

Chapitre1 : Principaux modes d'élaboration des matériaux

I. 1.GENERALITES

La métallurgie est l'ensemble des industries et des techniques qui assurent la fabrication des métaux. Son développement va modifier profondément l'histoire humaine.

D'après Larousse: La métallurgie extractive est l'«art d'extraire les métaux de la terre et de les purifier». « C'est la manifestation préhistorique la plus avancée de la maîtrise des ressources naturelles ». Elle remonte au quatrième millénaire avant notre ère pour la métallurgie extractive du cuivre et au premier millénaire pour la métallurgie extractive du fer [6].

Elle nécessite une parfaite maîtrise du feu ! Précisons que peuvent coexister au même moment des stades techniques différents selon les pays et les régions, mais aussi qu'une technique nouvelle ne chasse pas l'autre : pour preuve, on continue à travailler le bronze aujourd'hui même si d'autres métaux et alliages ont entre temps été découverts.

C'est au Moyen Orient que sont coulés les premiers bronzes, au IV^e millénaire, alors que l'Europe occidentale n'entrera dans l'âge du bronze que 2000 ans plus tard. Pensons aussi à l'Amérique qui ne connaîtra le fer qu'avec l'arrivée des Conquistadores.

Lorsqu'on parle d'élaboration des métaux, c'est le domaine des procédés industriels et parmi les procédés de métallurgie chimique, il est considéré ceux relatifs au fer seul, de sorte que l'on parlera de *métallurgie des ferreux ou sidérurgie* et ceux concernant tous les autres métaux, on parlera alors de *métallurgie des non ferreux*.

Quelle que soit la métallurgie envisagée, le but de tout procédé est d'extraire les métaux des minerais et de confectionner des alliages. Un alliage peut renfermer deux composants (alliage binaire, il y en a des milliers) ou trois composants (alliage ternaire, il y en a des centaines de milliers).

Un alliage sera élaboré afin de lui conférer les meilleures propriétés possibles, à savoir :

- **les propriétés physiques**, c'est-à-dire la masse volumique ρ (ou la densité), le coefficient de dilatation, le coefficient de chaleur spécifique C_p , la résistivité, la couleur, etc., ce sont des propriétés **qualitatives**. La densité par exemple de la majorité des métaux dépasse 7000 kg/m^3 , celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 kg/m^3 . Plus la densité du métal est petite et plus les éléments de construction qui en découlent sont légers et efficaces. Cela explique le fait que les alliages d'aluminium sont de plus en plus utilisés dans la construction.

Il est important de connaître le point de fusion des métaux pour pouvoir les traiter à chaud afin d'obtenir des éléments coulés.

- **les propriétés chimiques**, c'est-à-dire la résistance à la corrosion, la résistance aux agents chimiques, etc., ce sont des propriétés de **stabilité**,

- **les propriétés mécaniques**, ce sont celles qui sont définies par des essais standardisés, comme la limite élastique, le module de YOUNG (coefficient d'élasticité), la tension de rupture (ténacité), la résilience (résistance au chocs), la dureté (résistance à la déformation superficielle), etc., ce sont des propriétés **utilitaires**,

- **les propriétés de façonnage**, qui permettent la mise en forme d'un objet par déformation à chaud ou à froid, par usinage, par forgeage, etc., ce sont des propriétés **fonctionnelles**.

I.2. LES PRINCIPALES PROPRIÉTÉS D'EMPLOI DE CHAQUE FAMILLE

1.2.1. LES PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX

Les matériaux métalliques, comme leur nom l'indique, comportent des liaisons essentiellement métalliques, c'est-à-dire en partie assurées par des électrons délocalisés. Ces derniers sont responsables des bonnes propriétés de conductivité thermique et électriques des métaux.

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

1.2.2. LES PROPRIÉTÉS DES POLYMÈRES

Les polymères sont constitués de macromolécules à squelette covalent, liées entre elles par des liaisons faibles (liaisons de Van der Waals ou liaisons hydrogène).

Leurs propriétés dépendent fortement du comportement de ces liaisons faibles, et évoluent considérablement avec la température. Ils auront généralement un faible module d'élasticité, et une limite élastique d'autant plus faible qu'ils seront portés à plus haute température.

Ils seront donc faciles à mettre en forme. Ils ont aussi malgré leur bonne déformabilité, une bonne résistance à l'usure. Ils sont faciles à assembler et ont une bonne tenue à la corrosion. Enfin, ce sont des matériaux légers et ils peuvent être très bon marché.

1.2.3. LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX COMPOSITES

Les matériaux composites sont des matériaux qui associent deux ou plusieurs matières différentes, appartenant parfois à deux classes distinctes, pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chacun. Les plus fréquemment utilisés sont les composites à matrice polymère et à renfort fibreux qui présentent des propriétés spécifiques exceptionnelles ou directionnelles. Les composites céramique/céramique qui sont moins fragiles que les céramiques massives sont très intéressantes pour leur tenue en température, les composites à matrice métallique et renfort céramique ont pour vocation de tirer parti à la fois de la ductilité des métaux et de la raideur du renfort céramique. Enfin il convient de citer pour mémoire les matériaux tels que le bois, les ciments et bétons, les mousses polymères, céramiques ou métalliques, qui sont également des matériaux composites.

1.2.4. LES PROPRIÉTÉS DES CÉRAMIQUES TECHNIQUES

Les céramiques sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique. La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants à l'usure. Ces matériaux ont de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Les céramiques techniques de qualité ont tendance à être chères.

I.3. DÉFINITIONS

1.3.1. MATIÈRE PREMIÈRE

Les matières premières sont des ressources naturelles, c-à-d des produits obtenus directement de la nature (pétrole, minerais, arbres,...etc) à partir desquelles on extrait les matériaux utilisés dans l'industrie.

1.3.2.. MINERAI

Généralement tous les métaux ne se trouvent pas à l'état natif (état pur) dans la nature, mais sous forme de roche, terre appelée minerai, seuls quelques métaux (Au, Ag, Hg) peuvent se trouver à l'état pur.

Le minerai est une combinaison d'un métal ou de plusieurs métaux avec d'autres éléments tels que O_2 , C, N_2 , P, S etc. en plus il contient de l'eau d'hydratation.

Le minerai est une substance minérale qui baigne dans une substance stérile appelée gangue. Les minerais qu'on rencontre dans la nature sont sous forme d'oxydes (Fe_2O_3), carbonates ($CaCO_3$), sulfures (PbS) ou silicates ($Al_4(SiO_4)$).

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

a) Concassage des gros morceaux à l'aide de concasseur rotatif, à mâchoires ou à marteaux.

b) Broyage pour obtenir du minerai encore plus fin.

c) Triage, lavage du minerai par flottation (enrichissement).

1.3.3. PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX

En général, on entend par **résistance mécanique des matériaux**, la résistance que possèdent les matériaux à supporter des efforts mécaniques.

On connaît actuellement plusieurs propriétés des métaux ; parmi elles :

+ **ténacité** : la résistance d'un matériau à la traction. Autrement dit c'est la résistance qu'offre un corps face aux efforts lents de déformation (sans qu'il finisse par se rompre), ce pourquoi ils absorbent une quantité déterminée d'énergie ;

+ **dureté** : résistance que présente un matériau à être rayé ou pénétré. le matériau le plus dur le diamant (dureté 10) ;

+ **résilience** : résistance que présente un matériau aux chocs. Elle est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs ;

+ **fatigue** : est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statique ou dynamique) ;

+ **fluage** : caractérise la capacité d'un métal à se déformer à la suite d'une charge constante. Il peut donc conduire à l'accroissement des flèches des éléments des constructions et à la perte de stabilité.

+ **moulabilité** : un corps est moulable quand, à l'état liquide, il peut être refroidi et solidifié dans un moule en prenant la forme de celui-ci.

+ **malléabilité** : Contrairement aux pierres, les métaux ne se brisent pas quand on leur porte un coup, ils se déforment en conservant la nouvelle forme acquise. La malléabilité est la raison pour laquelle on peut laminier (*rouleau compresseur*) un matériau, le forger (*martèlement*), ou découper plus ou moins facilement un métal.

+ **fusibilité** : Un corps est fusible si, par la chaleur, on peut le faire passer de l'état solide à l'état liquide. Dans le cas des premiers métaux (or, cuivre, argent), les anciens obtenaient une chaleur suffisante sur un feu de bois pour le liquéfier ; par après, l'amélioration des

techniques, et notamment l'utilisation du charbon de bois, permettra d'atteindre des températures plus élevées et donc de faire fondre d'autres métaux plus résistants.

+ **ductilité** désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre pour former notamment des fils. S'il y résiste bien, il est dit ductile, sinon il est dit fragile (c'est la fragilité).

