

GJS: Fonte à graphite sphéroïdal alliée

Ni: Nickel avec 30 %

Cr: Chrome avec 1 %

Autre Ex: EN-GJN Cr15Mo Ni

EN: (Norme Européenne)

GJN: Fonte blanche alliée

Cr: Chrome avec 15 %

Mo: Molybdène avec quelques traces

Ni: Nickel avec quelques traces

1.2. Matières plastiques

1.2.1. Introduction :

Une matière plastique est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. Elle peut être étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels.

Généralement, les polymères industriels ne sont pas utilisés à l'état « pur », mais mélangés à des substances miscibles ou non dans la matrice polymère.

Les plastiques se présentent sous de nombreuses formes : pièces moulées par injections, tubes, films, fibres, tissus, mastics, revêtements, etc. Ils sont présents dans de nombreux secteurs, même dans les plus avancés de la technologie.

Les matières plastiques sont fabriquées à partir du pétrole, du gaz naturel, du charbon, de la cellulose et des bioplastiques.

1.2.2. Caractéristiques

Les propriétés des matériaux plastiques ne cessent de s'améliorer.

On constate l'emploi grandissant de pièces en matières plastiques à la place de pièces métalliques, souvent plus onéreuses, plus sensibles à la corrosion, ou plus lourdes. Certaines caractéristiques techniques diffèrent notablement de celles des métaux :

- **la densité des matières plastiques est nettement plus faible** que celle des métaux Celle d'un polymère est directement fonction du taux de cristallinité. Par ailleurs, la rigidité et la résistance mécanique augmentent avec ce taux ;
- **La température de transformation plus basse** : couramment comprise entre 100 °C et 300 °C. Les bioplastiques sont transformés de 160 à 200 °C.
- **L'élasticité est plus élevée** (jusqu'à 800 % d'allongement à la rupture pour le PEHD) ;
- **La thermostabilité des polymères thermoplastiques nettement inférieure à celle des métaux.** Rares sont les plastiques résistant à plus de 250 °C pendant de longues périodes dans l'air. Des modifications structurales, particulièrement parmi les matières thermoplastiques, permettent d'élargir le domaine thermique d'utilisation vers les basses ou hautes températures ;
- **Le module d'élasticité plus faible.** Une incorporation croissante de fibres augmente le module d'élasticité et la contrainte à la rupture (ténacité) du composite. La dilatation thermique des matériaux est inversement proportionnelle à leur module de traction. Le coefficient de dilatation des polymères thermoplastiques est supérieur à celui des métaux ;
- **La tenue (ou résistance) aux agents chimiques** : en règle générale, les polymères résistent aux acides et aux bases. Ils sont cependant sensibles aux solvants.
- **les polymères ont un comportement viscoélastique.** En effet, ils démontrent simultanément des propriétés élastiques et un caractère visqueux. Dans ce dernier cas, la matière s'écoule en réponse à une contrainte ;
- **certains plastiques sont des amortisseurs vibratoires .**
- la plupart des polymères thermoplastiques amorphes non chargés (et non colorés...) sont transparents (PMMA, PC, PS « cristal », etc.) ;
- certains plastiques manifestent une grande résistance à l'impact (PC, PET, PMMA, etc.) ;
- **certains sont résistants à l'abrasion** (PTFE, PVC rigide, polyamides, PET, aminoplastes, etc.). Le PTFE possède un coefficient de friction particulièrement faible qui lui permet d'être un lubrifiant solide ;

- **des déchets plastiques très stables peuvent rester des siècles dans l'environnement ; ils peuvent cheminer dans des organismes et ceux qui se fixent ont un effet inconnu.**
- **la conductivité thermique des polymères est environ cent fois plus faible que celle des métaux ; ainsi, beaucoup de matières plastiques, en particulier les mousses, sont utilisées comme isolants.**
- **La conductivité électrique des plastiques sert traditionnellement pour l'isolation de fils et câbles électriques**

1.2.3. Familles de matières plastiques

1.2.3.1. Thermoplastiques.

Les matériaux plastiques composés de polymères à chaîne linéaire ou ramifiée sont en principe fusibles. Les polymères thermoplastiques (ou polyplastiques, thermoformables) se déforment et sont façonnables sous l'effet de la chaleur, gardant cette forme en refroidissant (analogie avec la cire des bougies). Ce phénomène réversible permet leur recyclage : les objets sont broyés et « refondus » pour en élaborer d'autres.

Les thermoplastiques sont par ailleurs solubles dans des solvants spécifiques, ce qui permet leur utilisation comme revêtements et colles.

Pour fixer les idées, la plupart des polymères linéaires industriels ont des masses molaires voisines de $10^5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Une macromolécule linéaire peut avoir une longueur qui dépasse le dixième de micromètre, ses dimensions latérales restant mille fois plus faibles.

Les textiles synthétiques (fils et fibres) sont toujours thermoplastiques. Ils sont apparus en 1940. On compte actuellement plus de quarante types de textiles synthétiques et plus d'un millier de noms commerciaux pour les désigner.

1.2.3.2. Thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables prennent leur forme définitive après la réaction chimique (polymérisation) accompagnant leur transformation. Le réseau tridimensionnel obtenu donne au produit fini son caractère d'irréversibilité thermique. La structure réalisée avec une résine thermodurcissable ne peut varier et se trouve géométriquement figée (analogie avec la cuisson d'un œuf). Plus le composé sera tridimensionnel, plus il sera *rigide*, cassant, insoluble et infusible.

Exemple : copolymérisation du polyester insaturé en présence de styrène. La structure obtenue est définitive, le produit fini est infusible donc non transformable et non recyclable.

1.2.3.3. Élastomères

Les élastomères sont hautement déformables : ils se caractérisent par la faculté de supporter de grandes déformations (jusqu'à environ 1 000 %) avant rupture. Ils sont des polymères à caractère amorphe ou cristallin présentant des propriétés remarquables en élasticité, amortissement et étanchéité (air, eau). Ils sont thermoplastiques et deviennent thermodurcissables par vulcanisation.

Ils sont employés en général réticulés, et le plus souvent à une température supérieure à leur température de transition vitreuse, sur le plateau caoutchouteux ; utilisation : fabrication de la gomme des pneumatiques [contenant principalement du caoutchouc naturel (NR) et du copolymère élastomère styrène-butadiène (SBR)^[40], bandes transporteuses, tuyaux, durits, coussins, silentbloks, joints, mastics, gants médicaux, chaussures, etc.

1.3 Matériaux composites :

Matériau en phase solide constitué d'au moins deux constituants dont les qualités respectives se complètent pour former un matériau aux performances globales améliorées.

Un matériau composite structural est généralement constitué d'un renfort (ossature) et d'une matrice (liant). Le renfort, le plus souvent sous forme fibreuse ou filamenteuse, assure l'essentiel des propriétés mécaniques. La matrice joue le rôle de liant afin de protéger le renfort de l'environnement, de le maintenir dans sa position initiale et d'assurer la transmission des efforts.

Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope. Il possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas.

Un matériau composite se compose comme suit : matrice + renfort + optionnellement : charge et/ou additif. Exemples : le béton armé = composite béton + armature en acier, ou le composite fibre de verre + résine polyester

On distinguera :

- les matériaux composites dits de “grande diffusion” dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série ;
- les matériaux composites dits “hautes performances”, présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial.

Un matériau composite est constitué d'une ossature appelée renfort (qui est généralement des fibres) qui assure la tenue mécanique et d'un liant appelé matrice qui est la plupart du temps une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) et qui assure la cohésion de la structure et la transmission des efforts vers le renfort. Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites **que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :**

- les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;
- les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique) ;
- les composites à matrices métalliques (CMM) pour quelques applications spécialisées.

Les composites trouvent leurs principales applications dans les transports aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique, comparable aux matériaux homogènes comme l'acier, et à leur faible masse volumique.

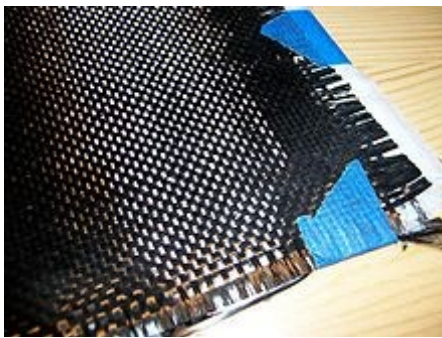
Principaux composites

Quelques exemples de matériaux composites :

- les composites naturels :

- le bois est un composite à base d'une matrice en lignine et de renforts en fibre de cellulose,
- l'os est un composite à base d'une matrice en collagène et de renforts en apatite,
- la dent ;
- les composites artificiels :
 - les matériaux rigides communément appelés « fibre de verre » et « fibre de carbone » sont des composites respectivement de fibres de verre et fibres de carbone et de diverses résines rigides (notamment époxyde),
 - le Micarta est un composite de fibres (initialement coton ou papier) imprégnées à haute pression avec des résines phénoliques durcissantes telles que la Bakélite,
 - les panneaux de bois agglomérés comme le contreplaqué utilisé en menuiserie, construction, ébénisterie,
 - les cloisons de plaques de plâtre, très utilisées dans le bâtiment hors intempéries,
 - le béton armé en génie civil est un composite de béton et d'acier,
 - le GLARE, composé principalement d'aluminium et de fibre de verre, est utilisé en aéronautique,
 - l'acier damassé était un composé de plusieurs feuilles d'acier de nuances différentes ;
- le composite dentaire ;
- l'amalgare composite pouvant remplacer une dent.

Renforts



Fibre de carbone tissée.

Le renfort est l'armature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques. Les renforts peuvent être classés selon :

- leur composition : métal, verre, polymère, etc. ;
- leur forme :
 - fibres : courtes (0,1 - 1 mm), longues (1 - 50 mm) ou continues (> 50 mm). Les fibres continues peuvent être disposées :
 - parallèlement les unes par rapport aux autres : renforcement unidirectionnel,
 - selon un angle prédéfini (45° par exemple les unes par rapport aux autres) : renforcement multidirectionnel,
 - d'une façon aléatoire ;
 - charges renforçantes : gravier (additionné au ciment pour fabriquer le béton), sable, billes de verre, etc. ;
- leur disposition : mat ou tissé.

Le renfort peut être seul au sein d'une matrice (composite homogène) ou associé à un renfort de nature différente (composite hybride).

Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance faible à la compression.

Parmi les fibres les plus employées on peut citer :

- les fibres de verre qui sont utilisées dans le bâtiment, le nautisme et diverses applications structurelles peu chargées. Le coût de production de ces fibres est peu élevé ce qui en fait l'une des fibres les plus utilisées à l'heure actuelle ;
- les fibres de carbone utilisées pour des applications structurelles visant à obtenir une plus grande légèreté et une meilleure rigidité qu'avec la fibre de verre . Elles sont obtenues par la pyrolyse d'un précurseur organique ou non sous atmosphère contrôlée. Le plus utilisé de ces précurseurs est le polyacrylonitrile (PAN). Le prix de ces fibres reste relativement élevé mais il n'a cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. On les retrouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions (Formule 1, mâts de bateaux) ;
- les fibres d'aramide (ou Kevlar qui est une dénomination commerciale) utilisées dans les protections balistiques comme les gilets pare-balles ainsi que dans les réservoirs souples de carburant en Formule 1 ;
- les fibres de carbure de silicium sont une bonne réponse à l'oxydation du carbone dès 500 °C. Elles sont utilisées dans des applications très spécifiques travaillant à haute température et sous atmosphère oxydante (spatial et nucléaire). Leur coût de production est très élevé ce qui limite donc leur utilisation ;
- pour les composites d'entrée de gamme, un intérêt croissant est porté aux fibres végétales, comme le chanvre ou le lin (lin textile). Ces fibres ont de bonnes propriétés mécaniques pour un prix modeste, et sont particulièrement écologiques. On rencontre aussi des fibres de polyester, telles que le Textilène.

