



OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

MODULE N°: 7 METALLURGIE DES METAUX

SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : MMOAMPA

NIVEAU : TS

ANNEE 2007

Document élaboré par :

Nom et prénom

EFP

DR

*DINCA CARMEN
MIHAELA*

*CDC Génie
Electrique*

DRIF

Révision linguistique

-
-
-

Validation

-
-
-

SOMMAIRE

I. PROPRIETES PHYSIQUES DES METAUX ET DES ALLIAGES.....	8
I.1. INTRODUCTION	8
I.2. LES PROPRIETES PHYSIQUES.....	8
I.3. LES ALLIAGES	8
I.4. MATÉRIAUX.....	10
II. METAUX.....	11
II.1. STRUCTURE CRISTALLINE DES MÉTAUX ET ALLIAGES	11
II.1.1. Généralités	11
II.2. LIAISONS INTERATOMIQUES.....	13
II.2.1. Structure de l'atome.....	13
II.3. LIAISON IONIQUE	14
II.4. LIAISON COVALENTE.....	14
II.5. LIAISON METALLIQUE.....	15
II.6. STRUCTURES CRISTALLINES PRINCIPALES DES MÉTAUX PURS ET DES ALLIAGES.....	15
II.6.1. Métaux purs	15
II.6.2. Structure cubique centrée	16
II.6.3. Structure cubique a faces centrées	16
II.6.4. Structure hexagonale compacte	17
II.6.5. Structures cristallines des alliages.....	17
II.7. DÉFAUTS CRISTALLINS.....	17
II.7.1. Défauts ponctuels.....	18
II.7.2. Défauts linéaires	18
II.7.3. Défauts plans.....	18
III. ELABORATION DE LA FONTE ET DE L'ACIER	19
III.1. GÉNÉRALITÉS	19
III.2. ÉLABORATION DE LA FONTE.....	20
III.2.1. Matières premières	20
III.2.2. Préparation des charges.....	21
III.2.3. Généralités sur le haut fourneau	21
III.2.4. Etude théorique du haut fourneau (HF)	22
III.3. ÉLABORATION DE L'ACIER	23
III.3.1. Principes généraux	23
III.3.2. Procédés primaires.....	24
III.3.3. Procédés secondaires	27
III.4. COULÉE DE L'ACIER	28
III.5. MISE EN FORME DE L'ACIER	28
III.5.1. Laminage à chaud	29
III.5.2. Laminage à froid	29
III.5.3. Produits.....	29
III.6. ÉLABORATION DE L'ALUMINIUM	30
III.6.1. Généralités	30
III.6.2. Minerai	30
III.6.3. Fabrication de l'alumine.....	30
III.7. FABRICATION DE L'ALUMINIUM.....	32
III.7.1. Électrolyte	32
III.7.2. Électrolyse	32
III.7.3. Cuves d'électrolyse.....	32
III.7.4. Bilan énergétique.....	33
III.7.5. Raffinage de l'aluminium	33

III.7.6. Recyclage de l'aluminium	33
III.7.7. Transformation en demi produits	34
III.8. ELABORATION DU CUIVRE	34
III.8.1. Généralités	34
III.8.2. Minerais	34
III.8.3. Traitement du minerai. Obtention de la matte	35
III.8.4. Obtention du métal	35
IV. DÉSIGNATION DES ACIERS CONVENTIONNELLE DES ALLIAGES FERREUX.....	37
IV.1. DÉSIGNATION DES ACIERS	37
IV.1.1. Classification des aciers	37
IV.1.2. Désignation symbolique.....	37
IV.1.3. Désignation numérique	39
IV.1.4. Symboles additionnels.....	39
IV.1.5. Compléments.....	40
IV.2. DESIGNATION DES FONTES	40
IV.2.1. Fontes blanches	40
IV.2.2. Fontes grises à graphite lamellaire	41
IV.2.3. Fontes grises à graphite sphéroïdal	41
IV.2.4. Fontes grises malléables	41
IV.2.5. Fontes austénitiques.....	41
V. METAUX ET ALLIAGES NON FERREUX	42
V.1. ALUMINIUM ET ALLIAGES D'ALUMINIUM (PRODUITS DE FONDERIE SEULEMENT); ZINC, MAGNESIUM, ETC. (SAUF CU ET NI) ET LEURS ALLIAGES	42
V.2. Cuivre et alliages de cuivre. Nickel et alliages de nickel	42
V.3. DÉSIGNATION NUMÉRIQUE DE L'ALUMINIUM ET DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	42
V.4. DÉSIGNATION CONVENTIONNELLE DES ÉTATS DE LIVRAISON DES METAUX NON FERREUX.....	43
V.4.1. Produits corroyés.....	43
V.5. ACIERS D'USAGE RECOMMANDÉ EN MÉCANIQUE	44
V.5.1. Généralités	44
V.5.2. Aciers de construction d'usage général (Extraits de la norme NF E 35-501	44
V.6. ALUMINIUM ET ALLIAGES D'ALUMINIUM PRODUITS LAMINÉS D'USAGE COURANT .	46
V.6.1. GÉNÉRALITÉS.....	46
V.6.2. ALUMINIUM.....	47
V.7. CUIVRE ET ALLIAGES DE CUIVRE PRODUITS LAMINÉS (TOLES)	48
V.7.1. Cuivre	48
V.7.2. Bronze	48
V.7.3. Laitons	49
V.7.4. Barres, fils et profilés	49
V.7.5. Barres, fils et profilés en laitons	50
V.7.6. Barres, fils et profilés en laitons au plomb	50
V.8. L'ACTION DE L'AIR ET COMBUSTION SUR LES METAUX	50
V.8.1. Les métaux	50
V.8.2. Action de l'air libre	51
V.8.3. Combustion dans le dioxygène : l'oxydation à chaud des métaux usuels.....	52
TP1 – Les types des métaux.....	54
EVALUATION DE FIN DE MODULE	55
Liste des références bibliographiques.....	57

MODULE :7

METALLURGIE DES METAUX

Durée : 35 heures

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

COMPORTEMENT ATTENDU

*Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit
étudier les notions de métallurgie des métaux
selon les conditions, les critères et les précisions qui
suivent.*

CONDITIONS D'EVALUATION

- À partir :
 - de directives ;
 - des catalogues des différents métaux.
 - de manuels du fabricant ;
- À l'aide :
 - des catalogues ;
 - des fiches techniques de fabricant.

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Respect de la méthode de travail.
- Démarche de travail structuré.

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT	
PRECISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. <i>Classer les opérations d'obtention des métaux ferreux à partir d'un minerai de fer</i>	✓ Définition correcte des propriétés physiques des métaux ✓ Identification juste des traitements des minerais
B. <i>Identifier et désigner d'une façon normalisée les métaux ferreux</i>	✓ Propriétés et utilisation correcte des différents métaux ferreux ✓ Désignation normalisée des métaux et alliages ferreux
C. <i>Identifier et désigner d'une façon normalisée les métaux non ferreux</i>	✓ Propriétés et utilisation correcte des différents métaux non ferreux ✓ Désignation normalisée des métaux et alliages non ferreux

Présentation du Module

Ce module de compétence générale est enseigné en premier semestre du programme. Son enseignement devra débiter avant le module 8 « Usinage manuel, mesures et contrôles ».

L'objectif de module est de faire acquérir les connaissances nécessaires à distinguer les propriétés des différents métaux utilisés dans la fabrication des machines, équipement et appareils.

Bien que ce module présente que des aspects théoriques, des efforts doivent être faits pour en dynamiser les apprentissages.

Module 7 : METALLURGIE DES METAUX

RESUME THEORIQUE

I. PROPRIETES PHYSIQUES DES METAUX ET DES ALLIAGES

I.1. INTRODUCTION

Métallurgie: c'est l'art d'extraire les métaux de leur minerai en cherchant à les obtenir à l'état pur ou à les convertir en alliage afin de les utiliser à des usages déterminés.

Sidérurgie: sidero = fer et ergo = travail. C'est l'art d'extraire industriellement le fer de son minerai et lui donner la forme et les propriétés convenable pour son emploi industriel.

I.2. LES PROPRIETES PHYSIQUES

- Les métaux sont distincts les uns des autres par une couleur ou des nuances qui leur sont propres. (ex: l'aluminium est blanc mat, la fonte est grise, le cuivre est rouge et le nickel a des reflets bleutés).
- Les métaux ont une masse volumique différentes (kg/m^3)
- La conductivité électrique est l'aptitude des matériaux à laisser passer un courant électrique plus ou moins fort. Bon conducteur: l'or, le cuivre, l'aluminium et le fer. Mauvais conducteur: le chrome et le nickel
- La conductivité thermique est la propriété permettant l'écoulement et la transmission de chaleur dans le métal.
- La dilatabilité: propriété à l'écartement des molécules qui provoque l'augmentation du volume du métal sous l'effet de la chaleur.
- La fusibilité; propriété qui ont les métaux de se liquéfier sous l'effet de la chaleur.
- La malléabilité: propriété que possède un métal de subir des déformations à froid ou à chaud par pression, étirement... dans le but d'obtenir une pièce (fonte et bronze pas maléales).
- La ductilité est la faculté qu'ont les métaux de pouvoir être réduit en fil sans se rompre au moment de la traction.
- La soudabilité est la propriété permettant aux métaux de se lier entre eux sous l'effet de la chaleur.
- Élasticité est la propriété permettant la déformation avec retour à la forme initiale.