+ **conductivité** thermique ou électrique, c'est-à-dire que les métaux transmettent la chaleur ou le courant électrique à des degrés divers.

+ **élasticité** : capacité des matériaux à récupérer leur forme originale une fois que se terminent les forces qu'on lui applique.

+ **plasticité** : capacité des matériaux à acquérir des déformations permanentes (sans récupérer sa forme primitive), lorsqu'ils sont déformés.

I.4. MODES D'ÉLABORATION

1.4.1. NOTIONS

Actuellement tous les matériaux connus et qui sont utilisés en industrie se représentent dans les quatre fameuses familles, à savoir : les métaux ferreux, les métaux non ferreux, les polymères, les céramiques et enfin les matériaux composites.

Parmi les éléments chimiques connus, 70 sont des métaux. Les métaux n'existent pas à l'état pur dans la nature, mais sous forme de combinaisons chimiques, uniquement dans certains cas le cuivre, l'argent et l'or se trouvent à l'état pur, c'est-à-dire à l'état métallique.

1.4.2. MODES D'ÉLABORATION DES MÉTAUX

On s'est mis d'accord qu'on parlera de métallurgie des alliages ferreux dite **sidérurgie** et celle concernant les non ferreux, de **métallurgie des non ferreux**.

L'élaboration des métaux, fait appel à des procédés industriels qu'on appelle plus précisément, du point de vue principe ou process, les procédés de métallurgie chimique.

C'est le mode d'élaboration appelé la métallurgie extractive qui consiste à transformer les minerais pour obtenir les métaux recherchés. Les minerais, comme connus, sont des mélanges d'oxydes (parfois de sulfures), dont certains constituent « la gangue ». La scorification des constituants du minerai et la réduction des constituants dont le métal est recherché sont les deux opérations de base de la métallurgie extractive.

La métallurgie extractive constitue donc une des industries de base de transformation de la matière (à côté de la chimie, de la cimenterie, etc.).

Acier	Aluminium	Cuivre	Zinc	Nickel	Magnésium	Titane
835	24	16	8,9	1,1	0,30	0,10

Tableau.1 : Les productions mondiales en millions de tonnes, en 2000.[3]

Ces industries ont connu de très forts taux de croissance, en particulier dans les années 1950 à 1973, puis un nouveau cycle de croissance de 1983 à 1990. La production d'acier est passée de 200 à 750 millions de tonnes entre 1950 et 1995, celle de l'aluminium a été multipliée par un facteur 14.

Ces très forts taux de croissance, dus à une demande très forte, ont été rendus possibles par suite de percées technologiques majeures dans les procédés de production : l'aciérie à l'oxygène pour la production d'acier, la réduction de la consommation d'énergie électrique nécessaire pour produire une tonne d'aluminium de 18 000 à 13 000 kWh ; la coulée continue de l'acier, de l'aluminium, etc.

L'innovation technologique a donc été et elle restera toujours le facteur clé pour rester compétitif dans ces industries.[3]

Cependant, tout procédé métallurgique, visant l'élaboration d'un alliage, peut être décrit en deux phases (la troisième phase sera la mise en forme finale) ; à savoir :

- **l'extraction**, les métaux à l'état natif sont rares, il faut donc toujours extraire le métal du minerai dans lequel il est enfermé sous forme d'oxyde (le plus souvent), de sulfure, de sulfate, de silicate, de carbonate, de phosphate ou encore d'halogénure.

- **L'affinage**, après l'extraction, l'alliage obtenu titre de 90 à 99% maximum de métal utile, un affinage est donc toujours nécessaire pour réduire les éléments indésirables ou impuretés qui, même en faibles proportions, risquent d'altérer les propriétés de l'alliage.

1.4.2.1. Phase d'extraction

On distingue deux grandes voies d'extraction de métaux, qui sont :

- **la pyrométallurgie** ou procédé d'extraction à haute température.

- **l'électrométallurgie** ou procédé par électrolyse en milieu fondu ou aqueux.

On a aussi pris l'habitude de parler de **métallurgie par voie humide**, qui est l'extraction du métal à partir de solutions aqueuses par des méthodes de précipitation, d'électrolyse, etc. C'est pratiquement l'électrométallurgie ; ainsi que de la **métallurgie par voie sèche**, qui implique la réduction du minerai (oxyde ou halogénure ou sulfure) par un réducteur (C, CO, H₂, etc.), généralement à haute température. Elle s'apparente à la pyrométallurgie.

1.4.2.2. Phase d'affinage

L'affinage se doit d'éliminer ou d'enlever du produit brut, les impuretés qui nuisent à son utilisation industrielle. Il n'est pas nécessaire d'enlever tous les éléments surtout si certains amènent une amélioration des propriétés du produit, l'affinage industriel ne cherche qu'à éliminer les éléments qui seraient nocifs. Les méthodes d'élimination peuvent être :

- **par voie mécanique**, lavage, dégazage, séparation liquide-liquide, décantation ; dans ce cas, les impuretés peuvent s'éliminer facilement,
- **par voie thermique**, par changement d'état et grâce à la connaissance des diagrammes S-L(solide-liquide), on peut déterminer les zones favorables de température où le métal peut se séparer de son impureté (phénomène de liquation), ou encore au moyen d'un agent chimique qui va se combiner aux impuretés pour donner des produits faciles à séparer,
- **par voie électrolytique**, le métal est déposé plus pur à la cathode au départ de l'anode, les impuretés restent dans la solution.

Les méthodes d'affinage par voie thermique sont les plus utilisées industriellement, surtout en sidérurgie, parce qu'elles permettent de grandes capacités de traitement.

Les méthodes de purification comme l'affinage conduisent à des métaux ou alliages à faibles pourcentages d'impuretés, mais selon le degré de pureté à atteindre, on aborde ensuite les techniques de *raffinage* (quasi pur) et de *superaffinage* (extrapur).

❖ Objectif d'élaboration des métaux

L'objectif de la métallurgie est de confectionner des alliages ayant les meilleures propriétés possibles à savoir : propriétés physiques, chimiques, mécaniques, et de façonnage.

Un alliage est très souvent majoritairement binaire ou ternaire. Les autres éléments sont ou doivent être en quantités suffisamment négligeables pour ne pas influencer les propriétés globales des métaux dominants de l'alliage. Cependant, il doit être précisé que l'action des éléments peut varier très fort de l'un à l'autre et que des proportions parfois minimales de certains peuvent vite influencer les propriétés d'un alliage. Industriellement parlant, cela montre l'importance capitale de l'obtention d'un alliage bien épuré.

❖ **Résumé et Analyse historique :** (« archéoméallurgie») :

La découverte des matériaux a suivie plusieurs périodes, selon les besoins et la technologie existante ; voyons un peu l'histoire de ces périodes, on a alors:

Antiquité :

- Au, Cu (chalcolithique < -5000)
- Cu, Sn Hg, Pb (age du bronze -5000)
- Fe (age du fer -1500)

Période « alchimique » :

XIII siècle : As (bien qu'utilisé dès l'antiquité dans les bronzes)

XV siècle : Sb, Bi

Naissance de la chimie moderne :

XVIII siècle : Ti, Ni, Cr, Mn, Co, Cd, Be, Zr, Nb, Mo, U, W ...

XIX siècle : Li, K, Na, Sr, Ca, Al, Mg, B ...

XX siècle : Hf, Re, Fr, actinides (transuraniens)

et dans le futur :

XXI siècle : éléments super lourds ($Z > 126$) ?

Néolithique (-8000)

Premiers objets en métal (Au et Cu à l'état natif) : bijoux



pépites d'or alluviales

Cu natif



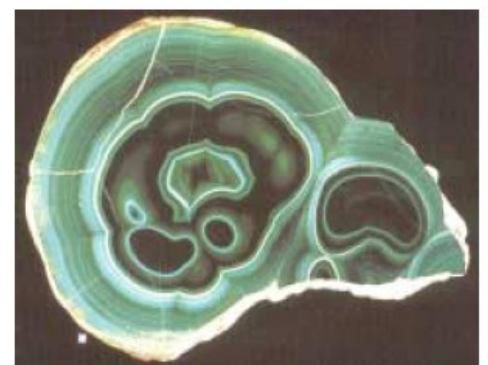
Age du bronze (-5000) (Iran, Turquie, moyen orient)

bronze : alliage de Cu avec As, Sn, Sb, Ag, Ni, Pb...



Chalcopyrite

malachite (verte) : $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
 azurite (bleue) : $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
 chrysocolle (vert) : silicate
 olivenite : $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)\text{OH}$
 chalcopyrite : CuFeS_2



Malachite

d'abord impuretés du minerai (As, Sb, Pb...) (provoquant un durcissement du métal) (mais dégagement d' As_2O_3 volatile et toxique) ;

puis introduction volontaire et contrôlée d'autres métaux : cassiterite SnO_2
airain : >5% Sn (point de fusion de 1084°C à 800°C si 15% Sn).