Matrices

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis-à-vis des diverses conditions environnementales. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé.

Dans le cas des CMO (composites à matrices organiques) les principales matrices utilisées sont :

- thermodurcissables :
 - les résines polyesters insaturés (UP) peu onéreuses qui sont généralement utilisées avec les fibres de verre et que l'on retrouve dans de nombreuses applications de la vie courante,
 - les résines époxyde (EP) qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure performantes (véhicules et voiliers de compétition, aéronautique),
 - les résines vinylester sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyester ne sont pas suffisantes. Elles sont issues d'une modification d'une résine époxyde et excellentes pour des applications de résistance chimique,
 - les résines phénoliques (PF) utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes imposées par les normes dans les transports civils,
 - les résines polyimides thermodurcissables (PIRP) pour des applications à haute température (~300 °C) et polybismaléimides (BMI) pour des applications à température intermédiaire (~225 °C) ;
- thermoplastiques, comme le polypropylène, le polyamide, le polyétherimide (PEI), le poly(sulfure de phénylène) (PPS) et la poly(éther-éther-cétone de phénylène) (PEEK) pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique.

Dans le cas des CMC (composites à matrices céramiques), la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) par densification d'une préforme fibreuse, soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).

Dans le cas des CMM (composites à matrice métallique) le matériau composite est constitué :

- d'une matrice métallique (ex. : aluminium, magnésium, zinc, nickel) ;
- d'un renfort métallique ou céramique (ex. : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant).

Des charges (minérales, organiques ou métalliques) et additifs sont presque toujours incorporés à la matrice.

Mise en forme

La mise en forme des matériaux composites peut avoir lieu par des procédés manuels ou mécanisés. Dans l'ensemble, les outils nécessaires aux procédés mécanisés s'amortissent en produisant en moyenne et grande série ; c'est pourquoi les procédés manuels sont plus adaptés à la petite série du point de vue économique.

Parmi les procédés manuels, on distingue :

- la projection simultanée à l'aide d'un pistolet qui dose la proportion fibre/matrice ;
- le drapage de préimprégnés (catalyse à haute température, souvent sous vide) ;
- le moulage au contact ;
- le moulage sous vide ;
- l'infusion.

Les procédés mécanisés sont :

- compression des préimprégnés :
 - SMC (*Sheet Molding Compound*),
 - BMC (*Bulk Molding Compound*) ;
- injection :
 - des thermoplastiques renforcés : moulage par injection,
 - des thermodurcissables renforcés :
 - RTM (*Resin transfer Molding*) (voir aussi RTM light),
 - R.RIM (*Reinforced Reaction Injection Molding*) : l'équivalent de la RIM (*Reaction Injection Molding*) pour les matériaux composites ;
- imprégnation en continu ;
- pultrusion : l'équivalent de l'extrusion pour les matériaux composites ;
- *pull-winding* ;
- estampage des TRE (Thermoplastiques renforcés estampables) ;
- enroulement filamentaire.

Environnement

La plupart des composites sont à base de polymères thermodurcissables, ce qui les rend difficilement recyclables. Cette contrainte va donc à l'encontre du développement durable. On peut aussi voir de nouvelles recherches axées sur les biocomposites notamment avec des fibres issues de plantes. Les biocomposites sont des matériaux formés par une matrice (résine) et un renfort de fibres naturelles

provenant usuellement des plantes ou de la cellulose (fibre de bois, chanvre, etc.). De plus, ils contribuent au respect de l'environnement car ils sont biodégradables, utilisés dans l'ingénierie des tissus, des applications cosmétiques et de l'orthodontie. Ces biocomposites ne sont pas encore prêts à être mis sur le marché pour des secteurs de pointe. L'industrie française s'intéresse grandement à ce type de matériau¹.

Un composite n'est entièrement biodégradable que si la matrice utilisée, en plus de fibres naturelles, l'est elle-même (ex. : PLA, acide polylactique). Dans le cas où on emploie une résine de type « classique » (polyester, époxyde, etc.), l'intérêt d'utiliser des fibres naturelles comme renfort sera le caractère renouvelable de celles-ci, mais on ne pourra pas parler de composite biodégradable. Les matériaux composites ont un impact sur l'environnement.

Description mécanique

Formalisation

Le comportement d'un matériau composite se décrit de la façon suivante, en utilisant le formalisme euclidien de la mécanique des milieux continus :

- on a n matériaux différents qui forment le composite (on parle de « phases », caractérisées par leur fraction volumique et leur géométrie) ;
- à l'intérieur de chaque phase, le matériau peut se déformer et subir des contraintes. La déformation se fait selon la loi de comportement du matériau en question (que l'on connaît) : $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{L}} : \underline{\underline{\epsilon}}$ pour le cas élastique linéaire ;
- il y a *équilibre des forces volumiques*, soit, dans chaque matériau i : $\text{div}(\underline{\underline{\sigma}}) = \underline{\underline{0}}$ si l'on néglige la force de pesanteur devant les forces appliquées au matériau (pression, traction, cisaillement) ;
- enfin, l'agrégation des comportements de chaque matériau simple, pour aboutir au comportement du composite, nécessite de décrire l'équilibre des forces entre deux matériaux « collés », en chaque point de leur *surface de contact*. Cette condition est que la force exercée par le matériau 1 sur le matériau 2 à la surface de contact ($\underline{\underline{\sigma}}_1 \cdot \underline{\underline{n}}$ si $\underline{\underline{n}}$ désigne le vecteur unitaire perpendiculaire à la surface) doit être opposée à celle exercée par le matériau 2 sur le matériau 1. Ceci implique une certaine continuité du champ de contraintes $\underline{\underline{\sigma}}$: on doit avoir (en chaque point des surfaces de contacts des matériaux mélangés dans le composite) $(\underline{\underline{\sigma}}_2 - \underline{\underline{\sigma}}_1) \cdot \underline{\underline{n}} = \underline{\underline{0}}$. C'est par cette condition qu'intervient la microgéométrie du mélange dans la détermination du comportement du composite. Ainsi, en mélangeant des matériaux isotropes selon une géométrie non isotrope (fibres, feuilles, etc.), on obtient un composite non isotrope mais dont les propriétés mécaniques sont issues des celles des matériaux initiaux ;
- ainsi, le matériau composite est décrit en chacun de ses points. La loi de comportement du composite qui en résulte doit pouvoir faire le lien entre les déformations *macroscopiques* et les contraintes *macroscopiques* (c'est-à-dire leurs valeurs moyennes, car par exemple si l'on mélange un matériau mou et un dur, les déformations microscopiques seront très variables selon le matériau, et c'est la déformation globale que l'on observera à l'échelle du composite).

Cette loi de comportement du composite est dite « effective » : on note $\underline{\underline{L}}^{\text{eff}}$ dans le cas linéaire.

1.4. Autres matériaux :

1.4.1. Les céramiques

Généralités

Le terme **céramique** a pour origine le mot grec *keramos*, qui fait référence à la poterie et à la « terre brûlée ». En fait le mot serait d'origine sanscrite et signifierait « à brûler ».

Les céramiques constituent une gamme très étendue de matériaux non métalliques. Elles sont toutes élaborées par des procédés thermiques et incluent de nombreux silicates et oxydes ; beaucoup ont pour origine les argiles naturelles analogues à celles qui servent à la fabrication de tuiles et de briques pour le bâtiment, argiles qui sont durcies par chauffage. Les céramiques à base de silicates comprennent tous les objets faits à partir d'argile, comme les poteries, les tuiles, les briques ou les porcelaines. Les constituants principaux sont les argiles et les aluminosilicates provenant des feldspaths. Aujourd'hui la gamme de matières premières est beaucoup plus étendue et elle aboutit, via la poterie et la céramique d'art, à des produits industriels très élaborés.

La structure moléculaire des céramiques est parmi les plus complexes de toutes celles du monde minéral. Les liaisons entre les atomes, de type covalent ou ionique, sont très fortes. En conséquence, du point de vue de la dureté, de la résistance thermique ou mécanique, les céramiques montrent une nette supériorité par rapport à la plupart des matériaux métalliques.

Les céramiques possèdent trois avantages importants par rapport à d'autres matériaux concurrents : les matières premières utilisées pour leur fabrication sont relativement disponibles et peu onéreuses, elles sont peu denses et résistent à des températures très élevées, là où la plupart des métaux perdent leur résistance, enfin elles ont des propriétés optiques, électriques, chimiques, magnétiques, thermiques, etc. qui les rendent irremplaçables dans de nombreuses industries, en particulier pour la fabrication de matériel électronique et informatique. En revanche, elles présentent un défaut très important, qui est leur plus ou moins grande fragilité ; cependant celle-ci est due avant tout à des défauts de structure ou à des impuretés dans les réseaux moléculaires et on les rend plus résistantes en améliorant la pureté des matériaux de base et en maîtrisant mieux les processus de fabrication.

Aspects historiques

L'art de fabriquer des poteries en modelant et en cuisant l'argile a été pratiqué par les civilisations les plus anciennes, et d'ailleurs l'examen des objets en terre cuite relevés au cours des fouilles est l'un des meilleurs outils dont disposent les archéologues. La poterie remonte à au moins 15.000 ans avant notre ère ; elle est devenue une industrie en Égypte depuis -5.000 ans et l'usage du kaolin est avéré en Chine depuis -4.000 ans au moins.

Le domaine des céramiques est traditionnellement lié à ceux des verres et des ciments. De façon semblable, la fabrication de verres à base de silicates est également très ancienne. Les verres naturels tels que l'obsidienne ont été utilisés depuis l'âge de pierre et les premières vitres ont été fabriquées vers -12.000. Les verres travaillés sont apparus vers -7.000 / -5.000 et l'industrie du verre était bien établie en Égypte vers -1.500. Au contraire, l'industrie du ciment est bien plus récente. Les Égyptiens avaient utilisé le calcaire calciné, autrement dit la chaux, pour fabriquer des mortiers ; plus tard, les Romains combinèrent la chaux avec les cendres volcaniques pour obtenir un véritable ciment hydraulique. Cette technique semble s'être perdue par la suite, avant d'être redécouverte en Angleterre vers 1750, où l'on calcinait des marnes, autrement dit des calcaires mélangés à de l'argile. L'industrie des ciments, telle que nous la connaissons, ne date guère que d'un siècle.

L'industrie des céramiques

Cette industrie est aujourd'hui vitale pour d'autres industries. Les matériaux réfractaires sont largement utilisés dans toute l'industrie métallurgique. Les abrasifs utilisés dans les ateliers d'usinage ne sont plus d'origine naturelle, mais reposent sur l'utilisation rationnelle de produits de synthèse. Beaucoup de produits manufacturés actuels comportent des éléments en céramiques, utilisés en raison de leur résistance thermique, de leurs propriétés isolantes vis-à-vis de l'électricité ou de la chaleur, de leur

inertie chimique, de leur stabilité dimensionnelle. Elles ont envahi par exemple les domaines des isolateurs, des condensateurs électriques, de la robinetterie domestique, etc.

Les domaines de prédilection de la verrerie sont les vitrages et les isolants pour le bâtiment, et plus encore les emballages, et l'essentiel de ces produits sont à base de silicates de calcium et de sodium. Les plus forts tonnages de céramiques et de ciments sont utilisés dans les domaines de la construction de bâtiments et d'ouvrages d'art tels que ponts, barrages, etc. Les « produits blancs » qui comprennent les faïences sanitaires et celles destinées à la poterie et à la vaisselle, mais aussi les porcelaines, correspondent en fait à des produits très variés et choisis spécifiquement pour tel ou tel usage. Ces produits sont le plus souvent associés à des verres ou des émaux vitrifiables qui en constituent les glaçures.