I.3. LES ALLIAGES

Généralités : le fer est un corps simple de la famille des métaux difficile à obtenir à l'état pur. Sa couleur est gris claire. Sa densité est de 7,87. Son point de fusion est de 1735°C . Le fer pur est très peu utilisé.

L'acier est obtenu par la fonte du minerai de fer auquel on ajoute différents adjuvants afin d'obtenir certaines propriétés mécanique et physique. Pour le fabriquer, on concasse d'abord le minerai de fer qui est introduit dans des hauts fourneaux en

couches alternées avec du coke. La combustion du coke fournit la chaleur nécessaire (1800 - 2000°) à la fusion du minerai. A cette température, le fer se combine en carbone pour donner la fonte et le laitier.

Le minerai de fer n'étant jamais pur, la fonte va contenir d'autres éléments: carbone à silicium, du chrome, du nickel, du tungstène, du vanadium et du manganèse.

Après refroidissement de la fonte on recommence une fusion entre 1 200 et 1 300°. Cette phase va permettre la décarburation de la fonte ce qui permet d'éliminer du silicium, du manganèse, du soufre et du phosphore ce qui permet d'obtenir de l'acier. En fonction de la teneur des éléments on va avoir des propriétés physiques différentes.

Les différentes nuances de l'acier :

L'acier au carbone: très peu allié, très dur et très résistant. Il faut que la teneur en carbone soit supérieur à 35% jusqu'à 80%. Ces aciers ne sont pas inoxydables.

L'acier allié: l'alliage permet une modification de la composition initiale par addition d'autres éléments afin de modifier les caractéristiques physiques et mécaniques. Les principaux alliages sont: le chrome, le cobalt, le manganèse, le nickel, le vanadium.

Le nickel augmente la résistance à la rupture, le coefficient d'allongement, la résistance.

Le chrome augmente la résistance à la rupture, augmente le coefficient d'allongement, diminue la résilience.

L'association nickel/ chrome augmente la dureté, la résilience, et l'allongement et cela rend l'acier inattaquable par les acides.

Le silicium augmente les limites élastiques après la trempe.

Le manganèse augmente énormément la dureté et la résilience.

Le tungstène augmente le pouvoir de trempe de l'acier, la dureté et la résilience à la rupture.

Quand sa teneur est comprise entre 4 et 6% cela donne un aimant permanent.

Le cobalt va favoriser l'aimantation. Le vanadium augmente l'in oxydabilité.

Les aciers inoxydables: on désigne un ensemble de famille d'alliage à base de fer dont la principale caractéristique est la résistance à la corrosion.

Schématiquement l'alliage à base de fer devient inoxydable à partir d'une teneur de chrome de 12%.

D'autres éléments tels que le molybdène, le cuivre et le titane peuvent être ajoutés pour améliorer la résistance à la corrosion. D'après leurs structures les aciers inoxydables sont classés en 3 familles:

- a) Les ferritiques: ils comprennent les alliages contenant 12 à 16% de Chrome. Ils sont magnétiques et aucun traitement thermique ne permet d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Par contre on peut les durcir à froid par écrouissage.
- b) Les austénitiques: tout acier inoxydable non trempant (=carbone < à 0,3%). Dans cet acier le taux de chrome (15 à 25%) et de nickel (8 à 10%) sont élevés. Cet acier est anti-magnétique et très inoxydable. Vu sa teneur en carbone cet acier n'est pas assez dur pour faire des outils tranchants.
- c) Les martensitiques: acier inoxydable dont la teneur en carbone est plus élevée (0,1 à 1,3%). C'est donc un acier trempant (on peut améliorer avec la chaleur). Le taux de chrome va de 10 à 13%. Il n'existe pas de Nickel et il existe des agents durcisseurs.

I.4. MATÉRIAUX

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel. La réussite technique et le succès commercial d'un produit fabriqué dépendent en grande partie du ou des matériaux choisis.

Sélectionner un matériau n'est généralement pas une opération simple compte tenu de la grande variété proposée. Le choix dépend autant du prix que des qualités propres du matériau et du procédé de fabrication retenu pour la réalisation. La sélection est le plus souvent effectuée en équipe, client et concepteur étant associés aux techniciens de fabrication.

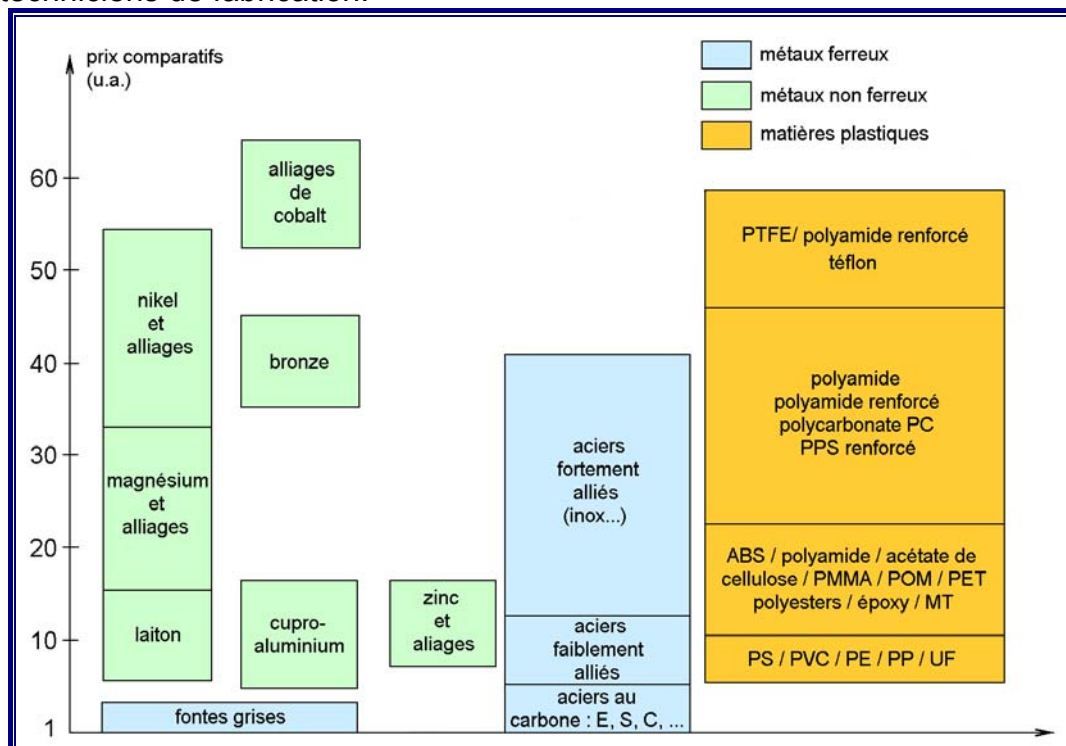


Figure 1 - Prix comparatifs indicatifs (au kg) des principaux matériaux industriels (u.a. = unité arbitraire)

