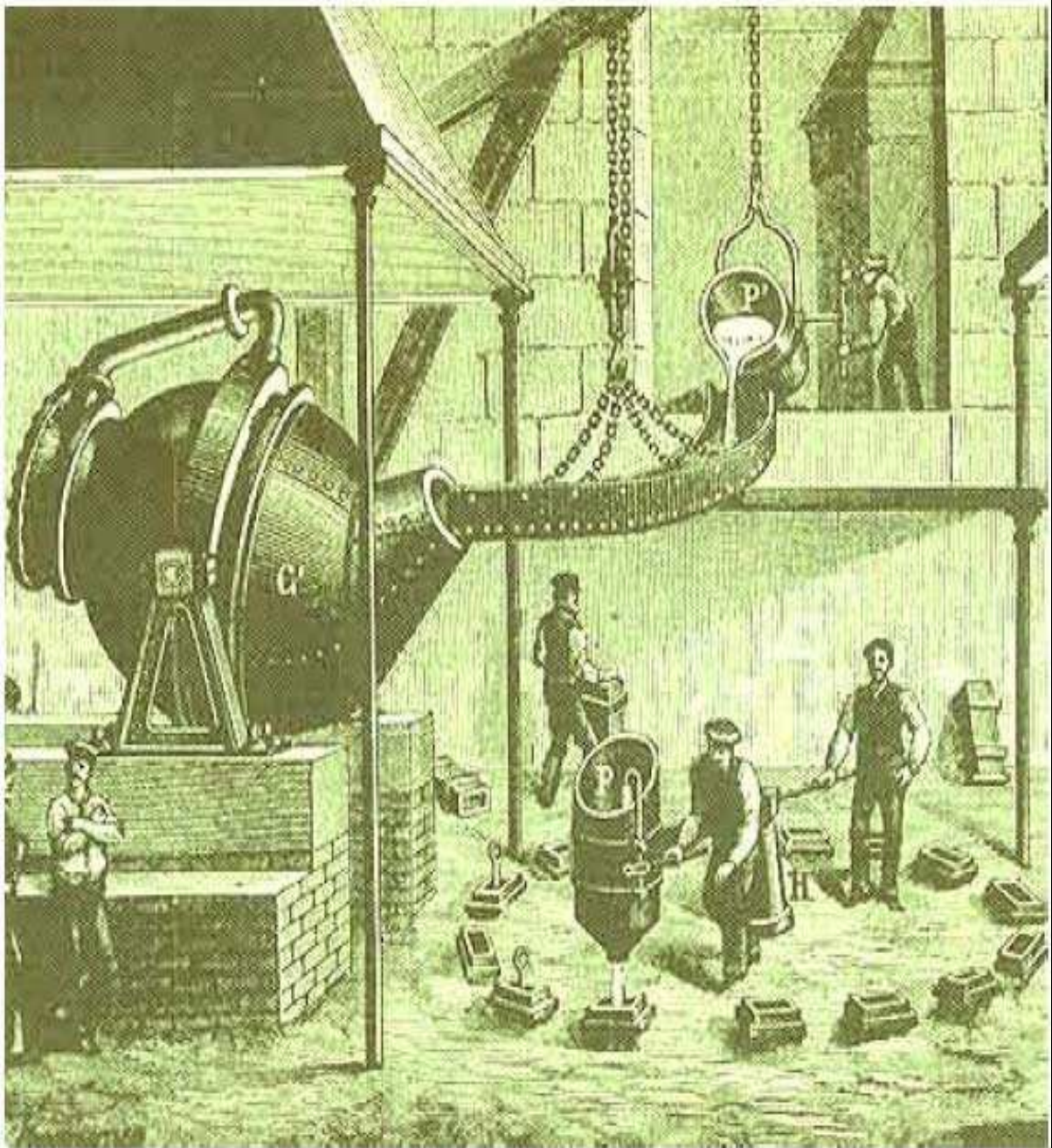
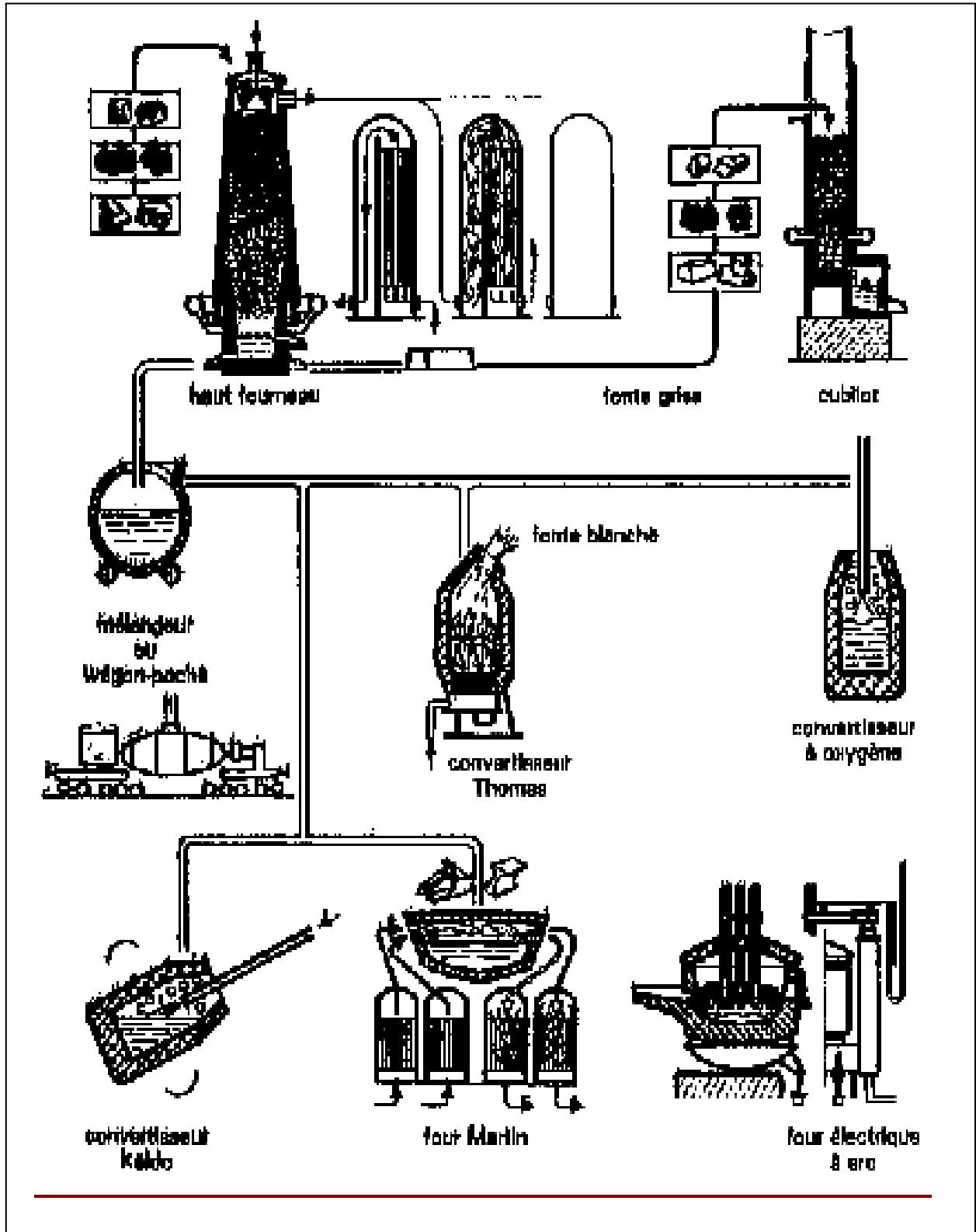


S.BENSAADA

**ELABORATION DES METAUX
FERREUX (FONTES ET ACIERS)**





SOMMAIRE

	page
1. Généralités	1
2. Matière minérale	2
2.1 Etats de la matière	2
2.2 Constitution de la matière	3
2.3 Formation de la matière	5
2.4 Minerai	6
2.5 Extraction des métaux	7
2.6 Propriétés caractéristiques des métaux	7
3. Notions de cristallographie	9
3.1 Corps cristallins et corps amorphes	11
3.2 Propriétés des corps cristallins	12
3.3 Structure réticulaire	14
3.4 Systèmes cristallins (les.14 réseaux de Bravais)	17
3.5 Densité du reseau	22
3.6 Notions des plans ou faces cristallographiques	23
3.7 Indices de directions	25
Exemples avec solutions	26
4. Alliages métalliques	37
4.1 Structures des alliages	37
4.1.1 Solution solide de substitution	37
4.1.2 Solution solide d'insertion	38
4.1.3 Combinaison chimique	39
4.1.4 Mélange mécanique	39
5. Élaboration des métaux	40
5.1 Élaboration des métaux ferreux	40
5.1.1 Élaboration de la fonte	42
5.1.1 Matières premières	42
5.1.2 Le haut fourneau	44
5.1.3 Flux de matière dans une usine métallurgique	47
5.1.4 Processus métallurgique dans le H-F	47
5.1.5 Les fontes du H-F	50
5.1.6 Formation du laitier	51
5.2 Elaboration de l'acier	51
5.2.1 Processus d'élaboration de l'acier	52
5.2.2 Composition chimique de l'acier	53
5.2.2.1 Influence des éléments chimiques constants	54
5.2.2.2 Influence des éléments d'alliages	56
5.2.3 Périodes de la marche d'une opération d'affinage	59
5.3 Procèdes d'élaboration de l'acier	61
5.3.1 Procédé par soufflage	62
5.3.1.1 Convertisseur Bessmer et Thomas	62
5.3.1.2 Caractéristiques du procédé Bessmer	62
5.3.1.3 Caractéristiques du procédé Thomas	67
5.4 Convertisseur à oxygène	71
5.4.1 Convertisseur à oxygène LD et.LDAC	71

5.4.2	Procédé KALDO	75
5.4.3	Les aciers à oxygène	76
5.5	Le procédé Martin	76
5.5.1	Types du procédé Martin	77
5.5.2	Marche de l'opération	78
5.5.3	Affinage du bain métallique	79
5.5.4	Les aciers Martin	80
5.6	Le four électrique	80
5.6.1	Type de fours électriques	80
5.6.2	Le four HEROULT	81
5.6.3	Les principales matières premières du four électrique	82
5.6.4	Marche d'une opération dans le four électrique	84
5.6.5	Classification des aciers le procédé d'affinage et % C	85
5.7	Coulée de l'acier	85
5.7.1	Coulée en lingotières	86
5.7.2	La coulée continu	88
5.8	Différents types de coulées selon le degré de désoxydation	90
5.8.1	La coulée calmée	90
5.8.2	La coulée effervescente	92
5.8.3	La coulée semi-calmée	93
5.9	Coulée sous vide	93
5.10	Défauts de lingots	93
6	Diagramme Fer-carbone	97
6.1	Le fer et ses caractéristiques	97
6.2	Le carbone et ses caractéristiques	100
6.3	Diagramme d'équilibre Fer-carbone	101
6.3.1	Les points caractéristiques du diagramme	102
6.3.2	Définition des constituants	'04
6.3.3	Les transformations	111
	- Aciers hypoeutectiques	112
	- Aciers eutectoides	116
	- Aciers hypereutectoides	118
	- Fontes hypoeutectiques	121
	- Fontes eutectiques	122
	- Fontes hypereutectiques	123
6.4	Détermination de la position des composants de la structure	123
6.5	Diagramme d'équilibre Fer-graphite	129
7	Désignation normalisée des aciers et fontes	132
7.1	Désignation des aciers	132
7.1.1	Désignation des aciers ordinaires sans traitements thermiques	133
7.1.2	Désignation des aciers pour traitements thermiques	135
7.1.3	Désignation des aciers alliés	136
7.1.3.1	Désignation des aciers faiblement alliés	137
7.1.3.2	Désignation des aciers fortement alliés	138
7.2	Désignation des fontes	139
7.2.1	Désignation des fontes non alliées	140
7.2.2	Désignation des fontes alliées	141
7.2.3	Désignation des fontes malléables	141

1. Généralités

Comme on le sait l'homme préhistorique n'utilisait que les cailloux pour satisfaire ses besoins matériels, c'était l'âge de la pierre, ensuite découvrit l'argile, matériau mou et malléable qui était transformé après cuisson en matériau indéformable et imperméable.

Vint ensuite l'âge du fer et du bronze qui forme en fait l'âge des métaux. Les métaux occupent une place importante aujourd'hui comme avant du fait qu'ils se prêtent à tous les usages (outils, armes, pièces mécaniques^ divers équipements etc.).

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

Déjà au 15^{ème} siècle on préparait empiriquement des alliages binaires qui sont faciles à travailler et plus résistants que leurs constituants, même on savait déjà expérimentalement comment durcir un métal en le trempant ou en le forgeant, mais l'apport scientifique à cette époque était très limité.

C'est au 20^{ème} siècle que les chercheurs ont pu établir les bases essentielles et les techniques fondamentales (analyses chimiques, métallographie, etc..) qui ont permis de progresser efficacement dans l'élaboration de nouveaux matériaux.

Le dernier siècle est caractérisé par l'apparition de beaucoup d'alliages, des matériaux réfractaires, des matériaux de construction et surtout les composés organiques (plastique, caoutchouc, résines, colles, goudron etc...), et surtout on a vu évoluer en force dans le domaine de la haute technologie, les céramiques techniques et les matériaux composites qui ont pris l'essor que l'on connaît actuellement^ outre cela il y a amélioration de la qualité des matériaux, réduction des poids des pièces mécaniques et de leur prix de revient.

Malgré toutes ces nouveautés dans le domaine des matériaux, l'acier et la fonte demeureront les métaux les plus utilisés dans l'industrie.

Je suis persuadé que cet ouvrage est susceptible d'être amélioré en de nombreux points. Je serais très reconnaissant aux lecteurs qui voudront bien faire part de leurs suggestions.

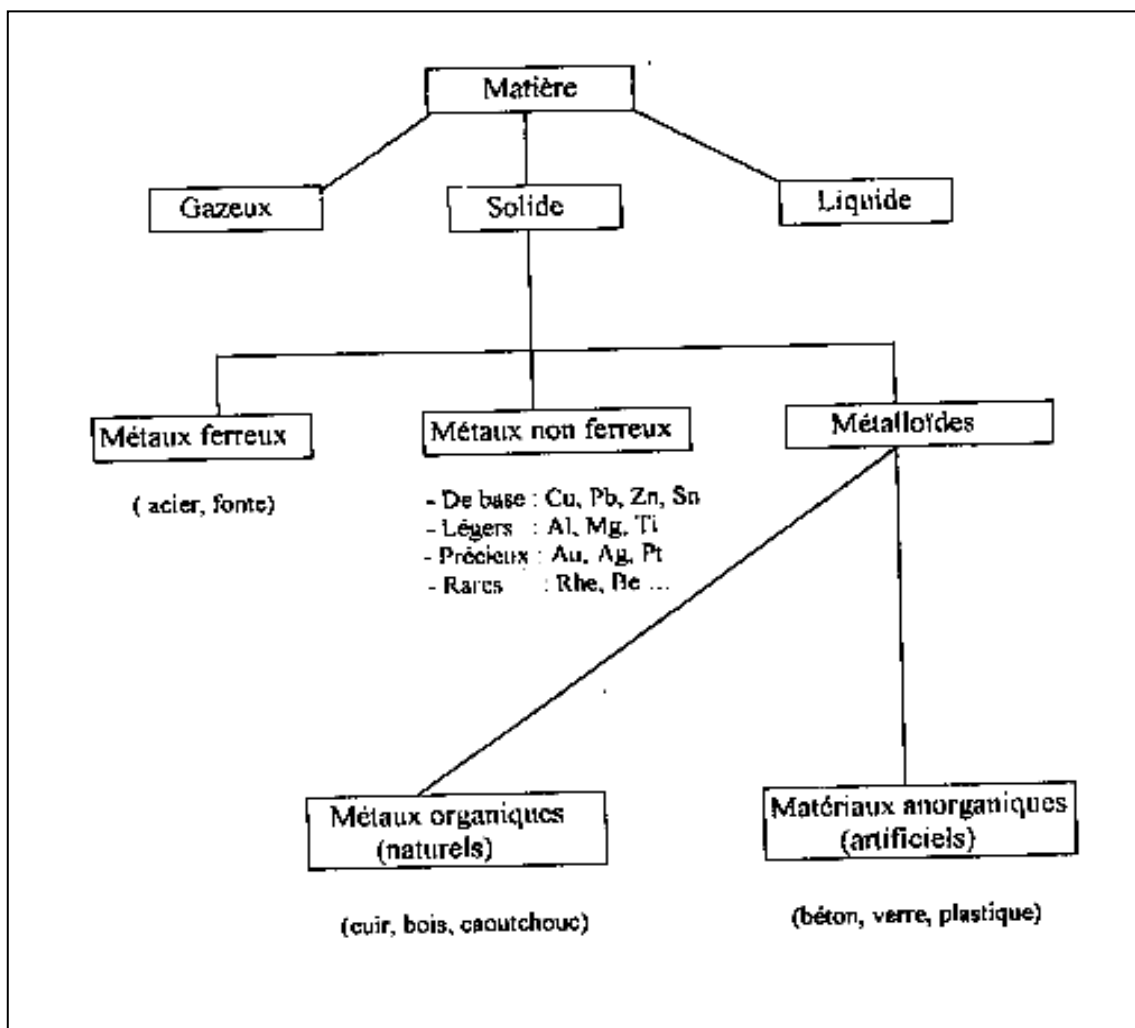
L'auteur

Dr.S.Bensaada

2. Matière minérale

2.1 Etats de la matière

D'après l'ancienne classification, la matière se présente dans la nature sous trois états physiques (liquide, gazeuse, solide).



2.1.1 .L'état gazeux

C'est l'état dans lequel les molécules sont séparées les unes des autres par des distances grandes par rapport à leur diamètre. Il est impossible de déterminer à un instant donné la position exacte et la vitesse de chacune des particules. Autrement dit les molécules possèdent une de translation, de rotation et de vibration (mouvement chaotique désordonné).

L'état gazeux est caractérisé par la non conservation du volume, SQWS forme propre, grande compressibilité, expansibilité, élasticité. La plus part des gaz peuvent changer d'état sous l'action de la chaleur et de la compression. Leur densité est faible et variable avec la température.

2.1.2.L'état liquide

Il est plus ordonné que l'état gazeux. Chaque atome limite, par le volume qu'il occupe, les positions que peuvent prendre ses voisins. Les molécules de liquide possèdent une liberté de translation, rotation et vibration. L'état liquide est caractérisé par sa fluidité et sa structure désordonnée comme le gaz. Son empilement aléatoire de particules se traduit par une coordinence variable et une faible compacité.

Caractéristiques : surfaces libre apparente, faible compressibilité, sans forme propre, conservation du volume.

2.1.3.L'état solide


Il est caractérisé par une disposition (arrangement) ordonnée des atomes suivant un réseau tridimensionnel dit cristallin régi par des forces de cohésion. C'est un état de compacité maximale et de coordinence bien définie. Les atomes ou ions sont animés de vibrations.

Caractéristiques : rigidité, très faible compressibilité, élasticité, forme propre, conservation de volume.

2.2 .Constitution de la matière

La matière est constituée de particules très petites appelées molécules. L'atome est la plus petite partie de la matière, il est constitué de noyau autour duquel gravitent des électrons sur des couches électroniques (K, L, M, N, O, P) et qui portent un certain nombre d'électrons (2, 8, 16, 32 etc.). La couche périphérique est la plus importante, elle définit les propriétés chimiques des atomes.

1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																				
1	1,0																	2	4,0																																			
H	Hydrogène																	He	Hélium																																			
3	6,94	4	9,0																	5	10,8	6	12,0	7	14,0	8	16,0	9	19,0	10	20,2																							
Li	Lithium	Be	Béryllium																	B	Bore	C	Carbone	N	Azote	O	Oxygène	F	Fluor	Ne	Néon																							
11	23,0	12	24,3																	13	27,0	14	28,1	15	31,0	16	32,1	17	35,5	18	39,9																							
Na	Sodium	Mg	Magnésium																	Al	Aluminium	Si	Silicium	P	Phosphore	S	Soufre	Cl	Chlore	Ar	Argon																							
																			19	39,1	20	40,1	21	45,0	22	47,9	23	50,9	24	52,0	25	54,9	26	55,8	27	58,9	28	58,7	29	63,5	30	65,4	31	69,7	32	72,6	33	74,9	34	79,0	35	79,9	36	83,8
K	Potassium	Ca	Calcium	Sc	Scandium	Ti	Titane	V	Vanadium	Cr	Chrome	Mn	Manganèse	Fe	Fer	Co	Cobalt	Ni	Nickel	Cu	Cuivre	Zn	Zinc	Ga	Gallium	Ge	Germanium	As	Arsenic	Se	Sélénium	Br	Brome	Kr	Krypton																			
37	85,5	38	87,6	39	88,9	40	91,2	41	92,9	42	95,9	43	98,1	44	101,1	45	102,9	46	106,4	47	107,9	48	112,4	49	114,8	50	118,7	51	121,8	52	127,6	53	126,9	54	131,3																			
Rb	Rubidium	Sr	Strontium	Y	Yttrium	Zr	Zirconium	Nb	Niobium	Mo	Molybdène	Tc	Technétium	Ru	Ruthénium	Rh	Rhodium	Pd	Palladium	Ag	Argent	Cd	Cadmium	In	Indium	Sn	Étain	Sb	Antimoine	Te	Tellure	I	Iode	Xe	Xénon																			
55	132,9	56	137,3	57	138,9	72	178,5	73	180,9	74	183,8	75	186,2	76	190,2	77	192,2	78	195,1	79	197,0	80	200,6	81	204,4	82	207,2	83	209,0	84	(209)	85	(210)	86	(222)																			
Cs	Césium	Ba	Barium	La	Lanthane	Hf	Hafnium	Ta	Tantale	W	Tungstène	Re	Réhenium	Os	Osmium	Ir	Iridium	Pt	Platine	Au	Or	Hg	Mercure	Tl	Thallium	Pb	Plomb	Bi	Bismuth	Po	Polonium	At	Astato	Rn	Radon																			
87	(223)	88	(226)	89	(227)	104	(261)	105	(262)	106	(266)	107	(264)	108	(269)	109	(268)	110	(269)	111	(272)	112	(277)		114			116					118																					
Fr	Francium	Ra	Radium	Ac	Actinium	Rf	Rutherfordium	Db	Dubnium	Sg	Seaborgium	Bh	Bérium	Hs	Hassium	Mt	Méhvérium	Uun	Ununbium	Uuu	Ununtrium	Uub	Ununseptium		Uuq	Unquadium		Uuh	Unhassium				Uuo	Unoctium																				
						58	140,1	59	140,9	60	144,2	61	(145)	62	150,4	63	152,0	64	157,4	65	158,9	66	162,5	67	164,9	68	167,3	69	168,9	70	173,0	71	175,0																					
						Ce	Cérium	Pr	Praseodyme	Nd	Néodyme	Pm	Prométhium	Sm	Samarium	Eu	Europium	Gd	Gadolinium	Tb	Terbium	Dy	Dysprosium	Ho	Holmium	Er	Erbium	Tm	Thulium	Yb	Ytterbium	Lu	Lutétium																					
						90	232,0	91	231,0	92	238,0	93	(237)	94	(244)	95	(243)	96	(247)	97	(247)	98	(251)	99	(254)	100	(257)	101	(258)	102	(259)	103	(260)																					
						Th	Thorium	Pa	Protactinium	U	Uranium	Np	Néptunium	Pu	Plutonium	Am	Américium	Cm	Curium	Bk	Berkélium	Cf	Californium	Es	Einsteinium	Fm	Fermium	Md	Méhvérium	No	Néobium	Lw	Lavrencium																					



Dmitri Ivanovitch Mendéléïev (1834 - 1907) est un chimiste russe connu pour ses travaux sur la classification périodique des éléments. En 1869, il publia une première version de son tableau périodique des éléments appelé aussi tableau de Mendéléïev. Il déclara que les éléments chimiques pouvaient être arrangés selon un modèle qui permettait de prévoir les propriétés des éléments non encore découverts.

6 →

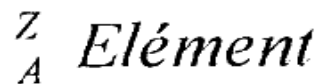
7 →

Les éléments ayant cette couche saturée sont très stables, les autres éléments tendent à acquérir cette stabilité soit :

a) en cédant des électrons, le cas des métaux qui sont des éléments électropositifs (ils libèrent facilement les électrons de la couche périphérique).

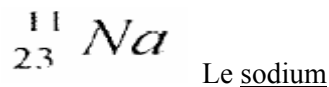
b) Ou en gagnant des électrons, le cas des métalloïdes, qui sont électronégatifs (ils ont tendance à compléter leurs couches périphériques). Le nombre d'électrons cédés par les métaux ou le nombre d'électrons absorbés par les métalloïdes définit le nombre de liaison ou la valence. La stabilité des éléments est permanente si l'atome contient sur la dernière couche :

- 2 électrons pour l'hélium.
- 8 électrons pour le reste. Exemple :



Z : Nombre de protons —>• Numéro atomique ou nombre d'électrons planétaires.