Environ 40 % des réfractaires comportent une base d'argile, ceux qui sont destinés à des usages spécifiques, à très haute température ou dans des milieux chimiques agressifs, ne comportent pas d'argile mais des oxydes d'aluminium, de chrome, de magnésium, des nitrures, du carbone sous forme de graphite, etc.

Céramiques traditionnelles, céramiques modernes

Les céramiques à base d'argile sont employées depuis des millénaires et restent, de très loin, les plus répandues dans tous les domaines. Les nouveaux matériaux récemment mis sur le marché sont à base de composés minéraux relativement simples, par exemple des oxydes, des carbures ou des nitrures. Lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, ils ne possèdent pas les propriétés de déformation et de plasticité que présentent les argiles, il faut donc les combiner à d'autres produits pour pouvoir les mettre en forme par les procédés habituels. Il a fallu aussi, pour certains d'entre eux, inventer des procédés de fabrication nouveaux, qui n'avaient jamais été utilisés pour les argiles.

Cette page est en travaux. Tant que cet avis n'aura pas disparu, veuillez en considérer le plan et le contenu encore incomplets, temporaires et sujets à caution. Si vous souhaitez participer, il vous est recommandé de consulter sa page de discussion au préalable, où des informations peuvent être données sur l'avancement des travaux.

Propriétés générales des céramiques

Aspect

Les céramiques présentent des formes cristallines opaques et des formes vitreuses amorphes plus ou moins translucides.

Propriétés mécaniques

Les objets en céramique sont habituellement assez peu denses, très durs et dotés d'une bonne résistance mécanique, même à des températures très élevées. D'une manière générale, leur résistance à la compression est bien supérieure à leur résistance à la traction, ce qui est une des caractéristiques des matériaux fragiles. En fait, c'est la présence de petites imperfections ou d'impuretés qui leur confère ce comportement; les céramiques très pures peuvent souvent supporter des chocs mécaniques relativement violents.

La réputation faite aux céramiques de bien résister à l'usure doit être considérée avec une certaine prudence.

Propriétés thermiques



Isolation thermique d'une tubulure d'échappement par un revêtement de céramique colorée

Les céramiques gardent leur solidité même à des températures très élevées, résistent aux chocs thermiques (voir les « tuiles » de protection des navette spatiales américaine). L'une des raisons de cette résistance réside dans leur faible coefficient de dilatation, très inférieur à celui de la plupart des métaux et alliages. La conductivité thermique est généralement médiocre ou faible, d'où leur utilisation comme isolants thermiques.

Propriétés électriques

Les céramiques sont d'excellent isolants électriques et peuvent servir de support à des éléments de circuits électriques. Ce sont elles, en particulier, qui constituent les isolateurs des lignes à haute tension. Dans certaines conditions, comme des températures extrêmement basses, certaines céramiques deviennent des supraconducteurs.

Propriétés chimiques et environnementales

Les céramiques présentent généralement une très grande inertie chimique et résistent bien aux attaques de substances agressives, à l'oxydation et aux agressions climatiques. Ce caractère de matériaux neutres et inertes fait qu'elle ne présentent pas de danger pour l'homme et pour la nature. On les utilise d'ailleurs largement pour les équipements sanitaires, médicaux ou alimentaires.

Les principales céramiques

Produit	Propriétés	Utilisations
alumine (oxyde d'aluminium Al_2O_3)	bonne tenue mécanique aux températures élevées, bonne conductivité thermique, grande résistivité électrique, grande dureté, bonne résistance à l'usure, inertie chimique	isolateurs électriques, supports d'éléments chauffants, protections thermiques, éléments de broyage, composants mécaniques, bagues d'étanchéité, prothèses dentaires, composants de robinetterie
borure d'aluminium AlB_2		renforcement des composites métalliques
carbure de bore B_4C		blindages de chars d'assaut et d'hélicoptères
carbure de silicium ou carborundum SiC	grande dureté, bonne résistance aux chocs thermiques, grande conductivité thermique, faible dilatation thermique, excellente inertie chimique	réfractaires, résistances chauffantes, outils de coupe, pièces de frottement, joints d'étanchéité des pompes à eau, support de

		catalyseur, abrasifs
carbure de tungstène		Pièces d'usure, outils de coupe, guide-fils, glaces de joints d'étanchéité
cordiérite (silicate alumineux ferro-magnésien)	bonne résistance aux chocs thermiques, bonne conductivité thermique	isolants électriques, échangeurs thermiques, éléments chauffants
mullite $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	bonne résistance aux chocs thermiques, conductivité thermique faible, résistivité électrique importante	produits réfractaires.
nitruure d'aluminium AlN	conductivité thermique élevée, bonne résistance électrique, transparent aux longueurs d'onde du visible et de l'infra-rouge	circuits imprimés, colonnes thermiques, fenêtres pour radar, creusets pour la fonderie
nitruure de bore NB	haute conductivité thermique, faible dilatation thermique, excellente résistance aux chocs thermiques, haute résistance diélectrique, faible constante diélectrique, inerte chimiquement, transparent aux micro-ondes, facilement usinable	isolants électriques à très hautes températures, creusets pour la fonderie, garnitures de fours, gaines de thermocouples, supports de résistances, lubrifiant à haute température.
nitruure de silicium Si_3N_4	grande dureté, bonne résistance à l'usure et à l'abrasion, bonne inertie chimique, bonne résistance aux chocs thermiques. Il existe deux types de nitruure de silicium : lié par nitruration de poudre de silicium comprimée ou par pressage de la poudre de nitruure de silicium à température élevée (frittage)	poudres abrasives, outils de coupe, réfractaires pour la sidérurgie, billes de roulements, bagues d'étanchéité pour le moulage des métaux, soupapes de moteurs
oxyde magnétique de fer Fe_3O_4		transformateurs, selfs, stockage magnétique des données
oxyde de magnésium MgO	résistance aux métaux fondus, bonne résistance mécanique	traitement des matériaux piézoélectriques, réfractaires, composants optiques
oxyde d'uranium UO_2		combustible dans les réacteurs nucléaires
oxyde de zinc ZnO		utilisé dans les diodes pour ses propriétés électriques, voir Varistance
pérovskites		diélectriques pour la fabrication de condensateurs multicouches,

<p>vaste famille de matériaux cristallins de formule $(A)(B)O_3$ comme $BaTiO_3$, $CaTiO_3$, $SrTiO_3$ ou $(PbSr)TiO_3$, $Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O_3$</p>		<p>thermistances, transducteurs piézoélectriques</p>
<p>sialon</p> <p>solution solide de nitrure de silicium, de nitrure d'aluminium et de d'oxyde d'aluminium</p>		
<p>silicates d'aluminium</p> <p>(argiles)</p>		<p>* céramiques du bâtiment, briques, tuiles, carreaux, éviers, bacs à douches, cuvette de WC, tuyaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • céramiques des arts de la table, terre cuite, faïence, grès, porcelaine, assiettes, bols, plats • céramiques artistiques, sculptures, terre cuites, vases, lampes
<p>stéatite</p> <p>(silicate de magnésium $(SiO_4)Mg_2$)</p>	bonne résistivité électrique	isolants électriques
<p>zircon</p> <p>(oxyde de zirconium ZrO_2)</p>	<p>excellentes propriétés mécaniques aux températures élevées, conductivité thermique faible à température ambiante, conducteur électrique à $T > 1.000^\circ C$, grande dureté, bonne résistance à l'usure, bonne inertie chimique, bonne résistance aux attaques des métaux. Il en existe deux sortes</p> <ul style="list-style-type: none"> • zircon non stabilisée, utilisée en tant qu'additif, matériau de revêtement, poudre abrasive • zircon stabilisée à l'yttrium ($ZrO_2/Y_2O_3 = TZP$) ou à la magnésie ($ZrO_2/MgO = PSZ$). 	<p>creusets, buses de coulée, éléments chauffants, revêtement anti-thermique, conducteurs ioniques, prothèses dentaires</p>

Les verres, les émaux, certains types de ciments et de liants hydrauliques, sont souvent associés aux céramiques en raison de leurs propriétés et de leurs utilisations très comparables.

Utilisations des céramiques

Bâtiment

Les céramiques à base d'argile sont largement utilisées pour fabriquer des briques, des tuiles, des canalisations, des carrelages, etc.

Produits blancs

On désigne sous ce nom essentiellement des faïences et des porcelaines. Ces produits constituent les assiettes, tasses et autres éléments des services de table, mais aussi les sanitaires, les porcelaines servant d'isolants électriques ou les céramiques murales décoratives.

Abrasifs

Les céramiques sont utilisées pour fabriquer des meules, des papiers abrasifs ou des poudres à projeter. On fait intervenir des produits naturels comme la silice, le diamant, ou des produits synthétiques comme le carbure de silicium ou l'alumine. Les abrasifs sont utilisés pour les opérations de meulage, de rectification, de coupe, de polissage ou de super finition.

Construction électrique et électronique

Les céramiques sont largement utilisées pour la fabrication de condensateurs, d'isolateurs, de supports d'appareillages et de circuits, de matériaux piézoélectriques et magnétiques et dans le domaine des supraconducteurs.

- **Alumine**

De nombreux composants électroniques comportent des parties en céramiques, principalement à base alumine (de 80 à 95 %). On réalise ainsi des supports pour circuits intégrés, qui peuvent être découpés au laser et munis d'ouvertures ou de trous réalisés à la demande. Des boîtiers hermétiques possèdent à la fois une bonne résistance mécanique, une conductivité thermique élevée et une étanchéité quasi parfaite. Certains substrats en alumine peuvent être traités pour adhérer aux métaux, en vue d'applications comportant des soudures ou des brasures. Des tubes et des bâtonnets servent de support à des résistances à couches de carbone, à couche métallique ou bobinées.

Médecine

Leur inertie chimique et leur biocompatibilité en font des candidats valables pour les prothèses chirurgicales et dentaires.

Optique

Les propriétés optiques de certaines céramiques permettent leur utilisation dans les lampes à vapeur métallique, dans des lasers, ainsi que dans des détecteurs infrarouge.

Génie thermique

Leur faible conductivité thermique fait qu'elles sont utilisées comme isolants thermiques ou matériaux réfractaires, aussi bien pour la construction de parois de fours que pour fabriquer les tuiles du bouclier thermique des navettes spatiales ou pour recouvrir des aubes de turbines de réacteurs. Il peut s'agir de produits « monolithiques » comme des briques ou des blocs de formes diverses, mais aussi de produits fibreux, tissés ou non. Leur usage est courant dans la sidérurgie, l'industrie des métaux non ferreux, les systèmes de conversion d'énergie, les pétroles, les industries chimiques, la construction aéronautique et spatiale.

Dans les années 1980, la société Toyota a mis au point un moteur en céramique pouvant supporter une température supérieure à 3.300 °C. Ce type de moteur n'a pas besoin d'être refroidi, il permet un gain de rendement et de poids très important par rapport aux moteurs à explosion classiques. Cependant, il n'a pas eu d'applications commerciales du fait des nombreuses difficultés industrielles rencontrées lors de sa fabrication, en particulier pour l'obtention de matières premières d'un degré de pureté suffisant.

Tribologie

Les propriétés particulières des céramiques peuvent également être utilisées pour réduire les frottements entre les pièces mécaniques et lutter contre l'usure. On les trouve à l'état massif ou sous forme de revêtements pour des éléments de moteurs, des éléments de guidage, des outils de coupe et de nombreuses pièces qui doivent résister à l'usure. Ces questions sont étudiées dans plusieurs chapitres du livre de tribologie :

Applications diverses

- appareils de détection des gaz, de l'humidité,
- catalyseurs,
- réalisation d'électrodes,
- réalisation de formes et de moules pour la fabrication d'objets au trempé, par exemple des gants de caoutchouc.