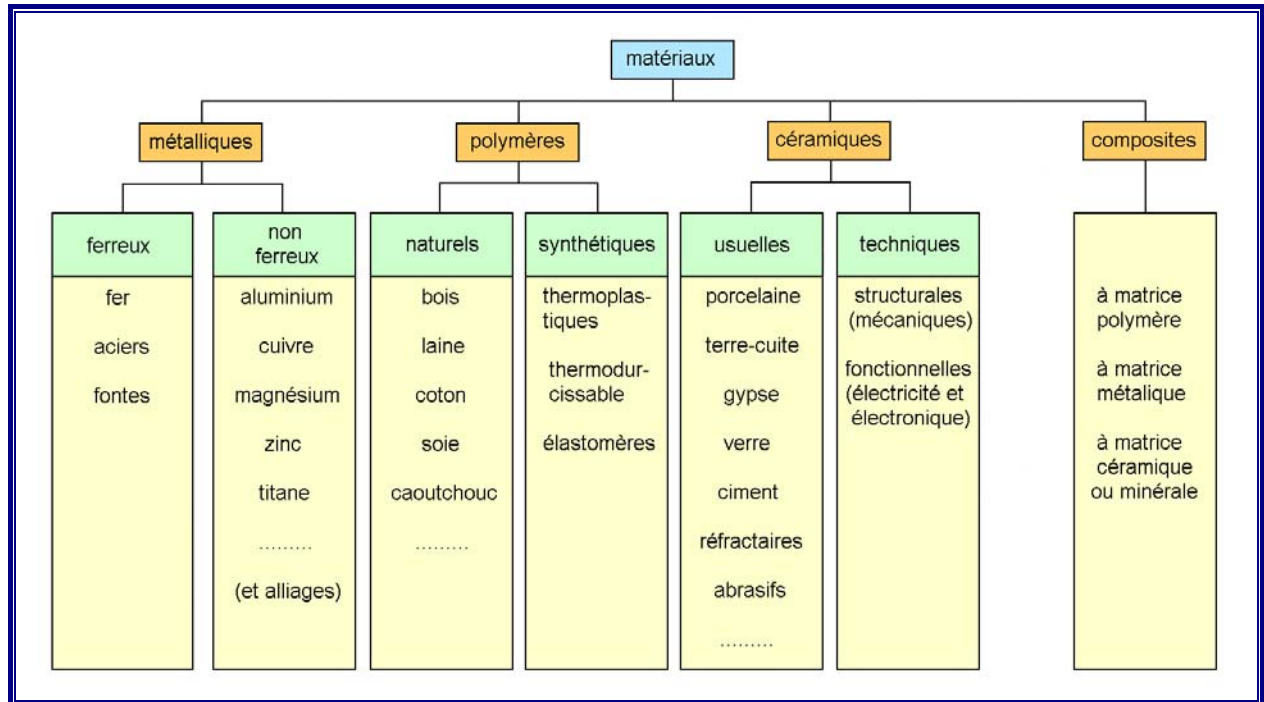


Figure 2 - Principales familles de matériaux

II. METAUX

II.1. STRUCTURE CRISTALLINE DES MÉTAUX ET ALLIAGES

II.1.1. Généralités

Un métal est formé d'une multitude de petits volumes polyédriques appelés grains dont la taille varie en général de 2 à 20 μm , et qui sont limités par des surfaces appelées joints de grains.

Cette microstructure granulaire est bien mise en évidence par microscopie électronique à balayage ou par microscopie optique.

- La figure 3a représente la surface d'un métal rompu à basse température, observée au microscope à balayage: la rupture s'est effectuée le long des joints de grains, mettant bien en évidence les grains qui apparaissent en relief.
- La figure 3b représente la surface d'un métal observée au microscope optique après polissage mécanique et attaque chimique. L'attaque chimique révèle de façon préférentielle les joints de grains qui apparaissent suivant des lignes noires. Ces lignes limitent des surfaces qui correspondent aux grains du métal.

Chaque grain est en fait un monocristal, c'est-à-dire un empilement régulier d'ions métalliques dont la cohésion est assurée par un gaz d'électrons.

L'orientation du réseau cristallin propre à chaque grain est différente et le matériau est dit polycristallin. Dans le cas très particulier où le matériau n'est constitué que d'un seul grain, il est dit monocristallin (figure 4).

Dans les cas les plus simples (métaux purs, solutions solides), tous les cristaux ont une structure et une composition identiques : le matériau est monophasé. Mais en général le matériau est polyphasé, chaque ensemble de cristaux de même structure et de même composition formant une phase distincte (figure 5).

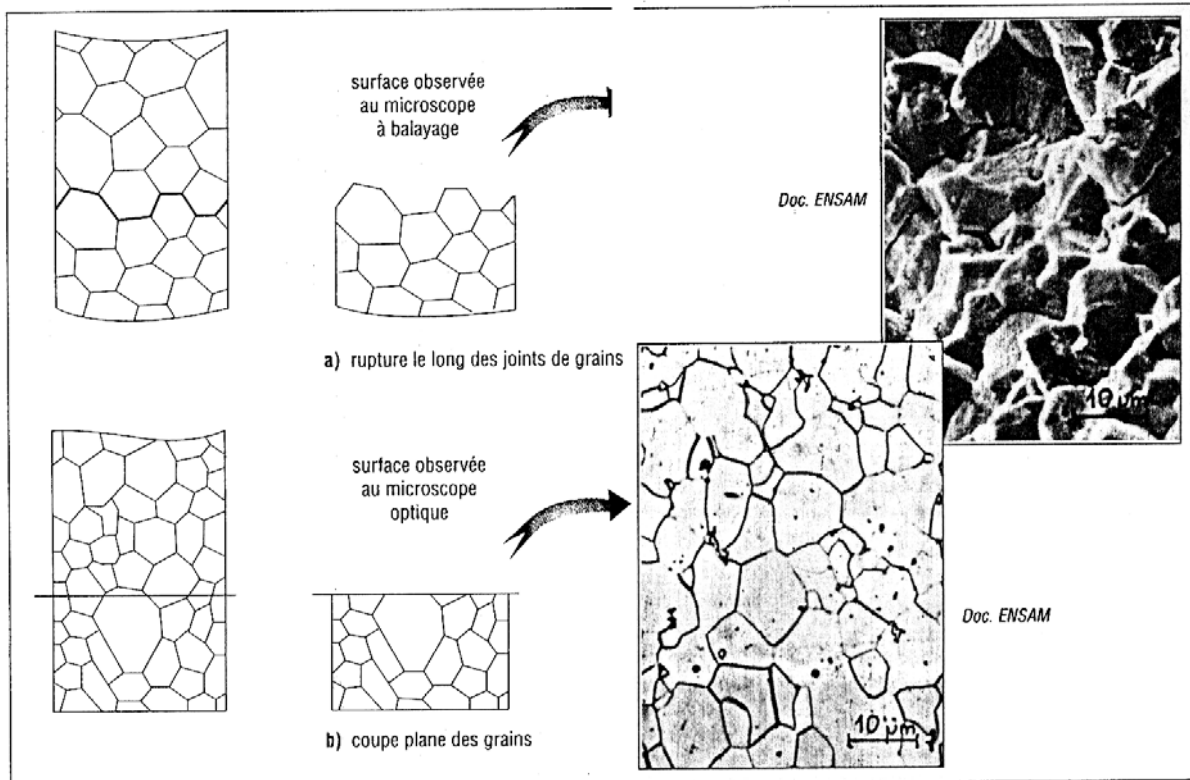


Figure 3 – Mise en évidence de la microstructure granulaire d'un métal

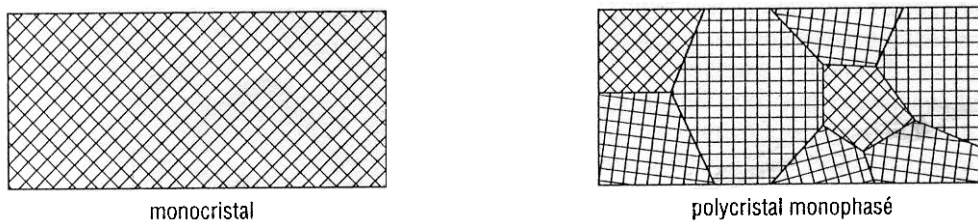


Figure 4 – Représentation schématique d'un monocristal et d'un polycristal

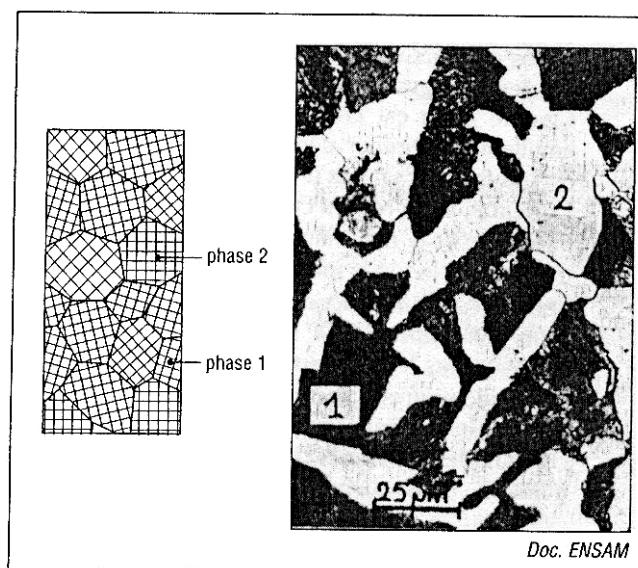


Figure 5 - Matériau polyphasé avec deux phases mises en évidence par microscopie optique

Les propriétés macroscopiques d'un matériau métallique sont en relation directe avec sa structure à l'échelle cristalline. C'est pourquoi nous étudierons successivement l'atome et les liaisons entre atomes, la cristallographie géométrique qui est une façon simple d'étudier les différents types d'empilements, les principales structures cristallines des métaux et alliages, les défauts dans les cristaux, et la radiocristallographie X, qui est la principale méthode d'étude de ces structures cristallines.

II.2. LIAISONS INTERATOMIQUES

II.2.1. Structure de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons.

Le noyau est formé de :

- protons : masse $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
charge positive $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- neutrons : masse $m_N = m_p$
charge nulle.

Les électrons ont une masse $m_e = \frac{m_p}{1840} = 0,91 \times 10^{-30} \text{ kg}$

et une charge négative égale à $-e$.