Avantages du bronze :

- très résistant et très dur (mais fragile),
- fond à « basses » températures (entre 800 et 1000°C) moulage,
- réutilisable (par fusion),
- peu oxydable et oxyde protecteur de belle couleur (vert).

Inconvénients du bronze :

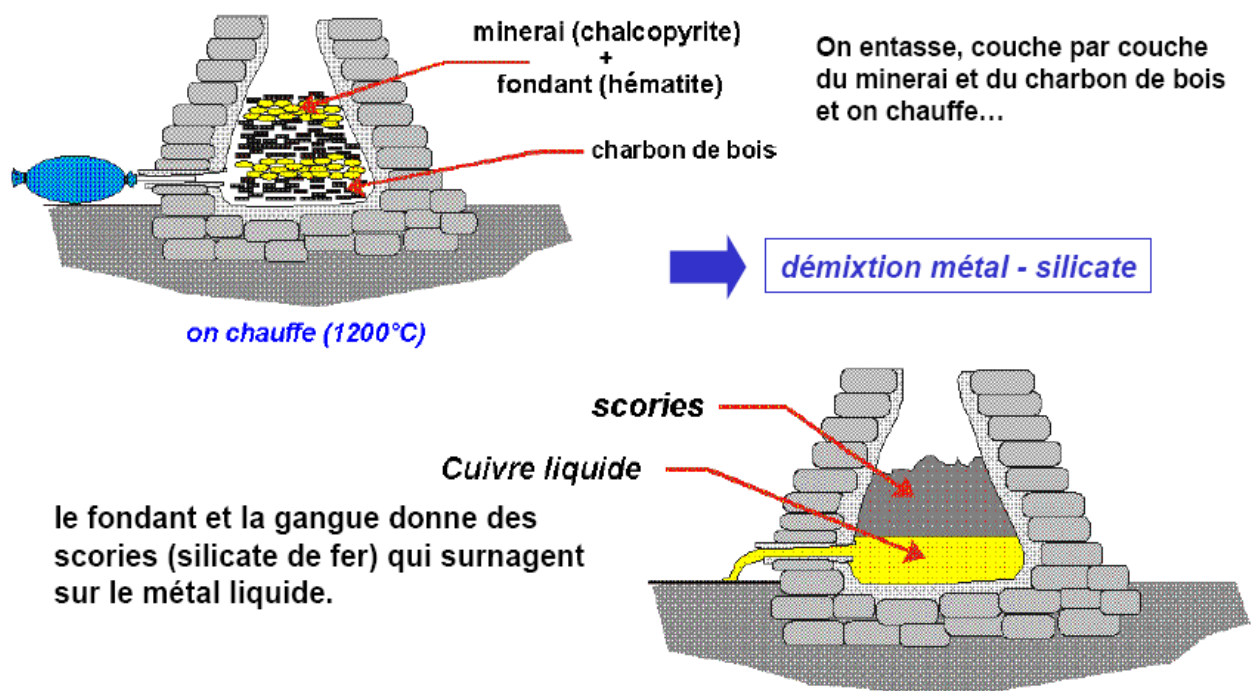
- Cu et Sn sont rares (transport et coût importants),
teneur moyenne de la croûte terrestre : (Cu : 58 ppm) ; (Sn < 2 ppm) ; (Fe : 5%).
- fragilité relative.

d'abord impuretés du minerai (As, Sb, Pb...) (provoquant un durcissement du métal) (mais dégagement d' As_2O_3 volatile et toxique) ; puis introduction volontaire et contrôlée d'autres métaux : cassiterite SnO_2
airain : >5% Sn (point de fusion de 1084°C à 800°C si 15% Sn).

NB : le laiton (alliage Cu-Zn) était connu (orilchaque) en Turquie et en Amérique du Sud (-2000) grâce à un minerai mixte.

Obtention du bronze par la méthode du « bas-fourneau »

Le minerai (chalcopryrite $(\text{Fe,Cu})\text{S}_2$ + gangue siliceuse) est grillé à l'air pour éliminer le soufre puis mélangé avec un fondant (hématite ou Fe_2O_3)



Age du Fer (-1500, Hittites)

Europe de l'Ouest (Celts) Hallstatt : - 700 à - 500
La Tène : - 500 à - 50

rareté du Cu et du Sn : le fer devient compétitif...

1ère métallurgie du Fer : -1500 Hittites (Anatolie)

- se répand grâce aux migrations indo-européennes (Europe, Moyen Orient, Afrique)
- se développe également indépendamment en Chine

- le minerai de fer (brun rougeâtre) est moins visible que celui du Cu
- le fer n'existe pas à l'état natif (*)

(*) sauf cas exceptionnel du fer météoritique (sidérite)

sideros (astre) ? ou sideros (fer) ?
ergon (travail) → **sidérurgie** (*siderougos* : forgeron)

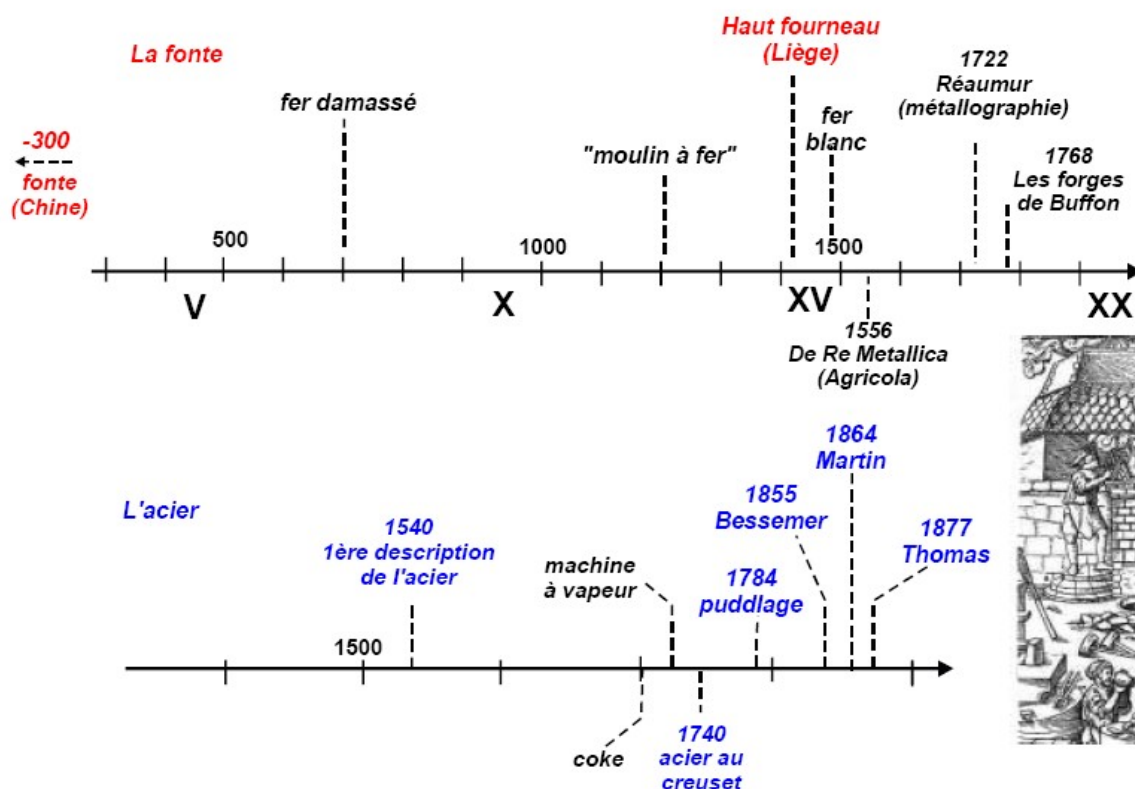
Avantages du fer :

- très résistant tout en restant ductile
- minerais abondant

Inconvénient :

- altérable (rouille)
- fond à hautes températures ($>1500^{\circ}\text{C}$)
- ne peut être moulé (usinage à la pièce)
- le four doit être détruit après chaque utilisation
- ne peut être réutilisé

méthode du bas fourneau (fer par martelage) → haut fourneau (XV^{ème} siècle) fonte → convertisseur (XIX^{ème} siècle) acier



I.4.3. MODES D'ÉLABORATION DES POLYMÈRES

1.4.3.1. Définitions

Lorsqu'on parle de polymères tout de suite on sait qu'on sous entend les matières plastiques. Cette matière plastique ou couramment plastique serve à la fabrication d'objets moulés ou formés, de films, de fibres, etc....

On définit un matériau plastique comme étant un mélange d'une matière de base: la **résine** et de divers **adjuvants** destinés à permettre sa mise en oeuvre (transformation) et à améliorer ses caractéristiques d'utilisation.