A : Nombre de masse —▶ protons + électrons.



L'atome constitué de 23 particules composées de 11 protons et de $(23 - 11) = 12$ neutrons.

Le nombre d'électrons de la couche énergétique (périphérique) externe des atomes métalliques est peu grand, la liaison entre les électrons extérieurs et l'atome est caractérisée par le travail de libération des électrons (potentiel d'ionisation) c'est à dire le travail nécessaire pour arracher les électrons à un atome isolé.

Si pour les métaux le potentiel d'ionisation varie de 4,4 à 9 eV, dans le cas de l'ionisation unitaire (c-à-d la libération d'un seul électron), pour les corps non métalliques il est généralement supérieur à 10 eV pour les éléments intermédiaires Si, Ge, As, Se, Te il est de 8 à 10 eV.

2.3. Formation de la matière

Les liaisons entre atomes pour la formation de molécules peuvent se réaliser soit par l'abandon d'électrons d'un atome à un autre (métal—▶ métalloïde), soit par la mise en commun d'électrons périphériques pour compléter leurs dernières couches (liaison covalente plastique).

En général les liaisons interatomiques sont directement liées à la couche périphérique, elles sont du type ionique, covalente ou métallique.

a) Liaison ionique : dans cette liaison il y a transfert d'électrons d'un métal vers un métalloïde, c'est une liaison réalisée par attraction électrostatique.

b) Liaison covalente : Les atomes mettent en commun une paire d'électrons pour compléter leurs couches d'électrons.

c) Liaison métallique : c'est la liaison la plus importante, elle est formée par la combinaison de la liaison ionique et de la liaison covalente. Par le fait que les électrons de liaison sont libres, on considère le métal comme un empilement d'ions positifs entouré par un nuage d'électrons, les électrons libres expliquent le phénomène de conductibilité thermique et électrique.

2.4. 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 ($Al_4(SiO_4)$).

La possibilité d'exploitation économique d'un minerai dépend de la teneur du métal de base, de l'abondance ou de la rareté du métal.

Industriellement on qualifie de minerai tout produit minéral dont on peut extraire un métal ou un alliage à un prix de revient convenable. Le mot minerai est donc un terme économique et non minéralogique, la teneur minimale des minerais exploitables dépend essentiellement de la valeur du métal. Ainsi un quartz aurifère contenant 20g d'or à la tonne est considéré comme un minerai riche alors qu'une roche à 20% de fer (teneur 10.000 fois plus grande) n'est pas exploitée en général.

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).

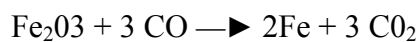
2.5 .Extraction des métaux (élaboration des métaux)

Pour extraire les métaux des minerais, on applique des opérations de traitements thermiques ou chimiques l'utilisation de l'une ou de l'autre dépend de la composition chimique du minerai et de la nature de sa gangue.

En général les traitements se font dans des fours portés à haute température. L'opération consiste à assurer d'une part la fusion du minerai et d'autre part l'élimination des éléments non désirés grâce au contact avec des agents ajoutés volontairement.

Les périodes les plus importantes lors de ses opérations sont

a) La réduction appliquée au minerais du type oxydes, sous l'effet de la chaleur, le carbone et l'oxyde se combinent en libérant le métal et le gaz carbonique, par exemple dans le cas du fer :



b) Le grillage : consiste à chauffer à Pair les minerais de type sulfures. Par cette opération, les sulfures se transforment en oxydes.

c) La calcination consiste à chauffer à l'abri de l'air les minerais de types carbonates. Par cette opération les carbonates se transforment en oxydes, par exemple : $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Les oxydes obtenus par les méthodes de grillage et de calcination sont ensuite traités par la méthode de réduction afin d'extraire le métal. Certains métaux élaborés ne sont pas pur et doivent subir des opérations de raffinage chimique ou électrochimique. Les métaux obtenus sont ensuite préparés sous diverses formes commerciales par les procédés suivants : déformation plastique, laminage, étirage et moulage.

2.6. Propriétés caractéristiques des métaux

Parmi les 106 éléments du tableau périodique 76 sont des métaux. Les métaux se distinguent des autres éléments par plusieurs caractéristiques.

- Conductibilité thermique et électrique élevée due aux électrons libres qui se déplacent dans le champ potentiel du réseau.

- Coefficient de température de résistivité positif, cela signifie que la résistivité de métaux purs s'accroît avec l'élévation de la température ; à très basse température un grand nombre de métaux.

(30) passent à l'état supra-conducteur à l'approche du zéro absolu, la résistivité de ces métaux tombe par sauts jusqu'à une valeur très faible.

- Emission thermo-électrique c-a-d l'aptitude d'émettre des électrons sous l'effet de la température.
- Bonne aptitude à la réflexion ; les métaux sont opaques et ont un éclat métallique particulier.
- Capacité élevée à la déformation plastique, due à la périodicité de leur structure atomique, lorsque certains volumes du métal se déplacent par rapport à d'autres volumes, la liaison entre les atomes ne se rompt pas.
- Tous les métaux et alliages métalliques ont la structure cristalline, l'arrangement de leurs atomes (ions) est régulier et périodique à la différence des corps amorphes dont les atomes sont disposés d'une manière chaotique.

Donc toutes ces propriétés caractérisant l'état métallique, qui est caractérisé par l'énergie élevée de la liaison entre les atomes. La mesure de cette liaison est donné par l'intensité de la chaleur de sublimation, thermique qui traduit l'énergie totale nécessaire pour passer d'un système condensé, c-a-d d'un métal solide, à l'état de vapeur, lorsque les atomes isolés ne sont plus liés entre eux par l'énergie d'ionisation dans ce dernier cas les atomes étant électriquement neutres.

A l'état structural ordinaire, les métaux purs ont une résistance faible et, dans de nombreux cas, n'assurent pas les propriétés physico-chimiques et technologiques requises. C'est ce qui définit leur utilisation relativement rare et la grande extension des alliages élaborés par fusion ou frittage de deux ou plus de métaux avec des métalloïdes. Leurs propriétés caractéristiques sont celles de l'état métallique. Les éléments chimiques constitutifs des alliages s'appellent composants. Un alliage peut avoir deux composants et plus binaire, ternaire etc...

Pour étudier la structure, les transformations et les propriétés des métaux et alliages on introduit la notion de phase et de structure largement appliqués dans la métallographie. L'ensemble des phases à l'état d'équilibre s'appelle système. On appelle phase les parties homogènes d'un système ayant la même composition, le même état d'agrégation et qui sont délimitées par rapport aux autres parties par les surfaces de séparation ou interfaces. Ainsi un métal pur homogène ou un alliage est un système à phase unique. L'existence simultanée d'un alliage liquide (métal) et des cristaux constitue un système de deux phases. Par le terme de structure on entend la forme, les dimensions et la disposition des phases. On appelle composants structuraux d'un alliage ses parties isolées qui ont la même structure caractérisée par les propriétés qui leur sont propres.

Pour l'analyse de la structure d'un métal ou d'un alliage métallique, on distingue :

2.6.1. La macrostructure

C'est la structure d'un métal discernable à l'œil nu ou avec un grossissement ne dépassant pas 30 à 40 fois. La macrostructure peut être établie :

a) d'après les cassures et les coupes macrographiques spécialement établies. L'étude de la cassure est le mode le plus simple pour déterminer la structure cristalline des métaux. A la différence d'un corps amorphe (verre, colophane etc..) la cassure d'un corps cristallin est granulaire (cristalline). La cassure permet de juger sur la grosseur des grains, les particularités de la coulée, du moulage (température de moulage, vitesse et uniformité de refroidissement de l'alliage etc.), du traitement thermique et sur certains propriétés du métal qui en résultent.

b) D'après des coupes spéciales, c-a-d des plaquettes prélevées sur des grosses ébauches (lingots, pièces de forge etc..) ou sur des pièces, dont la surface est rectifiée pour être soumise ensuite à l'attaque par réactifs appropriés. L'examen d'une coupe permet d'établir :

- La forme et la position relative des grains dans le métal moulé.
- Les fibres (cristallites déformées) des pièces de forge et estampées.
- Les défauts qui perturbent la continuité du métal (porosité due au retrait, soufflures, cavernes, fissures etc.).
- L'hétérogénéité chimique de l'alliage produite par le processus de cristallisation ou par traitement thermique ou thermo-chimique (cémentation, nituration, etc.).

2.6.2. La microstructure

Elle montre la disposition relative des phases, leurs formes et dimensions, pour l'obtenir on réalise une coupe en rectifiant soigneusement un des plans de l'échantillon prélevé dans le métal à étudier et soumis à l'attaque par des réactifs spéciaux. La microstructure des métaux est étudiée au microscope optique ou électronique grossissement 1500x.

De nos jours, les métaux sont étudiés à une large échelle au microscope électronique dont le grossissement va jusqu'à 100000X, permet de discerner des détails jusqu'à 3-5 Å

L'une des tâches les plus urgentes de la métallographie est d'établir non seulement cette relation, mais encore de relever le rapport quantitatif entre la structure et les propriétés des alliages métalliques.

3. Notions de cristallographie

La cristallographie est une science qui étudie les cristaux c-a-d la formation, la croissance, la forme extérieure, la structure interne et les propriétés physiques de la matière cristallisée. Le mot cristal à son origine grec—► glace. C'est au 19^{ème} siècle que la cristallographie se dégaga progressivement de la minéralogie et se rapprocha de la physique et de la chimie en devenant une science indépendante.

Les figures 1 et 2 représentent respectivement :

- des cristaux de neige.
- des cristaux de bloc d'aluminium refroidit, dont la surface est polie et attaquée par un agent chimique, les cristaux allongés sur le contour à partir desquels le refroidissement est parti et les petits grains de cristaux au cœur.

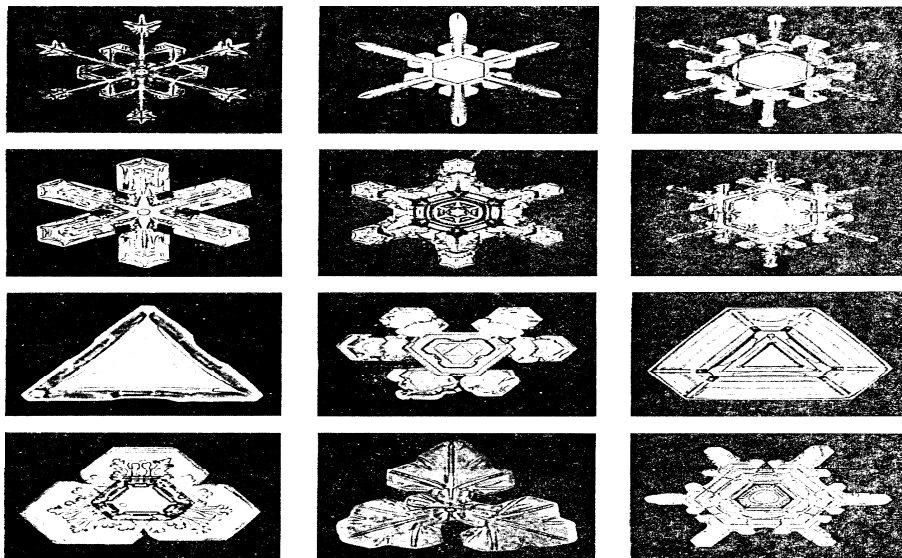


Fig.1



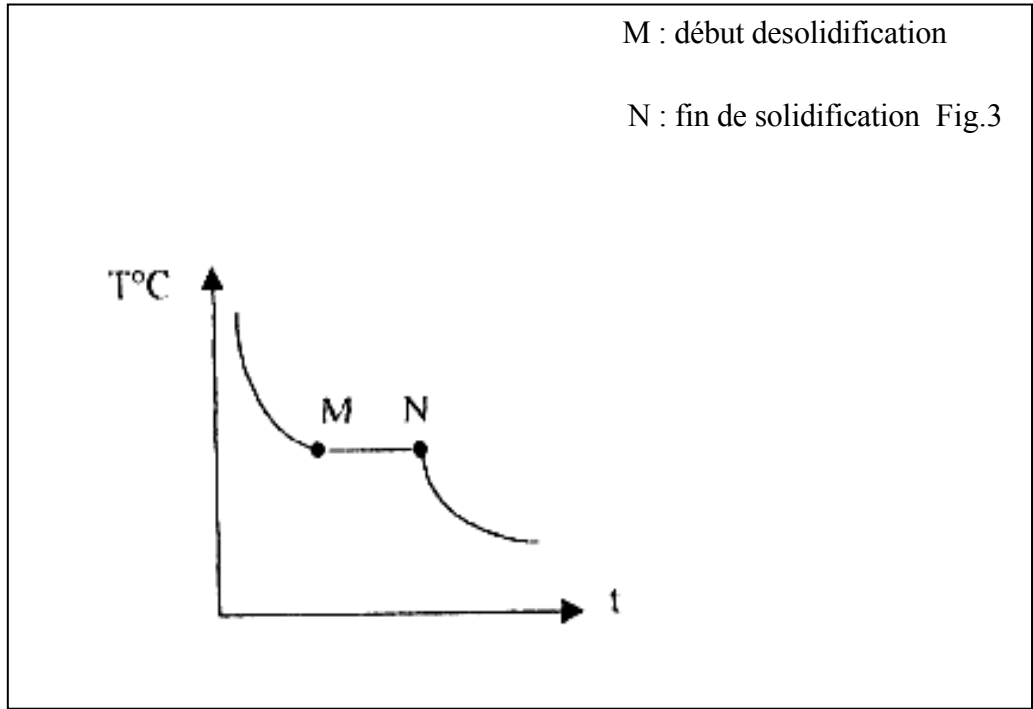
Fig.2

3.1. Corps cristallins et corps amorphes

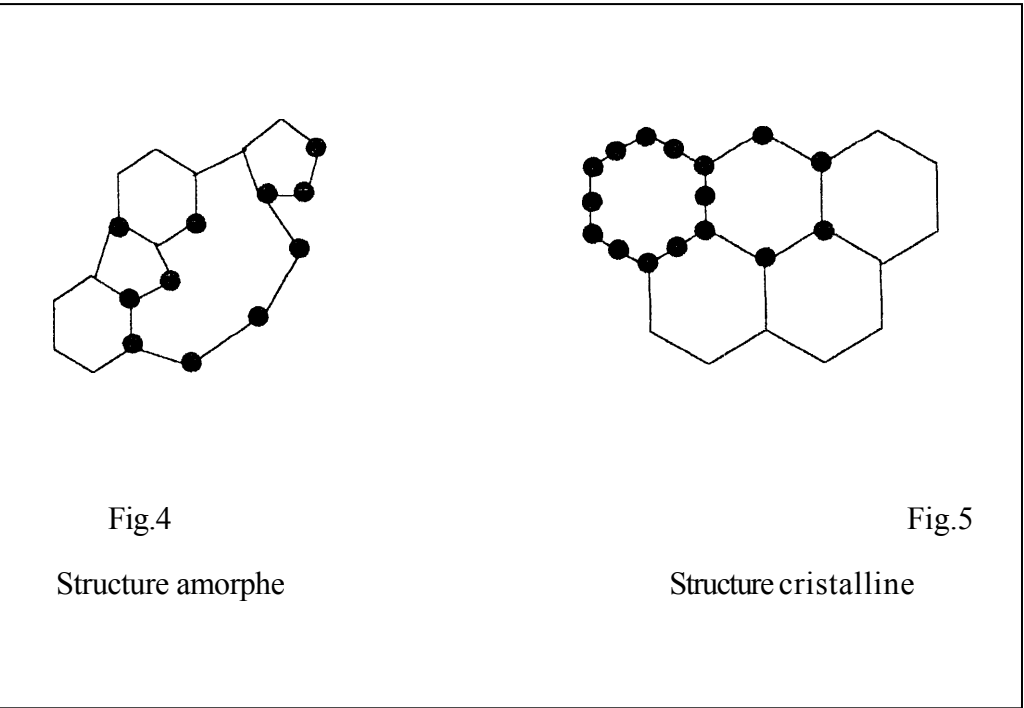
Par structure cristalline on entend l'arrangement des atomes dans un cristal. Un cristal est défini comme étant un corps solide qui a une structure réticulaire et se compose d'atomes (ions) répartis suivant une succession déterminée qui se produit périodiquement dans les trois dimensions. L'absence de structure réticulaire caractérise le corps amorphe. Les propriétés des corps amorphes diffèrent largement de celle des corps cristallins. Les corps amorphes sont caractérisés par la disposition chaotique de leurs atomes ce qui donne une structure interne désordonnée (comme un liquide). Un corps amorphe n'a pas de forme géométrique naturelle, ils sont assimilés à des liquides figés.

Les corps amorphes sont caractérisés par :

- L'absence d'une température de fusion nettement déterminée.
- L'isotropie (mêmes propriétés dans les différentes directions) surtout les propriétés physiques.
- On trouve ainsi une différence caractéristique dans les courbes de refroidissement des corps amorphes et cristallins, le refroidissement des corps amorphes se traduit par une courbe décroissante et continue (fig.3) :



Tandis que celui des corps cristallin présente un palier en température qui marque début et fin de solidification (cristallisation) : Tous les corps solides peuvent être amorphes ou cristallins, il existe un grand nombre de corps solides amorphes. Les verres représentent un exemple bien connu des corps amorphes, les SiO_4 composants les verres sont désorientés les uns par rapport aux autres (fig.4) dans un solide ils seraient répartis régulièrement (fig.).



Aujourd'hui les solides amorphes représentent un grand intérêt dans le domaine de la technologie. Les semi-conducteurs amorphes peuvent remplacer des composants électroniques. Des mémoires d'ordinateurs ont été élaborées à partir de matériaux amorphes.

Dans le même ordre d'idée, les liquides ne sont pas tous amorphes. Certains d'entre eux présentent une organisation périodique et les molécules s'orientent les unes par rapport aux autres au sein du liquide. C'est le cas des cristaux liquides dont les propriétés optiques dépendent étroitement des perturbations extérieures (température, pression, champ électrique ou magnétique). Ils permettent la transformation de signaux de nature diverses en signaux optiques, le cas de la télévision ultraplat s'accrochant au mur.

3.2. Propriétés des corps cristallins

Les corps cristallins sont caractérisés par les propriétés suivantes :

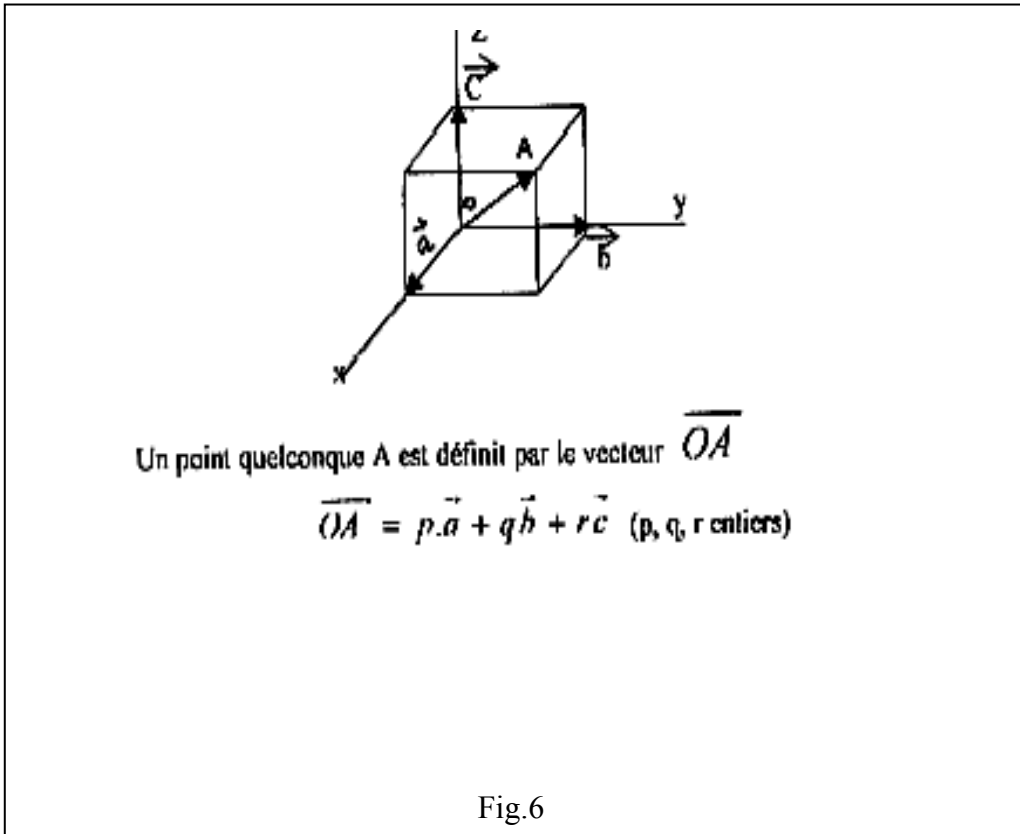
a) ils sont caractérisés par une certaine anisotropie (les propriétés physiques ne sont pas les mêmes dans les différentes directions) l'anisotropie peut être constatée à l'échelle macro et microscopique.

b) Un matériau cristallin peut présenter soit :

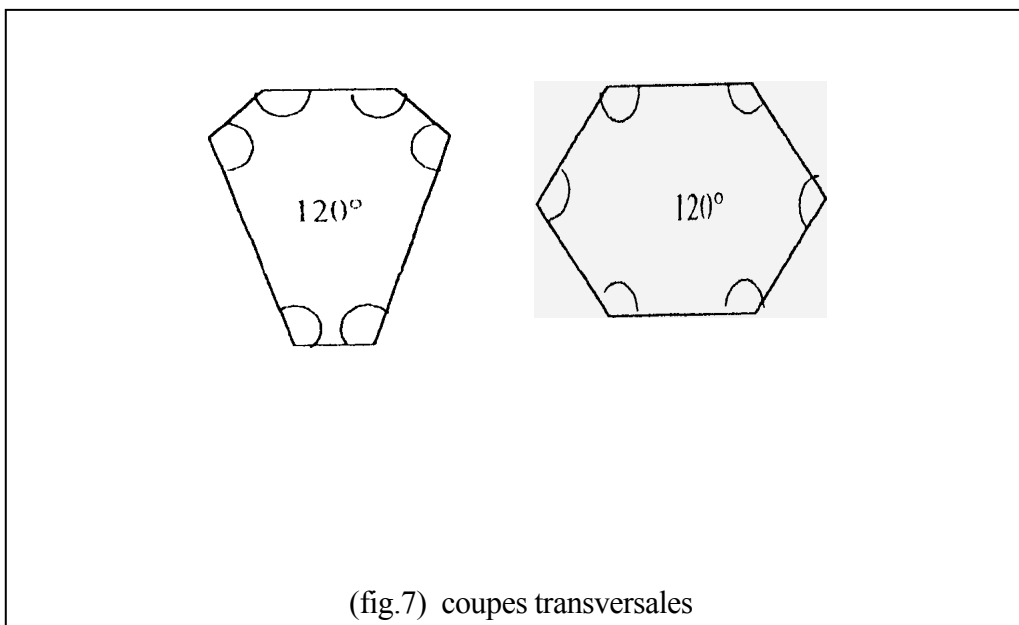
- un monocristal (cristal unique) par ex : cristal de quartz, de calcite, de diamant etc...
- ou un polycristal ou une agglomération de petits cristaux (échantillon d'acier).

c) Les cristaux sont caractérisés par des faces planes, des arêtes rectilignes et des sommets tels que : $F - i - S - A + 2 F$: faces, S : sommets, A : arêtes. Les faces sont caractérisées par deux lois :

- Si l'on rapporte les différentes faces d'un cristal à un système de coordonnées à 3 dimensions, la position d'une face quelconque peut toujours être exprimée par trois nombres entiers simples. Si on fait intervenir la notion du réseau tridimensionnel la position de tout point du réseau peut être indiquée par des coordonnées par rapport à un système d'axe dont l'origine est placée en un nœud du réseau (fig.6).