Le nombre d'électrons est égal au nombre Z de protons : la charge électrique d'un atome est nulle. Le nombre Z qui est appelé numéro atomique de l'atome permet de classer les éléments dans l'ordre croissant de leur nombre d'électrons. Les électrons sont répartis autour du noyau sur des couches électroniques de différentes énergies appelées K, L, M, N, etc., au fur et à mesure que l'on s'éloigne du noyau (énergies de liaison décroissantes). Chaque couche peut recevoir un nombre maximal d'électrons: 2 pour K, 8 pour L, 18 pour M, etc.

Les électrons ont une trajectoire complexe autour du noyau, que l'on représente de façon commode, mais physiquement incorrecte, par une trajectoire circulaire.

Cela conduit à la représentation de l'atome suivant un modèle de sphère centrée sur le noyau et dont le rayon est égal à celui de l'encombrement électronique (figure 6).

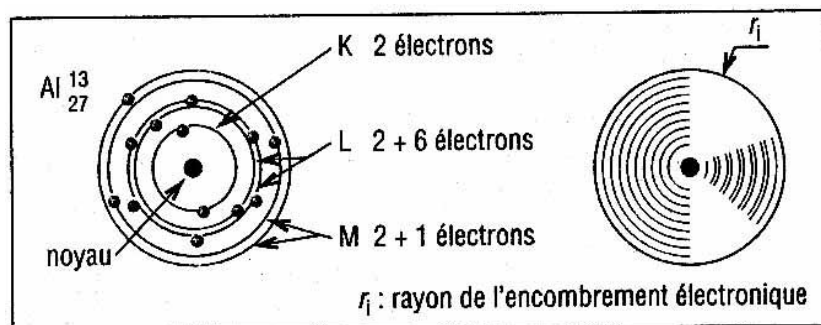


Figure 6 – Représentation schématique d'un atome

La couche périphérique est la plus importante. Les éléments qui ont cette couche saturée sont très stables : ce sont les gaz rares (hélium, néon, etc.) .Les autres éléments 4 peuvent acquérir cette structure stable :

- soit en perdant des électrons : les métaux (Mg, Al, Fe) ;
- soit en gagnant des électrons: les non-métaux (Cl, O. ..)

Les liaisons inter atomiques sont directement reliées à cette couche périphérique. Elles sont principalement de type ionique, covalent ou métallique, et entraînent des caractéristiques spécifiques des différents matériaux (tableau 1).

Liaison	Matériaux	Caractéristiques
Ionique	NaCl Al ₂ O ₃	Mauvaise conductivité électrique, fragile, transparent, haut point de fusion
Covalente	Si C diamant	Mauvaise conductivité électrique, très grande dureté, très haut point de fusion
Métallique	Na, Al Cu, Fe, W	Bonne conductivité électrique et thermique, facilement déformable, opaque

Tableau 1

II.3. LIAISON IONIQUE

Elle a lieu entre les éléments très électropositifs et très électronégatifs. Dans cette liaison, l'atome électropositif donne un ou plusieurs électrons à l'atome électronégatif, ce qui produit des ions de charges opposées. Les forces de liaison résultent de l'attraction électrostatique entre les ions (figure 7).

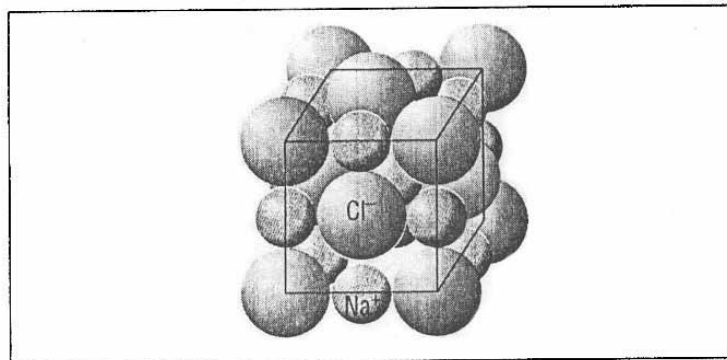


Figure 7 - Liaison ionique : cristal de chlorure de sodium NaCl

II.4. LIAISON COVALENTE

Cette liaison, à l'opposé de la liaison ionique, a lieu entre des éléments proches de la classification périodique. Les atomes mettent en commun des électrons pour compléter leurs couches périphériques (figure 8).

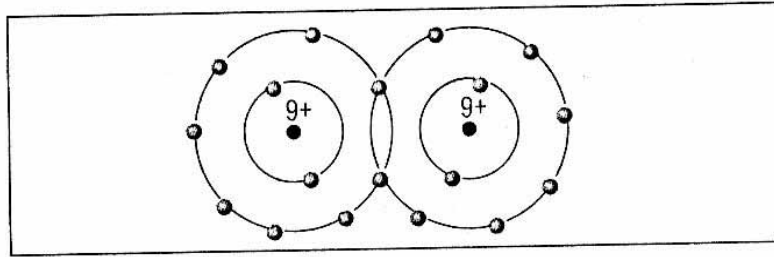


Figure 8 - Liaison covalente: molécule de fluor F_2

II.5. LIAISON METALLIQUE

C'est elle qui nous intéresse plus particulièrement. Elle est caractérisée par le fait que les électrons de liaison sont libres. On peut considérer le métal comme un empilement d'ions positifs entourés par un nuage d'électrons. Ces électrons libres expliquent, par exemple, les propriétés de conductivité thermique et électrique des métaux.

Cet empilement d'ions conduit à des structures compactes qui peuvent être représentées par un empilement régulier de sphères dures (figure 9). La compacité peut s'exprimer par le nombre de coordination, qui est le nombre de plus proches voisins d'un ion ou d'un atome déterminé. Alors que ce nombre est de 4 dans le cristal à liaison covalente (carbone diamant), de 6 dans le cristal à liaison ionique (chlorure de sodium), il atteint 8 ou 12 pour les structures des principaux métaux.

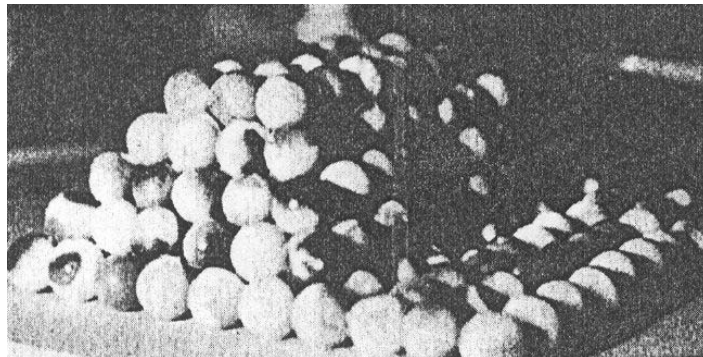


Figure 9 – Modèle de l'empilement de sphères dures

II.6. STRUCTURES CRISTALLINES PRINCIPALES DES MÉTAUX PURS ET DES ALLIAGES

II.6.1. Métaux purs

Les structures cristallines les plus fréquentes présentées par les métaux purs à l'état solide appartiennent, comme le montre le tableau 2, aux systèmes cubique et hexagonal. Trois structures principales y sont représentées: la structure cubique centrée (CC), la structure cubique à faces centrées (CFC), la structure hexagonale compacte (HC).

Nota: les exemples du tableau 2 montrent qu'un même élément (fer, titane, etc.) peut présenter plusieurs structures cristallines selon l'intervalle de température considéré. On dit que l'élément présente un polymorphisme cristallin. Le passage d'une forme à une autre est une transformation allotropique. Pour étudier les structures cristallines, on représente les mailles élémentaires en y plaçant la position des centres des ions. Il faut faire attention au fait que cette représentation ne met pas en évidence la vraie dimension des ions par rapport aux paramètres de la maille. Pour obtenir un schéma à l'échelle, on dessinera chaque fois les plans de compacité maximale en représentant les ions par des sphères dures.

[illegible]

Tabelau 2 – Structures cristallines des principaux éléments métalliques de la classification périodique

II.6.2. Structure cubique centrée (figure 10)

La structure CC est définie par un motif élémentaire de 2 ions (l'un à l'origine, l'autre au centre de la maille). La maille élémentaire contient 2 ions par maille (1 au centre + 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).

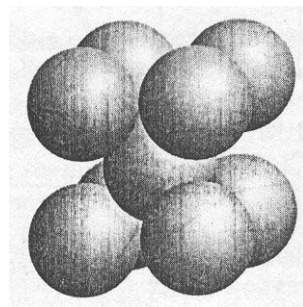


Figure 10 – Structure cubique centrée

II.6.3. Structure cubique a faces centrées (figure 11)

La structure CFC est définie par un motif élémentaire de 4 ions (l'un à l'origine, les 3 autres au centre des faces du cube). La maille élémentaire contient 4 ions (6 sur les faces appartenant chacun à 2 mailles + 8 aux sommets appartenant chacun à 8 mailles).