Les résines sont obtenues par **polymérisation** ou **polycondensation** à partir de matières minérales, (tirées du sol par extraction ou de la mer) de matières végétale, de matières animales. Elles peuvent être :

- naturelles ; exemple : la colophane,
- artificielles : obtenues par transformation d'un produit naturel par réaction chimique ; exemple : la cellulose transformée par l'acide acétique ou acétate de cellulose,
- synthétiques ; obtenues par réactions de synthèse à partir de matières premières tirées du charbon, du pétrole, etc.... ; exemple : le polyéthylène, polymérisation de l'éthylène.

Les résines sont appelées **haut polymères** pour signifier qu'il s'agit de composés chimiques à haut degrés de polymérisation (enchaînement de très nombreux motifs monomères : quelques centaines à plusieurs centaines de mille).[6]

NB : Les **adjuvants** sont : des **lubrifiants** pour faciliter la mise en oeuvre dans les machines de transformation, des **stabilisants** destinés à combattre les causes et les effets des dégradations, des **plastifiants** pour conférer plus de souplesse aux matières plastiques en les rendant moins cassantes à température ordinaire, et des **charges** (farine de bois, poudres de verre, de métaux, la craie, la mica et l'ardoise en poudre, le graphite...) incorporées principalement dans les poudres à mouler en résines thermodurcissables, enfin d'autres adjuvants tels que colorants, pigments, fongicides, anti-statiques... [6]

Les polymères (macromolécules) sont classés en deux types principaux :

1. **les polymères linéaires**, où les enchaînements de groupes de monomères se développent dans une seule direction et donnent à la molécule polymérisée l'aspect filiforme. C'est à ce type qu'appartiennent , avec le caoutchouc naturel, les **polymères thermoplastiques** qui se ramolissent sous l'action de la chaleur et reprennent leur dureté au refroidissement, transformation réversible renouvelable un grand nombre de fois.
2. **les polymères en réseau**. Ces macromolécules s'étendant dans les trois directions de l'espace, sont dites en réseau et les liaisons interatomiques tridimensionnelles confèrent à l'ensemble une grande rigidité. C'est à ce type qu'appartiennent les **polycondensats thermodurcissables** qui sont, avant transformation, dans un état de polymérisation partielle et qui acquièrent leur dureté par une réaction chimique irréversible, accélérée par la chaleur, au moment de leur mise en oeuvre.

Si la polymérisation s'effectue sur plusieurs monomères différents on obtient alors un **copolymère**. C'est ainsi qu'à partir du styrène on fabrique le polystyrène. En associant le styrène à d'autres monomères, le butadiène et l'acrylonitrile on obtient un copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène souvent désigné sous le nom de résine ABS. [6]

1.4.3.2. Elaboration

Un plastique est le plus souvent produit à partir du pétrole par différents processus de fabrication. Le pétrole est une huile minérale composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures.

Le pétrole est chauffé dans un four de distillation. Lorsque l'on chauffe le pétrole, un phénomène physique se produit, il se sépare en différents états qui ont des températures d'ébullition différentes. Ce phénomène est comparable à ce qui se produit lorsque vous faites bouillir de l'eau pour faire cuire vos pâtes, à une certaine température (température d'ébullition à 100°C) l'eau liquide se transforme en gaz, la vapeur d'eau.

Il en est de même pour le pétrole. Le four de distillation chauffe le pétrole à 370°C. A cette température, on procède au « craquage » du pétrole. C'est-à-dire qu'on le divise en plusieurs parties: en fiouls lourds, en mazout et diesel (gazole), en kérosène, en essence, en naphta (utilisé par la pétrochimie) et enfin, en gaz (voir schéma ci-dessous).

Pour produire du plastique, on utilise uniquement la fraction naphta. [7]

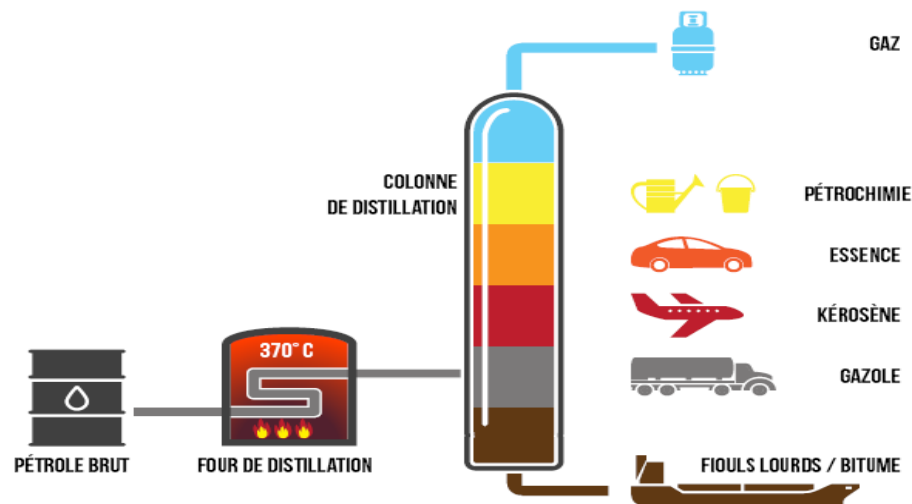


Figure 1 : schématisation du processus. [7]

Il est ensuite envoyé dans une autre usine spéciale, une usine de plasturgie. La plasturgie est l'industrie du plastique. Dans l'usine de plasturgie, le naphta est transformé en différents plastiques grâce à des procédés différents assez compliqués qui sont comparables à de vraies recettes de cuisine. A chaque type de plastique correspond une recette différente.

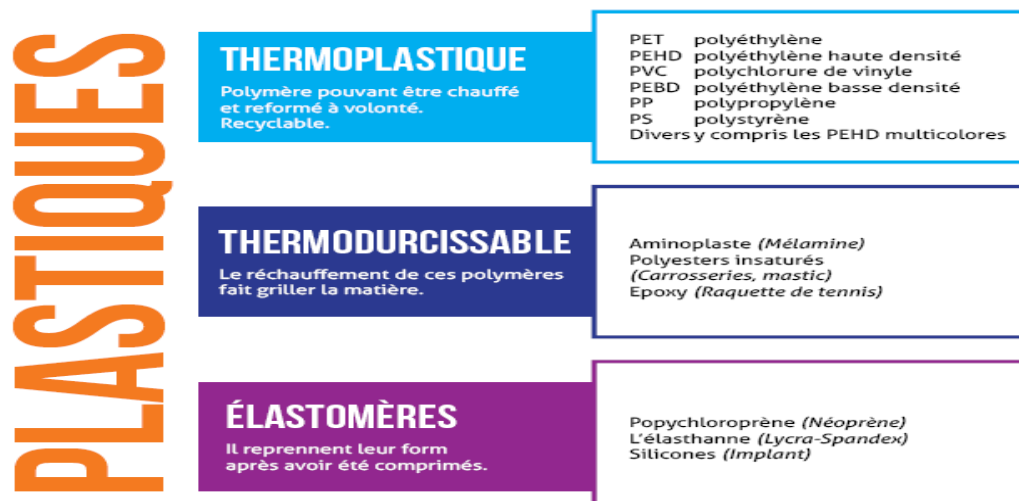


Figure2 : Types de plastiques [7]

1.4.3.3. Familles de plastiques les plus communes

THERMOPLASTIQUES :	
Ils sont formables à chaud sans modification chimique et de façon réversible. Ils se ramollissent par chauffage	
LES POLYOLÉFINES	PE (polyéthylène) PP (polypropylène)
LES POLYCHLORURES DE VINYLE ET LEURS DÉRIVÉS	PVC
LES STYRÉNIQUES	PS (polystyrène) PSE (polystyrène expansé) SB (styrène butadiène) SAN(polystyrène acrylonitrile)
	ABS (acrylobutadiène styrène)
LES POLYACRYLIQUES	PMMA (polyméthacrylate de méthyle) PAN (polyacrylonitrile)
LES POLYCARBONATES	PC
LES POLYMÈRES FLUORÉS	PTFE (polytétrafluoroéthylène) Teflon®
LES POLYESTERS SATURÉS	PETP et PBTP
THERMODURCISSEMENT :	
Ils sont formables à chaud avec modification chimique et de façon irréversible, Ils ont une structure réticulée à mailles serrées. Ils restent intacts aux températures de chauffage utilisées pour les thermoplastiques; ils offrent une meilleure résistance à la chaleur.	
LES POLYOXYMÉTHYLÈNES	POM
LES POLYAMIDES	PA (Nylon, Kevlar®)
LES POLYESTERS INSATURÉS	UP
LES POLYCARBONATES	
LES AMINOPLASTES	UF (urée-formaldéhyde) MF (mélamine formaldéhyde)
LES PHÉNOPLASTES	PF (formophénolique)
LES POLYÉPOXYDES	EP
LES POLYURÉTHANNES (2 familles)	PU
ÉLASTOMÈRES :	
Ils sont formables selon des techniques comparables à celle de l'industrie du caoutchouc, structures réticulées à mailles larges. Ils reprennent leur forme après avoir été comprimé.	
LES SILICONES	SI (sous forme : d'huiles, de gommes, liquides ou pâte et résines)
LES CAOUTCHOUCS	Naturels et vulcanisés
LE POPYCHLOROPRÈNE	Néoprène®
L'ÉLASTHANNE	Lycra® (Spandex)

Tableau.3 : Synthèse des différentes familles de plastiques [10].