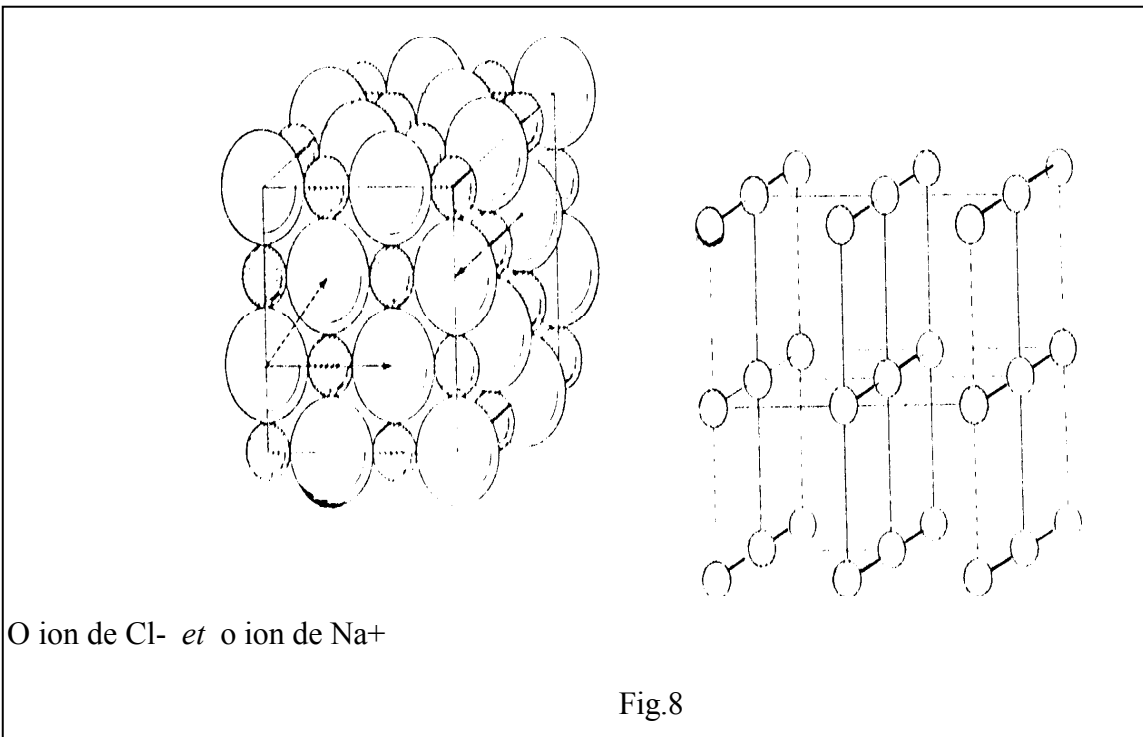
d) Constante des angles dièdres : l'angle formé par deux faces déterminées est constant dans tous les cristaux d'une même espèce chimique. Si nous coupons un cristal de quartz perpendiculairement à l'axe vertical on obtient plusieurs configurations mais avec des angles rigoureusement égaux (120°), (fig.7).



- e) La plupart des cristaux se comportent d'une façon inattendue par rapport à la lumière. Les rayons lumineux se propagent à des vitesses différentes dans les milieux cristallins.
- f) Les propriétés d'un cristal peuvent avoir la même valeur dans plusieurs directions et l'on décèle suivant ces directions une symétrie de diverses natures.

3.3. Structure réticulaire

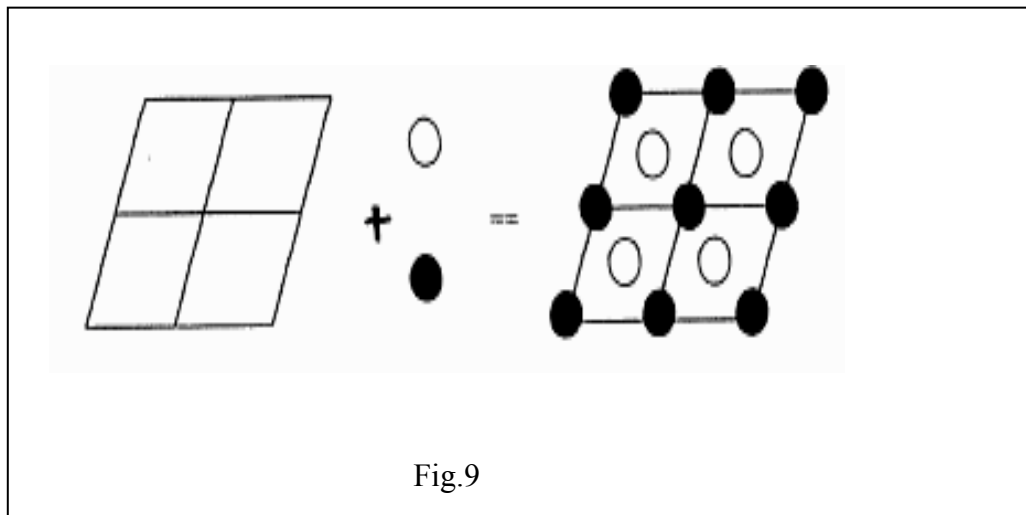
Pour expliquer les particularités observées dans les cristaux on doit admettre que tout corps cristallin a une structure ordonnée réticulaire qui est indépendante de la nature et de la forme des particules matérielles élémentaires constituant le cristal. Donc pour représenter schématiquement une structure cristalline on emploie un réseau à trois dimensions (fig.8), l'exemple du réseau de NaCl.



Un réseau cristallin est constitué par un assemblage d'atomes (ions) arrangés suivant un motif qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Donc un réseau cristallin est un réseau spatial imaginaire ayant pour nœud les atomes (sommet des parallélépipèdes) les droites passant par ces nœuds sont appelés rangés. Tous les nœuds sont groupés dans des plans parallèles équidistants appelés plans réticulaires, la distance entre deux plans voisins de la même famille est la distance interréticulaire.

Tous les parallélépipèdes qui ont pour sommets les nœuds sont appelés maille du réseau c-a-d le volume minimal d'un cristal qui permet déjuger de la structure atomique du volume tout entier s'appelle maille cristalline élémentaire (fig. 10) :

Réseau cristallin + motif = structure cristalline



- **La maille élémentaire** : c'est aussi le plus petit parallélépipède qui permet de reproduire tous les réseaux tridimensionnels par translation continue de ces éléments suivant les trois directions. Un réseau cristallin d'un solide est composé d'un nombre infini de mailles élémentaires à l'intérieur desquelles les atomes sont disposés dans un ordre bien défini.
- **Motif** : c'est la reproduction indéfiniment et régulièrement des atomes ou ions dans le cristal, l'ensemble régulier de motifs est appelé réseau.
 - contrairement au motif le nœud n'a pas de réalité physique.
 - La rangée du réseau est un ensemble de nœuds alignés, c'est une droite passant par des nœuds du réseau. La distance qui sépare deux nœuds consécutifs d'une rangée est appelée période ou paramètre de rangée.
- **Maille du réseau** : Le réseau est théoriquement infini, ainsi pour le décrire, on choisit une unité structurale qui le reproduit par translation. Cette unité c'est la maille élémentaire. On distingue la maille simple ou primitive et la maille multiple.

a) Maille simple ou primitive

Dont les sommets sont constitués de huit nœuds tous voisins quelque soit la rangée considérée, elle ne contient de nœuds ni dans son volume, ni sur ses faces, ni sur ses arêtes. On désigne la maille primitive par la lettre P, il y a autant de maille P que de nœuds dans le réseau, en effet chaque nœud est commun à huit mailles P et chaque maille P correspond à huit nœuds. A chaque maille on peut donc associer un nœud.

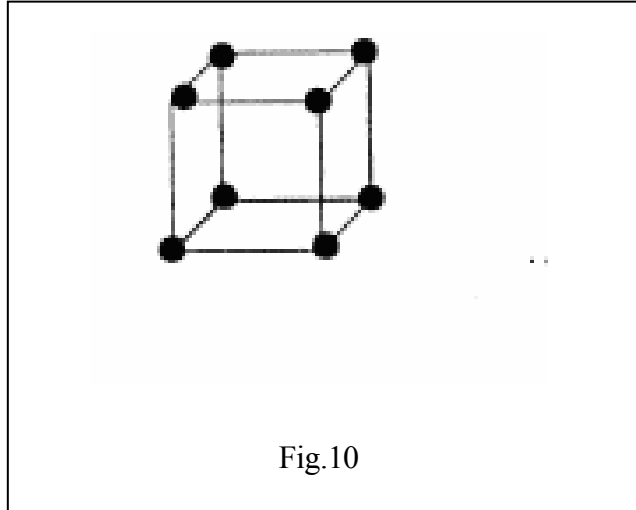


Fig.10

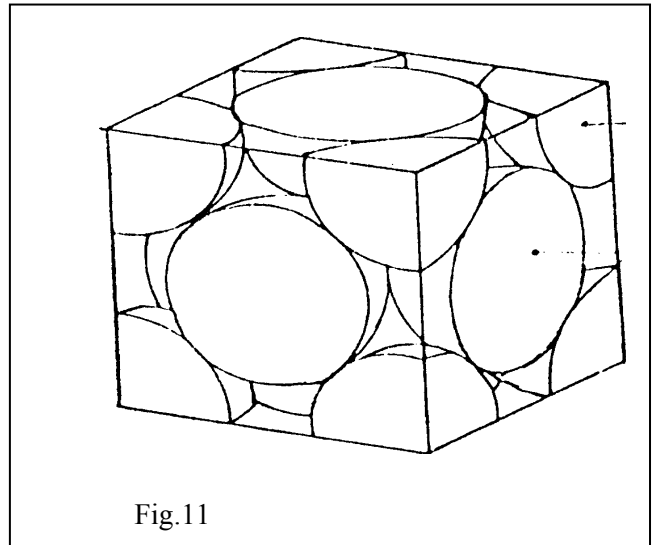
Si chaque nœud est commun à 8 mailles P donc cette dernière contient : $1/8 \times 8 = 1$ atome

Pour toute maille élémentaire :

- Les nœuds à l'intérieur des mailles comptent pour 1.
- Les nœuds aux sommets des mailles comptent pour $1/8$.
- Les nœuds sur les arêtes des mailles comptent pour $1/4$.

Les nœuds sur une face de maille comptent pour $1/2$.

La figure 11 ci-dessous nous montre une coupe schématique d'une maille cubique à faces centrées montrant la proportion $1/8$ au niveau de chaque sommet et la proportion $1/2$ pour chacun des atomes situés sur les faces.

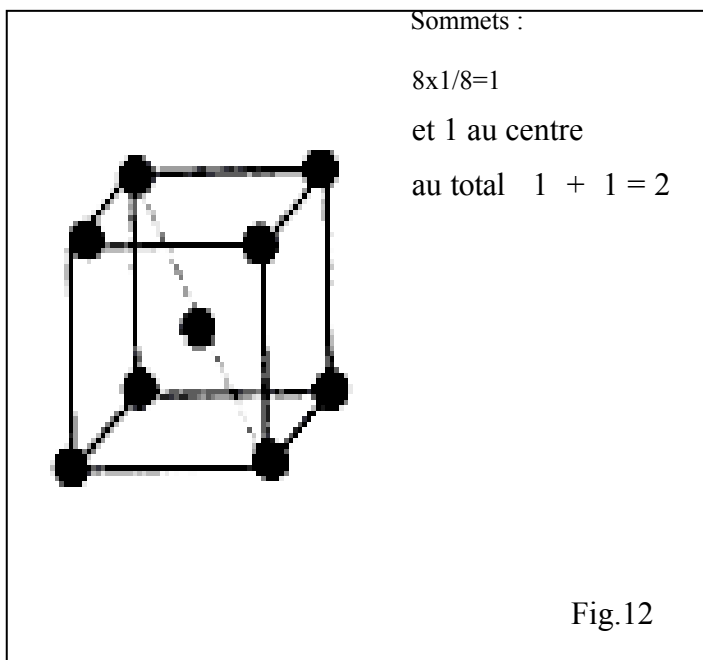


b) Mailles multiples

Dans la catégorie des mailles multiples en plus des huit sommets du parallélépipède, elles contiennent des nœuds dans le volume ou sur les faces, d'où on distingue :

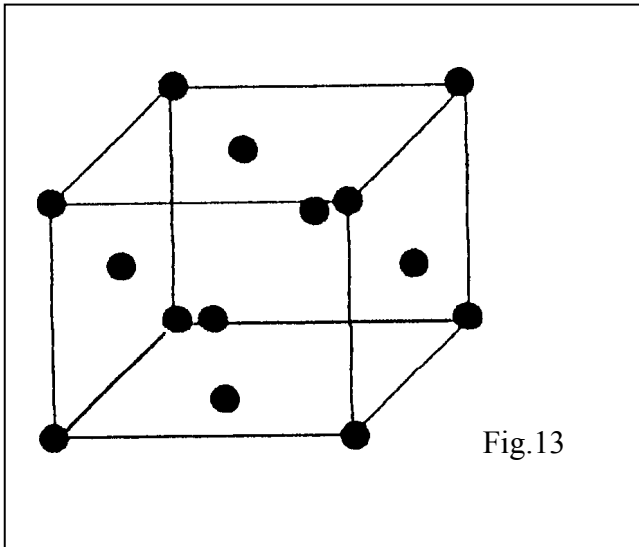
Maille multiple centrée

Elle est désigné par l'abréviation I elle contient des nœuds aux sommets et un nœud au centre du parallélépipède, c'est une maille double.



Maille multiple à faces centrées

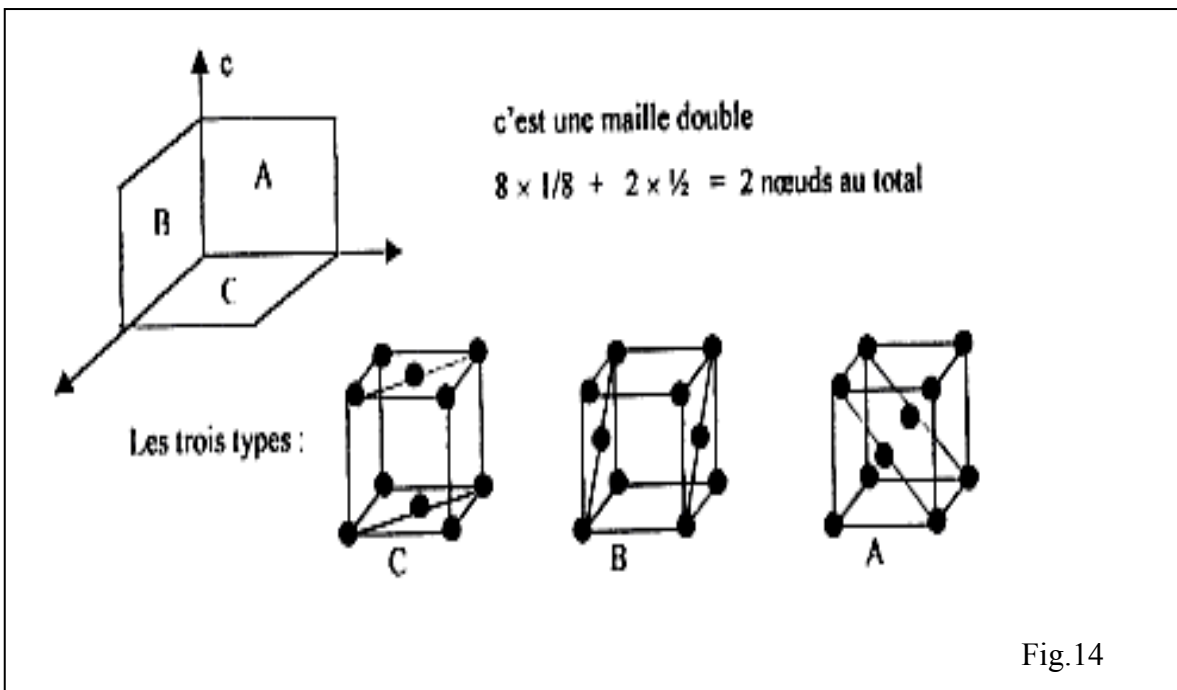
Désignée par la lettre F, et contient huit nœuds aux sommets et six aux centres des faces c'est une maille quadruple.



$8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$ nœuds au total, les nœuds des faces comptent pour $1/2$

Mailles multiples à bases centrées

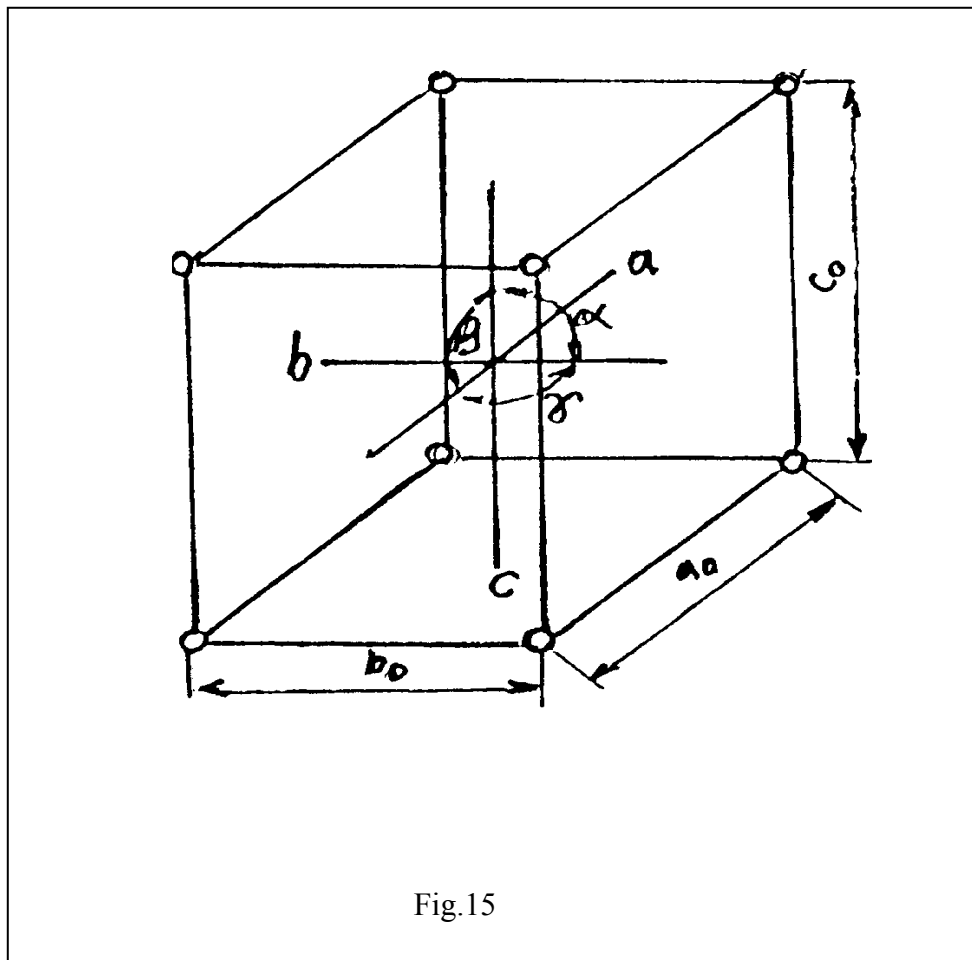
Elle contient des nœuds aux sommets et sur l'une des espèces de bases A, B ou C.



3.4. Systèmes cristallins (les 14 réseaux de Bravais)

A partir de la maille cristalline élémentaire on peut décrire de façon simple les systèmes cristallins existant dans la nature. En combinant les différentes relations entre les paramètres a , b , c et les angles α , β , γ du trièdre de référence (paramètres angulaire), Bravais a déterminé 14 réseaux tridimensionnels fondamentaux. Ils sont de quatre modes différents (multiplicité).

- Réseaux simples ou primitifs P.
- Réseaux à bases centrées A, B ou C selon le type de faces centrées.
- Réseaux centrés I.
- Réseaux à faces centrées F.



Les sept systèmes cristallins qui existent et qui forment les réseaux de Bravais sont (fig.16):

A : Système triclinique : Le cristal fondamental est un parallélépipède oblique. Il n'admet qu'un seul centre de symétrie à l'intersection des diagonales. Il possède donc :

- 1 centre de symétrie.
- $a \neq b \neq c$
- $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ ($\neq 90^\circ$, inégaux, mais voisins de 90°).
- 1 seul mode qui est le primitif

B: Système monoclinique : Le cristal fondamental est un prisme droit sur une base rhombique (en losange) incliné dans une seule direction. Il admet :

- 1 centre de symétrie.
- 1 seul axe de symétrie.
- $a \neq b \neq c$
- $\alpha = \beta = 90^\circ$
- $\gamma = 90^\circ$
- 2 réseaux de Bravais : primitif (P) et à bases centrées (C).

C : Système orthorhombique : La forme géométrique est un prisme droit à base rectangulaire. Il possède :

- 3 axes d'ordre 2
- 1 seul axe de symétrie
- $(a = b) \neq c$
- $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 4 réseaux de Bravais : primitif (P), à bases centrées (C), centré (I), et à faces centrées (F).
- **D: Système quadratique**: Le cristal fondamental est un prisme droit à base carrée. il admet :

- 3 axes d'ordre 4
- 4 axes d'ordre 2 : dont deux sont orthogonaux entre eux.
- $(a = b) \neq c$
- $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 2 réseaux de Bravais : primitif (P) et centré (I).

E : système cubique : La forme fondamentale est un cube. Il a :















- 3 axes d'ordre 4
- 4 axes d'ordre 3
- 6 axes d'ordre 2
- $a = b = c$
- $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 3 réseaux de Bravais : primitif (P), centré (I), et à faces centrées (F)

F : Système rhomboédrique : la géométrie fondamentale est limitée par 6 losange égaux. Il admet :

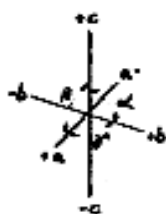
- 1 centre de symétrie
- 1 axe d'ordre 3
- 3 axes d'ordre 2
- $a = b = c$
- $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
- 1 seul réseau de Bravais : primitif (P).

G : Système hexagonal : le cristal est un prisme droit à base hexagonale. Il a :

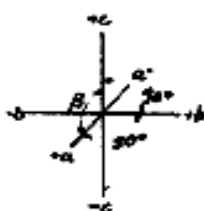
- 1 centre de symétrie
- 1 axe d'ordre 6
- 6 axes d'ordre 2
- $(a = b) \neq c$
- $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
- 1 seul réseau de Bravais : (P).

Système	P	C	I	F
Cubique		—		
Quadratique ou Tétraгонаl		—		—
Orthorhombique				
Hexagonal		—	—	—
Monoclinique			—	—
Triclinique		—	—	—
Rhomboédrique		—	—	—

Les systèmes d'axes cristallographiques



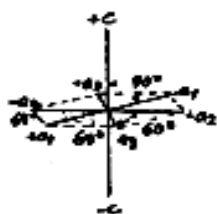
Triclinique



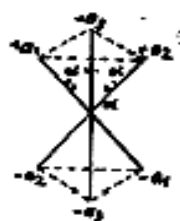
monoclinique



orthorhombique



Hexagonal



rhomboédrique



Tétragonal



cubique

Fig.17

Le réseau de la majorité des métaux utilisés dans l'industrie s'établit d'après un des systèmes suivant à symétrie élevée et à empilement compact des atomes : cubique centré, cubique à faces centrées et hexagonal.

Les métaux qui ont le réseau

Cubique centrée :

Rb, K, Na, Ti β , TL β , Zr β , Ta, W, V, Fe α , Cr, Nb, Ba, etc..

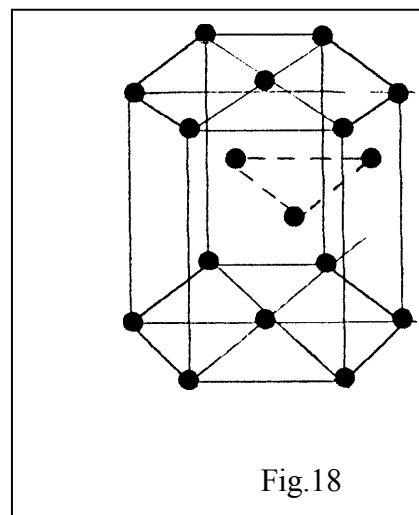
Cubique à faces centrées :

Ca α , Ce, Sra, Th, Pb, Se, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Ir, Fe γ , Cu, Co α etc..

Hexagonal

Hf α , Mg, Ti α , Cd, Re, Os, Ru, Zn, Co β , Be, Ca α , V, La α , TL α , Zr α etc..

Un réseau hexagonal est composé d'atomes placés aux sommets et au centre des bases hexagonales du prisme, trois atomes se trouvent dans le plan médian du prisme, donc il compte 17 atomes.