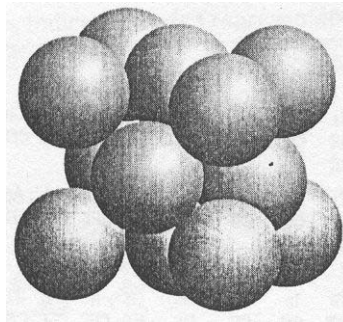


Figure 11 – Structure cubique à faces centrées

II.6.4. Structure hexagonale compacte (figure 12)

La structure HC est définie par un motif élémentaire de 2 ions. La maille hexagonale représentative contient 6 ions (3 à l'intérieur + 2 sur les bases, communs chacun à 2 mailles + 12 sur les sommets, communs chacun à 6 mailles).

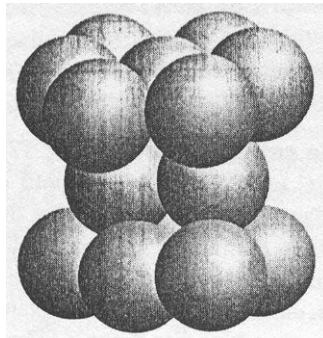


Figure 12 – Structure hexagonale compacte

II.6.5. Structures cristallines des alliages

À part quelques cas particuliers, les métaux sont rarement utilisés à l'état pur, mais sous forme d'alliages qui sont des matériaux obtenus à partir d'un métal et d'additions métalliques ou non.

Les alliages sont obtenus à partir de 2 (binaires), de 3 (ternaires), de n éléments. Ils peuvent être, selon la composition et la température, mono ou polyphasés.

Une phase est une partie d'un matériau physiquement distincte, mécaniquement séparable, ayant une composition et une structure propres. En excluant l'état liquide qui n'est que transitoire, on distingue à l'état solide deux types de phases: les solutions solides et les composés définis dont les domaines de stabilité sont fournis par les diagrammes d'équilibre.

II.7. DÉFAUTS CRISTALLINS

Les cristaux ne sont jamais parfaits. Il y a toujours des erreurs dans les empilements qui peuvent être décrites comme des défauts ponctuels, linéaires et plans.

II.7.1. Défauts ponctuels

Ces défauts existent au niveau des dimensions atomiques.

Ils peuvent résulter de la présence :

- d'un atome de la matrice en position interstitielle (auto interstitiel) ;
- d'un atome étranger en position interstitielle ;
- d'un atome étranger en position substitutionnelle ;
- d'un site atomique vacant (lacune). Les lacunes, qui sont à la base du processus de diffusion, sont toujours présentes dans le réseau et leur concentration à l'équilibre varie avec la température.

II.7.2. Défauts linéaires

Ces défauts, appelés dislocations, sont à l'origine de tous les processus liés à la déformation plastique. Toute ligne de dislocation peut se ramener à deux types: la dislocation-coin et la dislocation-vis.

II.7.3. Défauts plans

• Surfaces libres

Elles séparent le solide du gaz. Elles sont rarement lisses et présentent à l'échelle atomique des marches.

On leur associe une énergie de surface qui dépend de l'orientation cristallographique : les surfaces des plans denses ont la plus faible énergie, parce que les atomes de ces surfaces ont moins de liaisons rompues.

Ces surfaces sont importantes pour le frottement, la catalyse, le soudage, l'oxydation, la croissance de films notamment. Dans ce dernier cas, s'il y a relation d'orientation cristallographique entre le substrat et le film, on dit qu'il y a épitaxie.

• Joints de grains

Ils séparent des régions d'orientations cristallographiques différentes. On distingue les joints de faible désorientation, qui peuvent être décrits par des arrangements simples de dislocations, et les joints de forte désorientation plus complexes à définir. Ces joints possèdent une énergie d'interface et représentent un état métastable du métal. Ils peuvent se déplacer sous l'effet de la température et sont le lieu privilégié de la ségrégation d'atomes étrangers; ce sont des obstacles à la propagation des dislocations.

Les joints de grains jouent donc un rôle primordial dans les propriétés mécaniques du polycristal.

• Interfaces entre deux phases

L'interface sépare deux phases différentes. On distingue deux cas limites :

- l'interface incohérente, au travers de laquelle il n'y a pas de continuité entre les réseaux cristallins des deux phases ;
- l'interface cohérente, où les phases adjacentes ont des plans cristallographiques dont les directions coïncident. Les structures des deux phases n'étant jamais strictement identiques, le passage de l'une à l'autre à travers une interface cohérente conduit en général à l'existence d'un champ de déformation local.

III. ELABORATION DE LA FONTE ET DE L'ACIER

III.1. GÉNÉRALITÉS

La sidérurgie est le secteur industriel concerné par la métallurgie d'élaboration des alliages ferreux et par leur mise en forme. Elle fournit des produits finis ou demi-finis aux diverses branches industrielles.

La production d'acier met en oeuvre plusieurs filières selon les matières premières utilisées et les procédés employés. Quel que soit le cas, on met toujours en évidence trois opérations fondamentales : élaboration, coulée et mise en forme (figure 13).

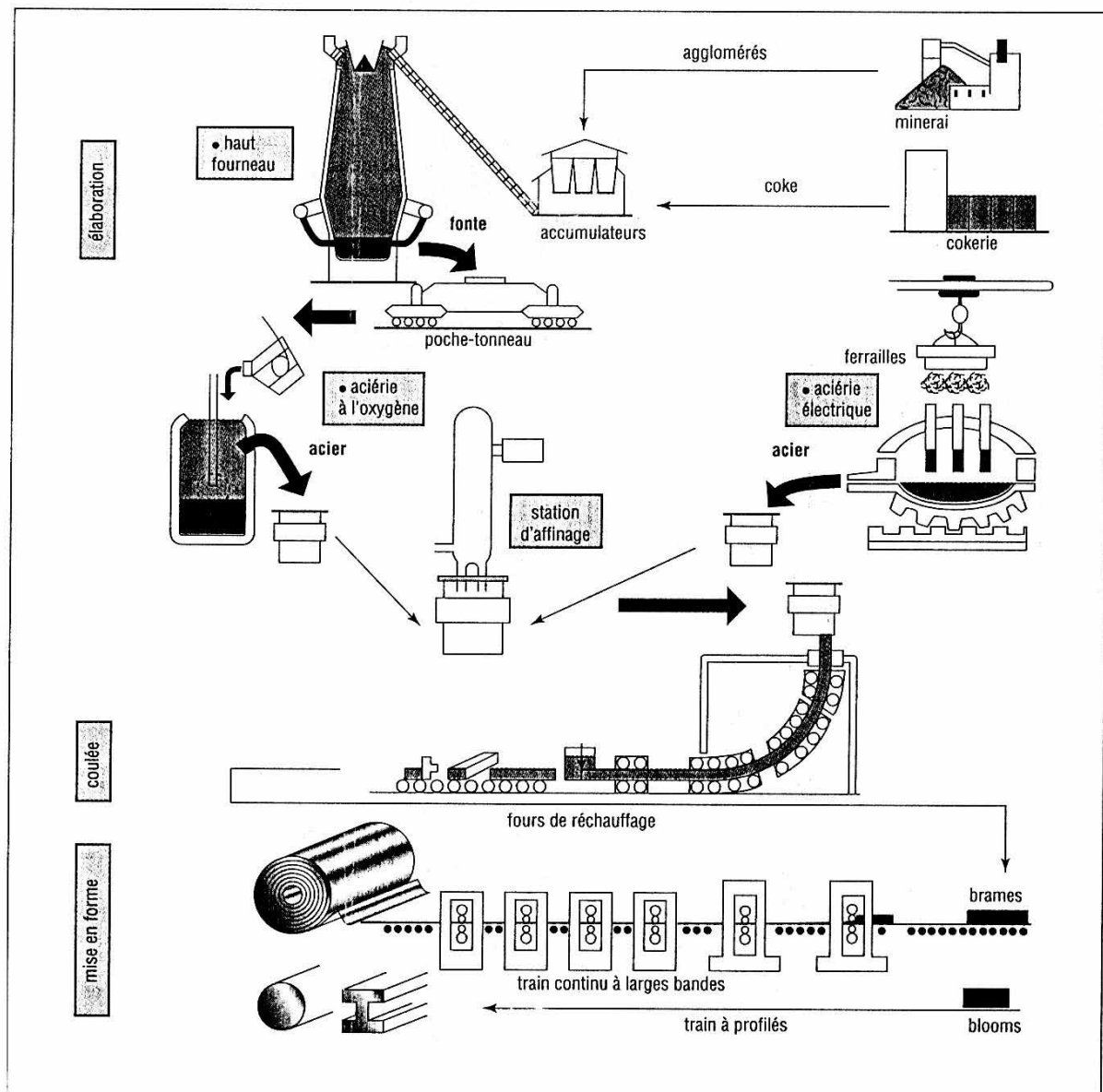


Figure 13- Opérations sidérurgiques

- L'élaboration est destinée à produire la nuance d'acier désirée. Elle utilise soit la filière fonte, soit la filière ferrailles. La réduction directe du minerai n'a pas encore atteint le stade industriel.