1.4.4. MODES D'ÉLABORATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES

Dans le but de commencer à fixer les idées, on peut admettre que les ces fameux matériaux composites ne sont pas une nouveauté, ils ont tout temps été utilisé par l'homme, comme par exemple le bois, le béton et le béton armé.

1.4.4.1. Définition

Un composite est un matériau constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées.

1.4.4.2. Elaboration

L'élaboration d'un matériau composite se fait donc par l'assemblage de deux, de trois matériaux, et ainsi de suite, de natures différentes permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. l'assemblage de ces matériaux fait apparaître la combinaison de trois éléments de base qui sont : la **Matrice**, le **renfort**, les **charges additives**.

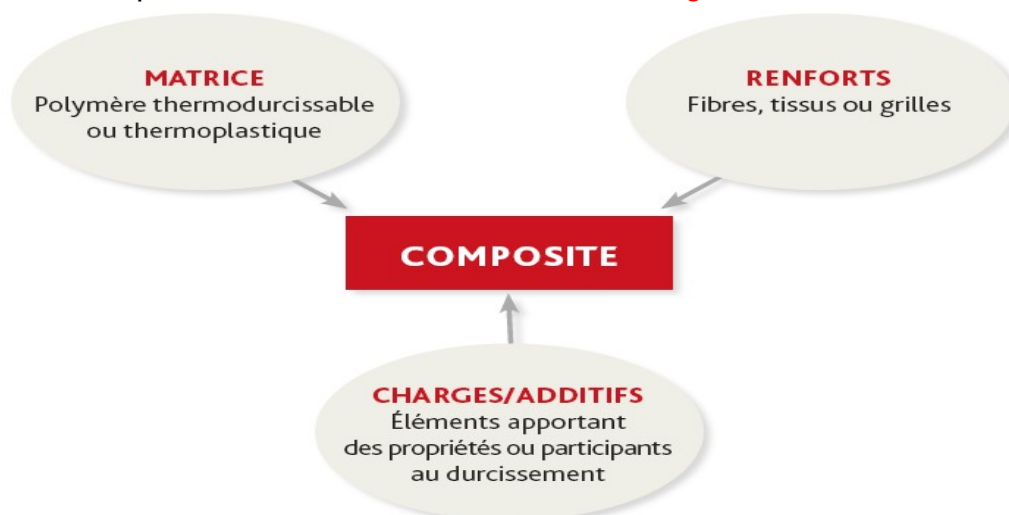


Figure3 : Présentation schématique des constituants d'un composite [8].

Les constituants, qu'ils soient pré-imprégnés ou non, peuvent être de différents types et fournis sous différentes formes : [9]

❖ **Matrices** : il existe trois grandes familles de matrices :

Les matrices organiques, qui sont des résines polymères ; ces matrices peuvent être :

- **Soit thermoplastiques** ; il s'agit alors de granulés solides (fig 4a) que l'on chauffe pour les ramollir avant de les mettre en forme ;
- **Soit thermodurcissables** (les plus utilisées) ; il s'agit alors de précurseurs liquides (fig 4b) (souvent se présentent sous la forme d'un liquide visqueux (résine) ou de poudre), qui, après l'ajout d'un catalyseur, réagissent pour former la matrice (c'est la polymérisation), ce qui entraîne une solidification ;

Les matrices céramiques, dont la mise en forme fait appel à des précurseurs liquides(fig4c) ou gazeux, qui réagissent pour former la matrice ;

Les matrices métalliques, qui sont initialement sous forme de métal fondu (ou, parfois, de poudres métalliques que l'on met en forme par frittage).



*Figure 4 : Quelques matrices avant mise en forme :
(a) granulés thermoplastiques, (b) résine thermodurcissable, (c) silicium fondu, utilisé pour former une matrice de carbure de silicium [9].*

❖ **Renforts :** Le renfort est constitué de fibres tissés ou non. Ils améliorent les caractéristiques mécaniques de rigidité. La nature de ces fibres peut être du verre, du carbone, de l'aramide ou de fibres naturelles (lin, chanvre, sisal).

Il existe trois grands types de renforts : les particules, les fibres courtes et les fibres longues [9] :

Le cas le plus simple est celui des particules (figure 5a) et des fibres courtes (figure 5b). Ces renforts sont directement incorporés à la matrice avant la mise en forme, et les procédés utilisés sont alors très proches de ceux que l'on utilise traditionnellement pour mettre en forme les résines, céramiques ou métaux non renforcés.



(a)



(b)

Figure 5: (a) Particules (microbilles) de verre ; (b) fibres de verre courtes. [9]

Le cas des fibres longues est plus complexe. En effet, le principal intérêt de ces fibres est la possibilité de choisir leur orientation, ce qui permet de renforcer la pièce dans les directions selon lesquelles elle est la plus sollicitée. Cependant, les fibres étant de diamètre microscopique (quelques microns), il n'est naturellement pas envisageable de les disposer une à une.

Elles sont donc fournies sous la forme de *semi-produits* pouvant être de plusieurs types :

- Soit des plis ou nappes, pouvant être unidirectionnels (toutes les fibres sont parallèles, fig 6a) ou mats (les fibres sont disposées « en vrac » dans toutes les directions du plan) ; ces plis sont alors fournis en rouleaux ;
- Soit des fils, formés de nombreuses fibres tressées entre elles, et fournis en bobines (fig 6b) ;
- Soit des tissus plans préfabriqués à l'aide de ces fils, et fournis en rouleaux (fig 6c).

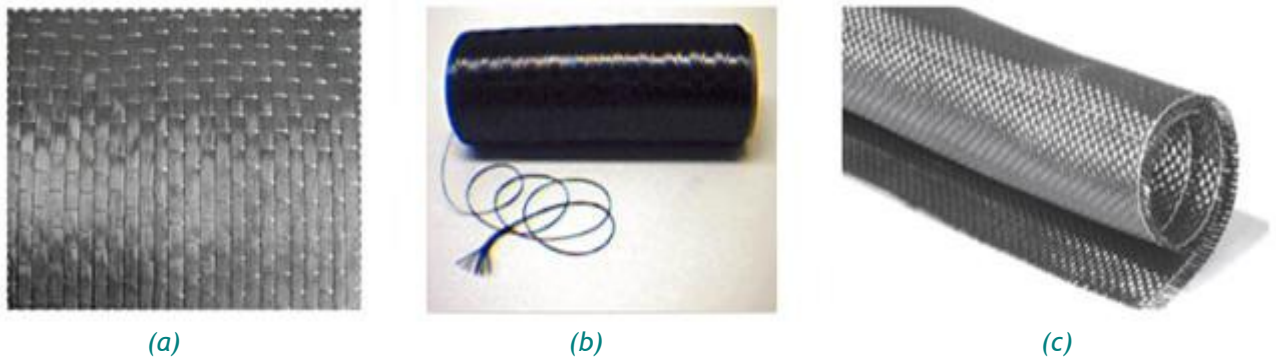


Figure 6 : Fibres longues de carbone : (a) en rouleaux unidirectionnels (les fils de trame blancs ne sont là que pour maintenir les fibres parallèles), (b) en bobines de fils (on distingue les fibres à l'extrémité du fil), (c) en rouleaux de tissu 2D équilibré. [9]

❖ **Les additifs ou les charges sont ajoutés** sont nécessaires pour permettent d'abaisser le coût de revient du matériau (ex : talc, silice, coton, ...). Selon l'additif, certaines propriétés mécaniques ou spécifiques sont améliorées (Tenue à la chaleur, tenue aux chocs,...). Ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés : Pigments de coloration, agents anti-UV, isolation thermique ou acoustique, ...

1.4.4.3. Intérêts des composites [8]

Les matériaux composites, en fonction de leurs constituants, présentent un grand nombre d'intérêts.

D'un point de vue mécanique, ils offrent d'excellentes propriétés en traction, flexion, compression, cisaillement plan et transverse ainsi qu'une excellente absorption aux chocs. Leur résistance mécanique combinée à leur faible densité en font un élément incontournable des conceptions actuelles qu'elles soient structurelles ou non.