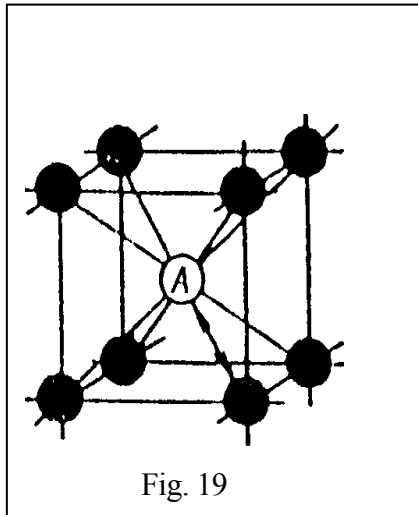
Le réseau hexagonal ne contient pas d'atomes au plan médian. La maille élémentaire d'un réseau hexagonal compte 6 atomes :

$$12 \times \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6 \text{ atomes}$$

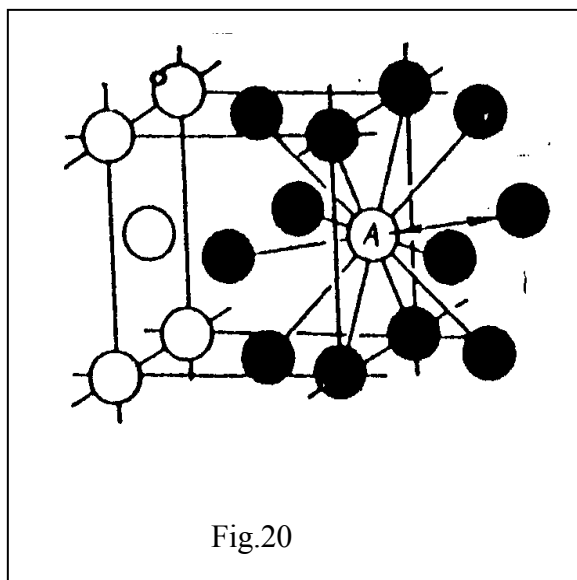
3.5 Densité du réseau

La densité du réseau cristallin c-a-d le volume occupé par les atomes qu'on peut considérer comme des sphères suffisamment rigides est caractérisée par l'indice de coordination ou coordinence, terme qui indique le nombre d'atomes situés à une distance égale et minimale de l'atome considéré, plus la

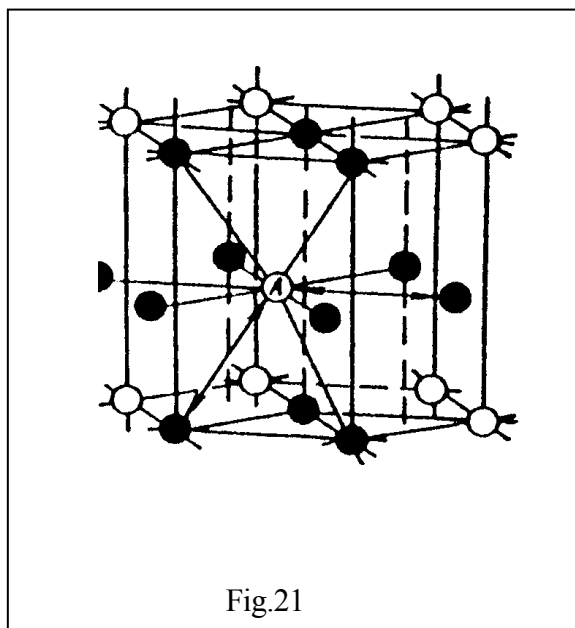
coordination est grande, plus l'empilement des atomes est compact. La distance minimale entre les atomes d'une maille élémentaire cubique correspond à $a\sqrt{3}/2$, c'est la distance qui sépare l'atome considéré de ses 8 voisins, on en déduit que la coordination de ce réseau est égale à 8 (C8) et le coefficient d'empilement (rapport du volume occupé par les atomes au volume de la maille) vaut $\approx 68\%$.



Pour une maille cubique à faces centrées, la coordination est égale à 12 (C12), chaque atome comptant 12 voisins situés à une distance minimale $d = a\sqrt{3}/2$, ce qui correspond à la compacité maximale de l'empilement sous forme de sphères.

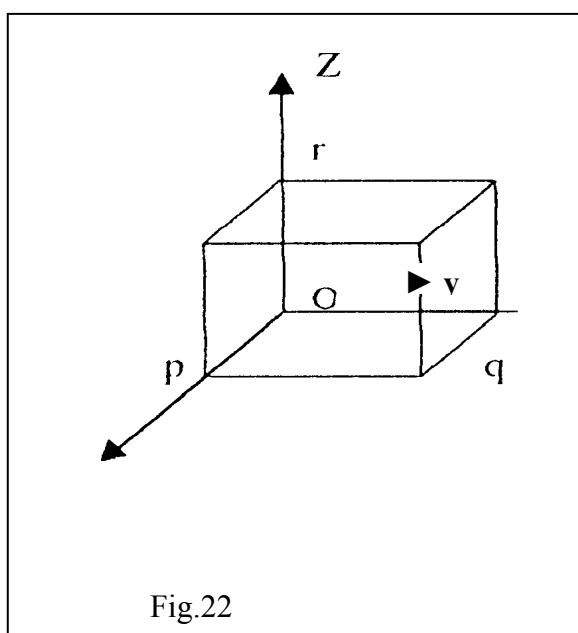


L'indice de coordination du réseau hexagonal compact dont le rapport $C/a = 1,633$ est 12(H12) ce qui correspond également à une densité maximale. Lorsque la valeur de C/a se distingue nettement de 1,63 (cas du zinc et du cadmium) la coordination du réseau hexagonal est égale à 6.



3.6. Notions des plans ou faces cristallographiques

On peut déterminer la position dans l'espace de chaque face cristallographique au moyen de trois nombres entiers. Pour cela on prend comme axes de coordonnées trois arêtes de la maille élémentaire et comme unité de longueur les modules de trois vecteurs de base de la maille Z .

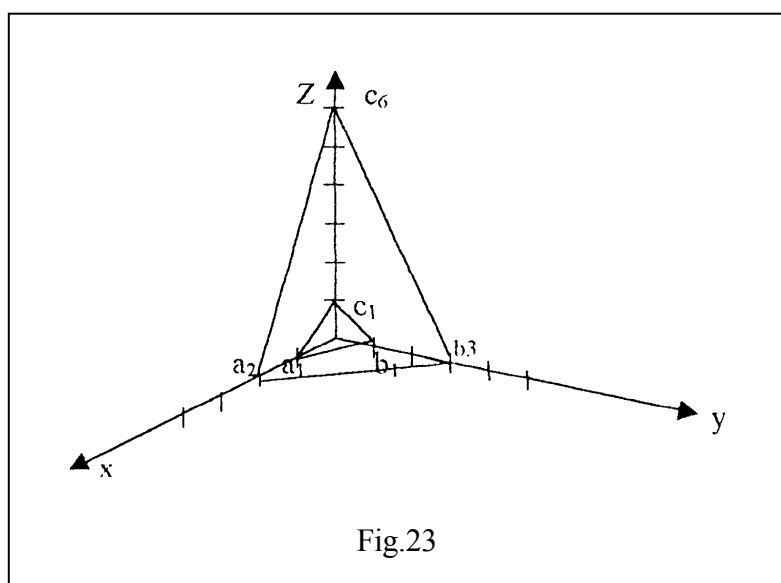


En 1838 Weiss proposa une méthode qui consiste après avoir défini le trièdre de référence à déterminer dans l'espace l'orientation de chaque face cristalline à l'aide de trois caractéristiques numériques p, q, et r. On peut repérer les faces du prises dans le système d'axes de coordonnées ox, oy et oz par a1 b1 c1 et a2 b3 c6 (fig.23). La face a1 b1 C1 intercepte une seule équidistance sur chacun des axes ox oy oz (fig.23).

Oa1, Ob1 et Oc1 où le rapport p :q :r = 1 :1 :1

a2 b3 c6 ou le rapport p :q :r = 2 :3 :6

L'ensemble de ces trois nombres (1, 1, 1) pour la première face et (2,3,6) pour la deuxième face sont les indices de Weiss des deux faces.



En 1839 Miller proposa une méthode beaucoup plus commande qui est actuellement d'un emploi universel; il a remplacé les caractéristiques numériques de Weiss p, q, r par leur inverse 1/p, 1/q, 1/r, en général on obtient 3 fractions inférieures à l'unité et dont les rapports réciproques sont exprimés par trois nombres entier premiers ente eux appelés indice de Miller et notés **(hkl)** :

$$h=1/p \quad , \quad k=1/q \quad , \quad l=1/r$$

Donc les indices de Weiss sont (2, 3, 6) et ceux de Miller hkl = (1/2, 1/3, 1/6)

Remarques :

- a) Les indices de faces ou de plans sont toujours mis entre parenthèses sans séparation.
- b) Un indice négatif par exemple (-h) est désigné par (\bar{h}) , (-2)-> $(\bar{2})$.
- c) Un plan parallèle à un axe le coupe à l'infini, son indice de Miller (valeur réciproque)

correspond à cet axes est $1/QO = 0$.

d) Une famille de plans $(h k l)$ est désignée par une accolade $\{hkl\}$.

Exemple de notation pour les plans d'un cube (fig.24)

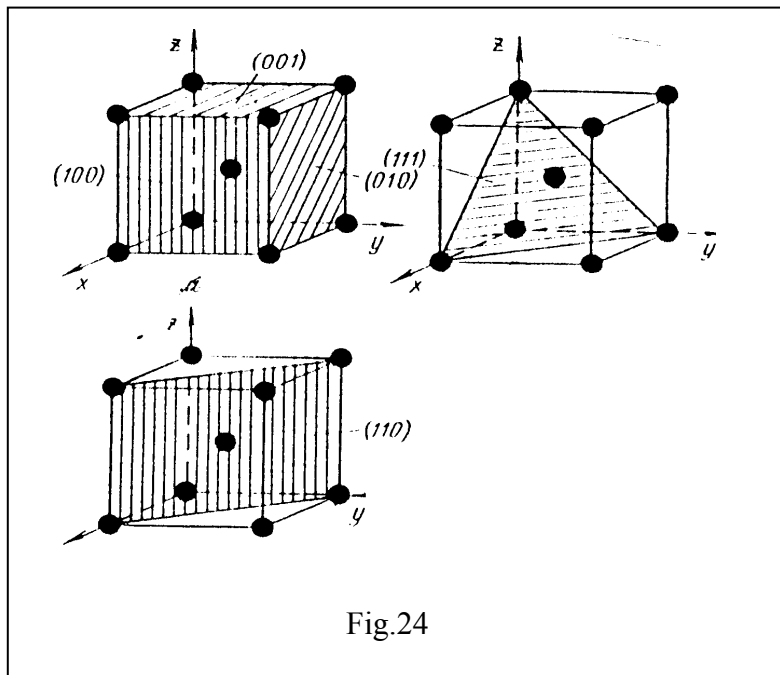


Fig.24

Chaque plan du cube ne coupe qu'un seul axe, les segments étant égaux.

Pour les faces avant, droite, supérieure ont respectivement $(1, \infty, \infty)$; $(\infty, 1, \infty)$; $(\infty, \infty, 1)$ les valeurs inversement proportionnelles aux segments tranchés sont respectivement $1, 0, 0$; $0, 1, 0$; $0, 0, 1$ mais il est d'usage de mettre les indices des plans $h k l$ entre parenthèses et de ne pas les séparer par des virgules $(1\ 0\ 0)$, $(0\ 1\ 0)$, $(0\ 0\ 1)$ pour les faces arrières, gauche et inférieure ont respectivement (100) , (010) , (001) . Le réseau cubique, en plus des plans de cube compte des plans octaédriques (fig.24) (111) et des plans décaédrique (fig.24) (110) .

3.7. Indices de directions

On entend par direction cristallographique, la ligne droite qui joint au minimum 2 nœuds. Pour déterminer les indices de direction dans un système d'axes de coordonnées, on choisit la ligne parallèle à la direction et qui passe par l'origine. Pour la suite on détermine les coordonnées du nœud le plus proche, les nombres ainsi déterminés sont appelés indices cristallographiques de direction et sont notés $[uvw]$. Les droites de direction sont toujours perpendiculaires aux plans qui ont leurs mêmes indices (fig.25)

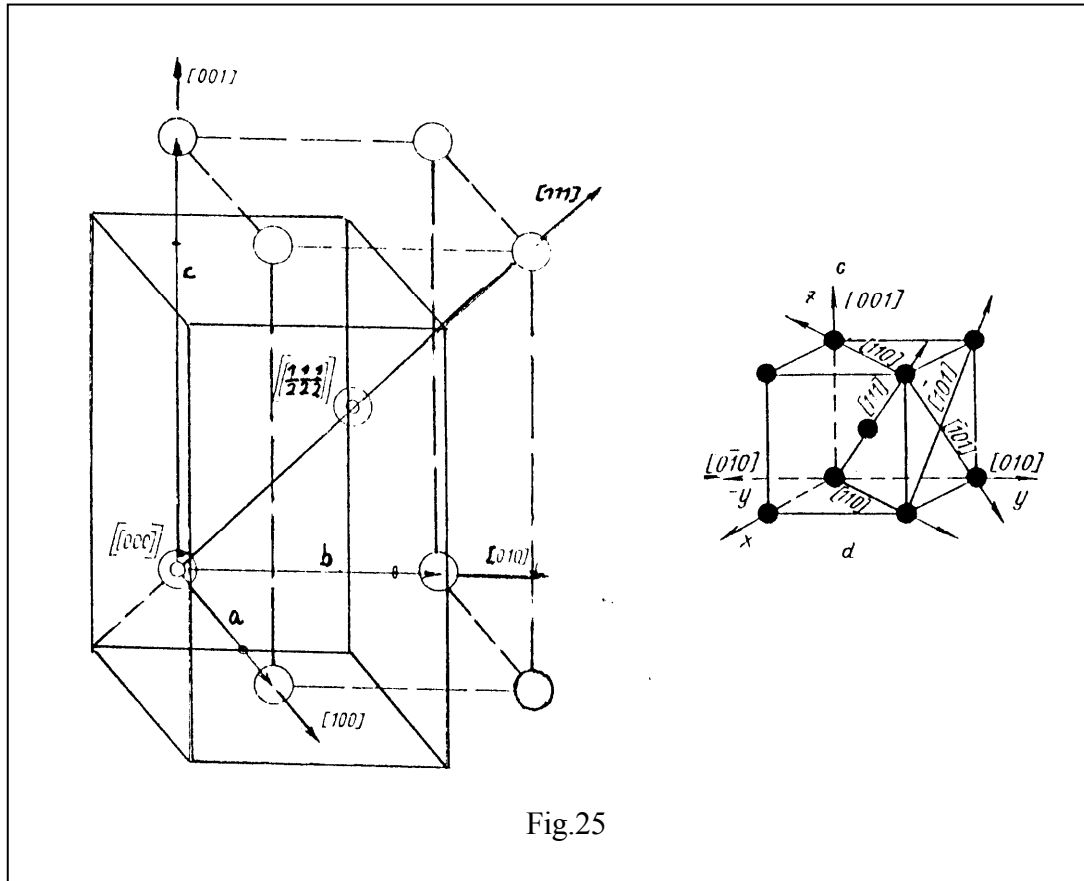


Fig.25

Exemples avec solutions

Exemple 1 : Donner les définitions des termes suivants, relatifs à un cristal cubique parfait : Face, arête, sommet, axe diagonal, axe principal

Réponse 1 :

- Face —► surface plane extérieure délimitant le cristal.
- Arête —► ligne d'intersection de deux faces continues.
- Sommet —► point sur lequel se joignant 3 faces contiguës du cube.
- axe diagonal ou secondaire -► droite joignant deux sommets diamétralement opposés.
- Axe principal —► droite joignant le centre de deux faces apposées.

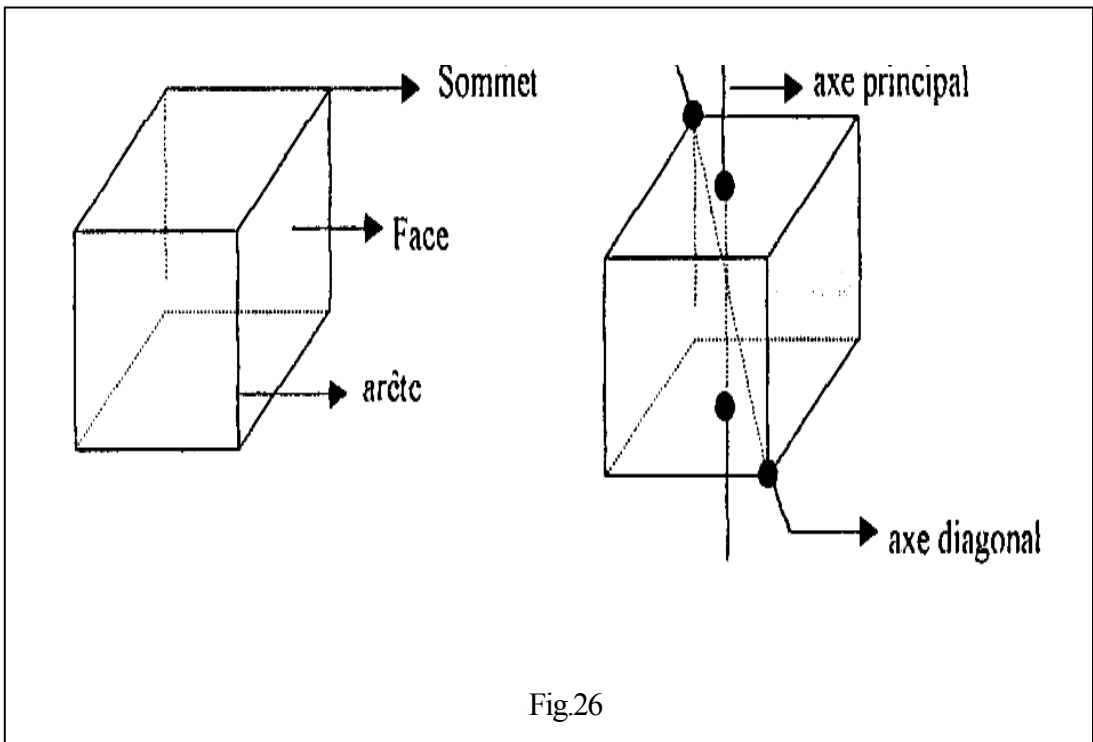


Fig.26

Donc on a :

6 faces, 12 arêtes, 8 sommets, 3 axes principaux et 6 axes diagonaux.

Exemple 2 : dans le système d'axes de coordonnées suivant, indexer les faces ABC et EFG, en appliquant la règle de Miller.

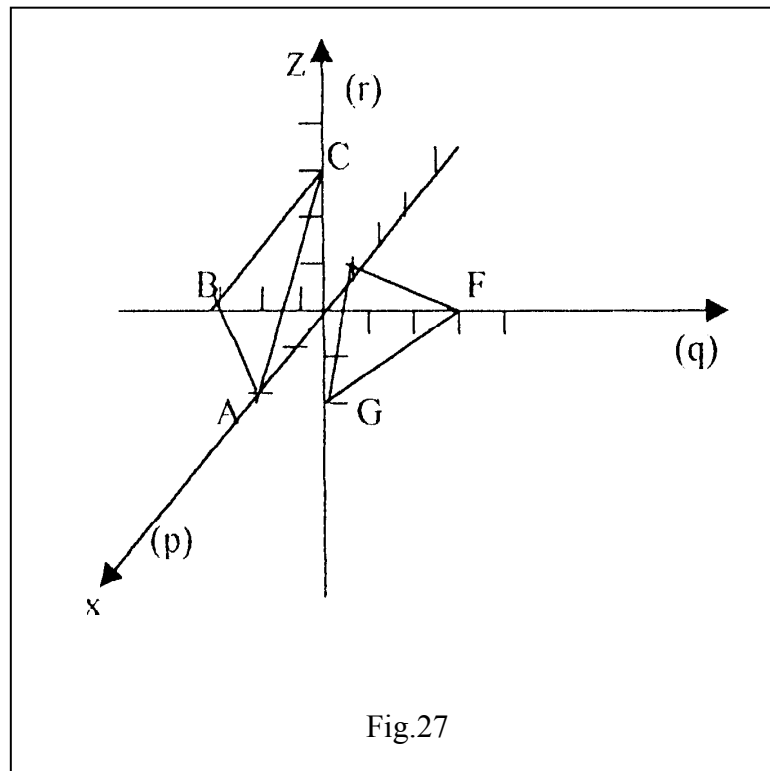


Fig.27

Réponse 2 : les indices de Miller sont hkl qui remplacent les caractéristiques numériques de Weiss p q r : $h = 1/p$ $k = 1/q$ $l = 1/r$

Donc on obtient trois fractions inférieures à l'unité et dont les rapports réciproques sont exprimés par trois nombres entiers premiers :

Face ABC : $p = +2$ $q = -3$ $r = +3$

$(hkl) = (1/p, 1/q, 1/r) = (1/2, -1/3, 1/3)$

$hkl = (1/2, -1/3, 1/3) \cdot 6 = (3, -2, 2)$

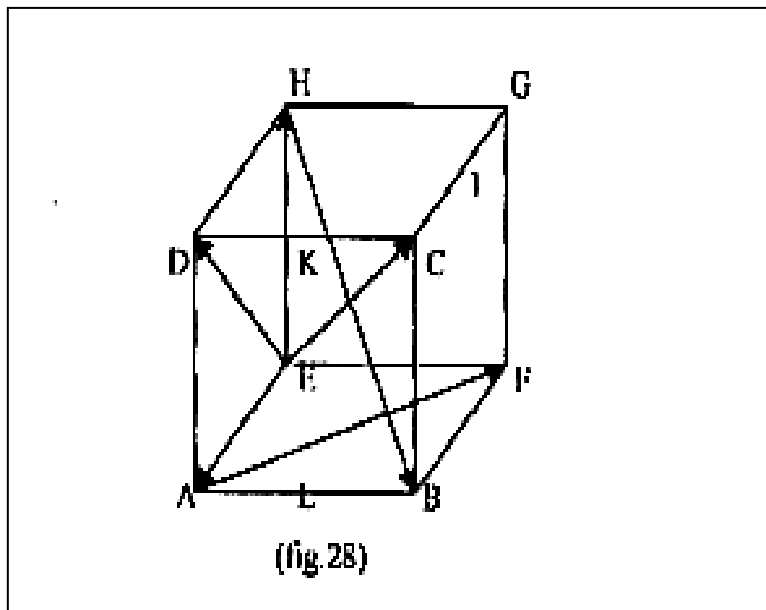
Face EFG : $p = -1$ $q = +3$ $r = -2$

$(1/p, 1/q, 1/r) = (-1, 1/3, -1/2)$

$hkl = (-1, 1/3, -1/2) \cdot 6 = (-6, 2, 3)$

Exemple 3 : dans le système cubique suivant :

- Indexer les 6 faces du cube.
- Indexer les faces AEGC, EDG, AFGDI
- Identifier les faces (100), (1 10), (110), (101)
- Indiquer les directions [1 10], [1 1 1], [010], [101]



Réponse 3 :

a) les six faces du cube : AEFB = (100), DCGH = (100), BFGH = (010), AEHD ABCD = (001), EFGH = (001).

$$(p \ q \ r) = (1, \infty, \infty) \Rightarrow (hkl) = [1/p, 1/q, 1/r] = [1/1, 1/\infty, 1/\infty]$$

b) les faces AEGC, EDG, AFGD :

$$\text{AEGC} = (110), \quad \text{EDG} = (1, 1, 1) \quad \text{AFGD} = (011)$$

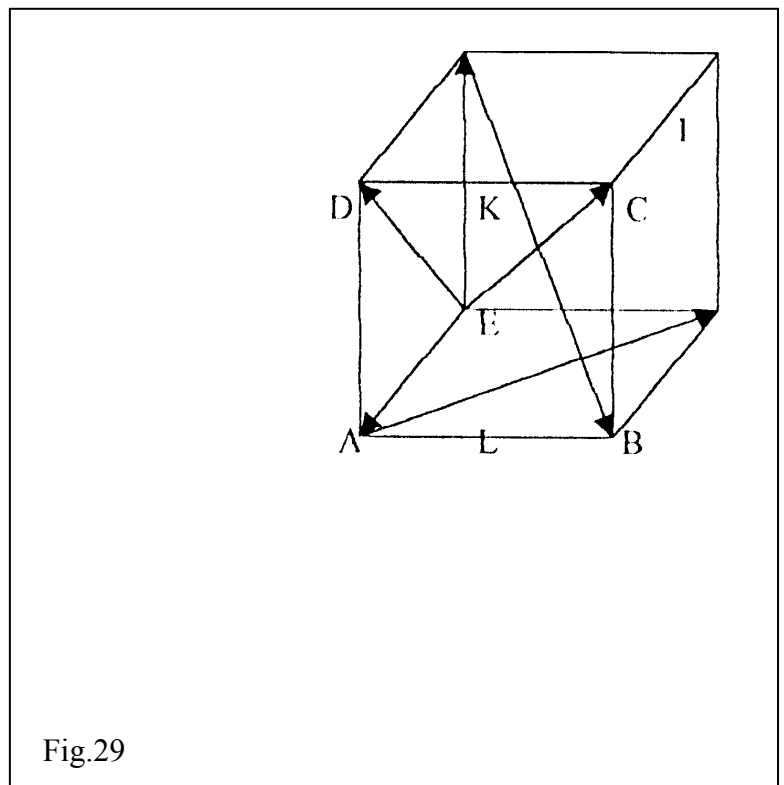
c) (100) = AEBF, (110) = AEGC, (110) = FBDH, (101) = ABGH

d) $[1\ 1\ 0] = HF$ $[1\ 1\ 1] = HB$ $[010] = HG$ $[101] = HA$

Exemple 4

a) indexer les directions schématisées par les flèches.

b) indexer les plans HGFE, HUE, HCBE, HKLE, HDAE.