- La coulée de l'acier à l'état liquide est suivie de la solidification du métal.
- La mise en forme, mis à part le cas particulier du moulage, se fait par laminage à chaud ou à froid et aboutit à la production de produits plats (tôles) ou longs (profilés, barres, fils, etc.) .

La sidérurgie fournit aux différentes branches industrielles des aciers de toutes nuances sous forme de produits plats ou longs adaptés aux besoins des utilisateurs qui leur feront subir des transformations mécaniques et des traitements thermiques divers.

Quelles que soient ces transformations, l'acier conservera, comme héritage non modifiable ses caractéristiques inclusionnaires. Elles représentent un des aspects primordiaux de la qualité de l'acier et jouent un rôle important dans son comportement en service. Les inclusions présentes dans un acier sont caractérisées par leur nature, leur dimension moyenne et leur répartition. Ce sont principalement des sulfures, des oxydes, des silicates, des aluminates ou le plus souvent des inclusions complexes associant plusieurs types.

Les aciers destinés à des applications exigeantes sont soumis à des opérations de refusion afin d'affiner la microstructure, de réduire les ségrégations et la densité inclusionnaire. Les procédés de refusion utilisent soit un traitement sous vide, comme dans les procédés VAR (Vacuum Arc Remelting) ou VIM (Vacuum Induction Melting), soit un laitier spécial comme dans le procédé ESR (Electroslag Refining) Pour leur part, les aciers inoxydables à très faible teneur en carbone, azote et hydrogène, sont le plus souvent élaborés par fusion au four électrique suivie d'un traitement AOD ou VOD (Argon ou Vacuum Oxygen Decarburizing).

III.2. ÉLABORATION DE LA FONTE

III.2.1. Matières premières

- Minerais de fer

Le fer s'y trouve essentiellement combiné sous forme d'oxydes : oxyde ferrique Fe_2O_3 ou oxyde magnétique Fe_3O_4 (magnétite).

Le fer en sera donc extrait par réduction.

L'abondance de la gangue détermine la richesse du minerai : 30% de fer pour les minerais à faible teneur, 60% de fer pour les minerais riches.

La gangue est formée de silico-aluminates de calcium et de magnésium et de phosphate de calcium. La composition de la gangue varie selon la provenance du minerai.

- Fondants

Ils permettent d'éliminer la gangue sous forme de laitier fusible. Ils sont calcaires si la gangue est siliceuse ou alumineuse et inversement. Certains mélanges de minerai sont autfondants et ne nécessitent pas d'addition.

III.2.2. Préparation des charges

Les principaux progrès réalisés dans les hauts fourneaux modernes ont visé l'amélioration de leur productivité, la reproductibilité de l'analyse du métal produit, la réduction de la mise au mille du coke. Ces améliorations souvent considérables ont été obtenues grâce à une préparation soignée des charges.

Les matières premières de la charge doivent :

- répondre à des contraintes chimiques par analyse précise du lit de fusion ;
- présenter une granulométrie compatible avec un bon écoulement dans la cuve du haut fourneau,
- présenter des caractéristiques physico-chimiques bien déterminées : réductibilité (NF A 20-204), résistance aux chocs thermiques, résistance à l'écrasement (NF A 20-202).

On parvient à ce but par :

- a) une préparation mécanique des minerais, suite de concassages et de criblages ;
- b) une homogénéisation pour fournir un mélange aussi constant que possible à partir de minerais de diverses origines ;
- c) l'agglomération d'un mélange minerai + coke + castine porté vers 1 200 °C en surface, puis fritté par aspiration d'air à travers le mélange après allumage (figure 4) ;

En bout de chaîne, un brise-mottes donne des morceaux de 250 mm qui sont broyés puis criblés jusqu'à 20, 12 et 5 mm. L'aggloméré constitue souvent plus de 75 % des produits ferreux de la charge.

On arrive ainsi à substituer au minerai cru un matériau artificiel répondant aux spécifications désirées.

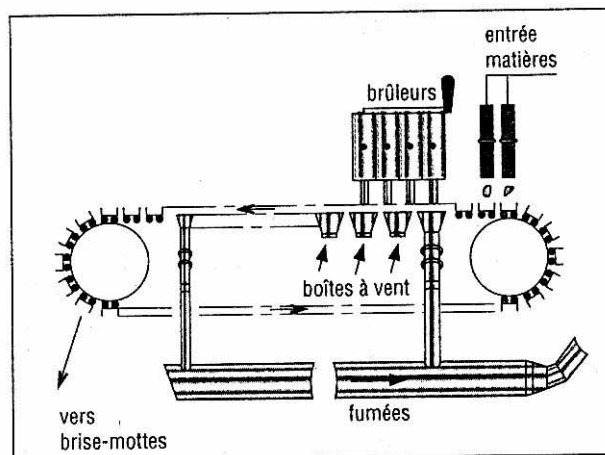


Figure 14 – Chaîne d'agglomération

III.2.3. Généralités sur le haut fourneau (figure 15)

Le haut fourneau est un réacteur à lit consommable à contre-courant. Les réactions principales qui s'y déroulent sont :

- les réactions de réduction des oxydes ;
- les réactions d'échange entre le métal et le laitier.

La figure 15 donne le schéma d'un haut-fourneau et précise les divers flux de matières.

Le lit de fusion comprend des couches alternées de coke (450 kg.t^{-1} de fonte), de minerai aggloméré (1650 kg.t^{-1} de fonte) et d'une faible quantité de fondant. Le coke après combustion, sous l'effet du « vent » chaud soufflé aux tuyères (1250°C), conduit à la fusion de la charge et à la réduction du minerai. Les gaz de gueulard dépoussiérés sont utilisés pour préchauffer le « vent » dans des récupérateurs de chaleur. Les temps de séjour moyens sont d'environ 8 heures pour les solides et 3 secondes pour les gaz.

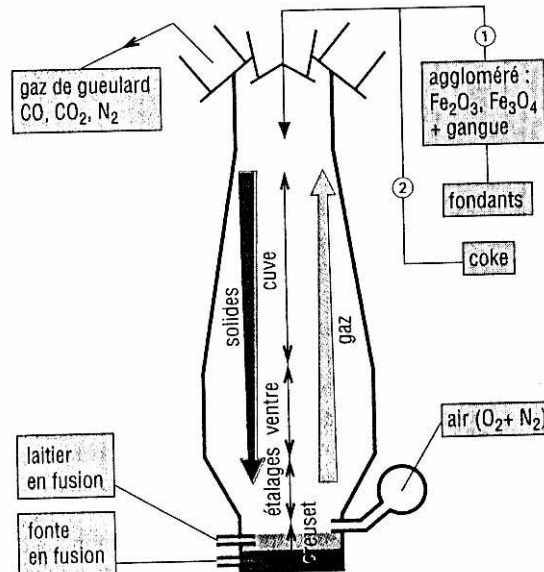


Figure 15 – Schéma d'un haut fourneau

III.2.4. Etude théorique du haut fourneau (HF)

L'étude expérimentale du HF en régime permanent a montré qu'en marche avec du minerai aggloméré il existe une zone de réserve thermique à température quasi uniforme T_R dans laquelle est incluse une zone de réserve chimique où l'état d'oxydation des gaz et des solides reste pratiquement constant.

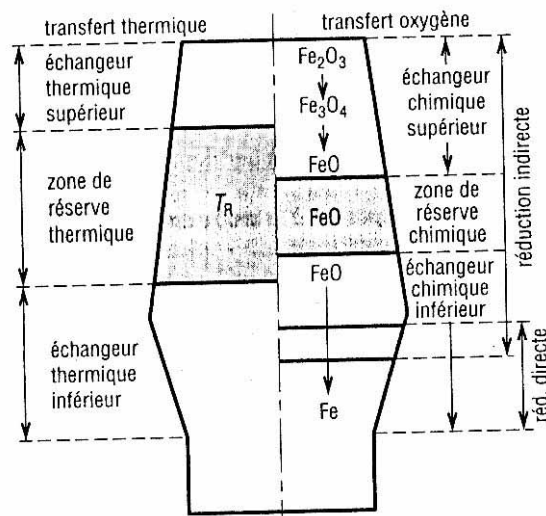


Figure 16 – Echanges thermiques et chimiques dans un haut fourneau

III.3. ÉLABORATION DE L'ACIER

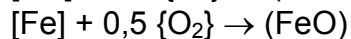
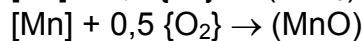
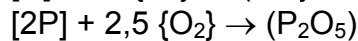
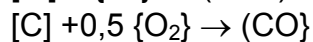
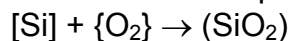
III.3.1. Principes généraux

Afin d'optimiser le processus global, l'élaboration de l'acier comprend deux étapes successives.