D'un point de vue physico-chimique, ils s'adaptent parfaitement à différents milieux ambiants et peuvent être très performants en termes de résistance aux produits chimiques, au feu, ou à la corrosion.

Néanmoins, leur plus grand intérêt réside dans la possibilité de pouvoir intégrer plusieurs fonctions en une seule opération réduisant de fait et de façon conséquente, le nombre de pièces d'un ensemble mécanique ou d'une conception et par là même son coût de revient.

Bien que leur fabrication nécessite des investissements parfois lourds en termes d'outillages de moulage, ils constituent un compromis technico-économique intéressant lorsqu'ils sont fabriqués en série.

1.4.5. MODES D'ÉLABORATION DES CÉRAMIQUES TECHNIQUES [11]

1.4.5.1. Généralités

Le terme céramique a pour origine le mot grec *keramikos*, qui fait référence à la poterie et à la « terre brûlée ». 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 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.

1.4.5.2. Définition mieux adaptée des céramiques

L'analyse précédente montre à l'évidence que la définition du Larousse, pour le terme céramique, n'est pas satisfaisante et qu'il est nécessaire, aujourd'hui, de mieux définir ce terme. De nombreuses définitions en ont été proposées et ont été revues récemment [Fantozzi *et al.*].

D'une manière générale, nous considérerons qu'un matériau céramique est un **solide inorganique non métallique**. C'est la définition de la céramique au sens large du terme. Ainsi, les céramiques ne sont pas définies par rapport à une technologie (dont l'étape majeure serait le frittage) mais par référence à une nature chimique.

Les matériaux inorganiques non métalliques obtenus par fusion, comme les verres et les réfractaires électrofondus, et les liants hydrauliques, (ciments, bétons, plâtre) obtenus par prise à partir d'un milieu aqueux, font donc partie de la classe des matériaux céramiques. D'après cette définition, le graphite et le diamant ainsi que la glace font également partie des céramiques.

On peut donc définir la céramique comme étant le domaine scientifique, technique et industriel qui s'occupe de la fabrication et des propriétés des solides inorganiques non métalliques.

1.4.5.3. Élaboration des céramiques

L'élaboration est spécifique à chacune des familles de matériaux céramiques, celles-ci se distinguant précisément par leur mode d'élaboration [Fantozzi *et al.*].

Celle-ci se fait soit par frittage soit par fusion, à relativement haute température, ou soit par prise, à la température ambiante, pour les liants minéraux.

►► Quand l'un des composants reste à l'état solide lors de la cuisson, le procédé est appelé **frittage** : il a lieu avec ou sans formation de phases vitreuses selon qu'il y a fusion ou non d'un ou plusieurs composants. C'est ce qui se produit au cours de l'élaboration des céramiques traditionnelles et des céramiques techniques.

►► En revanche, quand il y a fusion de tous les composants, le procédé est appelé **fusion** ; c'est le cas des verres, des vitrocéramiques et des réfractaires électrofondus.

►► En ce qui concerne les liants hydrauliques, les matériaux n'acquièrent pas leur cohésion par cuisson mais grâce à des réactions d'hydratation des composés présents qui conduisent à l'établissement de liaisons de forte intensité entre les particules constituant le liant ; on parle de **prise du liant**.

Le durcissement des liants hydrauliques n'est donc dû qu'à l'effet de l'eau qui, par formation de composés hydratés stables et cristallisés, va « cimenter » les particules entre elles.

En se rappelant que les matériaux céramiques ont en commun d'être inorganiques et non-métalliques, il est intéressant de remarquer, comme l'avait montré P. Boch, que les trois modes d'élaboration mettent en oeuvre quasiment les mêmes opérations mais intervenant dans un ordre différent (tableau 1.1).

Famille de céramiques	1 ^{re} étape	2 ^e étape	3 ^e étape
Céramiques traditionnelles ou techniques	Poudre	Mise en forme	Traitement thermique
Verres	Poudre	Traitement thermique	Mise en forme
Liants minéraux	Traitement thermique	Poudre	Mise en forme

Tableau 1.1 – Ordre des étapes selon lesquelles sont élaborées les céramiques

a) Élaboration des céramiques par frittage

La céramique traditionnelle est une industrie dont les savoirs faire sont très anciens, alors que la céramique technique qui remplace d'autres matériaux grâce à de meilleures performances, se retrouve dans des savoirs faire industriels très récents, très variés et en perpétuelle évolution. Toutefois et bien que les deux types d'industrie soient très différents, ils ont en commun le fait de mettre en oeuvre le même schéma de fabrication :

Poudres → prétraitement → mise en forme → séchage →
traitement thermique (frittage) → produit fini

Ce schéma est le même pour les carreaux de salles de bain que pour les supraconducteurs ou les piézoélectriques les plus innovants.

b) Élaboration des céramiques via une fusion

- **Les réfractaires électro-fondus**

Pour les fours de fusion du verre, on a besoin de réfractaires denses qui ont une bonne résistance à la corrosion. Ces réfractaires sont obtenus par électrofusion.

Les réfractaires électro-fondus sont en général constitués de mélanges de phases vitreuses et, ou, cristallines, elles-mêmes constituées de cristaux enchevêtrés de haute réflectivité et compacts.

- **Les verres**

Le verre est produit en chauffant les matières premières à une température au-dessus de laquelle il y a fusion. Les principaux procédés de mise en forme des verres sont les suivants : pressage, laminage, flottation, soufflage et étirage.

c) Élaboration via une « prise » : liants hydrauliques

Les ciments, les bétons et les plâtres sont utilisés comme des matériaux de construction à une échelle gigantesque. Contrairement aux matériaux précédemment cités, ces matériaux n'acquièrent pas leur résistance mécanique par traitement thermique mais par des réactions chimiques qui permettent d'établir entre les particules constitutives des liaisons de forte intensité.

I.5. LES PROCÉDÉS INDUSTRIELS D'ÉLABORATION DES MÉTAUX ET ALLIAGES

1.5.1. NOTIONS

Faisant partie de la métallurgie, la sidérurgie est aussi le secteur industriel de fabrication consacré à la production et l'élaboration des alliages ferreux et leur mise en forme. Elle fournit des produits finis ou semi-finis métalliques aux diverses branches industrielles ; c'est-à-dire sous forme de tôles, de plaques, de barres, de fils, de profilés divers, de tubes, de pièces de forge ou de fonderie.

Cette fabrication comporte une succession *d'opérations de transformation, d'extraction ou de séparation des constituants de minerais ou de produits intermédiaires* (ces trois types d'opérations seront présentés plus loin), que l'on divise généralement en quatre étapes (bien qu'il n'y ait pas toujours une frontière très nette entre ces étapes (Encadré I.1.1. et Planche I.1.1. relative à la fabrication de l'acier) [3]:

1) la métallurgie « primaire » ou « extractive » ou « de première transformation » (*winning*) part du minerai pour aboutir au métal en général liquide, quelquefois sous forme d'éponge (solide poreux) ou de poudre, qui constitueront la base des aciers et alliages. Cette étape comporte des opérations d'extraction ou de séparation des constituants du minerai plus ou moins importantes et nombreuses selon que l'on part de minerais riches (Fe ; Al ; Ti) ou pauvres (Cu ; Zn ; Ni) ;

2) la métallurgie « secondaire » (*refining*) consiste en un « traitement du métal liquide », obtenu soit directement dans la première étape, soit par refusion de métaux recyclés avant coulée. Elle comporte plusieurs opérations successives ou combinées : l'affinage (purification), c'est-à-dire l'élimination des éléments nocifs restant dans le métal liquide, la mise à la nuance (addition des éléments constitutifs de l'alliage), la coulée, et la solidification (soit sous forme de lingots, soit directement sous forme de produits solides plats ou longs par coulée continue, soit sous forme de pièces de fonderie, soit même sous forme de poudre) ;

3) la mise en forme, constituée par des transformations thermomécaniques, donnant à la fois la forme, la structure métallurgique et donc une partie de leurs propriétés finales aux demi-produits ;

4) ces demi-produits pourront subir ensuite de nouvelles transformations de mise en forme, de traitements thermiques ou de traitements de surface, par les industries fabriquant des biens intermédiaires (l'industrie mécanique par exemple) ou des produits finis.

ENCADRE I.1.1. PROCÉDÉS D'ÉLABORATION ET DE TRANSFORMATION DES MATÉRIAUX.

- 1) Procédés d'élaboration des matériaux « de base » (1^{re} transformation) (*Winning*) : métallurgie « primaire », « extractive » : pyro-, hydro-, électrométallurgie ;
- 2) Procédés de traitement de matériaux de base (métal liquide) (*Refining*) : métallurgie secondaire : procédés d'extraction, séparation, mise à la nuance, coulée et refusion ;
- 3) Procédés de « mise en forme », transformations et traitements thermomécaniques :
 - forgeage, laminage (1^{re} transformation) ;
 - emboutissage, estampage, trefilage (2^e transformation) ;
- 4) Procédés « avancés » de transformation : traitements thermomécaniques et thermochimiques, traitements de surface sur produit, demi-produit, composant, pièce.