Les matières premières

Les divers procédés utilisables doivent nécessairement tenir compte de la nature des matières premières brutes que l'on souhaite utiliser et des méthodes qui servent à les mettre en forme et à les traiter par la chaleur. La plupart des céramiques sont obtenues à partir de matériaux d'origine naturelle, relativement faciles à obtenir et peu coûteux, mais contenant beaucoup d'impuretés. Si celles-ci sont nuisibles, il est possible de les éliminer grâce à divers traitements physiques et chimiques mais les coûts augmentent en conséquence.

Bien qu'il existe une large gamme de matières premières utilisable, l'industrie des céramiques traditionnelles repose essentiellement sur l'usage de l'argile qui apporte la plasticité, du feldspath qui fond à température relativement basse et de la silice qui peut se vitrifier malgré son caractère fortement réfractaire. D'autres espèces minérales interviennent également, par exemple l'alumine, les silicates d'aluminium, le talc et les matériaux analogues, les abrasifs, etc. Le choix des composés naturels est fortement dicté par leur abondance dans la croûte terrestre et par leurs caractéristiques géochimiques. À partir du moment où l'on considère que l'oxygène, le silicium et l'aluminium constituent ensemble 90 % de la croûte terrestre, il n'est pas étonnant de les retrouver en abondance dans la composition des céramiques.

Les argiles

Elles sont constituées de très fines particules d'aluminosilicates hydratés qui deviennent plastiques une fois mélangés avec de l'eau. Leurs propriétés varient notablement selon des

critères chimiques, physiques et minéralogiques. Leur rôle dans les pièces de céramiques est très important, en ce sens qu'elles permettent une mise en forme facile mais qu'une fois séchées elles acquièrent une solidité qui leur permet de résister à la cuisson. Les argiles très pures sont très réfractaires mais celles qui sont riches en impureté ont une température de fusion généralement plus basse. On distingue trois groupes principaux de type kaolinite, montmorillonite et illite (mica hydraté). Plus récemment on a mis en évidence le groupe des chlorites qui se trouvent dans de nombreux dépôts sédimentaires.

1.4.2. Les matériaux intelligents :

Un matériau intelligent est un matériau qui possède une ou plusieurs propriétés qui peuvent être considérablement modifiées de manière contrôlée par des stimuli externes, tels que le stress, la température, l'humidité, le pH, les champs électriques ou magnétiques.

- **Ces textiles intelligents qui prennent soin de nous**
- **Des peintures toujours plus intelligentes actualité**
- **Vers une nouvelle génération de fenêtres intelligentes**

Matériaux innovants et nanotechnologies... fenêtre intelligente... de « fenêtres intelligentes » ayant la faculté de passer d'un mode estival à un mode hivernal en s'assombrissant..., une mixité énergétique, le développement de nouveaux matériaux... L'installation de nouveaux systèmes... Lee, ont mis au point une nouvelle vitre intelligente ayant la faculté de s'assombrir en été...

chII : Procédés d'obtention de pièces sans enlèvement de matière

2.1. Le moulage

2.2.1. Introduction: Le moulage est le moyen d'obtention de pièces pleines ou creuses à formes complexes. Cela permet d'économiser la matière et les opérations d'usinage. Le moulage d'une pièce est réalisé en remplissant le moule par le matériau en fusion. Les principaux procédés de moulage sont : le moulage en sable, le moulage en moule métallique (en coquille), et le moulage à la cire perdue.

2.2.2. Le moulage en sable : Ce type de moulage convient pour tous les métaux de fonderie, surtout pour les métaux à point de fusion élevé (fontes et aciers). Il est très utilisé pour les grandes pièces.

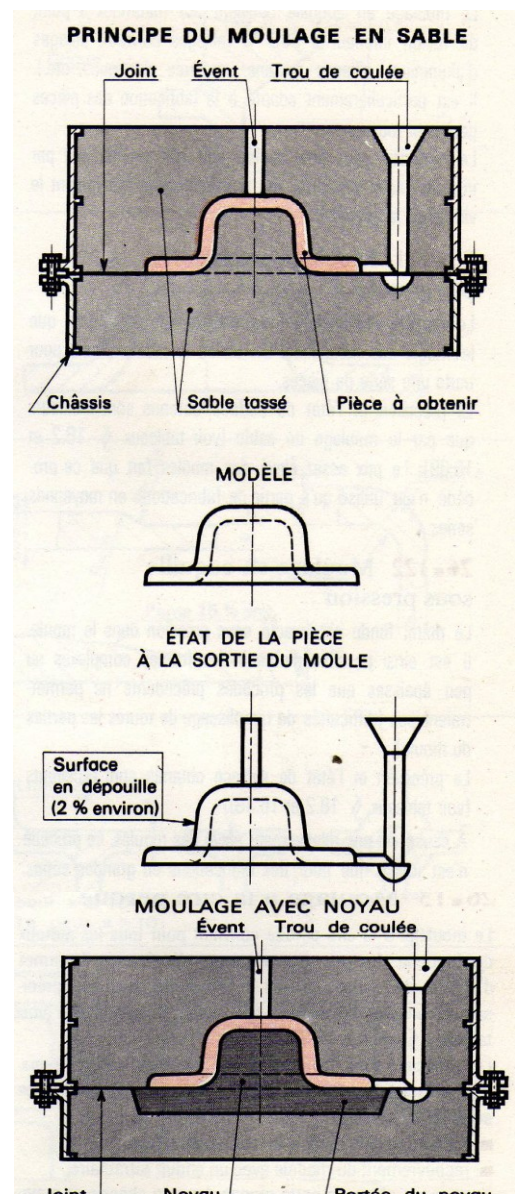
Un moule comporte en général deux parties : un châssis inférieur et un châssis supérieur. La surface de contact entre les deux châssis s'appelle le joint du moule. Les deux châssis sont remplis de sable silico-argileux ou de ses dérivées (procédé de sable auto-siccant, procédé au gaz carbonique, procédé à moule perdu,...).

L'empreinte de la pièce est généralement obtenue à l'aide d'un modèle en bois ou en métal. Afin de l'extraire du moule sans arracher du sable, il est nécessaire de prévoir des surfaces en dépouille. Les formes intérieures d'une pièce sont obtenues par un ou plusieurs noyaux en sable qui les matérialisent. Le moule en sable est détruit après solidification de la pièce.

Dans le cas du moulage à moule perdu, le modèle est en polystyrène expansé et reste prisonnier dans le sable. Il est détruit par la coulée du métal en fusion. Ce procédé convient pour des fabrications unitaires (prototype, montage d'usinage,...)

2.2.3. Le moulage en coquille :

ce type de moulage convient au moulage des matériaux à point de fusion ne dépassant pas 900°C (alliages d'Al, de Cu, de Zn, matières plastiques, ...). Il est réservé à la production de pièces en petite et moyenne série. Le matériau peut être coulé par gravité, par injection sous pression ou par dépression (création du vide dans la



2.2.4. Moulage à la cire perdue :

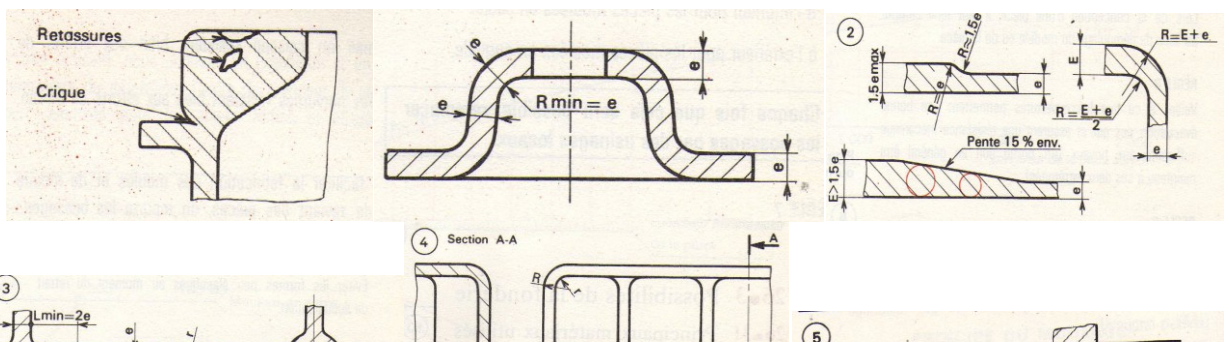
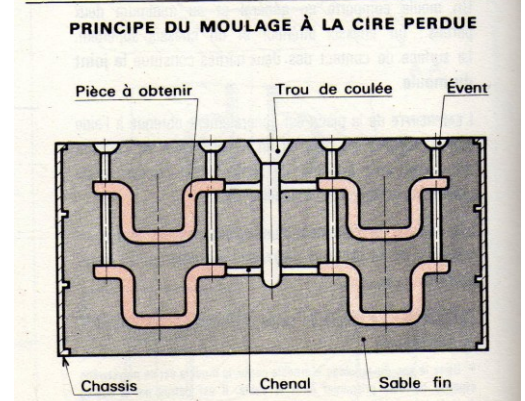
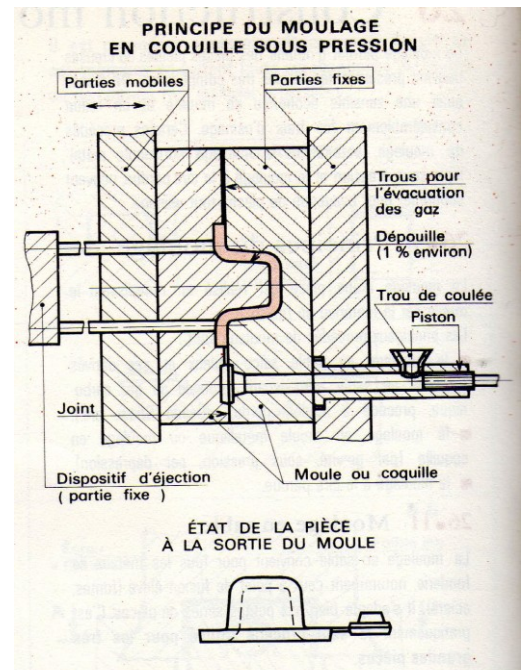
Il convient pour tous les métaux de fonderie. Le prix de revient est élevé mais il permet d'obtenir des pièces petites et moyennes avec une précision et un état de surface remarquables. Les principales étapes pour l'obtention d'une pièce sont les suivantes :

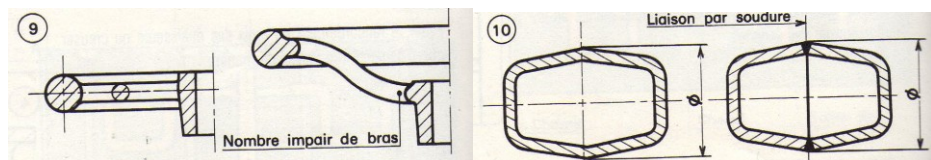
- Réalisation d'un modèle en cire ou en résine.
- Recouvrement du modèle avec un enduit réfractaire.
- Mise en place de cette grappe dans un châssis et maintien de cette grappe à l'aide d'un sable fin spécial.
- Elimination de la cire par chauffage.
- Coulée du matériau.
- Après solidification, extraction de la grappe de pièces par destruction du moule.
- Sectionnement des conduits de coulée et des évents.

2.2.5. Tracé des pièces moulées :

Afin d'obtenir des pièces homogènes sans crique ou retassure, on devrait respecter les règles suivantes :

1. Les pièces doivent avoir une épaisseur uniforme. On évitera les angles vifs en les remplaçant par des congés de raccordements.
2. Si on ne peut éviter les différences d'épaisseurs, celles-ci doivent se faire aussi régulièrement que possible





L'accroissement de masse est sensiblement proportionnel au rapport des surfaces des cercles inscrits. Généralement on ne dépasse pas un accroissement de 60% sur 10 mm.