- Une première étape conduit à l'obtention d'acier brut, encore appelé acier «sauvage». Elle est pratiquée :
 - soit en convertisseur, à partir de la fonte liquide dans les aciéries à l'oxygène ;
 - soit au four électrique, à partir de ferrailles dans les aciéries électriques.
- Une deuxième étape a pour but d'affiner l'acier brut et d'atteindre la composition et la qualité finales désirées. Elle est pratiquée dans une station d'affinage et utilise entre autres techniques celle de l'affinage en poche.

- Chimie des processus primaires

Le passage du bain liquide initial à l'acier final nécessite une diminution des teneurs de tous les éléments par oxydation partielle selon les réactions suivantes qui sont toutes exothermiques :



[] dans le métal; () dans le laitier

Le carbone s'élimine sous forme gazeuse et la turbulence créée, favorise l'élimination de l'hydrogène et de l'azote présents dans le métal.

La silice formée se combine aux oxydes basiques MnO et FeO et à l'oxyde de calcium CaO introduit en donnant une scorie qui monte à la surface du bain.

L'oxyde de phosphore est réductible par le carbone mais la présence de CaO permet la formation de phosphate de calcium moins réductible. Une bonne déphosphoration exige donc un milieu très oxydant et très basique.

- Désoxydation

La désoxydation est l'opération qui affecte le plus profondément les qualités du métal (densité inclusionnaire, composition du métal, etc.) et donc ses caractéristiques de mise en oeuvre (usinabilité, formabilité, soudabilité, résistance à la fatigue, à la rupture et à la corrosion, etc.) .

La désoxydation s'opère :

- soit par traitement sous vide qui provoque le déplacement de l'équilibre global :

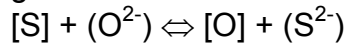
$$[\text{C}] + [\text{O}] \rightleftharpoons \{\text{CO}\} ;$$
 il se fait après ajustement de la teneur en carbone pour compenser la perte de ce dernier ;
- soit par l'introduction dans le métal liquide de désoxydants comme le silicium ou l'aluminium.

Dans le premier cas, la désoxydation se fait sous forme gazeuse. Dans le second cas, elle donne naissance à des inclusions de type oxydes qui s'éliminent au moins partiellement en passant dans le laitier.

- **Désulfuration**

La demande croissante d'aciers à très faible teneur en soufre (pouvant aller jusqu'à 0,001 %) a conduit à parfaire l'opération de désulfuration.

Elle met en oeuvre des échanges entre le métal et un laitier basique. La réaction globale de désulfuration s'écrit :



Elle montre que, pour un laitier de capacité en sulfure déterminée, la désulfuration de l'acier est d'autant meilleure que la désoxydation de l'acier liquide est plus poussée.

On peut également injecter du calcium dans l'acier liquide sous forme de siliciure.

L'action du calcium pourrait être due au fort brassage provoqué par sa vaporisation.

Le calcium permet également de contrôler la morphologie des inclusions de sulfures présentes dans le produit final.

III.3.2. Procédés primaires

- **Filière fonte: aciéries à l'oxygène**

• **Désulfuration en poche**

À la sortie du haut fourneau, la fonte subit une première désulfuration par la chaux, le carbure de calcium ou le magnésium introduits dans la poche-tonneau qui sert à son transfert. Bien que les oxydes de calcium et de magnésium soient plus stables que les sulfures correspondants, la teneur en oxygène dans une fonte à 4 % C à la température de 1600 °C n'est que de quelques ppm et la désulfuration en poche est très efficace. Les teneurs en soufre peuvent atteindre 0,01 à 0,02 %. La scorie est éliminée par un décrassage soigné afin d'éviter au soufre d'être réincorporé au métal dans l'étape suivante.

• **Élaboration de l'acier brut**

La fonte liquide, à une température moyenne de 1250 °C, est introduite dans un convertisseur sur un lit de ferrailles à refondre afin de limiter la température du bain à 1650 °C malgré l'exothermicité des réactions d'oxydation. De l'oxygène pur est insufflé sous pression en même temps qu'est introduite de la chaux sous forme massive ou sous forme de poudre. Les diverses techniques se distinguent par le mode d'apport de l'oxygène et de brassage du bain :

- par le bec de la cornue à l'aide de lances refroidies à l'eau dans les procédés LD (Linz Donowitz) et OLP (oxygène lance-poudre) (figure 17) ;

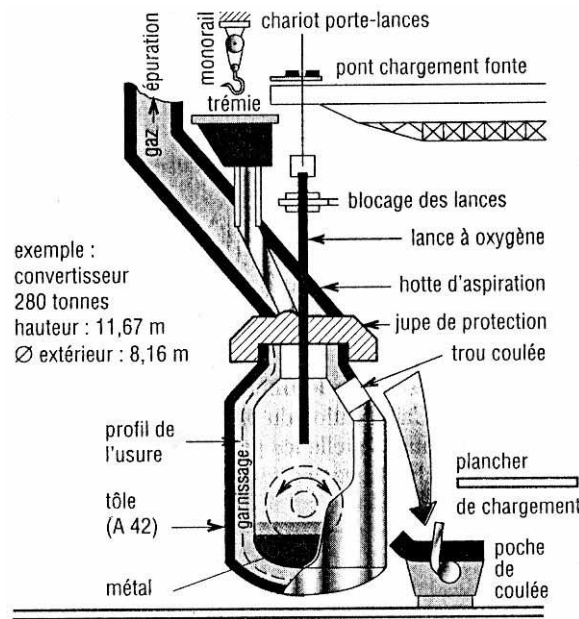


Figure 17 – Convertisseur LD/OLP

- par des tuyères protégées placées au fond du convertisseur dans le procédé Q-BOP (Quiet Blowing Oxygen Process) ;
- insufflation par le fond d'un mélange gazeux (CO_2 , O_2 , Ar, N_2), simultanément à l'apport d' O_2 par la lance dans le procédé STB (Sumitomo Top and Bottom).

Cette dernière configuration semble la plus répandue dans le monde actuellement. Elle permet un meilleur brassage du bain et la formation d'un laitier plus proche de l'équilibre thermodynamique.

La mesure du débit et de la composition des fumées permet le contrôle dynamique du soufflage en fin d'opération et son arrêt automatique quand la teneur en carbone désirée est atteinte. Il existe en effet une relation entre la vitesse de décarburation du bain et sa teneur en carbone. La durée totale d'une opération est de l'ordre de 30 minutes.

- Filière ferrailles: aciéries électriques

La filière de refusion des ferrailles utilise des fours à arcs munis d'une sole réfractaire sur laquelle sont placées les matières à refondre. Les ferrailles sont préchauffées à 250 - 300 °C dans un four de réchauffage utilisant les gaz produits ou, de manière plus efficace, en employant deux fours électriques jumelés fonctionnant en alternance. Les fours ont des puissances qui peuvent atteindre ou dépasser 800 kVA.t^{-1} . L'utilisation généralisée de parois refroidies à l'eau permet d'augmenter la durée du revêtement et de réduire la consommation des électrodes. De même, diverses techniques de brassage du bain récemment introduites permettent d'obtenir un laitier très proche de l'équilibre thermodynamique ayant des teneurs en FeO et MnO relativement plus faibles, donc une rétention plus importante de manganèse dans l'acier.

La production est de l'ordre de 80 à 100 t.h^{-1} . L'opération de fusion est de plus en plus souvent assistée par ordinateur à partir d'algorithmes utilisant les données

fournies par des capteurs de température et de composition dans le but de contrôler la teneur en carbone et la température de l'acier produit.

Le four électrique apparaît essentiellement comme un appareil de refusion, et la préparation de la charge constituée par des ferrailles de diverses origines est fondamentale. Les teneurs en éléments résiduels comme le cuivre, l'étain, le chrome, le nickel, etc., sont particulièrement surveillées.

Contrairement au procédé à l'oxygène, dans lequel la teneur initiale en carbone est élevée et voisine de 4 %, dans le procédé électrique la teneur initiale en carbone n'est que de 0,4 à 0,5 % supérieure à celle visée. Cependant, cet excès de carbone est nécessaire pour produire en quantité suffisante le monoxyde de carbone permettant par entraînement d'éliminer l'hydrogène et l'azote.

La figure 8 représente schématiquement une installation électrique et les diverses étapes de l'opération.