Réponse 4

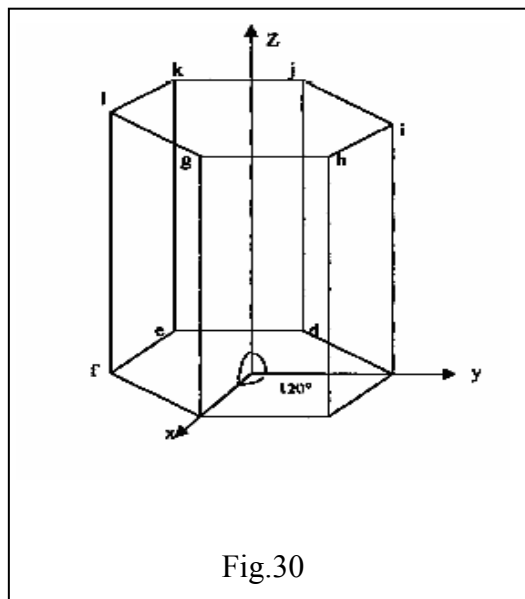
EA[100], ED[101], HE[001], EC[111], HB[111], AF[110], EF[010]

Les plans :

HGFE = (100), HIJE = (1/2 10),) ,

Exemple 5 :

Indexer les 8 faces d'une maille hexagonale élémentaire.



Réponse 5

Faces latérales

abhg = (1010)

bcih = (0110)

cdji = (1100), edjk = (1010) fekl = (0110)

afig = (1100)

Bases

abcdefa = (0001), ghijklg = (0001)

Exemple 6

Soit une maille cristalline cubique à faces centrées ayant une arête $a = 4$ déterminer :

- a) le nombre d'atomes par unité de surface dans le plan (110) et (111).
- b) La densité d'atomes par unité de longueur suivant les directions [110] et [111].

c) Réponse 6

Maille CFC avec les plans (110) et (111)

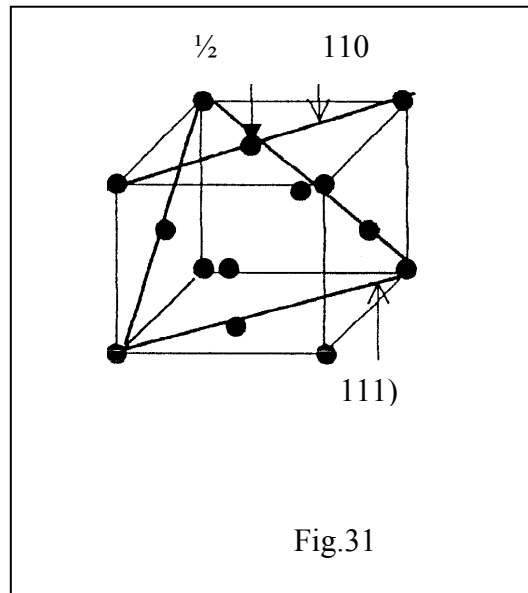


Fig.31

a) Nombre d'atomes par unité de surface

plan (1 10)

Nombre d'atomes centres des faces : $2 \cdot (\frac{1}{2}) = 1$

= 2

Nombre d'atomes sommets : $4 \cdot (\frac{1}{4}) = 1$

Surface du plan $a \cdot \sqrt{a^2 + a^2} = a^2 \sqrt{2}$

d'où le nombre d'atomes par unité de surface

$N_1 = 2 / a^2 \sqrt{2} = 89000 \text{ atomes / cm}^2$

plan (111)

Nombre d'atomes des faces : $3 \cdot (1/2) = 3/2$

$$= 2$$

Nombre d'atomes sommets : $3 \cdot (1/6) = 1/2$

surface du plan $a \cdot a^2 (\sqrt{3}/2)$ car surface du triangle $\frac{b \times h}{2}$

d'où le nombre d'atomes par unité de surface :

$$N_2 = \frac{2}{a^2 \cdot \sqrt{3}/2} = 1,4 \cdot 10^{19} \text{ atomes/cm}^2$$

b) la densité linéaire

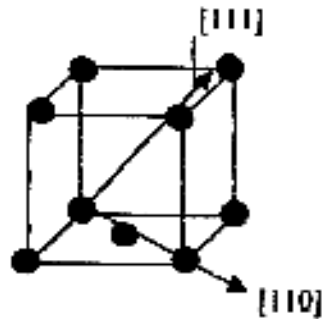
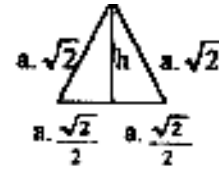


Fig.32

La direction [110]

Longueur du vecteur : $r = \sqrt{a^2 + a^2/2} = a \sqrt{2}/2$

Densité $d = 1/r = 3,54 \cdot 10^7 \text{ atomes/cm}^2$

La direction [1 1 1] :

Longueur du vecteur : $r = \sqrt{a^2 + a^2 + a^2} = a\sqrt{3}$

Densité $d = 1/r = 1,44 \cdot 10^7 \text{ atomes/cm}^2$

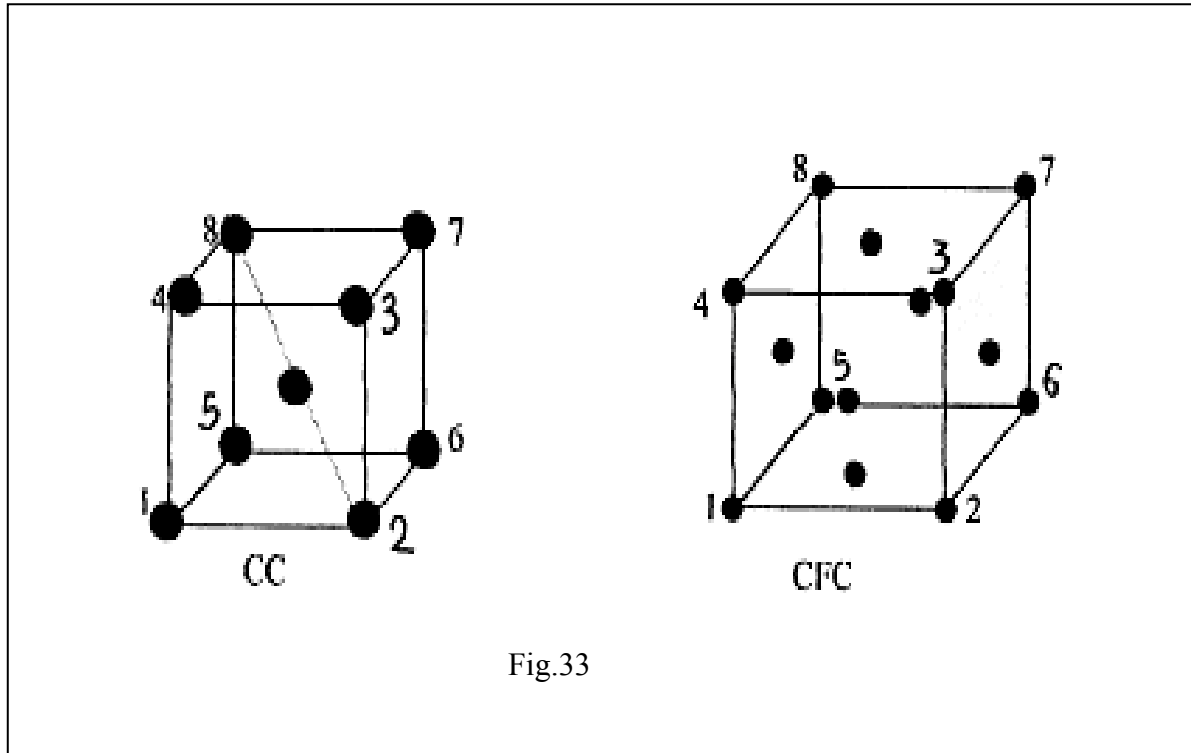
Exemple 7

Soit le système cubique centré et le système cubique à faces centrées.

a) Indiquer dans chacun des cas, le plan de densité atomique maximale.

b) Indiquer les directions cristallographiques de densité atomique maximale.

Réponse 7



- Système CC et CFC :

a) Plans de densité atomique maximale :

- Système CC : ce sont les plans diagonaux qui passent par l'atome central, et il y a 6 : 1674, 2385, 1278, 3456, 3751, 2684

- Système CFC : ce sont les plans diagonaux de type (111), et il y a 4 : 425, 361, 752, 861

b) Directions cristallographiques de densité atomique maximale :

- Système CC : ce sont les directions qui passent par l'atome central, et il y a 4 : 17, 28, 46, 35

- Système CFC : ce sont les directions qui passent par les atomes centrés dans les faces et il en a 3 dans le plan (111) : 16, 18, 68

Exemple 8

Déterminer le nombre d'atomes par maille élémentaire des réseaux suivants :

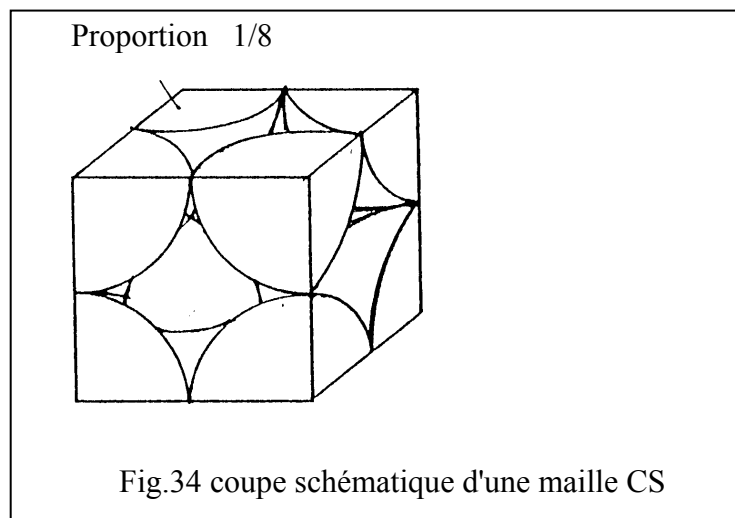
- a) cubique simple C.S
- b) cubique centré CC
- c) cubique à faces centrées C.F.C
- d) hexagonal compact

Réponse 8

Nombre d'atomes par maille élémentaire :

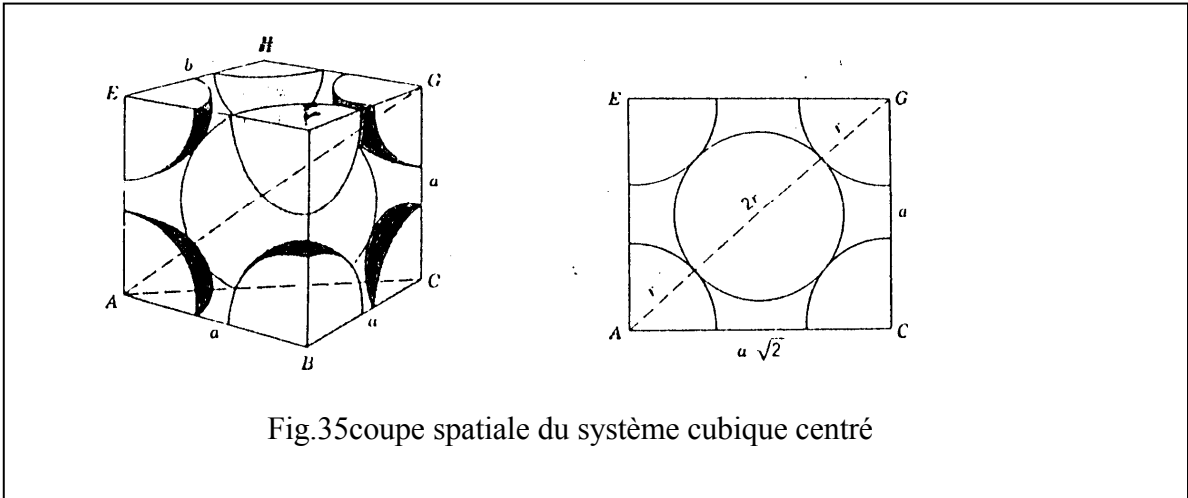
- a) Maille cubique simple CS : il y a 8 atomes disposés aux sommets et appartenant chacun à 8 mailles voisines dans la proportion 1/8. Donc la maille cubique simple contient :

$$8 \cdot (1/8) = 1 \text{ atome/maille}$$



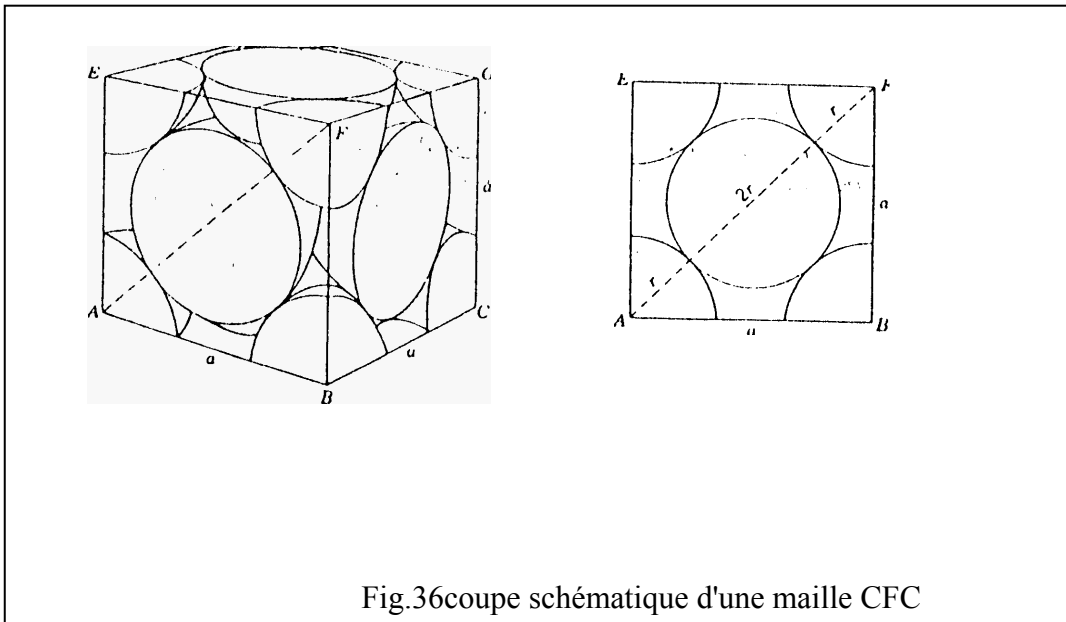
- b) Maille cubique centrée CC : dans ce cas, on a la même disposition que dans le cas précédent plus un atome entier placé au centre de la maille. Soit au total :

$$8 \cdot (1/8) + 1 = 2 \text{ atomes/maille}$$



c) Maille cubique à faces centrées (voir figure 35): au centre de chaque face est placé un atome dans le rapport V_2 , et aux sommets 8 atomes dans le rapport $1/8$. Donc au total :

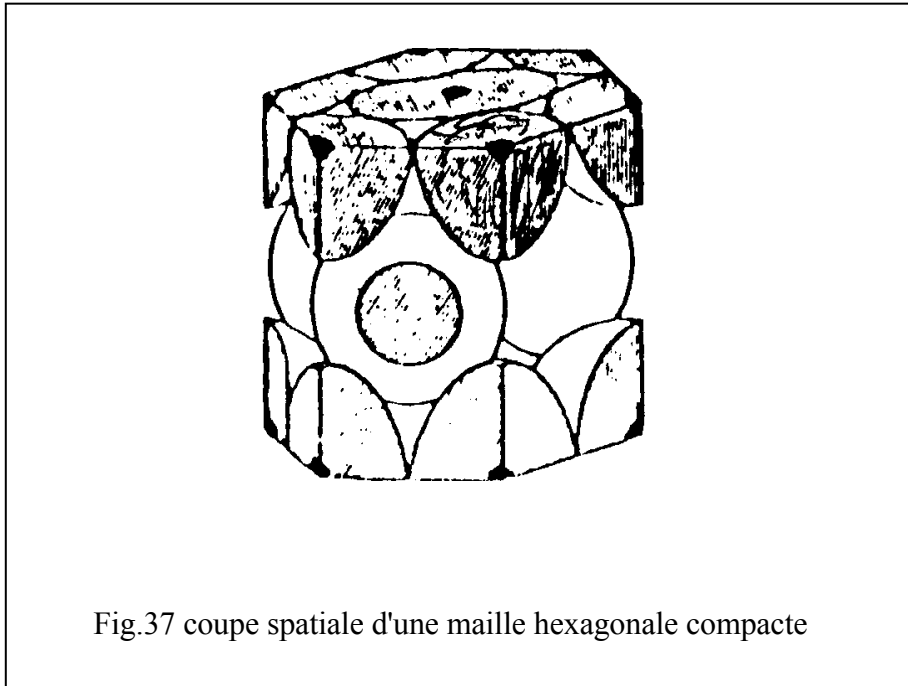
$$8.(1/8) + 6.(1/2) = 4 \text{ atomes/maille}$$



d) Maille hexagonale compact HC : comporte 12 atomes disposés aux sommets des deux bases dans la proportion 1/6 chacun, 3 atomes entiers placés à l'intérieur de la maille, et 2 atomes sur les bases.

Donc on obtient :

$$12 \cdot (1/6) + 3 + 1 = 6 \text{ atomes/maille}$$



Exemple 9

Quelle est la densité (compacité) du réseau cristallin d'une maille cubique simple sous les conditions que l'atome a pour rayon r.

Réponse 9

La densité du réseau est le volume occupé par les atomes qu'on peut considérer comme des sphères suffisamment rigides.

D : densité

N : nombre d'atomes par maille

V_A : volume de l'atome

V_{maille}: volume de la maille

Pour une maille primitive simple le nombre d'atome est $8 \cdot \frac{1}{8} = 1$ atome

$$V_A = \frac{4}{3} \Pi r^3$$

$$V_m = a^3 = (2r)^3 \quad a = 2r \text{ longueur de l'arête}$$

$$D = \frac{NV_a}{V_m} = \frac{1 \cdot \frac{4}{3} \Pi r^3}{(2r)^3} = \frac{\Pi}{6} = 0,523$$

La maille cubique simple est remplie avec 52,3% d'atomes. La même méthode peut être appliquée pour déterminer la densité dans le cas des réseaux CC, CFC et HC.

4. Alliages métalliques

La plupart des métaux purs sont en raison de leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques difficilement utilisables dans l'industrie moderne parce qu'ils n'assurent pas les propriétés physico-chimiques et technologiques exigées. Donc leur emploi est très rare et on utilise surtout leurs alliages. L'addition volontaire à un métal pur d'un ou plusieurs éléments peut modifier profondément les propriétés des métaux. Le mélange obtenu se nomme alliage métallique. Les alliages métalliques sont obtenus par fusion de deux ou plusieurs éléments.

Les alliages métalliques peuvent être binaires, ternaires, quaternaires, ceux qui renferment successivement 2,3 ou 4 éléments. Les substances constituant l'alliage s'appellent les constituants. Un alliage peut se trouver en état d'équilibre stable ou métastable ou métastable.

L'état d'équilibre stable correspond à la valeur minimum de l'énergie libre c'est à dire que le travail des forces extérieures est nul. Il ne peut avoir lieu qu'à de faibles vitesses de refroidissement c'est pourquoi dans la grande majorité des cas les alliages se trouvent en état métastable. Sous le terme métastable on comprend un état de matière dont la stabilité est limitée et qui sous l'effort des actions extérieures passe à d'autres états plus stables, un liquide surfusionné, une solution saturée sont des exemples de l'état métastable.

4.1.Structures des alliages

Dans le cristal d'un métal pur un ion quelconque est entouré par des voisins de même espèce Les forces de liaisons sont les mêmes, car chaque ion possède le même nombre d'électrons libres (les valences sont égales). Par contre dans un cristal d'un alliage un ion quelconque A est entouré par des voisins A ou B. Or les diamètres de A et B sont différents, le nombre d'électrons libres est différent aussi ainsi que les forces de liaison ne seront pas homogènes.

Selon la différence relative du diamètre des ions et de leurs valences, on peut distinguer

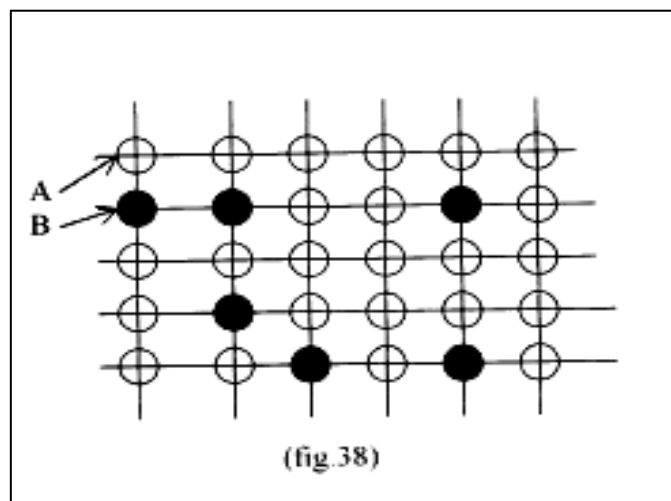
à première approximation

- Solution solide (de substitution et d'insertion).
- Combinaison chimique.
- Mélange physique (mécanique).

4.1.1. Solution solide de substitution

Le réseau cristallin de l'alliage est formé à partir d'un mélange intime des composants différents, par exemple Fe-Ni, Fe-C, Cu-Ni etc. Dans ce type un des composants conserve son réseau cristallin, alors que l'autre ne le conserve pas, les atomes du second passent dans le premier composant.

Le composant dont le réseau cristallin est conservé s'appelle SOLVANT et le composant dont les atomes passent dans le solvant s'appelle SOLUTE. La figure 38 montre la substitution d'un ion A (solvant) par un ion B (soluté). Cette substitution ne modifie pas sensiblement les forces de liaison et la cohésion d'un cristal mixte n'est pas déformée.

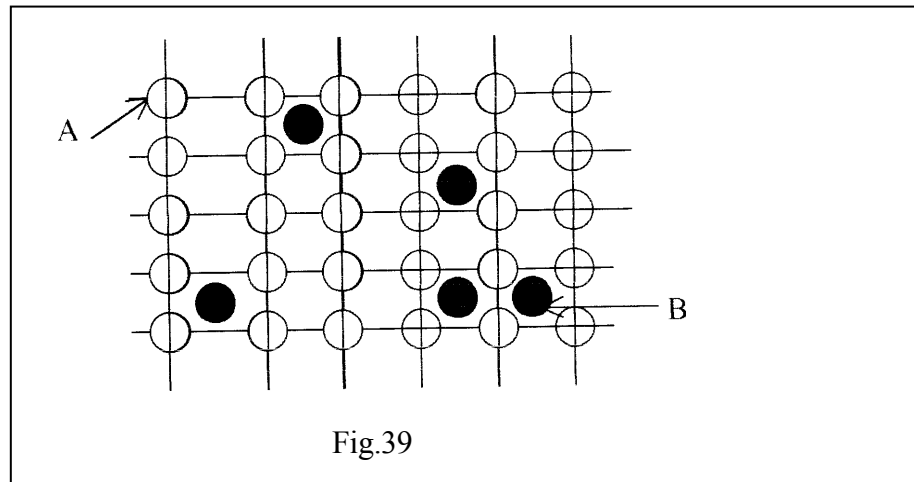


Lorsqu'il se forme une solution solide de substitution les atomes des composants dissout substituent une partie des atomes du réseau cristallin solvant. Puisque les dimensions des atomes du solvant et du soluté se différencient, la formation d'une solution solide perturbe toujours la forme, les paramètres du réseau, c'est pourquoi la dureté des solutions solides est plus élevée que celle des métaux purs alors que leur plasticité reste suffisamment élevée. Pour obtenir une solution solide de substitution il faut tenir compte des conditions géométriques :

- $D_A \approx D_B$ ($D_A - D_B < \pm 15\%$).
- Le réseau cristallin doit être du même type.
- Les composants doivent avoir une structure similaire de la couche atomique des valence c'est à dire ils doivent appartenir au même groupe de la classification périodique des éléments (absence d'affinité chimique).

4.1.2. Solution solide d'insertion ou interstitielle

Une solution solide d'insertion est constituée d'atome du soluté B qui occupent les interstices du réseau cristallin du solvant A figure 39.

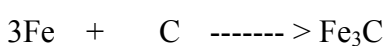


Ces atomes ne peuvent se former que si le diamètre ionique des éléments dissout est suffisamment faible pour correspondre aux dimensions des interstices du réseau cristallin du solvant. C'est pourquoi ce type de solution se forme seulement avec les éléments à faible diamètre ionique tels que H, O, C, B, N. Un exemple de ce type de solution est : Fe_α , Fe_γ . Dans la solution solide d'insertion les atomes des composants soluté se placent entre les vides interatomiques de certaines mailles du composant solvant c'est pourquoi la condition pratique d'insertion est : $D_b/D_a \approx 0,59$. En général l'insertion d'atomes étrangers au réseau le déforme et les propriétés mécaniques changent et l'alliage devient en général plus dur et plus fragile.

4.1.3. Combinaison chimique

Les atomes d'une combinaison chimique se groupent pour donner des molécules, c'est à dire il y a combinaison chimique

Dans le cas de la formation d'un état moléculaire, les alliages ont des structures différentes de celles des composants initiaux par exemple Fe_3C , $CuAl_2$:



Les combinaisons chimiques se distinguent des solutions solides par les caractéristiques suivantes :

- a) Le réseau cristallin est différent des éléments qui entrent dans la combinaison.
- b) La relation entre le poids des éléments est toujours multiple simple c'est pourquoi la composition d'un combinaison peut être exprimée par une formule simple A_mB_n où A et B sont des éléments correspondant et n, m des nombres entiers
- c) Une différence brusque entre les propriétés de la combinaison et des éléments qui la composent.
- d) Température de fusion constante.