3. Eviter le raccordement en croix des épaisseurs ou creuser afin d'éliminer une masse de matière.
4. Eviter la déformation des grandes surfaces planes en les remplaçant par des nervures.
5. Les formats en caisson résistent bien aux efforts de torsion. Les formes nervurées résistent bien aux efforts de flexion.
6. Afin de faciliter la fabrication des moules et de réduire le prix de revient des pièces, on reporte les bossages : à l'intérieur pour les pièces moulées en sable, et à l'extérieur pour les pièces moulées en coquille.
7. Lors de la conception d'une pièce, il faut tenir compte du sens de démoulage du modèle ou de la pièce.
8. Veiller à ce que les ouvertures permettent une bonne évacuation des gaz et assurent une résistance mécanique suffisante aux noyaux.
9. Eviter les formes peu élastiques au moment du retrait de solidification.
10. Certaines pièces difficiles à mouler peuvent être obtenues en les décomposant en éléments simples que l'on assemble ensuite par soudage ou par vis

2.2. Le forgeage :

Le **forgeage liquide** ou *squeeze casting* est une technique qui permet de réaliser des pièces métalliques en alliage d'aluminium coulé sous très haute pression. Ce procédé est principalement utilisé dans l'industrie automobile.

Cette technique se subdivise en deux procédés :

- *le procédé direct* qui est le procédé d'origine : le moule, conçu comme pour le matriçage, est monté sur une presse verticale de forge. Le métal est coulé directement dans l'empreinte.
- *le procédé indirect* est dérivé de la coulée sous pression : il utilise les mêmes presses et la même technique pour les moules. Cependant, il diffère par le fait que l'injection se fait à des

vitesses beaucoup plus faibles et que le système d'alimentation est très différent du moulage sous pression, ce qui permet de masselotter selon le même principe qu'en moulage par gravité et avec une efficacité accrue en raison de l'application de la pression.

2.3. L'estampage:

L'**estampage** est une opération de forgeage en trois coups (ébauche, finition et ébavurage). Cette opération consiste à former, après chauffage, des pièces brutes par pression entre deux outillages nommés « matrices », que l'on vient fixer sur des presses (hydrauliques, mécaniques...).

Principes techniques

On commence par faire l'ébauche de la pièce désirée, en plaçant le lopin dans la matrice d'ébauche. Une fois celle-ci prête, on la met dans la matrice ayant la forme de la pièce voulue. Puis, on vient découper les cordons de bavures.

Le matriçage, réservé aux métaux non ferreux, est une variante de l'estampage (on dit aussi « estampage de précision »). Dans ce cas, la presse hydraulique lente se substitue au marteau-pilon et la pièce est insérée par force dans un outillage (matrice) démontable.

L'intérêt technique de ces procédés est la compression des molécules de matière selon la forme de la pièce d'où des résistances extrêmes aux efforts mécaniques.

Technique artistique

L'estampage est une technique de reproduction qui donne des estampes, et qui produit, éventuellement, des effets de relief par impression d'argile dans un moule en creux ou d'une feuille de papier sur une plaque gravée.

Plus généralement, l'estampage est une technique artistique utilisée pour donner forme ou relief en faisant l'empreinte d'une matière dure dans une matière malléable.

Ainsi, des sculptures majeures sont éditées (avec une finesse de réalisation inatteignable par les techniques de moulage) par estampage d'argile dans des formes de plâtre, puis retouche manuelle pièce par pièce. Les formes de plâtre sont en général elles-mêmes fabriquées par empreinte directe à partir de la sculpture originale.

Selon la complexité de l'œuvre plusieurs formes peuvent être nécessaires. Elles composent en creux un puzzle en trois dimensions. Les éléments en argile façonnés par estampage dans ces formes en plâtre sont ensuite assemblés entre eux à l'aide de barbotine (même argile mais plus liquide) et modelés jusque dans les détails les plus fins. Chaque pièce tirée a ainsi « la patte » du sculpteur modelleur qui l'a retouchée. Les pièces sont ensuite séchées, cuites et parfois patinées.

Facture instrumentale

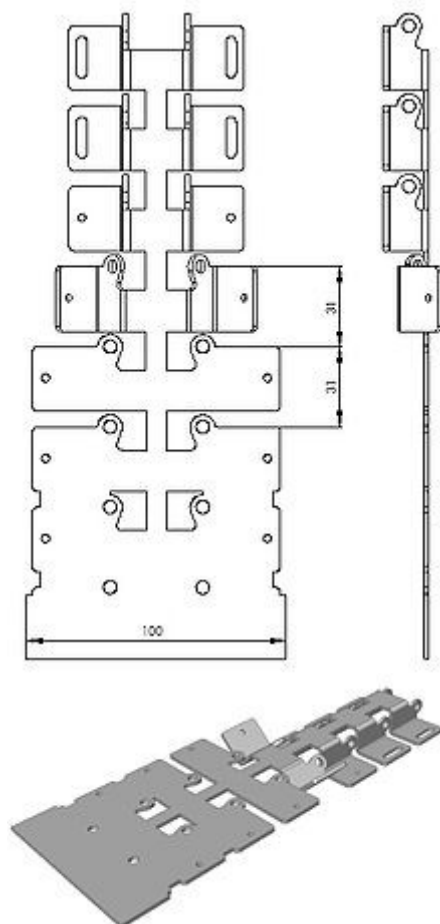
L'estampage de métaux non ferreux et de métaux précieux (ou matriçage) est une technique également utilisée dans la fabrication de certains instruments à vent, tels que la flûte traversière. Bien que largement remplacée de nos jours par des techniques de moulage et fonte à la cire perdue - plus rentables en production de masse - elle demeure cependant un critère de qualité supérieure, du fait des propriétés mécaniques obtenues : résistance aux efforts mécaniques (ce qui est gage de longévité de la mécanique de l'instrument), finition plus fine au polissage.

2.4. Le laminage :

2.5. Le tréfilage :

2.6. L'extrusion :

2.7. Le découpage :



Le **découpage** est un procédé de fabrication de pièces. C'est une sorte de cisailage sur un contour fermé. Une différence est faite sur les termes :

- découpage, afin d'obtenir un pourtour défini selon une forme et des cotes précises ;

- poinçonnage, afin d'ajouter une pièce (exemple : une perforation).

Le poinçon *poinçonne* la plaque (tôle, papier, carton, mousse, etc.) et une pièce *découpée* est obtenue.

2.7.1. Découpage (classique)

Le découpage classique d'un matériau mince (carton, plastique, tôle) se fait à l'aide d'un emporte pièce, cisailles ou grignoteuses éventuellement. Le défaut inhérent à ce type de découpage est qu'il éloigne progressivement les deux parties découpées entraînant ainsi des déformations locales. Plus le tracé est sinueux, plus ces déformations seront importantes.

Un découpage sans déformation sera obtenu par l'équivalent de l'équivalence du point par rapport à la symétrie par exemple avec un scalpel à lame fine (cutter) pour le carton et le plastique.

En langage courant, un **découpage** désigne un modèle en carton à découper et à assembler.

2.7.2. Découpage industriel



Presse hydraulique à découper

L'outil de découpe (composé d'une lame tranchante en acier d'environ 23 mm de haut et 1 à 2 mm d'épaisseur fixée dans un contreplaqué d'environ 18 mm) de la forme du produit fini désiré est posé dans une presse.

Pour les matériaux fins (quelques millimètres) et les petites et moyennes séries, il est utilisé une presse appelée « platine portefeuille » : le marbre fixe reçoit l'outil, le marbre mobile reçoit la feuille à découper et l'ensemble se referme à la manière d'un portefeuille.

Toujours pour les matériaux fins mais en grandes séries, il est utilisé une platine rotative. Les feuilles sont entraînées par des rouleaux sous l'outil.

Pour des matériaux plus épais nécessitant des pressions plus fortes, les outils (avec des lames plus hautes, 50 à 100 mm) sont montés sur des presses hydrauliques.

2.7.3. Découpage fin

Opération qui consiste à découper des pièces dans de la tôle plutôt épaisse. La pièce obtenue par ce procédé a la particularité d'avoir le bord découpé parfaitement perpendiculaire à la face, et de très bonnes qualités géométriques et dimensionnelles. L'outillage nécessaire pour cette découpe est de conception particulière par rapport aux outils de découpe habituels car la tôle est maintenue dans la phase découpe par des jongs de retenue.

2.7.4. Vocabulaire

- **Poinçonnage** : le déchet est appelé débouchure, ce sont des trous de petit diamètre.
- **Découpage** : le produit obtenu est un flan (souvent récupéré pour une opération d'emboutissage ou de pliage).
- **Crevage** : c'est un découpage partiel.
- **Encochage** : c'est un découpage débouchant sur un contour.
- **Grignotage** : c'est le poinçonnage partiel par déplacement progressif de la pièce ou du poinçon.
- **Grugeage** : c'est une opération de découpage de petites encoches.
- **Cisaillage** : c'est une coupe totale d'une pièce en deux parties.
- **Arasage** : c'est le découpage en reprise (afin d'obtenir une précision de cotes et d'état de surface).
- **Détourage** : finition d'un contour déjà ébauché, modifié au cours d'une déformation.
- **Pas** : on appelle « pas » la longueur dont avance la bande entre deux coups de presse.
- **Débouchure** : c'est le déchet issu d'un poinçonnage, encochage... Cela correspond par exemple à la matière enlevée au centre d'une rondelle.

2.7.5. Mise en bande

L'étude de la mise en bande consiste à rechercher la disposition des pièces dans une bande de tôle en essayant de produire un minimum de déchets.

Mise en bande simple

Dans le cas général les pièces sont disposées à la suite.

La distance entre deux pièces et la largeur des bords de bande sont égales à l'épaisseur du métal découpé. L'espace entre deux points similaires d'une bande est appelé le « pas ».

Écart = épaisseur de la tôle découpée.

Néanmoins, dans le cas de découpage de métal de faible épaisseur, il est prudent de conserver une certaine tenue au déchet. La largeur de ce dernier est de 2 mm au minimum.

La logique fera parfois choisir une largeur inférieure ou supérieure suivant le type de pièce étudié.

2.7.6. Oxycoupage



Oxycoupage d'une brique d'acier

L'**oxycoupage** est un procédé de découpe des métaux, par oxydation localisée mais continue, à l'aide d'un jet d'oxygène pur. Il est nécessaire, pour cela, de porter à une température d'environ 1 300 °C, dite température d'amorçage (ou d'ignition), le point de la pièce où l'on va commencer la coupe, qui peut être manuelle ou automatisée selon un gabarit de coupage. Ce procédé nécessite :

- une flamme de chauffe (oxy-gaz) pour l'amorçage et l'entretien de la coupe, où plusieurs types de gaz peuvent être utilisés ;
 - acétylène,
 - tétrène : mélange d'hydrocarbures dont l'acétylène et le propadiène ;

- un jet de coupe central d'oxygène pur, venant en milieu de buse, qui permet la combustion dans la saignée et sur toute l'épaisseur à couper. Ce jet de coupe a aussi un rôle mécanique d'élimination des oxydes formés (scories). L'efficacité de la coupe sera améliorée par un très haut degré de pureté de l'oxygène.



Morceau de métal découpé par oxycoupage

Le choix du combustible sera fonction de différents paramètres tels que l'épaisseur de la pièce, la vitesse de coupe, le temps de préchauffage ou la qualité de la coupe. L'oxycoupage est utilisé pour des aciers doux ou faiblement alliés, et sur des épaisseurs allant de quelques millimètres à près d'un mètre pour les pièces les plus massives.

2.7.7. Découpage laser

Le **découpage laser** est un procédé de fabrication qui utilise un laser pour découper la matière (métal, bois) grâce à la grande quantité d'énergie concentrée sur une très faible surface.

Le laser peut être pulsé (source de type YAG) ou continu (source CO₂) ou azote. Actuellement, les lasers à source CO₂ sont largement majoritaires en France. Ils permettent en effet de découper beaucoup plus de matériaux et à une vitesse plus élevée que les lasers pulsés.