La métallurgie extractive et la métallurgie secondaire mettent en oeuvre des opérations de transformation, par réaction chimique, des constituants du minerai ou de solutions liquides ou de phases gazeuses intermédiaires, en des composés plus ou moins facilement séparables les uns des autres, soit par des opérations d'extraction, soit par des opérations de séparation.

On classe ces opérations en trois familles :

1) la **pyrométallurgie** : opérations effectuées à haute température ;

2) la **hydrométallurgie** : opérations effectuées en milieu aqueux et à des températures relativement basses ;

3) la **électrométallurgie** : opérations mettant en oeuvre des électrolyses soit en milieu aqueux, donc à basse température, soit en sels fondus, donc à haute température.

La transformation, depuis le minerai jusqu'au métal liquide, peut mettre en oeuvre successivement des opérations relevant de ces trois familles.

Les deux premières familles d'opérations englobent de nombreuses « opérations unitaires » (élémentaires). On entend par « opération unitaire » une opération où est réalisée une seule transformation chimique ou l'extraction d'un constituant d'une solution par une seconde phase (liquide ou gazeuse) ou la séparation physique de constituants d'un mélange (distillation d'un mélange liquide) ou d'une suspension (par exemple la filtration).

Une des grandes caractéristiques de la métallurgie extractive moderne est la réalisation, séparément et successivement, de chaque opération unitaire du procédé, dans des appareils (réacteurs ou échangeurs) spécifiques.

Néanmoins, une opération comme la *conversion* de la fonte en acier met en oeuvre, dans le même appareil, plusieurs transformations. De même le haut-fourneau dans lequel on réalise la transformation du minerai de fer en fonte.

La métallurgie secondaire est également constituée par un ensemble d'opérations unitaires d'affinage et de mise à la nuance. Un des procédés d'affinage les plus utilisés consiste dans le traitement du métal liquide sous vide qui est une opération d'extraction de gaz dissous dans le métal liquide.

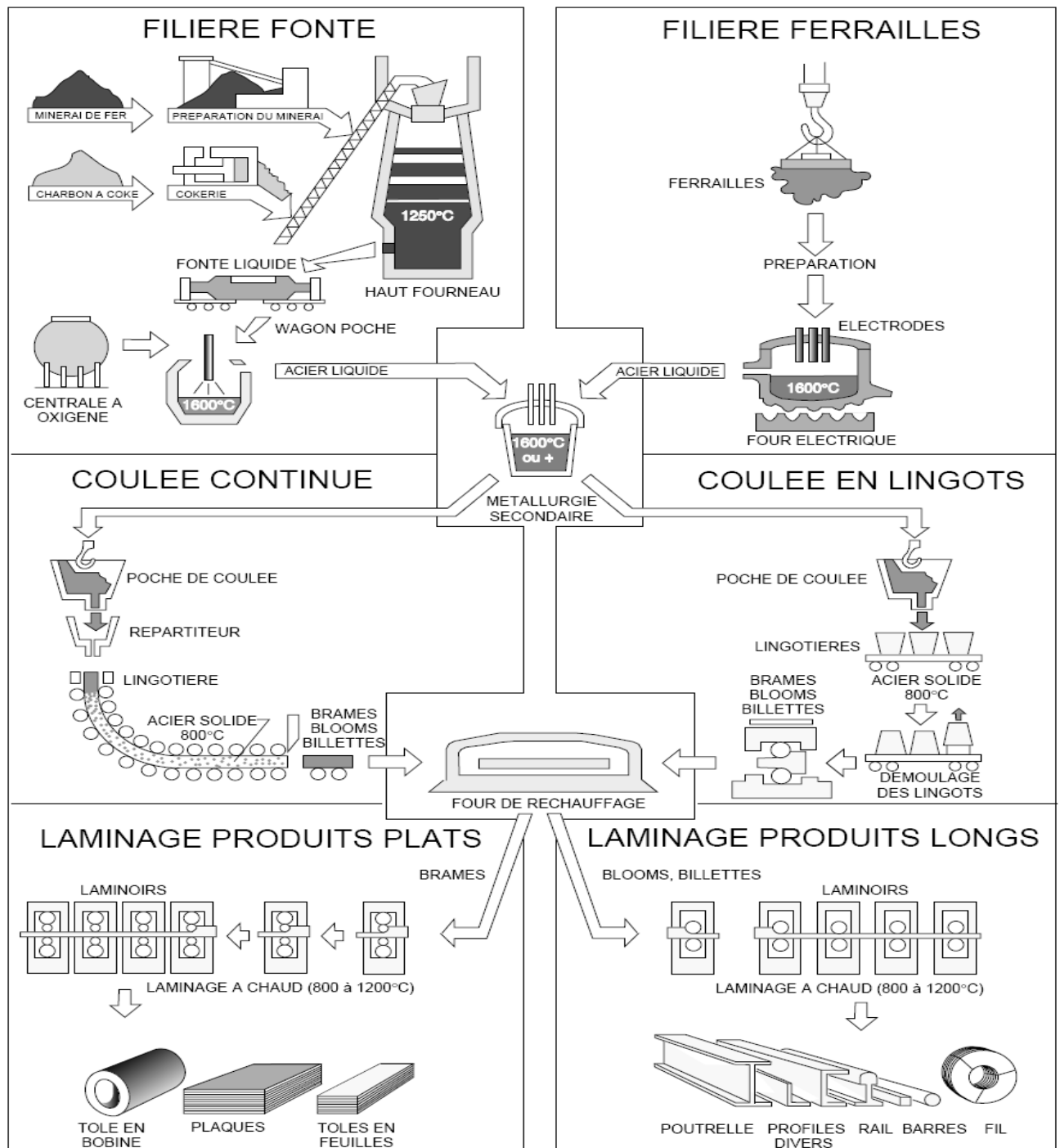


Planche I.1.1. Élaboration et fabrication de demi-produits en acier :
Filières-Étapes-Opérations.

1.5.2. EXMPLES D' ELABORATIONS [3]

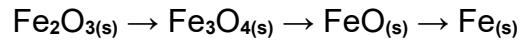
1.5.2.1 ÉLABORATION DE L'ACIER

La Planche I.1.1. présente le synoptique du procédé de transformation du minerai de fer jusqu'aux demi-produits (tôles, barres) en acier sortant soit d'une usine sidérurgique « intégrée » telle que les usines de Dunkerque ou Fos en France, (filière fonte) soit d'une usine utilisant comme matière première des ferrailles¹ (filière ferraille). Le « procédé » comporte 2 étapes. Les opérations des deux étapes, relèvent de la pyrométallurgie.

La première étape de « métallurgie primaire » de la filière « fonte » part du minerai. Elle comporte une succession d'opérations : la préparation du minerai qui, après un broyage et criblage, subit une agglomération (*sintering*) et prend la consistance d'un machefer fondu, la préparation du coke à partir de charbon dans une « cokerie » où le charbon est

débarrassé de ses composants volatils et acquiert les caractéristiques mécaniques nécessaires à l'une de ses fonctions dans le haut-fourneau et la transformation du minerai en fonte liquide dans le haut fourneau, appareil très complexe qui peut être décomposé en 5 zones où sont réalisées successivement :

- la combustion du coke par de l'oxygène pour donner le gaz réducteur CO ;
- la réduction des oxydes de fer à l'état solide par le gaz réducteur dans la partie supérieure :



- la fusion du fer, de l'oxyde de fer non encore réduit et autres oxydes constituant la gangue du minerai, avec séparation en deux phases liquides, la phase métallique et la phase laitier ;
- la poursuite de la réduction des oxydes à l'état liquide ;
- la carburation du fer en fonte (94 à 96 % de fer ; 3 à 4 % de carbone) ;
- la séparation de la fonte et du laitier avec un premier affinage par des réactions « métal-laitier ».

La quatrième opération est la **conversion** de la fonte liquide en fer liquide presque pur : opération complexe d'affinage de la fonte (réduction des teneurs en carbone, silicium, phosphore) soit par des réactions d'oxydation : oxydation, par soufflage d'oxygène, du carbone et du silicium et d'une fraction (que l'on cherche à minimiser) du fer de la fonte, soit par des réactions métal-laitier : déphosphoration (extraction sélective des constituants d'une phase par une seconde phase ; ici le laitier).

La première étape de « métallurgie primaire » de la filière ferrailles ne comporte qu'une seule opération pour aboutir au métal liquide constituée par la fusion des ferrailles et un certain affinage, comme dans un convertisseur, par soufflage d'oxygène, en présence d'un laitier. Elle est réalisée dans un four électrique.