4.1.4. Mélange mécanique

Les métaux qui ne se dissout pas l'un dans l'autre forment un mélange mécanique c'est à dire les composants peuvent se mélanger à l'intérieur du grain.

Les mélanges mécaniques peuvent regrouper des métaux purs, des métaux et des combinaisons chimiques, des métaux et des solutions solides.

5. ELABORATION DE LA FONTE ET DE L'ACIER

5.1. Élaboration des métaux ferreux (Fontes et aciers)

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.

Les $\frac{3}{4}$ de la croûte terrestre (1 km de profondeur) sont constitués par l'oxygène (46,6%) et le silicium (27,7%) le reste par l'aluminium (8%), le fer (5%), Na (2,8%), Mg (2,1%), Cu (0,01%). Le reste est constitué par les autres éléments dont la part est insignifiante par exemple l'or ($5 \cdot 10^{-5}$ %), Ag ($1 \cdot 10^{-5}$ %).

Les éléments ne sont pas répartis d'une façon homogène dans les différentes régions. On peut rencontrer différentes compositions chimiques et différentes concentrations des éléments d'une région à une autre.

Donc les métaux sont rencontrés sous formes de minerais qui sont des minéraux ou mélange de minéraux à partir desquels on peut extraire un ou plusieurs métaux par les différents procédés métallurgiques.

Les minerais sont exploités de leurs gisements par exploitation à ciel ouvert ou souterraine et avant d'être acheminés vers les usines métallurgiques subissent des opérations de préparation tels que le concassage, broyage, tamisage, enrichissement etc.. Selon l'énergie et l'agent réducteur employés pour extraire le métal de ses minerais (élaboration du métal), on distingue :

-Procédé métallurgique par voie ignée (thermique) fusion et réduction du minerais, l'agent réducteur le plus employé est le carbone (C) ou le CO.

-Procédé par électrolyse en fusion.

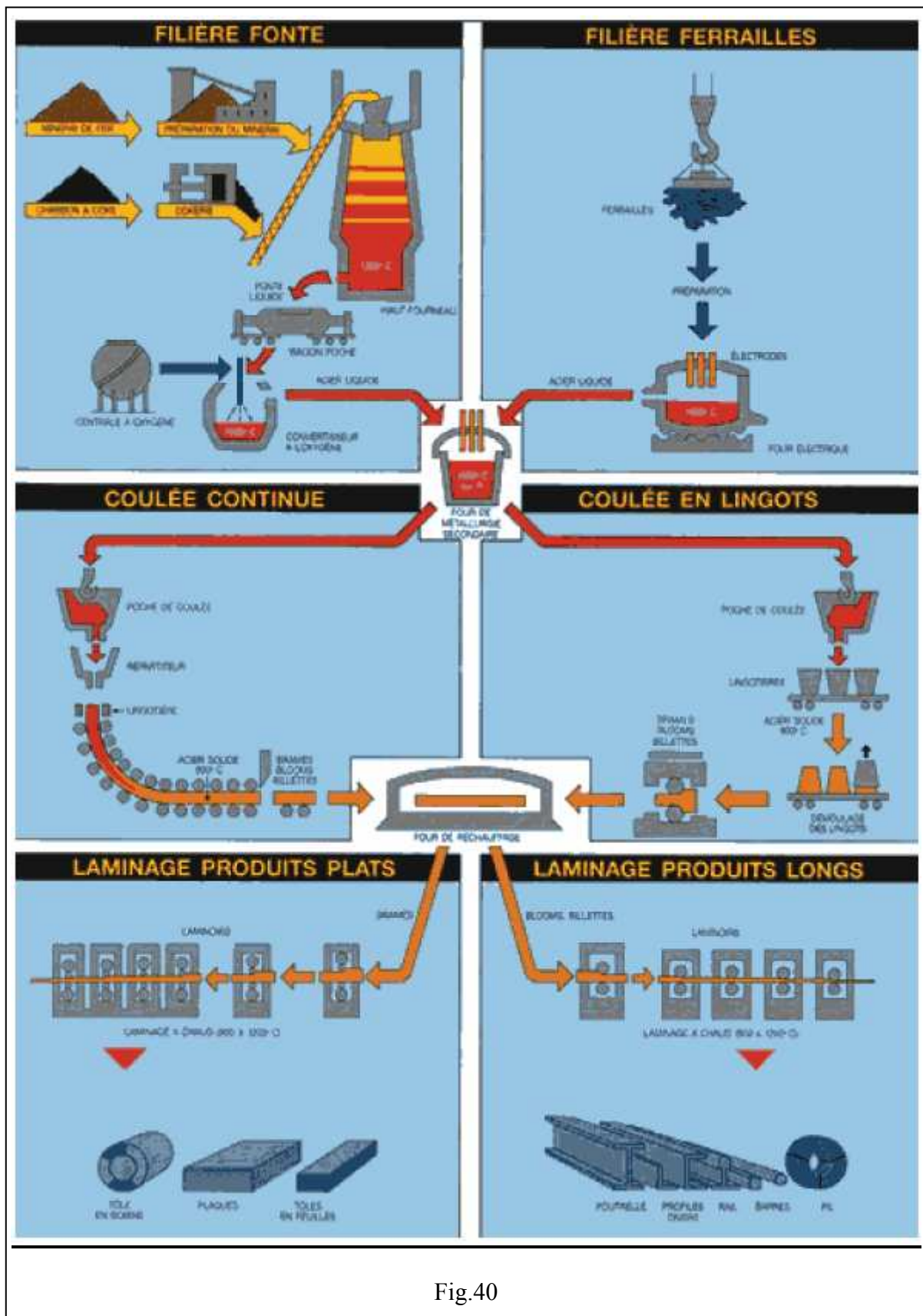
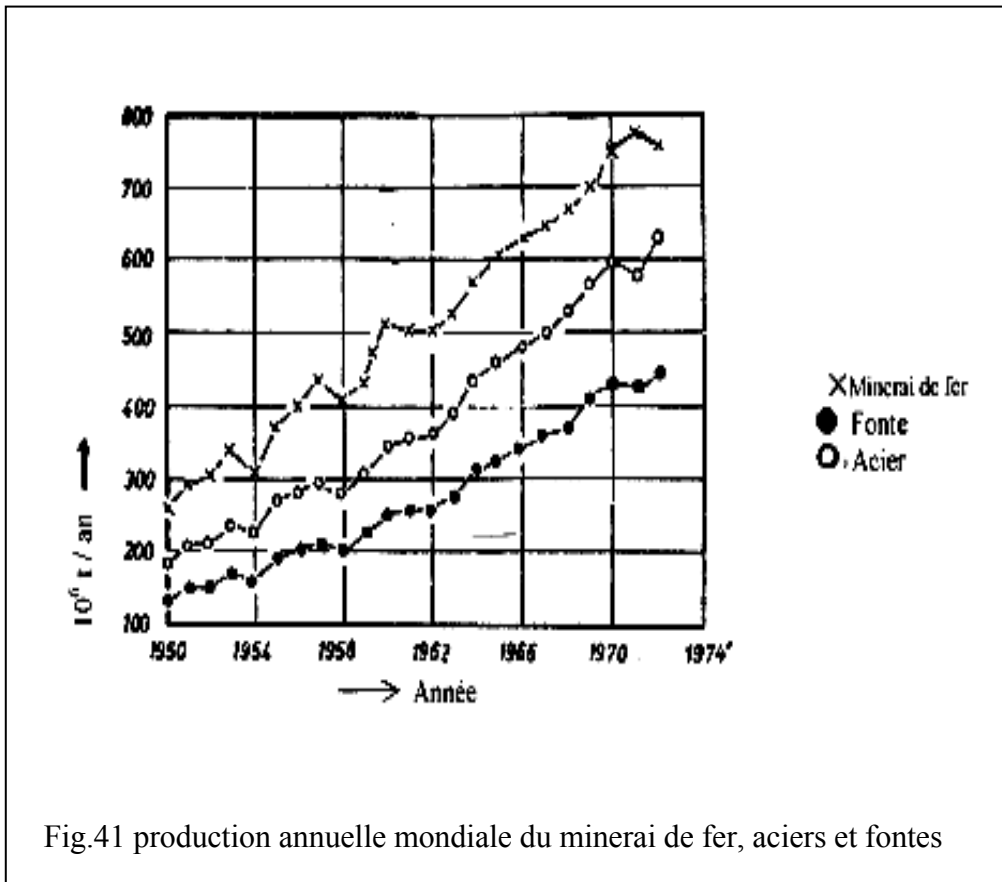


Fig.40

Dans la plupart des pays industriels, le métal le plus utilisé est le fer et ses alliages (fonte et acier), car son importance technique est justifiée par les statistiques de la production figure 41.



La production mondiale en aciers et fontes a triplée en 20 ans (de 1950 à 1972). La production en 1972 était de : 629 millions de tonnes d'aciers, 450 millions de tonnes de fonte. Tandis que la production des métaux non ferreux était très faible par exemple en 1970 cette production se répartit comme suit : Al : 10 millions de tonnes. Cu : 6 millions de tonnes. Zn : 5 millions de tonnes. Pb : 3,5 millions de tonnes. Cette comparaison nous laisse beaucoup réfléchir si la production des métaux ferreux sera maintenue jusqu'à l'an 2000 ou ils seront substitués par d'autres métaux ou non-métaux.

Plusieurs facteurs peuvent en décider, car les prévisions de production des pays producteurs d'aciers et de fonte ne prévoient aucune baisse, il y a eu toujours une augmentation de production par exemple en 1980 la production mondiale en acier étant de 900 millions de tonnes. Certes, dans certains cas 10-15% des aciers sont déjà substitués par des plastiques, aluminium le verre et matériaux composites.

Une substitution totale de l'acier et de la fonte par d'autres métaux et non métaux pour l'instant

économiquement n'est pas avantageuse. La répartition de la production d'acier par pays producteur est la suivante :

URSS	:	126 millions de tonnes				Chine	:	23 millions de tonnes
USA	:	121	"	"	"	Pologne	:	13
Japon	:	97	"	"	"	CSSR	:	13
RFA	:	44	"	"	"	RDA	:	16
GB	:	25	"	"	"	Algérie	:	200.000 tonnes
France	:	24	"	"	"			

Les causes de surpassement des importances techniques des métaux ferreux par rapport aux autres métaux résident dans les bonnes propriétés et leurs étendues que représentent ces derniers. Pourtant il existe d'autres métaux possédant des propriétés plus meilleures mais leur utilisation dans l'industrie est insignifiante.

Si les constructeurs préfèrent les aciers et les fontes aux autres métaux, avant tout c'est à cause de leur prix bas. Cette baisse de prix est due aux abondances de gisements de minerais de fer dans la nature (l'écorce terrestre en contient 5%), ainsi que dans la teneur en fer dans les minerais, certains minerais contiennent jusqu'à 70% de fer.

Le fer et ses alliages sont obtenus par des opérations métallurgiques, qui ont pour but d'extraire le métal (fer) à partir de son minerai. Ces opérations se déroulent dans des fours ou convertisseurs l'élaboration du métal comporte deux phases essentielles :

- a) extraction du métal à partir du minerai on obtient un produit brut appelé Fonte.
- b) Affinage du produit brut (Fonte) afin d'obtenir un second produit prêt à l'utilisation appelé (Fer

5.2. ELABORATION DE LA FONTE

L'agrégat principal utilisé pour l'élaboration de la fonte est le haut fourneau, dans lequel se déroule le processus métallurgique de réduction, fusion, ainsi que la carburation du fer.

Le but principal du haut fourneau est d'extraire le métal (fer) de son minerai et sa séparation de la gangue.

Les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de fer
- Le coke.
- Les fondants (addition)

Le produit principal du haut fourneau est la fonte appelée aussi fonte de première fusion. Elle est obtenue à l'état liquide à une température près de 1400°C et avec une teneur en carbone de 3,5 à 4,5% et de teneur variable en Si, Mn, P, S. Elle peut aussi renfermer d'autres éléments tels que Ti, Cr, etc..

La fonte est définie comme un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2 % (voir diagramme Fer-Carbone). Le produit secondaire obtenu lors de l'élaboration de la fonte est le laitier (scorie) dont les principaux composants sont CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO

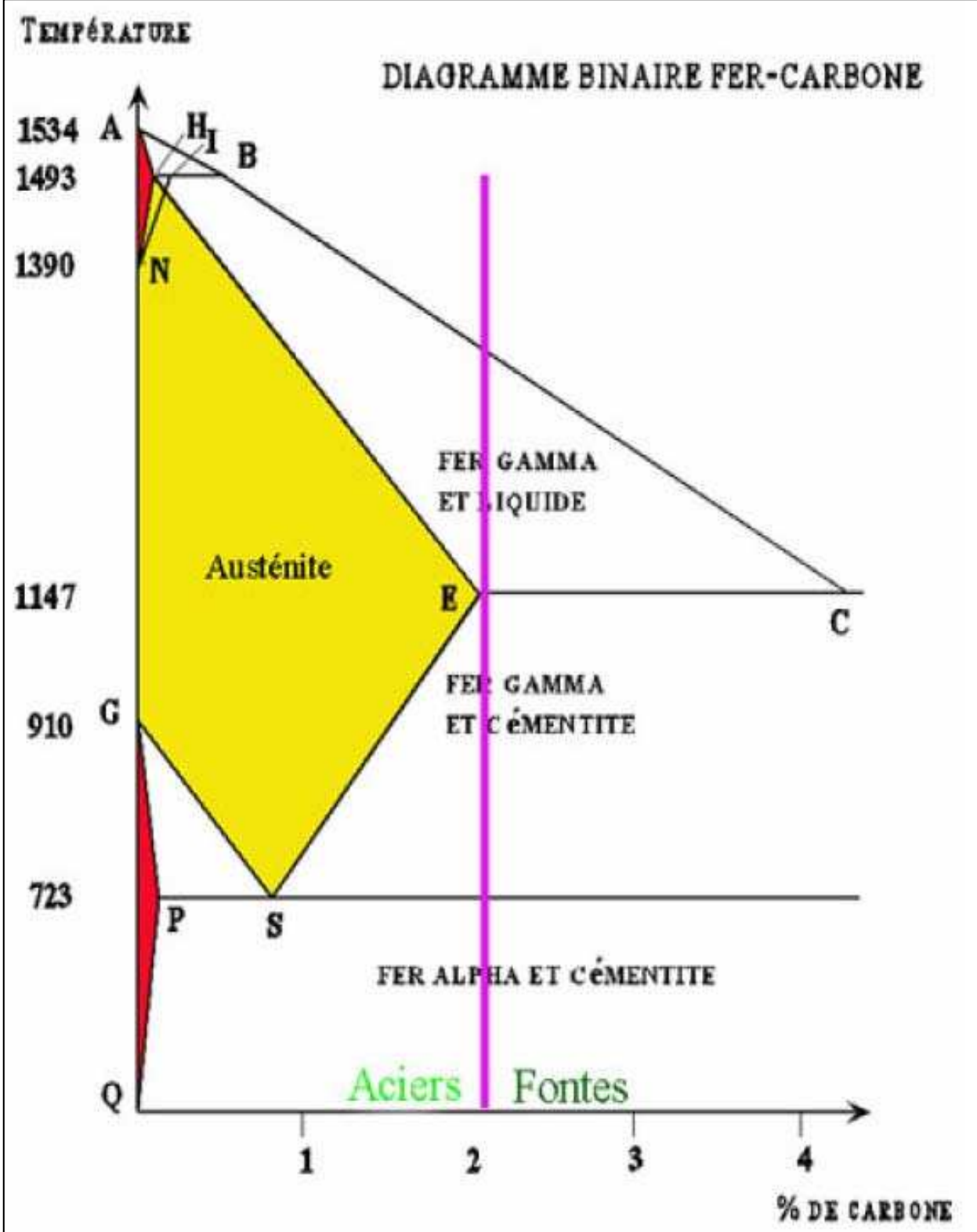


Fig.42

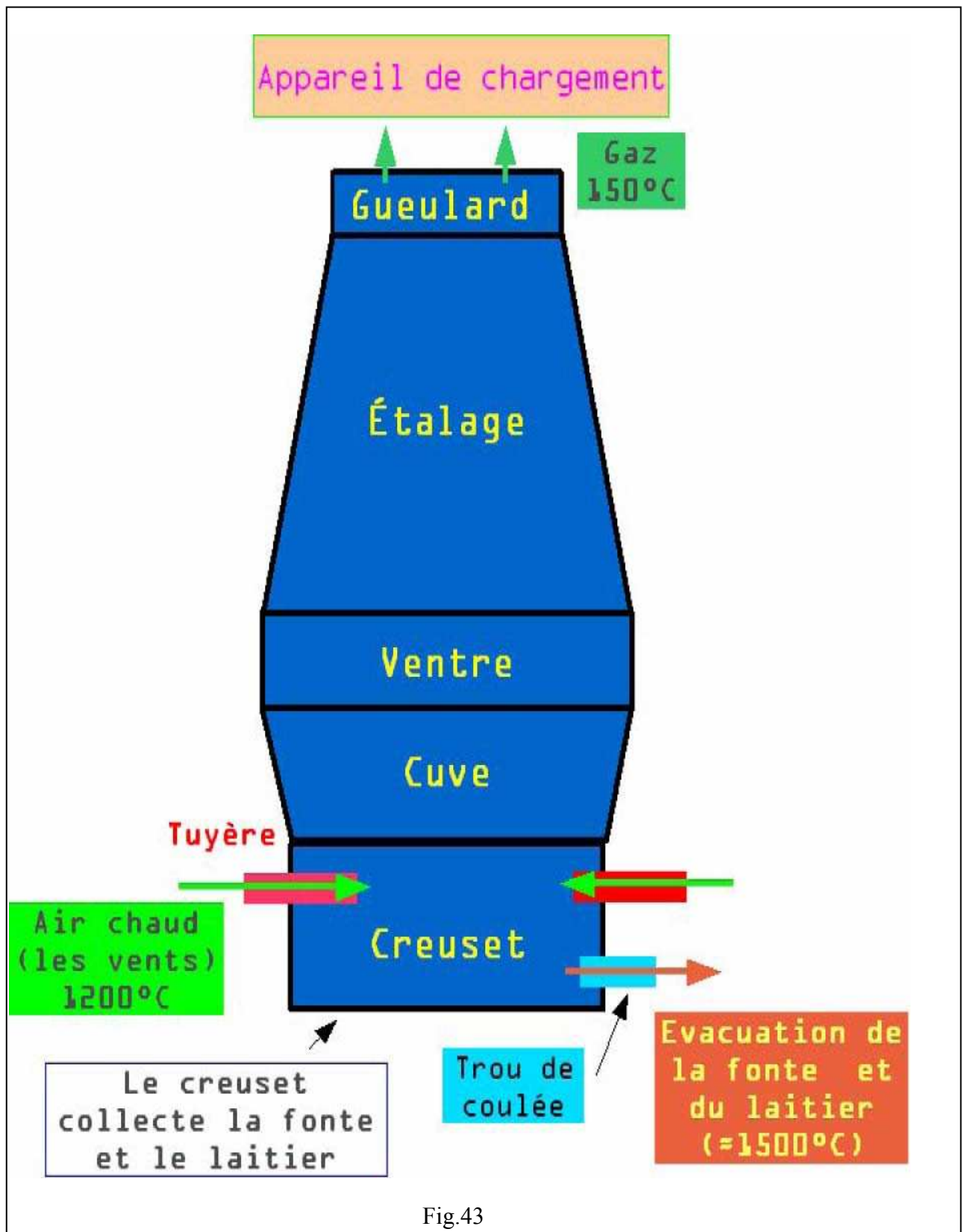


Fig.43

5.2.1.Matières premières

Comme il a été mentionné que les matières premières destinées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de Fer.
- Le coke.
- Et les fondants.

5.2.2.Le minerai de fer

Ce sont des roches contenant le fer en quantité importante et économiquement peuvent être traités en procédé métallurgique.

Selon la forme de combinaisons chimique on distingue plusieurs types de minerais de fer :

- la magnétite (Fe_3O_4), sa couleur varie du gris foncé au noir.
- l'hématite rouge (Fe_2O_3), sa couleur varie du rouge foncé au gris foncé.
- l'hématite brune ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$), sa couleur varie du noir au jaune.
- fer spathique ou sidérose ($FeCO_3$), sa couleur varie du jaune pâle au gris.

Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur la composition chimique des différents minerais.

Type	Composition chimique								
	Fe	Mn	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CO ₂	humide
Magnétite Fe ₃ O ₄	50-70	0.04-0.2	0.02-3	0.1-7	0.3-1.2	1.0-6	0.5-1.5	-	1
Hématite rouge Fe ₂ O ₃	40-70	0.1-1.0	0.1-0.8	5-18	1-6	0.5-5	0.2-1.0	0-8	1-10
Hématite brune Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	25-58	0.5-5.0	0.1-1.0	5-15	1-10	1-25	0.2-2	8-30	5-15
Fer spathique ou sidérose FeCO ₃	30-40	1-7	0.02	7-10	0.1-3	0.5-3	0.5-3.5	20-30	0.5-2

Certains éléments additifs du minerai de fer sont indésirables et d'autres sont utiles. Les éléments nocifs sont le soufre, phosphore, arsenic, plomb, zinc, cuivre, le reste tels que Mn, Cr, Ni, Al, Na, MO sont utiles.

5.2.3. Le minerai de manganèse

Les minerais de fer sont souvent très pauvres en manganèse, qui est un des éléments améliorant les propriétés de fonte. Il est essentiellement utilisé pour l'élaboration des fontes riches en manganèse tels que les ferro-manganèse et fonte spiegel. Le plus souvent on utilise les oxydes tels que MnO_2 et Mn_2O_3 dont la teneur en manganèse peut atteindre 50.

5.2.4. Les fondants

Les fondants sont utilisés dans la charge du haut fourneau pour réduire la température de fusion de la gangue, pour la scarification de la soudure du coke et enfin pour l'obtention du laitier fluide ayant une bonne capacité d'absorption du soufre et du phosphore, ces deux derniers éléments sont indésirables dans la composition de la fonte.

Comme fondants on utilise le plus souvent le calcaire $CaCO_3$ et très rarement la dolomite $MgCO_3 \cdot CaCO_3$

5.2.5. Le coke

Généralement plus de 90% des fontes sont produites avec du coke. Le coke est obtenu par cokéfaction de la houille. Selon les variétés de la houille utilisée le coke est constitué de:

78 - 83% carbone

8 + 11% sandre

2 + 6% H_2O

0,8- 1,2% Soufre

2 - 3% éléments volatils Le rôle du coke dans le haut fourneau est :

- Fournir la chaleur nécessaire pour la marche du processus du haut fourneau.
- Réduction du fer et des alio-éléments de leurs liaisons dans le minerai et en même temps carburation du fer.
- Ameubler la charge dans le haut fourneau afin d'avoir une bonne perméabilité aux gaz, grâce à sa grande résistance à l'écrasement.