Le principe

La focalisation d'un rayon laser permet de chauffer jusqu'à vaporisation une zone réduite de matière. Les lasers utilisés couramment ont une puissance de 4000 watts mais les sources peuvent varier de quelques watts à plus de 7 kW. La puissance est adaptée en fonction du matériau et de l'épaisseur à découper. À titre de comparaison, un laser de classe II potentiellement dangereux a une puissance de moins de 1 mW.

Ce procédé permet une découpe précise, nette et rapide de nombreux matériaux jusqu'à 25 mm. La découpe se fait sans effort sur la pièce et la zone affectée thermiquement (ZAT) est assez faible (de l'ordre de 0,5 mm sur les métaux) ce qui permet d'avoir des pièces très peu déformées. La réalisation de trou est facile mais leur diamètre doit être au moins égal à l'épaisseur de la tôle quand cette tôle est supérieure à 10 mm. Par exemple, maintenant dans du 8 acier, il est possible de faire un trou utilisable de 5 mm. Dans tous les cas, il est nécessaire d'utiliser un gaz additionnel dans la zone de découpage pour en améliorer l'efficacité (argon, azote, O₂). Souvent, il est aussi possible de graver (texte, etc.) avec la même machine.

La découpe s'effectue sur des plaques de matière ce qui donne généralement des objets plats une fois découpés.

Certains matériaux, comme l'argent, ou le cuivre, sont toutefois plus difficiles à découper au laser à cause de leur fort pouvoir réfléchissant, dans ce cas, mieux vaut utiliser la découpe par jet d'eau haute pression.

Applications

Le découpage laser a été utilisé dans l'industrie à partir des années 1980. Depuis il s'est répandu et banalisé. Dans le secteur de la transformation des métaux, il est complémentaire d'autres procédés comme le découpage par jet d'eau ou poinçonnage. Alors que ce dernier est tributaire de la forme de l'outil utilisé, le découpage laser permet de faire varier à volonté la forme découpée. À cette fin, les machines de découpe laser sont programmables.

Les performances de la découpe laser sont en constante évolution : diversification des matériaux métalliques (aciers, puis alliages d'aluminium...) et augmentation de l'épaisseur de la tôle découppable, jusqu'à plusieurs centimètres. Ces évolutions sont liées notamment aux progrès réalisés en matière de sources laser.

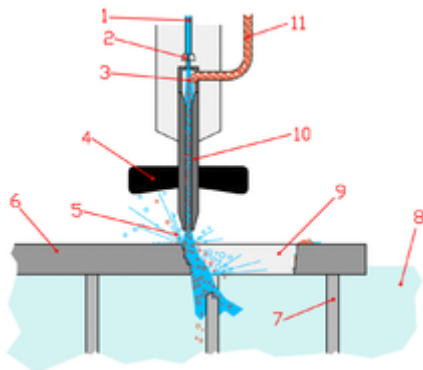
En 2007, les techniques ont énormément évolué, la puissance des lasers de découpe CO₂ dépasse les 6kW.

Les diamètres minimums de perçage sont maintenant de 0,4 x l'épaisseur de la tôle.

2.7.8. Découpage jet d'eau

Le **découpage au jet d'eau** est un procédé de fabrication qui utilise un jet d'eau pour découper la matière (exemples : mousse, cuir, matériaux métalliques, matériaux composites, produits agroalimentaires, etc..

Principe



Le fonctionnement de la découpe au jet d'eau

L'eau, ou plus exactement le fluide, peut contenir des additifs, notamment pour faciliter la coupe du matériau. La découpe au jet d'eau additionnée d'abrasif (type grenat), d'une granulométrie de 80 mesh dans le standard, permet la découpe de métaux, pierres, marbres, verre dans des épaisseurs allant jusqu'à 600 millimètres.

On distingue deux techniques de découpage :

- la découpe à l'eau pure (tous les matériaux se coupant au cutter) ; buse de coupe de 0,08 mm à 0,30 mm (sertie d'un saphir industriel) ;
- la découpe à l'eau chargée d'abrasif (tout matériaux) ; l'eau passe par la buse, on y adjoint le sable, l'eau et le sable passent par le canon de focalisation qui assure une cylindricité du mélange ; buse de coupe de 0,20 mm à 0,40 mm (sertie d'un saphir ou d'un diamant industriel). Canon de focalisation de 0,50 mm à 1,2 mm.

Un seul matériau ne peut être découpé au jet d'eau : le verre trempé, qui casse dès les premiers millimètres de découpe à cause des trop fortes contraintes présentes dans le matériau.

L'eau sous très haute pression (jusqu'à 6150 bars) sort de la buse de découpe :

- à une vitesse de 900 m/s à 4135 bars (environ 3 fois la vitesse du son)
- à une vitesse de 1 200 m/s à 6150 bars (environ 4 fois la vitesse du son)

Le bruit d'une machine en fonctionnement peut monter jusqu'à 90 décibels. Ce bruit peut facilement être diminué en immergeant la coupe.

Les machines de dernières générations intègrent une tête montée sur deux axes et un algorithme permettant de compenser le seul point faible du jet d'eau : la dépouille ^[réf. nécessaire]. Cette technique est très bonne en ligne droite car elle permet d'obtenir une vitesse de coupe supérieure mais montre des points faibles lors des changements de direction : de forts ralentissements.

2.7.8. Découpage plasma



Découpage plasma réalisé par un robot industriel.

Apparenté au soudage TIG (un arc électrique jaillit entre une électrode réfractaire et la pièce) par l'aspect de la torche, le **découpage plasma** diffère par les mélanges gazeux utilisés. Le jet de plasma est généré par l'arc électrique qui s'établit entre une électrode intérieure à la torche de coupage et la pièce. Le mélange gazeux ionisé à la sortie de la tuyère forme le plasma. Le pouvoir calorifique du jet (environ 18 000 °C) provoque une fusion quasi instantanée qui se propage dans toute l'épaisseur de la pièce.

Le découpage plasma est principalement utilisé par les entreprises du secteur de la Métallerie. Il permet la découpe de tôles en métal sur des épaisseurs de 0 à 160 mm avec une précision de plus ou moins 0,2 mm.

Sur une machine de découpe plasma, la température extrêmement élevée fait fondre instantanément le métal tandis que le gaz sous pression chasse au fur et à mesure les gouttelettes de métal en fusion. L'usage de la torche de découpage au plasma doit se faire impérativement dans des locaux spécialement ventilés ou en plein air à cause de dégagement de gaz toxiques généré par les très hautes températures de travail. Certains systèmes de découpe au plasma comprennent un apport d'eau sous forme d'un jet calibré qui, jaillissant de la torche plasma, permet de refroidir le métal sitôt après sa découpe plasma, évitant également le dégagement de ces gaz toxiques.

2.8. Le pliage :

2.9. L'emboutissage :

2.10. Le frettage :

2.11. Métallurgie des poudres :

2.12. Profilés et tuyaux (en acier, en Al) :

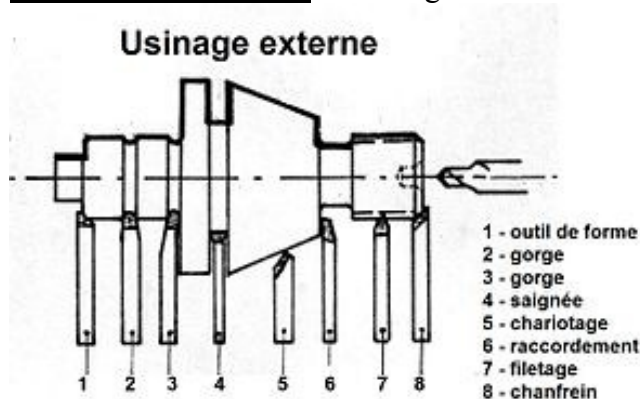
Ch III : Procédés d'obtention de pièces par enlèvement de matière

(Tournage, fraisage, perçage, rabotage, brochage, taillage des engrenages, rectification plane et cylindrique, autres procédés...)

3.1. Le tournage :

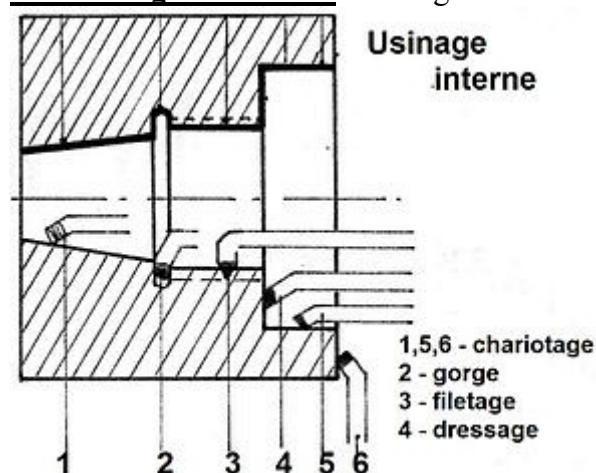
Le tournage avec ses différentes opérations s'exécute sur les machines-outils appelées : tours.

a- Tournage extérieur : L'usinage externe sur tour réalise les opérations suivantes :



- Tournage longitudinal (chariotage, axe z, axe de symétrie de la pièce), réalisation d'un diamètre ;
- tournage transversal (dressage, axe x, axe perpendiculaire à l'axe de symétrie), réalisation d'une face, d'un épaulement ;
- tournage par profilage ou contournage, réalisé par copiage ou utilisation d'une commande numérique ;
- tournage de gorges, dégagements ;
- filetage, réalisation d'un pas de vis ;
- tronçonnage.

b- Tournage intérieur : L'usinage interne sur tour réalise les opérations suivantes :



- Alésage ;
- dressage ;
- tournage intérieur par contournage ;
- tournage de dégagement, gorges ;
- taraudage, réalisation d'un filetage intérieur ;
- chambrage.

c- Tournage de pièces métalliques : Le chariotage d'une pièce métallique brute en tournage conventionnel se fait typiquement en cinq opérations :

1. Écroûtage du brut : on enlève la couche extérieure, qui a un mauvais état de surface et contient de nombreux défauts (calamine, corrosion, fissures, inclusions, écrouissage important, ...) ; il s'agit d'une passe d'environ 0,5 à 1 mm

2. Contrôle du diamètre obtenu (au pied à coulisse voire au micromètre), ce qui permet de déterminer combien il faut enlever de matière pour arriver à la cote visée.
3. Passes d'ébauche d'une profondeur de plusieurs mm, pour enlever la matière.
4. Contrôle du diamètre avant finition.
5. Passe de finition, d'une profondeur inférieure à 0,5 mm mais supérieure au copeau minimum, afin d'avoir une bonne tolérance dimensionnelle et un bon état de surface.

Si l'on doit réaliser un épaulement, on chariote en laissant une surépaisseur de 0,5 mm ; celle-ci est enlevée en dégagant l'outil lors de la passe de finition. On assure ainsi la planéité et la perpendicularité de la surface par rapport à l'axe, puisque la surface finale est réalisée en une seule passe.

Les tours sont classés suivant:

- le type de production :

* unitaire et petite série : tours universels

* série moyenne : tours semi-automatiques

* grande série et de masse : tours automatiques, multibroches, à CN et centres d'usinage.