La deuxième étape de « métallurgie secondaire » est appelée « métallurgie en poche » car le métal liquide est transféré dans une nouvelle « poche ». Elle permet de passer du fer liquide presque pur à l'acier ayant la pureté optimale (par élimination d'impuretés (O, H, N, S, etc. subsistant après la conversion) et la composition recherchée, ce-ci par addition d'éléments d'alliage nécessaires (Mn, Ni, Cr, etc.) (mise à la nuance). Elle est constituée de plusieurs opérations successives dans la même « poche » ou dans des « poches » différentes : la désoxydation, la désulfuration, le dégazage et la mise à la nuance. La désoxydation est une réaction de « précipitation homogène », permettant d'éliminer l'oxygène, dissous dans le métal liquide, par formation d'inclusions d'oxydes plus ou moins facilement séparables par décantation ou flottation.

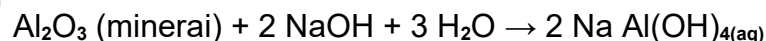
L'élimination poussée du soufre résiduel se fait à nouveau par une réaction « métallaitier » de transfert du soufre de la phase métallique dans le laitier. L'élimination des impuretés gazeuses (H, O, N) est réalisée soit par dégazage sous vide soit par entraînement par un gaz inerte injecté dans le bain liquide.

1.5.2.2. ÉLABORATION DE L'ALUMINIUM

Le procédé industriel de transformation de l'aluminium à partir de la bauxite, minerai principal de l'aluminium, (dont la composition moyenne est 55 % d' Al_2O_3 ; 5 % de SiO_2 ; 15 % de Fe_2O_3 et 25 % de pertes au feu) est constitué de trois étapes principales.

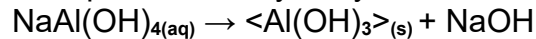
Première étape : l'extraction de l'alumine (Al_2O_3) de la bauxite, par le procédé Bayer constitué d'opérations d'hydrométallurgie, qui met en jeu trois opérations unitaires de transformation :

a) une lixiviation : attaque des particules du minerai par une base, réalisée dans des autoclaves, produisant une dissolution de l'alumine contenue dans la bauxite :

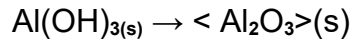


b) la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium à partir d'une solution sursaturée d'aluminate

avec formation de particules d'hydroxyde, réalisée dans des décomposeurs :



c) la calcination : décomposition thermique des particules d'hydroxyde avec formation d'alumine, réalisée dans des fours tournants :



et des opérations unitaires classiques de séparation solide-liquide : filtration, décantation permettant de séparer les solides en suspension dans des liquides.

Deuxième étape : l'électrolyse en sels fondus de l'alumine, donnant l'aluminium liquide.

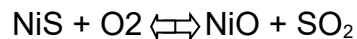
Troisième étape : l'affinage et la mise à la nuance pour l'obtention d'alliages

L'affinage comporte : l'extraction d'impuretés métalliques (Na ; Ca ; Li) et non métalliques (H) par dégazage (réalisé par insufflation d'un gaz inerte dans le métal liquide) et l'extraction d'inclusions d'oxydes en suspension dans le métal liquide par flottation puis par filtration avant coulée, en général coulée continue pour obtenir des bandes ou des barres.

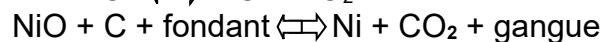
1.5.2.3. ÉLABORATION DU NICKEL

À la différence de la métallurgie de l'aluminium qui ne met en oeuvre qu'un seul procédé de transformation, dans le cas du nickel, des procédés totalement différents sont mis en oeuvre, dans les différentes unités industrielles (procédé pyro-électrométallurgique et un procédé hydrométallurgique).

Le **nickel** est un métal blanc brillant, dur et ductile. Il est trouvé dans la pentlandite $\text{Ni}_9\text{Fe}_9\text{S}_8$ ou dans la millérite NiS ou dans la garniérite (silicate de nickel et de magnésium). C'est un des métaux magnétiques. Il est préparé selon la pyrométallurgie classique d'un sulfure :



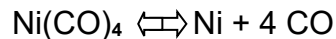
grillage du sulfure



réduction par C

L'affinage se fait comme presque toujours par électrolyse mais dans ce cas, un procédé dit au carbonyle (avec CO), permet d'arriver à un haut degré de pureté sans électrolyse.

C'est basé sur l'équilibre :



A haute température (200 °C), le carbonyle de nickel se décompose et à basse température (50 °C), il vient la formation de ce carbonyle de nickel qui est très volatile et donc facile à distiller.

Le nickel (environ 800000 tonnes par an) est un métal moderne, principalement utilisé dans les alliages comme le monel, le nichrome, l'invar, etc., mais particulièrement les aciers (INOX) et les fontes. Utilisé aussi comme métal de monnaies (or blanc), dans les piles rechargeables, le recouvrement (nickelage) et les matériaux magnétiques.

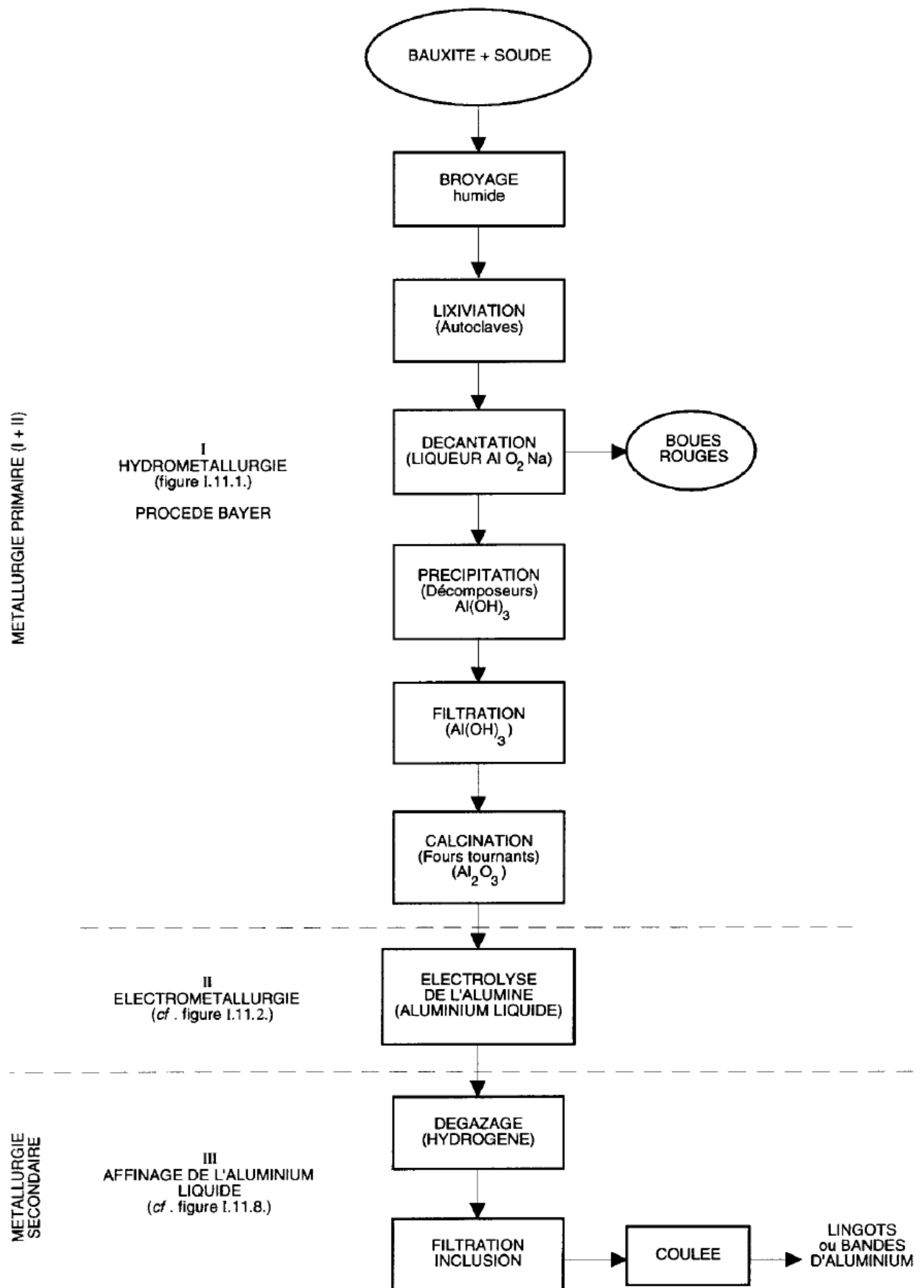


Planche I.1.2. Élaboration de l'aluminium. Étapes et opérations unitaires.