5.2.6. Le haut-fourneau

Le haut-fourneau est un four à forme circulaire figure 42 et 43 destiné à l'élaboration de la fonte. Son espace de travail se compose du bas vers le haut des parties suivantes :

- 1- Le creuset : partie cylindrique, dont la partie supérieure est appelée ouvrage et porte les tuyaux qui amènent l'air chaud. La partie inférieure porte deux trous, l'un pour la coulée de la fonte et l'autre pour la scorie (laitier).
- 2- L'étagage : tronc de cône évasé vers le haut
- 3- Le ventre : partie cylindrique.
- 4- La cuve : tronc de cône évasé vers le bas.
- 5- Le gueulard : ouverture par laquelle on introduit la charge et d'où s'échappent les gaz.
- 6- Blindage métallique ayant même profil que le haut-fourneau.
- 7- 8 éléments de refroidissement du blindage métallique.
- 9- fondation.
- 10- minerais de fer + fonte.
- 11- coke.
- 12- évacuation des gaz.
- 13- tuyère

La composition d'une charge à introduire dans le haut-fourneau pour l'élaboration d'une tonne de fonte ainsi que les produits obtenus.

a) Charge introduite

minerais de fer et addition	2160 kg/t de fonte
fondant (calcaire)	470 kg/t de fonte
coke	960 kg/t de fonte
rend chaud (humide)	3 125 kg/t de fonte
Total =	6715 kg/t de fonte

b) Produits obtenus

Fonte	1000 kg
Laitier	905 kg/t de fonte
Poussière de gaz	130 kg/t de fonte
Gaz de Gueulard (humide)	4680 kg/t de fonte
Total	6715 kg

Blast Furnace (BF) Facilities

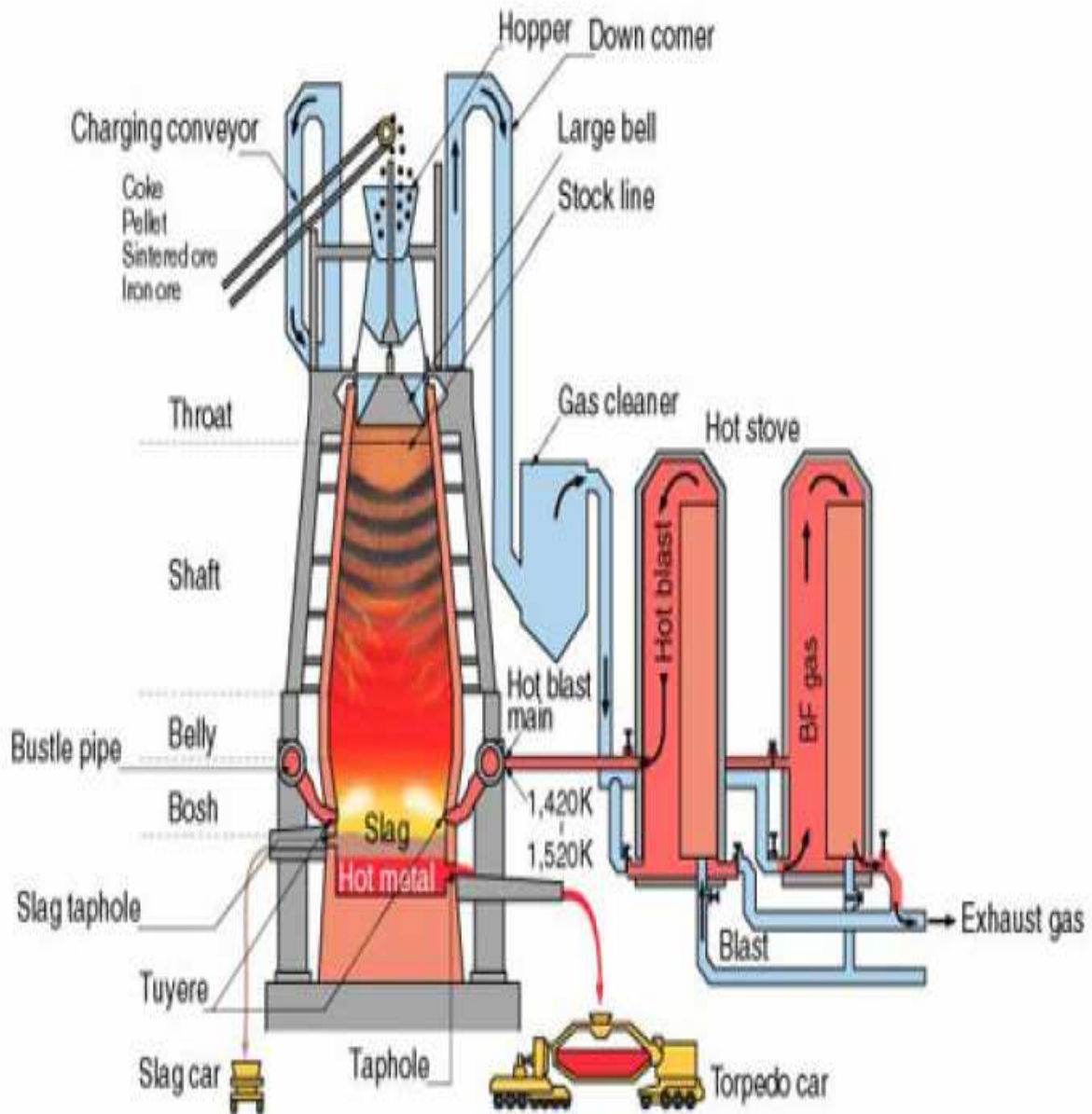


Fig.44

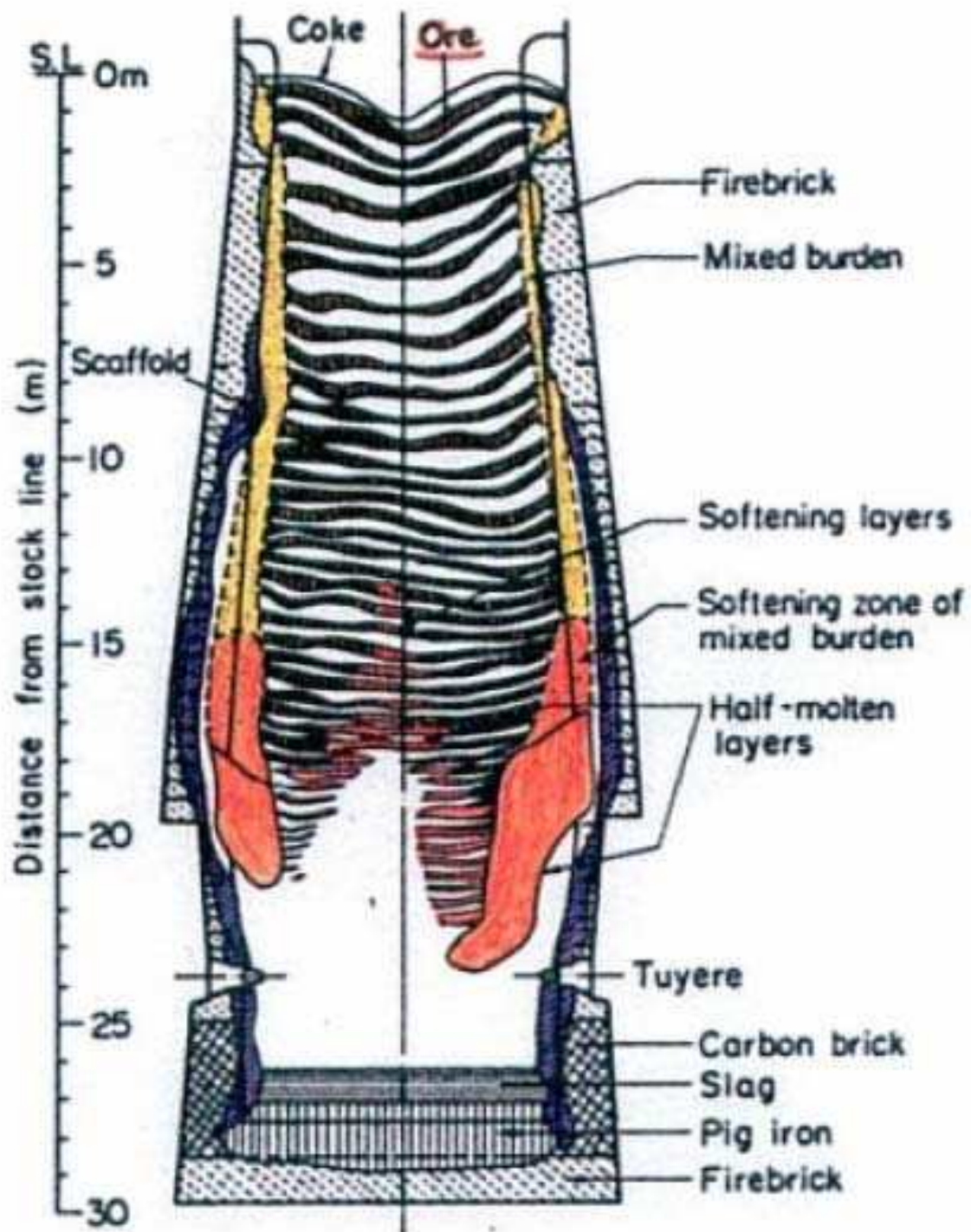


Fig.45

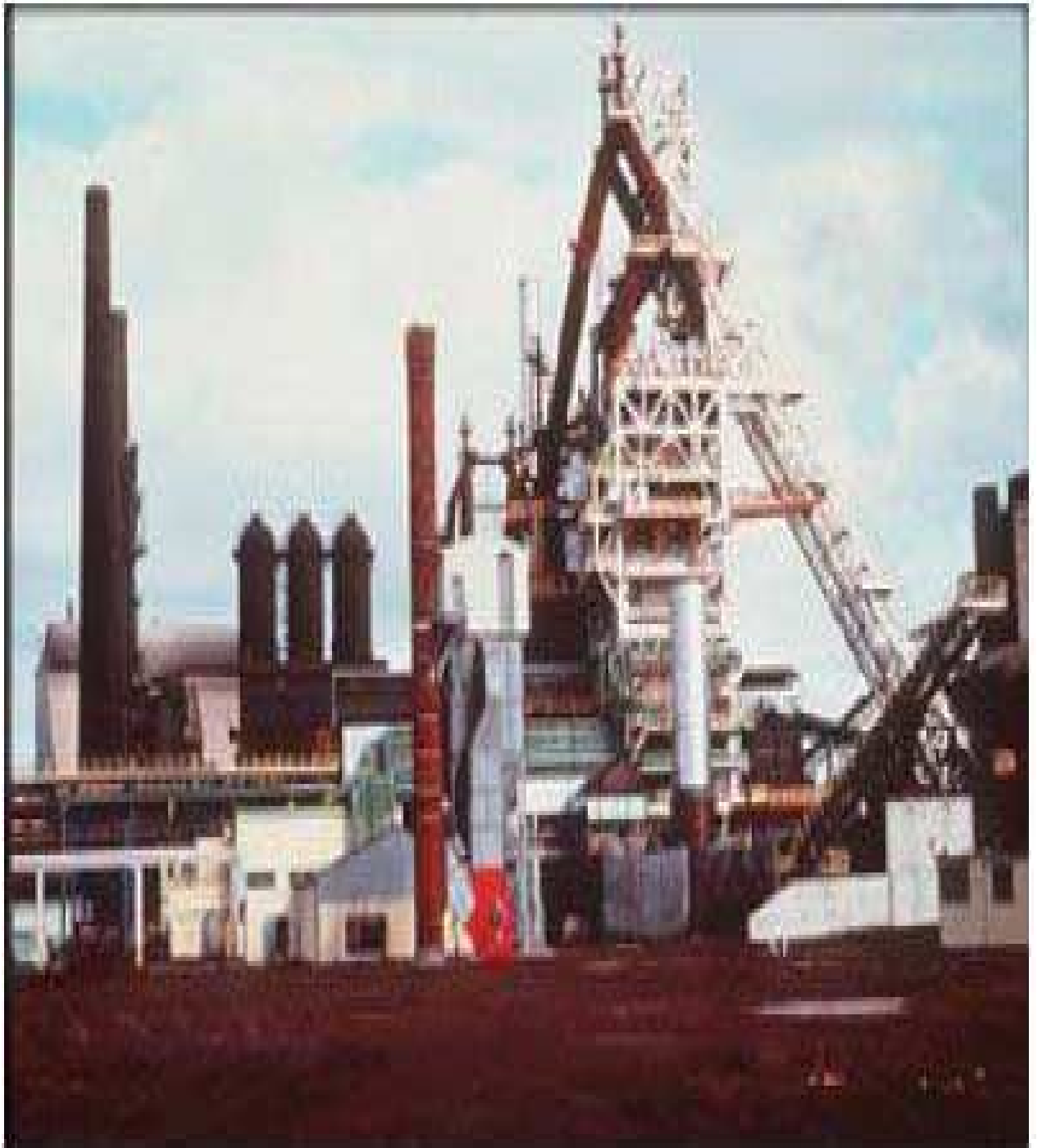


Fig.46

5.2.7. Flux des matières dans une usine métallurgique

La charge avant d'être introduite dans le haut-fourneau subit une préparation au préalable comme il est indiqué sur la figure 47.

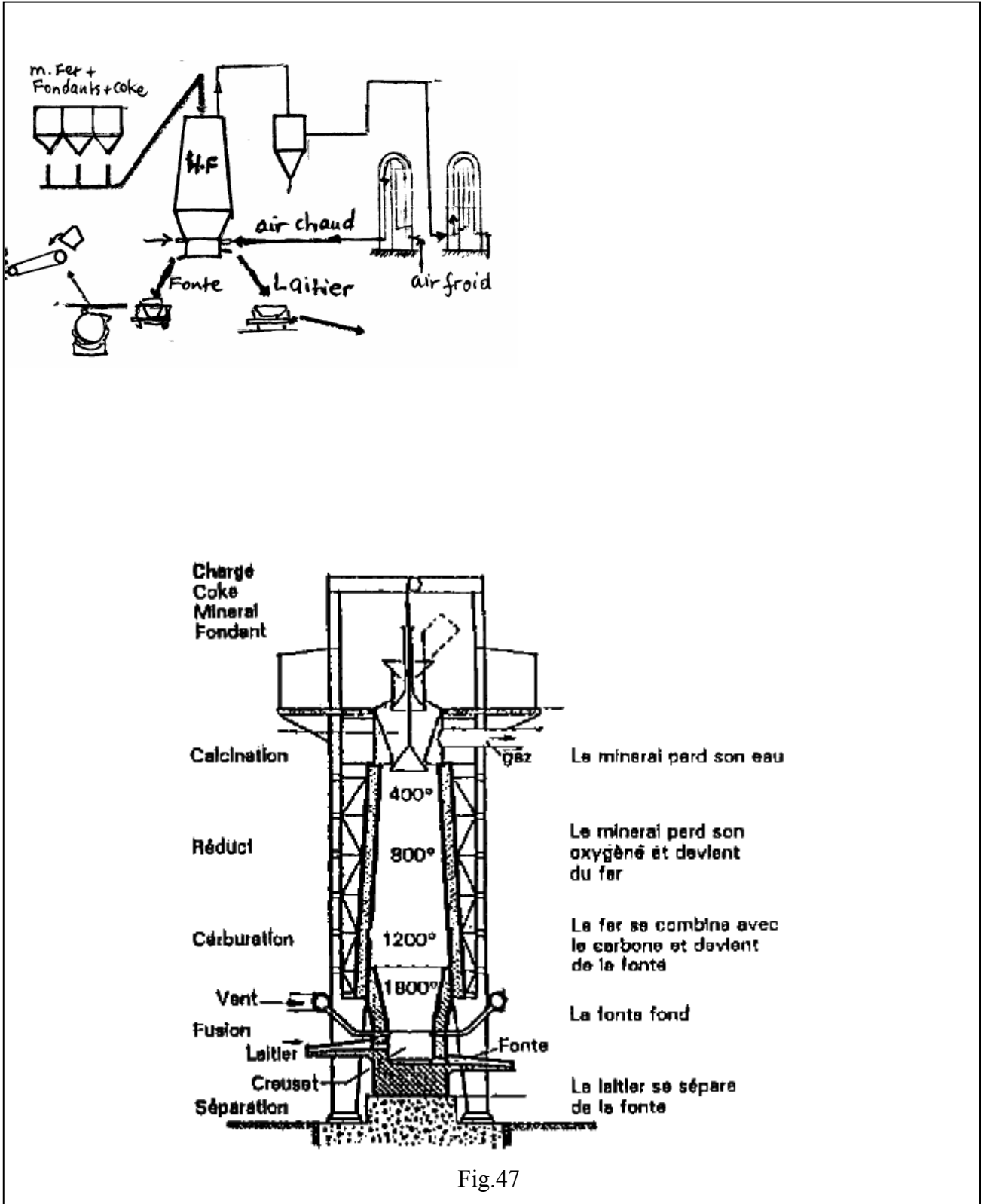


Fig.47

Minerais de fer	fondants	coke
concassage	broyage	concassage
↓	↓	↓
broyage	criblage	enrichissement
↓	↓	↓
criblage	séparation	cokéfaction
↓		↓
enrichissement		séparation
↓		↓
agglomération		criblage

C'est par le gueulard que la charge est introduite à l'aide d'un skip (monte charge). Les proportions du minerai de fer, fondants et du coke sont définies au préalable suivant le type de fonte à élaborer.

Le minerai de fer et les fondants sont introduits de telle façon à former des couches qui seront séparées par des couches de coke. Il s'établit un courant descendant des matières d'abord solides, puis pâteuses et enfin liquide qui traversent le haut fourneau en quelques heures (la durée dépend du volume et de la hauteur du haut-fourneau).

L'air chaud provenant des cowpers (régénérateurs de chaleur chauffés par le gaz de gueulard) est soufflé par les tuyères, ainsi l'oxygène contenu dans l'air chaud participe à la combustion du coke en le transformant en oxyde de carbone CO, il en résulte un courant gazeux ascendant qui traverse aussi le haut-fourneau en quelques heures.

Le courant gazeux possède deux fonctions :

- Transmettre la chaleur obtenue près des tuyères (1800°C) à la charge. Donc la charge descendante se chauffe jusqu'à une température de 1500°C à son arrivée au creuset.
- La deuxième fonction est la réduction des différents oxydes.

La réaction fondamentale de réduction lors du processus métallurgique dans le haut-fourneau est la réduction du fer. L'agent réducteur est le carbone et son oxyde (CO), mais le carbone est plus énergétique que le Co. Donc leur rôle est d'éliminer l'oxygène des différents oxydes.

La réduction dépend essentiellement de l'affinité chimique de l'élément à réduire par rapport à l'oxygène. Plus l'affinité chimique (solidité chimique) de l'élément avec O₂ est plus grande, plus il est difficile à le réduire des ces oxydes.

Il existe deux types de réduction :

- La réduction directe, celle qui se passe avec le carbone pour former CO.
- La réduction indirecte avec CO et H₂ pour former CO₂ et H₂O vapeur

La figure 48 et 49 nous donne un aperçu sur les réactions principales de réduction se déroulant lors du processus métallurgique de haut-fourneau. Près du gueulard et à une température avoisinant 200°C, la charge subit un séchage dont l'humidité contenue est évacuée sous forme de vapeur avec le gaz de gueulard.

À la partie supérieure de la cuve et entre 200°C et 400°C il y a décomposition des hydrates et entre 400°C et 800°C c'est la décomposition des carbures.

Les processus ci-dessus énumérés portent le nom de travail de la cuve, toutes ces réactions sont endothermiques.

Entre 800 et 1000°C on arrive au processus de réduction indirecte les éléments principaux tels que le fer et le manganèse (par rapport au fer le manganèse est difficile à réduire). Jusqu'au domaine de la réduction indirecte toute la charge se trouve à l'état solide.

À des températures supérieures à 1000°C et près du ventre et des étalages du haut fourneau se passe la réduction directe et commence la fusion de la charge.

Dans le domaine de la réduction directe le carbone du coke est très actif à ce que toutes les réactions de réduction se passent sans CO.

Avec l'augmentation de la température près de 1500°C, la charge est liquide et quelques réductions chimiques se poursuivent tels que la désulfuration de la fonte.

La formation de la fonte est caractérisée par la réduction du fer et sa liaison avec le carbone et autres éléments de la charge.

La carburation du fer commence déjà à l'état solides et à des températures inférieures à 1000°C. C'est le carbone du coke qui passe dans la composition chimique de la fonte, et au fur et à mesure que le fer se carbure sa température de fusion baisse.

La charge en passant à l'état liquide, elle s'écoule sous forme de gouttes entre les morceaux de coke, ce qui laisse poursuivre le processus de carburation du fer jusqu'à la teneur ordinaire nécessaire à l'obtention de la fonte liquide.

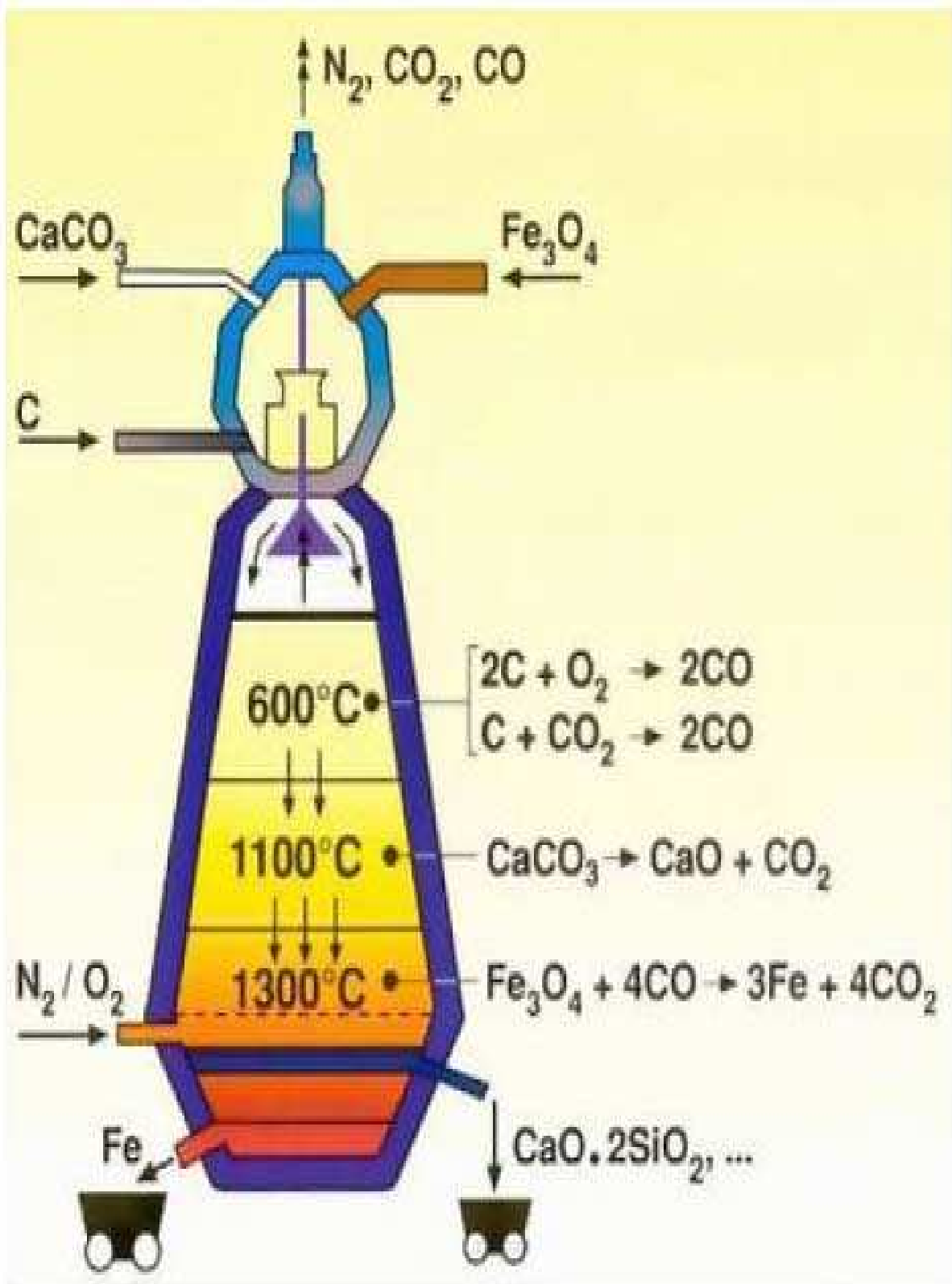


Fig.48

Matières	Coke	Minéri de fer	Calcaire
Element principal	C	Fe, O ₂	CaCO ₃ et CaO
Elements accompagnateurs	S, Si O ₂ , Al ₂ O ₃ , H ₂ O, Fe ₂ O ₃	SiO ₂ , CaO, MgO, Al ₂ O ₃ , Mn ₂ O ₃ , H ₂ O, FeS, Karbonate, P ₂ O ₃	SiO ₂ , MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃
Elements possible	LiO ₂ , P ₂ O ₃ , CaO, MgO, Alcalins et autres	As ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , V ₂ O ₃ , TiO ₂ , BaO, Pbs, Mos, Zns, Cas, Nis, Cus	S, TiO ₂ , etc..