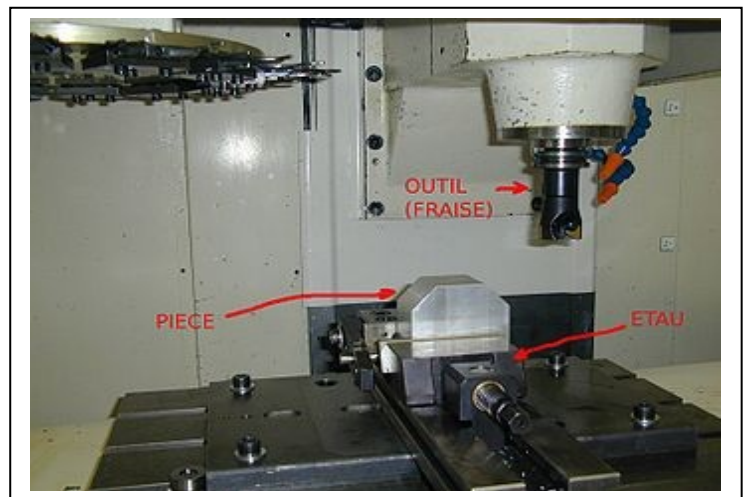
- selon l'axe du mandrin du tour : tour parallèle (horizontal), tour vertical (pour les grandes pièces)

3.2. Le fraisage :

Le fraisage est un procédé de fabrication de surfaces planes.

Il se caractérise par le recours à une machine-outil : la fraiseuse.

L'outil classiquement utilisé est la fraise.



En fraisage, l'enlèvement de matière — sous forme de copeaux — résulte de la combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe d'une part, et avance de la pièce à usiner d'autre part.

La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques (surfaces usinées planes) et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes.

Les fraiseuses actuelles sont fréquemment automatisées (fraiseuses à commande numérique et centres d'usinage). La programmation de commande numérique de ces machines nécessite le recours à des interfaces logicielles, pour une part embarquées sur la machine elle-même (Directeur de Code Numérique), et pour une autre part, extérieure à la machine (PC + logiciels Fabrication assistée par ordinateur 2D et 3D). Dans l'industrie, les ouvriers fraiseurs qualifiés effectuent fréquemment des travaux de tournage complémentaires.

3.2.1. Liste des opérations

La liste des opérations, ou phases, dépend bien sûr de la pièce à fabriquer, mais on retrouve globalement les opérations suivantes :

- débit du brut : découpage de la pièce brute, en général dans de la barre à profil carré ou rectangulaire ;
- vérification du brut : au réglet ou au pied à coulisse, on vérifie que le brut est suffisamment grand (cotes extérieures de la pièce finie + épaisseur à enlever) ;

- ébavurage d'une grande face : avec une lime ou un ébavureur (sorte de petit couteau à lame courbe), on enlève les bavures dues au découpage, pour la face qui se retrouvera en bas lors de la première opération ;
- cubage : on usine successivement les différentes faces afin d'avoir un parallélépipède rectangle « parfait », c'est-à-dire dans les tolérances en termes de dimensions (cotes extérieures de la pièce finie) et géométriques (perpendicularité des faces, la planéité et l'état de surface étant assurés par le réglage de la machine et l'état de la pièce) ;
- réalisation des différentes opérations donnant la forme finale de la pièce.

Chaque démontage de la pièce implique un ébavurage et éventuellement une vérification des côtes. Il n'est pas toujours nécessaire d'effectuer un cubage intégral, on peut se contenter des faces fonctionnelles — cela incluant les faces nécessaires à la mise en position dans la fraiseuse.

3.2.2. Mode de fraisage

Les principales méthodes de fraisage pratiquées sont :

- le fraisage de profil (dit « de forme ») ;
- le fraisage en bout (dit « d'enveloppe » ou « surfaçage ») ;
- le fraisage combiné (en bout et de profil) ;
- le tréflage.

3.2.3. Mode d'action de la fraise

D'autre part, le fraisage peut s'effectuer :

- en opposition : l'effort de coupe tangentiel de la fraise s'oppose à l'avance de la pièce à fraiser ; c'est la méthode utilisée sur machine conventionnelle afin de neutraliser les jeux de transmission de mouvement ;
- en concordance, dit « en avalant » : l'effort de coupe tangentiel accompagne la pièce à fraiser dans son déplacement : c'est la méthode utilisée sur les machines à commande numérique, qui n'ont pas de jeu à compenser grâce à la vis à billes.

3.2.4. Composants des fraises

Il existe plusieurs groupes de matériaux entrants dans la composition des fraises :

- les fraises en acier rapide ;
- les fraises en carbure monobloc ;
- les fraises à plaquettes carbure amovibles ou brasées ;
- les fraises CBN ;
- les fraises diamant

3.2.5. Modèles de fraises

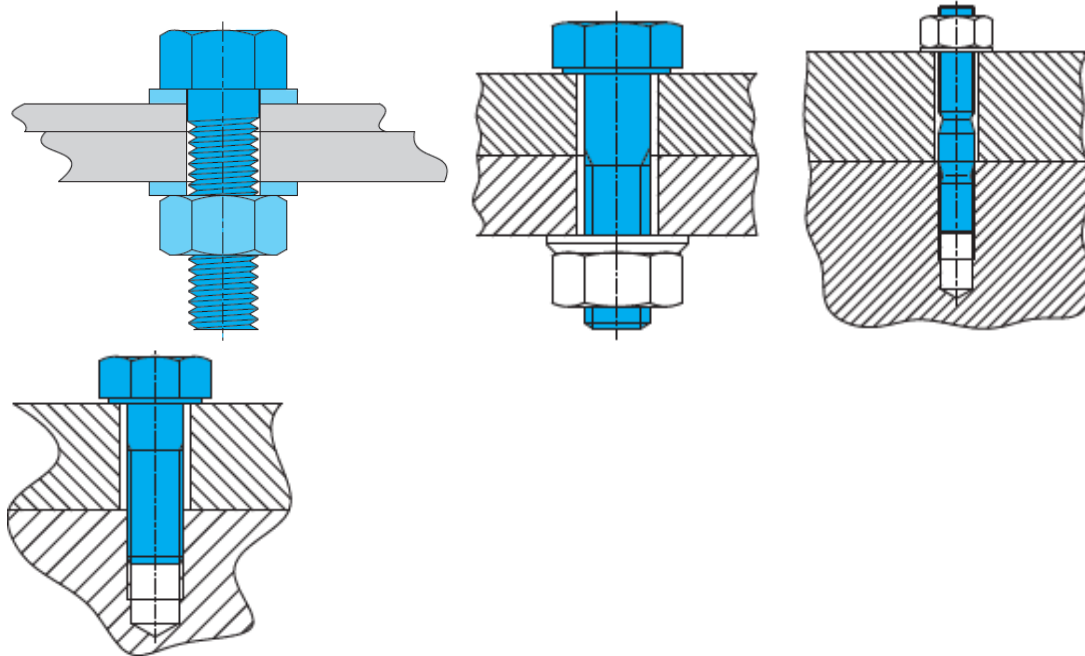
- La fraise-scie
- La fraise 1 taille à rainurer
- La fraise à surfacer
- La fraise cylindrique 2 tailles
- La fraise à rainurer 2 dents
- La fraise pour rainures en T
- La fraise pour logement de clavette-disque
- La fraise d'ébauche
- La fraise 3 tailles (à denture droite ou alternée)
- La fraise extensible (3 tailles à dentures alternées)
- La fraise d'angle (ou fraise pour queue d'aronde)
- La fraise isocèle
- La fraise pour 1/2 cercle
- La fraise à chanfreiner
- Les fraises à plaquettes carbure amovibles

Ch IV : Techniques d'assemblage des pièces mécaniques :

4.1. Technique d'assemblage par boulonnage :

La majeure partie des assemblages dans la construction des machines se font avec des vis. Les assemblages vissés sont constitués par des boulons (vis traversantes avec écrous), des vis pour taraudage borgne ou non ou par des goujons. Les boulons traversants serrent les deux éléments par la tension qui est établie entre l'écrou et la tête de la vis.

Les vis pour taraudage assemblent deux éléments en traversant le premier et en pénétrant le deuxième par un taraudage.



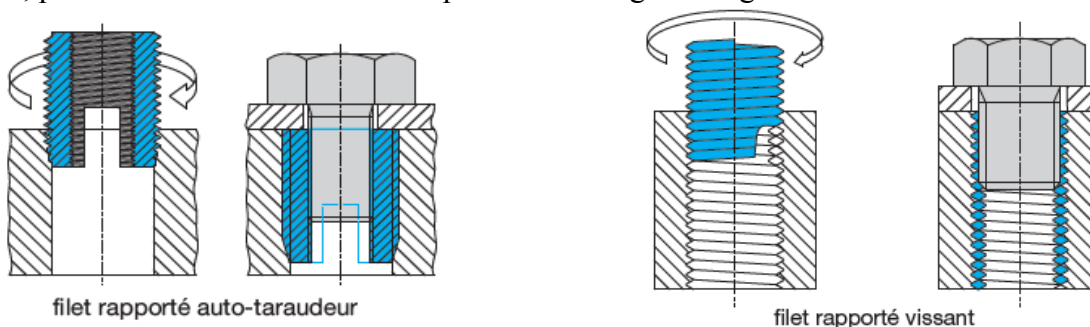
boulon traversant
goujon

vis pour taraudage borgne

Sur les goujons, la tête de la vis est simplement remplacée par un écrou.

4.1.1. Les filets rapportés

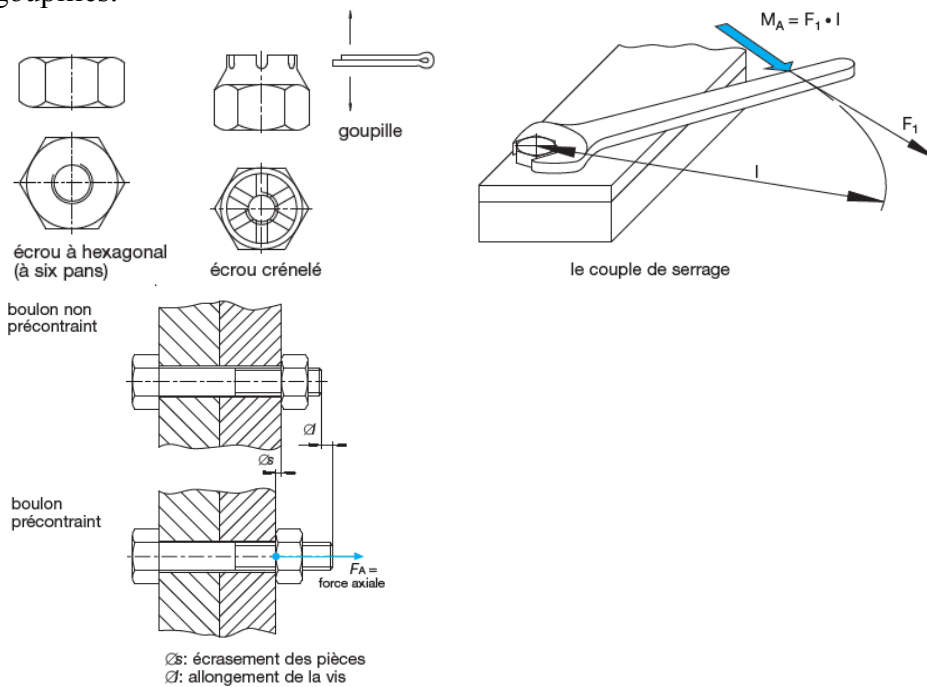
Pour les matériaux à petite résistance au cisaillement, p. ex. les métaux légers, les matières synthétiques et le bois, les taraudages peuvent être arrachés lors de grandes charges. Pour éviter ce risque, on utilise des filets rapportés. On les utilise aussi pour réparer des taraudages abîmés ou lorsque les vis doivent être enlevées et remises fréquemment, p. ex. pour des plaques de serrage d'installations flexibles. Les filets rapportés taraudent eux-mêmes le filet de leur logement. Ils sont parfois fabriqués à partir de fils profilés rhombiques. On produit ainsi des filetages supportant de très hautes charges par ex. pour l'aviation et la recherche spatiale en alliage Al-Mg.