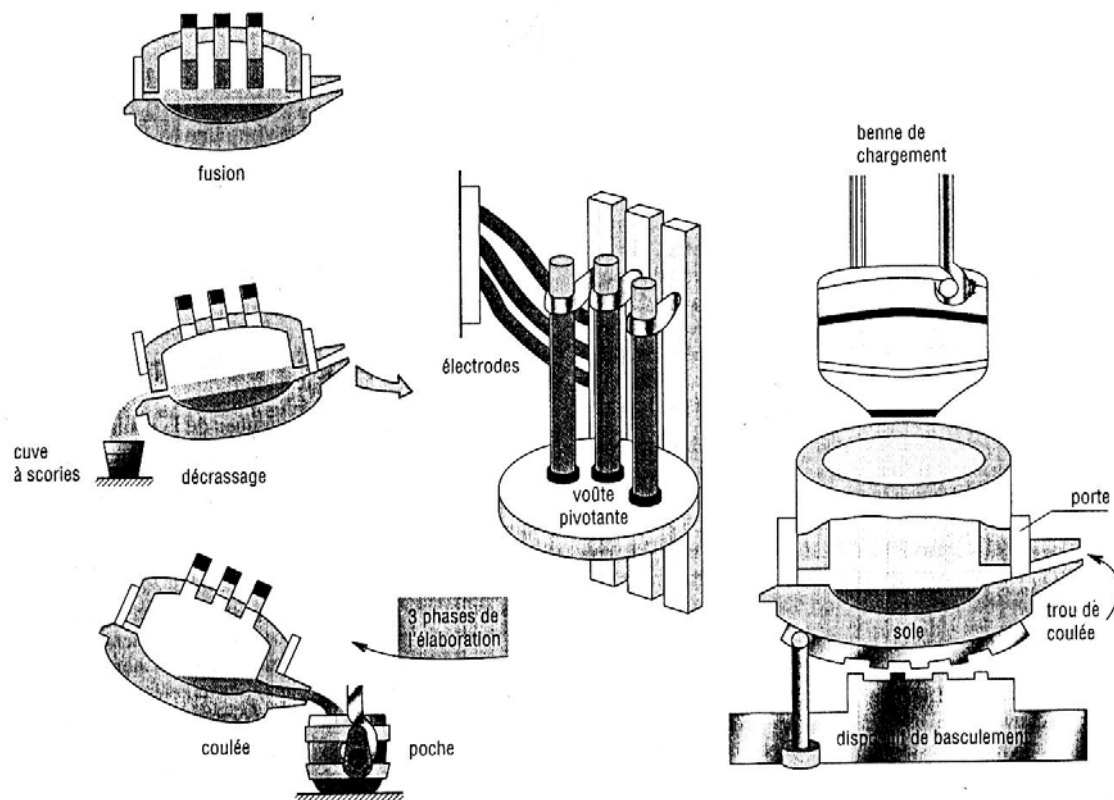


Figure 18 – Four électrique à arc. Diverses phases de l'élaboration

- Conclusion

L'utilisation du convertisseur et du four électrique est limitée aux opérations pour lesquelles ils sont les plus performants : la décarburation, la déphosphoration et le réglage sommaire de la température du bain. Les teneurs en silicium et en soufre diminuent également au cours de cette étape. La composition de l'acier brut qu'ils produisent n'est pas encore correcte. En outre, le bain est beaucoup trop oxydé, la teneur en oxygène dissous pouvant atteindre 0,05 à 0,1 %. La mise à nuance, la désoxydation et la désulfuration finales sont réalisées dans la station d'affinage.

III.3.3. Procédés secondaires

- Affinage en poche

La demande croissante d'aciers de haute qualité a conduit au développement de l'affinage en poche qui est basé essentiellement sur les traitements de dégazage sous vide, combinés ou non avec l'action de laitiers synthétiques et le réchauffage du bain liquide.

La désoxydation a lieu au cours de cette étape par l'introduction d'additions désoxydantes comme le ferro-silicium ou l'aluminium: on obtient des aciers calmés au silicium ou à l'aluminium.

La mise à nuance a lieu au cours de cette étape par additions de ferro-alliages ou autres tels que Fe-Mn, Fe-Nb, Fe-V, Si-Mn, etc. L'addition de manganèse permet de piéger le soufre sous forme de MnS et d'éviter la formation de FeS qui constitue avec le fer un eutectique à bas point de fusion dont la présence compromettrait l'aptitude au travail à chaud de l'acier.

La séquence des opérations doit être soigneusement contrôlée et la variété des procédés l'interdit toute description détaillée.

La figure 19 donne un aperçu des diverses méthodes, utilisées seules ou en combinaison.

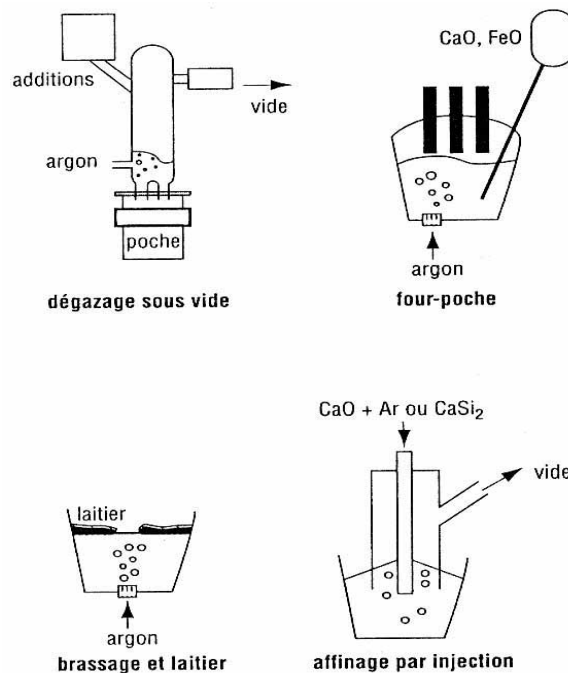


Figure 19 – Méthode d'affinage en poche

Après traitement en poche, la teneur totale des éléments résiduels S, P, O, N, H peut atteindre des niveaux très bas, de l'ordre de 50 ppm. L'utilisation de l'affinage par injection permet de convertir les oxydes et sulfures résiduels en aluminates de calcium à bas point de fusion et contenant du sulfure de calcium. Le traitement au calcium permet d'obtenir des inclusions arrondies au lieu des inclusions allongées de MnS ordinairement présentes dans les aciers après laminage et très dommageables pour certaines applications.

ppm – partie par million

III.4. COULÉE DE L'ACIER

La coulée en lingotière a pratiquement disparu. La coulée continue est presque universellement adoptée. La figure 20 schématise une installation de coulée continue. Elle permet de réaliser des blooms pour la production des produits longs et des brames pour la production des produits plats. Diverses contaminations, comme des infiltrations d'air, peuvent conduire à la réoxydation partielle du métal lors de son transfert entre la poche et le répartiteur de l'installation de coulée, et donc à la génération de nouvelles inclusions d'oxydes. La protection par une couverture d'argon, des configurations particulières du répartiteur et des temps de séjour relativement longs dans celui-ci favorisent la décantation des inclusions «accidentelles» de diamètre compris entre 50 et 200 μm . Enfin, la présence d'un laitier protecteur à l'entrée de la lingotière permet de drainer certaines inclusions non éliminées précédemment.

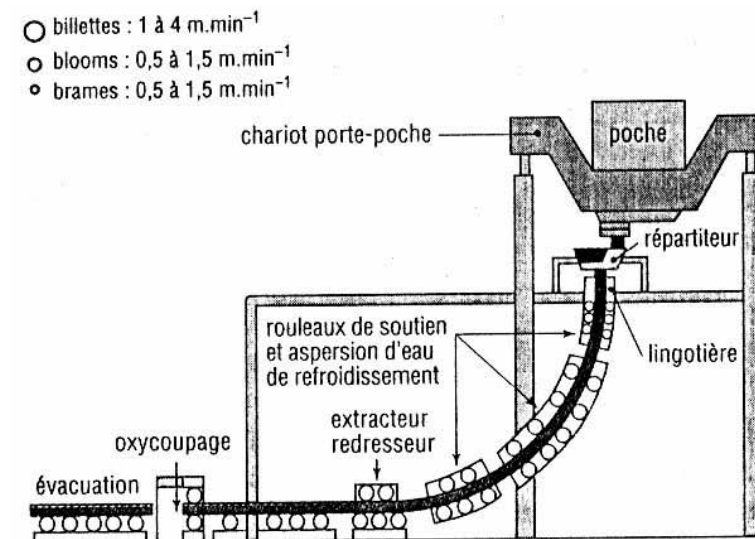


Figure 20 – Installation de coulée continue

III.5. MISE EN FORME DE L'ACIER

À part le moulage, cas particulier de la coulée, la mise en forme de l'acier à l'état solide se fait par laminage. Le laminage consiste en une série d'opérations transformant les brames ou les blooms obtenus par coulée continue en divers produits, de formes et de dimensions déterminées.

Un laminoir est composé de plusieurs cages comprenant des cylindres entre lesquels passe le métal qui y subit un écrasement progressif. Les cylindres tournent en sens inverses et sont groupés par paires. Ils sont lisses pour l'obtention de produits plats, et cannelés pour les autres formes. Les vitesses de sortie peuvent atteindre 90 km.h⁻¹ pour les tôles et 360 km. h⁻¹ pour les fils.