4.1.2. Les écrous

Les forces de traction des boulons sont transmises aux pièces par la tête et l'écrou de la vis. L'effort de précontrainte allonge la vis. Cet allongement et la sollicitation de l'écrou sont relativement élevés sur le premier filet et ils diminuent progressivement jusqu'au dernier filet. Les écrous sont souvent utilisés en combinaison avec des vis et des goujons. La hauteur des écrous hexagonaux (à six pans) est en général de $0,8d$, plus rarement $0,5d$.

Les écrous crénelés avec 6 ou 8 entailles sont utilisés quand l'assemblage doit être sécurisé avec des goupilles.



4.1.3. La transmission de la force et de la charge

Lors du serrage d'un écrou ou d'une vis, il se produit un couple. Par le serrage, ce couple produit un allongement de la tige de la vis. La force qui cherche à remettre la tige du boulon dans son état originel écrase les pièces à assembler et, de ce fait, les serre.

Cette force est appelée l'effort de précontrainte F_v . S'il est trop grand, il déforme le boulon et peut le casser. Les boulons ne doivent donc pas être serrés trop fortement ni trop faiblement. Si on ne tient pas compte de la friction, l'effort de précontrainte maximal F_v ne dépend que de la dimension et du matériau de la vis. En raison de la friction, le boulon ne subit pas seulement une charge de traction, mais aussi une charge de torsion. Pour cette raison, plus la friction est élevée, plus l'effort de précontrainte F_v maximal doit être réduit. L'effort de précontrainte F_v est produit par le couple de serrage M_A . Lors d'un serrage à la main, le couple correspond à la force de la main F_1 et à la longueur efficace de la clé l .

4.1.4. Les clés dynamométriques :

Le réglage rapide et son blocage sur n'importe quelle valeur du cadran sont possibles grâce aux crans et à la touche de blocage dans la poignée. Lorsque, pendant le serrage, la valeur réglée est atteinte, la clé décroche en donnant un « signal » (bruit et sensation). Et la clé est tout de suite prête à un nouvel emploi.

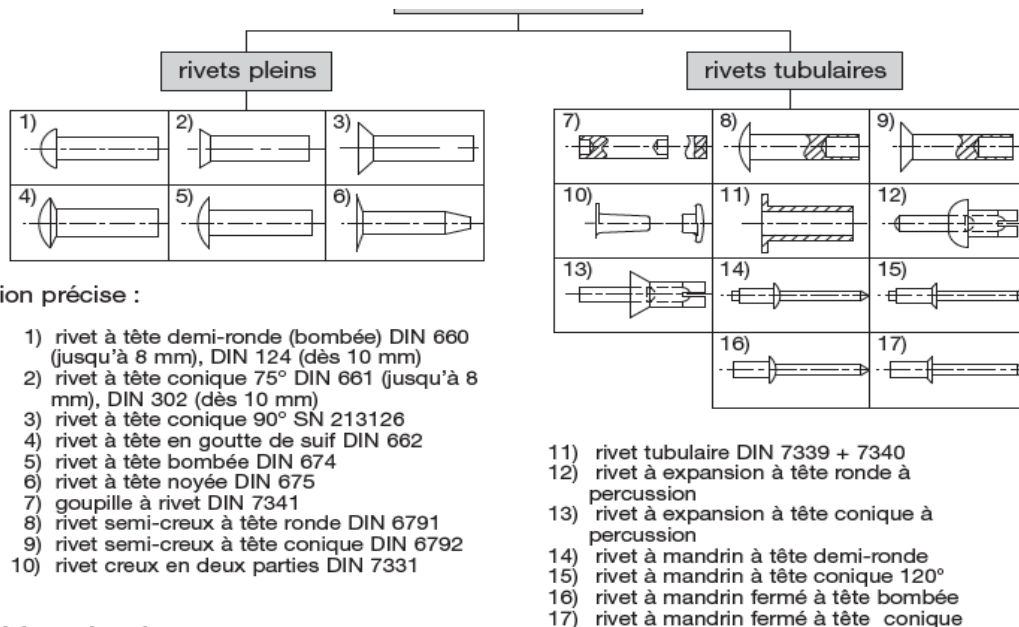
4.1.5. Les règles de travail avec la clé dynamométrique

- Ne pas forcer, mais serrer lentement avec délicatesse.
- Avant l'utilisation, étalonner le couple de la clé par le réglage sur un couple plus élevé, puis serrer la vis et contrôler si elle continue à tourner.

4.2. Technique d'assemblage par rivetage :

4.2.1. Les formes de rivets :

Les rivets peuvent être classés par la forme de leur tête, par le type de leur tige et par le procédé de rivetage.



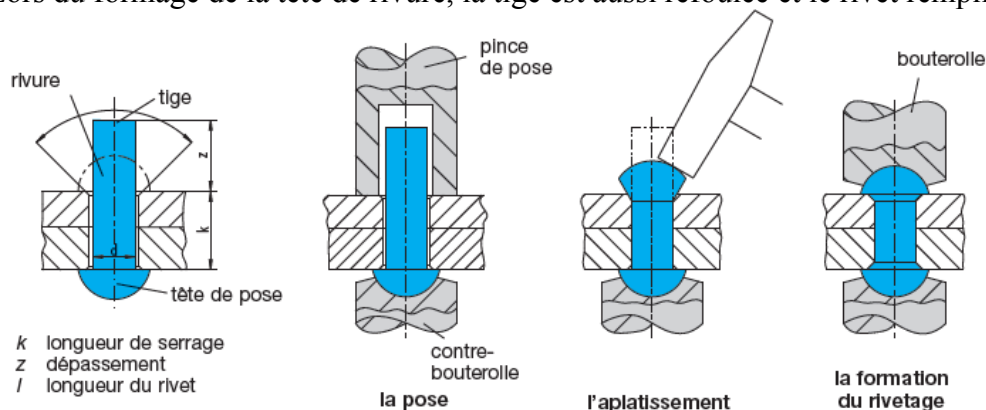
4.2.2. Les matériaux des rivets

Les rivets doivent être suffisamment solides tout en étant faciles à déformer. Afin d'éviter la corrosion électrochimique et/ou un desserrage par réchauffement, les rivets sont idéalement du même matériau que les éléments à assembler.

4.2.3. Le rivetage

On distingue le rivetage à froid et à chaud. Les rivets prêts à l'emploi consistent en une tête de pose, une tige et une rivure. Les rivets en acier jusqu'à un diamètre d'environ 8 mm et les rivets dans d'autres matériaux sont déformés à froid.

Lors du formage de la tête de rivure, la tige est aussi refoulée et le rivet remplit tout le perçage.



4.3. Technique d'assemblage par brasage :

Le brasage fait partie des assemblages inamovibles. Il est possible d'assembler des éléments de matières différentes. Le brasage nécessite des matériaux auxiliaires tels le métal d'apport, c'est à dire l'alliage de brasage.

La température de fusion du métal d'apport doit toujours se situer en dessous de la température de fusion des éléments à assembler. Les matériaux des éléments sont mouillés sans qu'ils ne fusionnent. Les assemblages par brasage sont solides, étanches et conducteurs.

4.3.1. La sécurité au travail

- On ne doit pas porter de survêtement facilement inflammable.
- Le survêtement doit être sans traces d'huile ou de vapeurs inflammables.
- Les yeux doivent être protégés avec des lunettes adéquates.
- Il est important de travailler dans des pièces bien aérées, car le brasage génère des vapeurs toxiques.

4.3.2. Les procédés de brasage

On distingue la soudure forte de la soudure tendre. Pour les températures jusqu'à 450 °C, on parle de soudure tendre. Pour les températures entre 600 °C et 1080 °C on parle de soudure forte. Et pour les températures au dessus de 900 °C, on parle de brasage à haute température.

Un bon assemblage par brasage est produit lorsque :

- *les surfaces métalliques sont propres*
- *les surfaces sont exemptes d'huile et de graisse*
- *on choisit la bonne température de travail*
- *l'écart se situe entre 0,05 et 0,2 mm*

4.3.3. Les gaz pour la soudure oxyacétylénique :

Pour la soudure oxyacétylénique, on utilise des gaz combustibles tels que l'acétylène, le propane ou l'hydrogène. En les brûlant avec de l'oxygène pur, on obtient des températures élevées. C'est le mélange acétylène-oxygène qui produit la flamme la plus chaude. Pour cette raison, c'est le procédé préféré.

4.3.4. Le stockage de l'oxygène :

L'oxygène est mis en bouteille d'acier.

Les bouteilles normales (N) : 40 l en surpression de 150 bar = 6000 l d'oxygène.

Les bouteilles légères (L) : 50 l en surpression de 200 bar = 10'000 l d'oxygène.

- Les détendeurs des bouteilles d'oxygène doivent rester exempts d'huile et de graisse, car ces substances sont facilement inflammables en présence d'oxygène.

4.3.5. Le stockage de l'acétylène :

L'acétylène pur (C₂H₂) explose déjà avec une pression d'environ 2 bars. Afin d'éliminer ce risque, la pression maximale autorisée dans ces bouteilles et tuyaux est de 1,5 bar.

Pour pouvoir stocker l'acétylène en grande quantité dans des bouteilles en acier, l'acétylène doit être dissout dans de l'acétone. Ce dernier est absorbé dans les bouteilles par une masse poreuse.

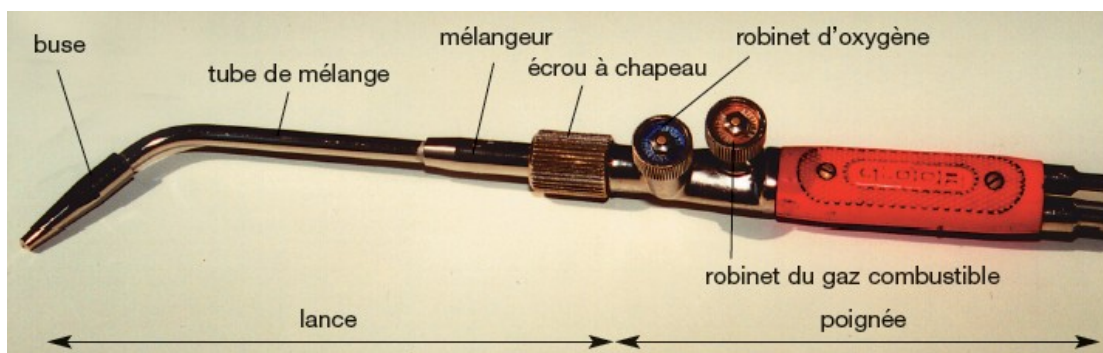
Afin que l'acétone ne soit pas emporté lors du prélèvement d'acétylène, on ne doit pas prélever plus de 1'000 l/h et, en régime continu, pas plus de 350 l/h. Si on a besoin de débits plus élevés, il faut le prélever de plusieurs bouteilles en même temps.

- En raison des pressions très élevées, les bouteilles et les armatures doivent être maintenues dans un état irréprochable.
- Les armatures et les raccords doivent être maintenus propres et parfaitement secs, ne jamais les graisser ou huiler \Rightarrow danger d'incendie.

4.3.6. Les chalumeaux :

Les chalumeaux de soudage consistent en une poignée et une lance. La poignée est dotée de raccords de tuyaux et de robinets pour le gaz combustible et l'oxygène. La lance consiste en un mélangeur, un tube de mélange et une buse. Elle est fixée sur la poignée par un écrou à chapeau.

Le chalumeau sert à : **mélanger** de l'oxygène et de l'acétylène, **brûler** le mélange gaz-oxygène, **et ajuster** la flamme à l'épaisseur du matériau



Dans les chalumeaux d'aspiration (à injection) utilisés le plus fréquemment, l'oxygène arrive à haute vitesse dans le mélangeur par une buse concentrique. Dans la zone d'étranglement du mélangeur, la vitesse élevée produit une sous-pression.

4.4. Technique d'assemblage par collage :
4.5. Technique d'assemblage par soudage