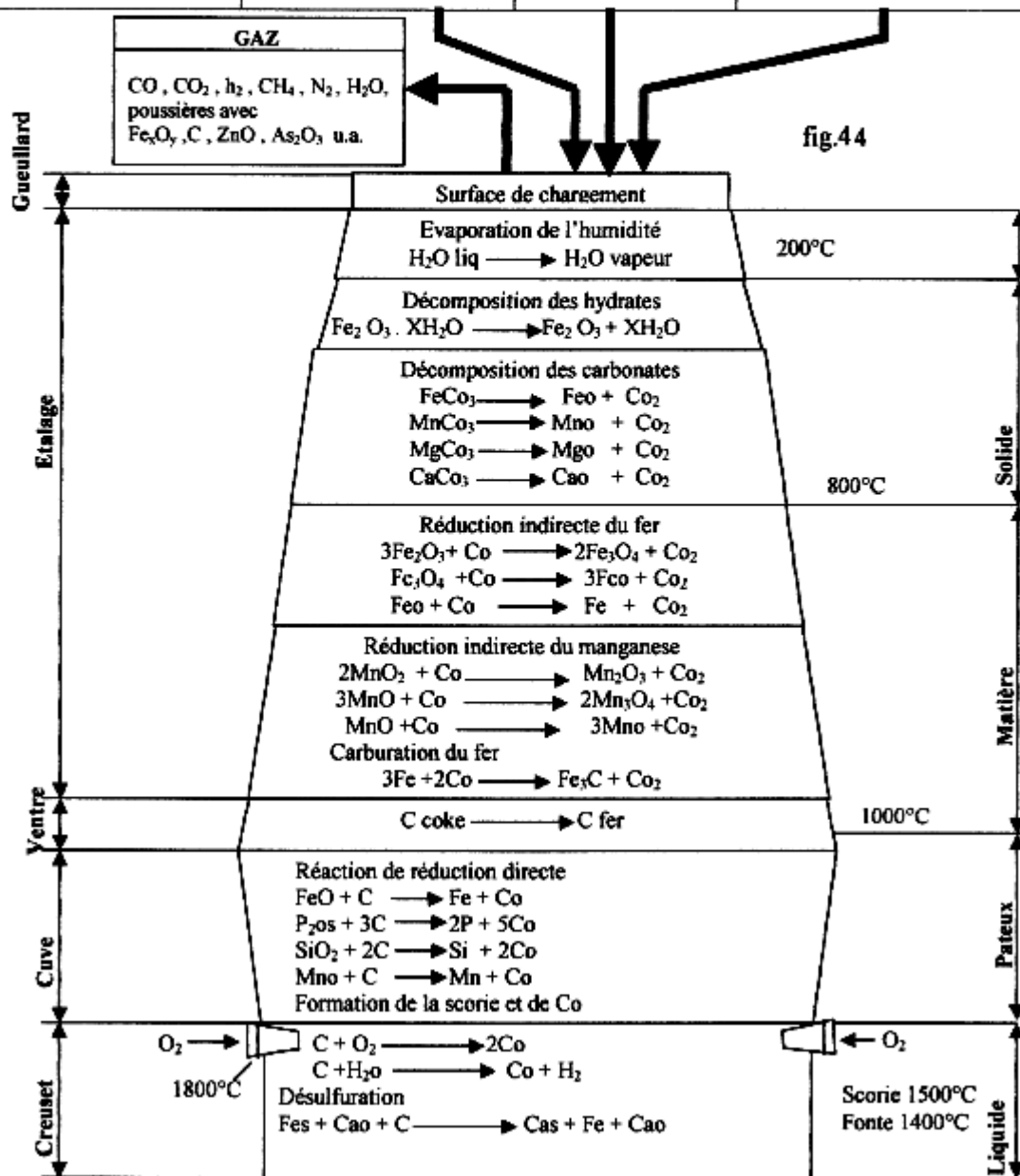


Fig.49

5.2.8. Les fontes du Haut Fourneau

Les fontes obtenues dans le H-F sont destinées pour l'affinage de l'acier dans les différents fours et convertisseurs ainsi que pour le moulage des pièces mécaniques (fonderie). Elles se distinguent l'une de l'autre par leurs compositions chimiques.

Le tableau ci-dessous nous indique les différents types de fontes obtenues dans le H-F avec leur composition chimique.

	C	Si	Mn	P	S
Type de fontes H-F	$\frac{0}{10}$	%	%	%	%
Fonte pauvre en Mn	≈4%	Jusqu'à 1	(<1)	0.08-0,12	Jusqu'à 0.05
Fonte riche en Mn	≈4%	Jusqu'à 1	(2 - 3)	0.08-0.12	Jusqu'à 0.05
Fonte Thomas	3.2 - 3,6	0,3 - 0,6	0.5 - 1,5	1,7-2.2	0,05-0.15
Fonte Bessmer	3.8	1.0-2.5	1 - 3	0,07 - 0,1	Jusqu'à 0.04
Fonte de Fonderie	3,5 - 4.2	2-3	Jusqu'à 1.0	0.5- 1.0	Jusqu'à 0.07
Fonte Hématite	3.5 - 4,2	2 - 2.5	0,7- 1.5	0,08-0.12	Jusqu'à 0.04
Fonte-manganèse	6-8	< 1.5	30 - 80	0.2 - 0.3	0.02
Fonte-silicium	1.2- 1.6	9- 15	0.5 - 0,7	0.12-0.16	0,02 - 0.04

La fonte liquide comporte des inclusions variées. Quelques une sont souvent introduites intentionnellement. Outre leurs caractères alphagènes ou gammagènes et leurs actions sur la trempabilité, valables pour les alliages ferreux, les éléments introduits dans les fontes sont caractérisés par leurs actions :

- Graphitisantes (Si, C, Al, Cu, Ni, Zr...) qui se traduisent par la création de germes servant de support de croissance pour le graphite.
- Antigraphitisantes (Cr, Mo, Mn, S, V, W, B...)

Nous donnons quelques indications spécifiques des principaux éléments contenus dans les fontes.

a) Cuivre et nickel : éléments graphitisants qui contribuent fortement au raffinement de la perlite par leur action γ -gène. En outre, le cuivre est fortement antiferrisant, alors que le nickel est sans effet.

L'introduction dans la fonte des ces deux éléments entraîne une augmentation de la résistance et de la dureté.

b) Silicium : élément graphitisant de base dans les fontes grises ($\% > 3$) qui diminue la solubilité du carbone à l'état liquide dans l'eutectique et solide dans l'austénite. Il augmente la réfractairité des fontes et leurs tenus à certaines corrosions.

c) Chrome : élément antigrahitisant qui stabilise les carbures en retardant leur décomposition thermique ainsi que l'oxydation interne, et de ce fait améliore la tenue à chaud.

d) Manganèse : empêche la graphitisation et renforce les liaisons atomiques entre le for et le carbone dans la cémentite.

e) Molybdène : il est surtout utilisé pour son importante action sur le " nez perlitique " des courbes T.T.T. Il améliore considérablement la résistance au choc thermique.

f) Soufre : est un élément nuisible qui dégrade les propriétés mécaniques de la fonte. Il abaisse la coulabilité et contribue à la formation de soufflures dans les pièces moulées.

5.2.9. Formation du laitier.

Le deuxième produit obtenu lors de l'élaboration de la fonte est le laitier. Le laitier résulte de la combinaison des éléments de la gangue de divers minerais, des fondants et de la sandre du coke.

Les principaux éléments constituant le laitier sont donnés sur le tableau ci-dessous.

Cao	SiO ₂ :	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S	Na ₂ O + K ₂ O
%	%	%	%	%	%	%	%	%
35-40	28-40	5 - 17	2 - 13	< 1	< 10	< 1	1 -2	< 2

La formation du laitier s'effectue en trois étapes :

- a) Près de la partie inférieure de la cuve se forme d'abord le laitier primaire facilement fusible et en grande quantité et contenant une quantité importante de FeO
- b) Avec l'augmentation de la température le FeO et MnO contenus dans ce laitier sont réduits simultanément et il y a dissolution d'autres oxydes dans ce laitier. Ce laitier est appelé laitier intermédiaire.
- c) Le laitier final se forme dans le creuset à des hautes températures par dissolution de la sandre du coke, fondant et le reste de la gangue.

5.3. ELABORATION DE L'ACIER

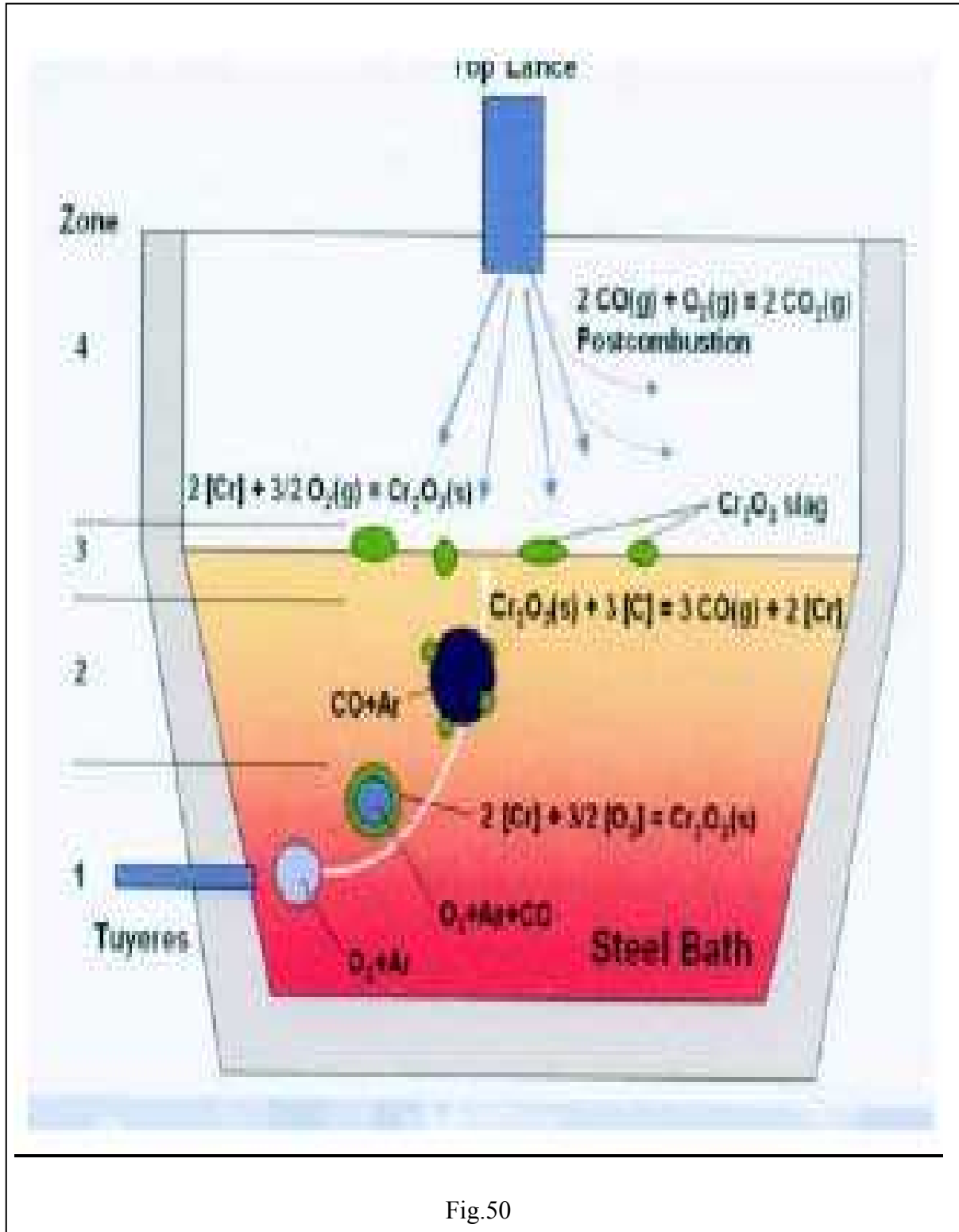


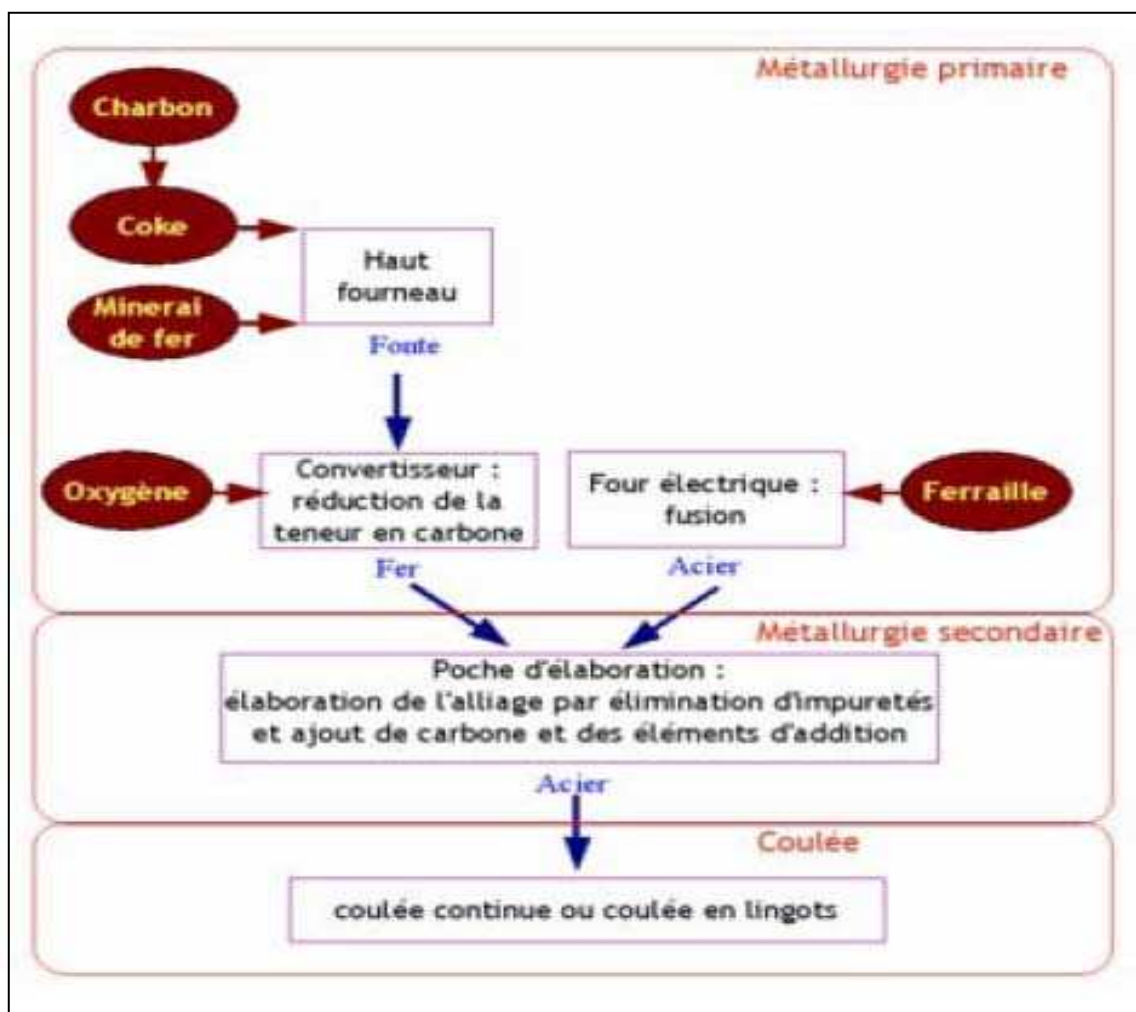
Fig.50

5.3. Élaboration de l'acier

L'acier est défini comme un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% (voir diagramme Fe-C). Dans l'industrie l'acier est plus utilisé que la fonte, car il possède des propriétés mécaniques relativement bonnes par rapport à ceux de la fonte.

Les procédés de fabrication modernes de l'acier sont assez nombreux. Ils donnent des produits de qualités différentes. La majorité d'entre eux consiste pour affiner la fonte de première fusion à la décarburer dans un premier temps, puis de rétablir par des additions convenables les teneurs de ces éléments au niveau désiré.

L'acier est obtenu dans des fours ou convertisseurs par différentes opérations métallurgiques tels que l'oxydation des différents éléments d'impuretés, décarburation de la fonte et addition d'éléments alliés nécessaire pour améliorer les différentes propriétés.



Les matières premières nécessaires pour l'élaboration de l'acier :

- Fonte liquide ou solide (selon le procédé).
- Ferraille.
- Additions.
- Ferro-alliages (alliages de métaux).

La masse principale de la charge (90% à 95%) se compose de la fonte et de la ferraille, la composition de la fonte doit correspondre aux exigences du procédé utilisé.

Les métaux alliés sont utilisés le plus souvent sous forme de ferro-alliages, destinés à obtenir des aciers de propriétés bien définies. Les additions sont le calcaire sous forme de CaCO_3 ou CaO ou CaF_2 utilisé pour l'affinage électrolytique.

La ferraille, le calcaire, les ferro-alliages et CaF_2 sont introduits dans les fours ou convertisseurs à l'état solide, dans certains cas sont chauffés au préalable. La fonte est introduite soit à l'état liquide (1250°C) dans le cas des procédés par soufflage d'air ou d'oxygène ce qui nécessite un préchauffage du four. La chaleur est obtenue lors de l'oxydation des éléments alliés au fer dans la charge, ce procédé ne nécessite aucun apport de chaleur extérieure pour atteindre la température de fusion de l'acier (1600°C), soit à l'état solide, dans le cas des procédés des fours à sole, ce qui exige à fournir de la chaleur en grande quantité pour la fusion de la charge solide et atteindre la température de fusion de l'acier, la chaleur utilisée est la chaleur de combustion du combustible tels que mazout, gaz naturel ou énergie électrique.

Comme il a été déjà mentionné que l'acier est élaboré principalement à partir de la fonte liquide ou solide ou à partir de la ferraille, l'utilisation de l'un ou de l'autre procédé dépend de l'éloignement de l'aciérie du haut-fourneau. Si l'aciérie est loin du H-F, la fonte subit une seconde fusion. Si l'aciérie est près du H-F il est évidemment économique d'utiliser la fonte liquide, laquelle est coulée directement du H-F dans un vaste réservoir sur rail appelé mélangeur. Le mélangeur rend donc la marche de l'aciérie indépendante de celle du H-F.

5.3.1. Processus d'élaboration de l'acier

Le principe de l'élaboration de l'acier est l'oxydation des éléments accompagnant le fer, tels que le carbone, le silicium, le phosphore, le manganèse etc. jusqu'à la teneur désirée dans l'acier, ainsi que l'élimination des différents oxydes du métal liquide. Ces éléments sont éliminés soit sous forme de scorie ou de gaz. Donc le métal liquide est toujours en contact avec la scorie formée et la phase du gaz.

Les réactions chimiques se passent entre ces trois systèmes auxquels on peut ajouter un quatrième système qui est le garnissage du fer. L'acier liquide-scorie-phase de gaz est une condition idéale facilitant le transfert et la transformation de la matière.

Au point de vue thermodynamique, les transformations des matières et énergétiques entre les systèmes s'effectuent en une direction donnée définie par la force motrice de réaction, mais toutes les transformations des matières sont limitées par un état d'équilibre qui est caractérisé par l'enthalpie libre AG° (unité de mesure de la force motrice).

Généralement il n'est pas possible de laisser dans un système fermé, des transformations métallurgiques s'effectuant dans une seule direction jusqu'à ce que toute la matière s'épuise et sera transférée dans le produit final correspondant pour cela il est très important de connaître :

- a) quelle concentration sous les conditions extérieures (P,T) caractérise l'équilibre de la réaction.
- b) Jusqu'à quel point l'équilibre d'une transformation peut être changé sous l'influence de l'extérieur.

Revenons à l'oxydation des différents éléments, pour cela le métal doit absorber l'oxygène de l'air ou l'oxygène pur ou l'oxygène contenu dans les oxydes de fer de minerais ou des riblons selon les procédés d'affinage.

A la fin de l'affinage la teneur en oxygène (O_2) dans le métal liquide est généralement près de 0,1%, l'utilisation d'un acier avec une telle teneur en oxygène n'est pas économique à cause des propriétés plastiques, coulabilité etc.

Donc après l'opération d'oxydation il est nécessaire de désoxyder le métal liquide, l'opération de désoxydation est effectuée avant ou après la coulée de l'acier liquide, par addition d'éléments de désoxydation.

Le tableau ci-dessous nous montre le pourcentage des éléments essentiels tels que Fe, C, et O_2 avant affinage, avant et après l'opération de désoxydation.

Opération	%Fe	% [O]	% C
Fonte + ferraille	93	0,005	3,2-4,5
Oxydation des éléments avec l'oxygène	99	0,05	0,2
Métal liquide (acier non allié)	>99	0,05-0,1	0,01-0,6
 désoxydation du métal liquide			
 Acier non allié	> 99	0,001-0,01	selon le % désiré

5.3. 2.Composition chimique de l'acier

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% (C<2%) outre le fer et le carbone qui en sont les éléments principaux rentrant dans sa composition, un acier ordinaire contient principalement du silicium ; du manganèse, du soufre et du phosphore.

5.3.3Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% outre le fer et le carbone qui en sont les éléments essentiels rentrant dans leur composition, ils se composent de plusieurs autres inclusions ou impuretés constantes ou inévitables telles que Mn, Si, P, S, O, M, H, etc... qui influent sur leur propriétés. La présence de ces inclusions s'explique :

- Soit par la difficulté de l'élimination de certaines d'entre elles lors de l'élaboration (S,P).
- Soit par leur passage dans l'acier lors de l'opération de désoxydation (Mn , Si).
- Soit encore par addition en vue d'améliorer les propriétés de l'acier (Cr, Ni, Mo, etc.).

Les fontes contiennent ces mêmes inclusions ou impuretés mais en quantité plus grande. L'influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier peut être divisée en deux groupes : les éléments chimiques constants et les éléments d'alliages.

5.3.3.1. Influence des éléments chimiques constants

La fragilité et la plasticité sont les propriétés essentielles de l'acier, le même métal peut être ductile ou fragile suivant :

- La composition chimique.
- L'état de surface.
- Et la *température*.

Parmi les éléments chimiques, généralement contenus dans les aciers ordinaires, on peut citer :

a) Le carbone

Après refroidissement lent, la structure d'un acier se compose de la ferrite et cémentite (deux phases), la quantité de cémentite est directement proportionnelle à la teneur en carbone

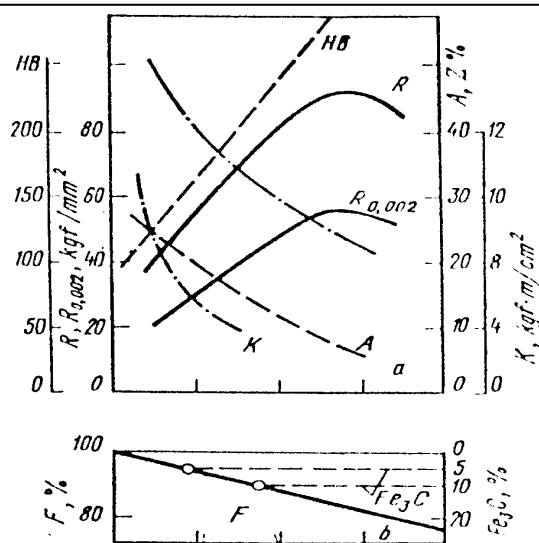


fig.51

0 0,4 0,8 1,2 1,8 Teneur en carbone, %

Influence du carbone:

a-sur les propriété mécanique de l'acier; b-sur le nombre de phases présentes dans l'acier

La ferrite une fois associée à la cémentite nous donne la perlite. Le carbone est l'élément qui a une grande influence sur les propriétés de l'acier. L'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience. Notons toute fois que la résistance commence à chuter à partir de 1,2% C. Les propriétés physiques changent aussi et on observe :

- la diminution de la densité, de la conductibilité thermique, de l'induction rémanente et de la permittivité.
- L'augmentation de la résistivité électrique et de la force coercitive.

L'influence la plus importante du carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier est surtout due au fait que, par trempe on obtient un constituant très dur, appelé la martensite.

b) Le silicium

La teneur du silicium dans l'acier varie de 0,05 -f- 0,3%, il existe surtout à l'état de solution ferrite. Son influence n'est pas très importante sur les propriétés de l'acier, mais rend toute fois l'acier plus homogène à la coulée, en s'opposant, grâce à son pouvoir réducteur à la formation de soufflures, l'un des défauts les plus fréquents qu'on rencontre après solidification de l'acier. Sa présence en grande quantité permet une bonne désoxydation de l'acier.

c) Le manganèse

Le manganèse existe en solution dans la ferrite sous forme de MnS et surtout sous forme de carbure Mn_3C associé à la cémentite Fe_3C . Sa teneur dans l'acier varie de 0,2 à 0,8% la présence du manganèse dans l'acier est très souhaitée, car d'une part il augmente la dureté de l'acier et sa trempabilité et d'autre part i joue le rôle d'antidote du soufre, car le soufre est moins nocif dans la mesure où il se trouve sous forme de MnS et non sous forme de FeS ou de soufre libre.

d) Le phosphore

Il existe en solution dans la ferrite et provoque un grossissement du grain, ce qui augmente la fragilité de l'acier à froid. En se ségrégant facilement, contribue à l'hétérogénéité de l'acier.

Sa teneur doit être limitée de 0,025 à 0,040%. Le phosphore augmente la limite élastique et la charge de la rupture tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité.

e) Le soufre

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A froid le soufre amène également une diminution importante de la résistance la teneur limite en soufre doit être inférieure à $0,035 + 0,06\%$, généralement inférieure à % de la teneur en manganèse. Parfois on utilise des aciers de décolletage riches en soufre ($0,015 \text{ } ^\wedge \text{ } 0,025$) % afin de faciliter la fragmentation des copeaux. Un minimum de soufre (0,02%) est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité.

f)Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène

L'azote et l'oxygène sont contenus dans un acier sous forme d'inclusions non métalliques fragiles tels que FeO, SiO₂, Al₂O₃ (oxydes) et Fe₄N (nitrures)...., de solution solide ou à l'état libre dans les volumes défectueux du métal (retassures, criques etc...).

Les inclusions d'insertion (azote, oxygène), en se concentrant aux joints de grains, forment le long de ces joints des nitrures et des oxydes, en élevant ainsi le seuil de fragilité à froid et en alternant la résistance à la rupture fragile. Les inclusions non métalliques (oxydes, nitrures, scories) étant des concentrateurs de contraintes sont susceptibles de réduire sensiblement, si leur quantité est importante ou s'ils s'accumulent en agrégats, la limite de fatigue est la résilience. L'hydrogène dissout dans l'acier est un élément très nocif qui exerce une forte action fragilisante. Absorbé pendant la fusion, l'hydrogène non seulement rend l'acier plus fragile, mais détermine dans les laminés et les grosses pièces de forge la formation des flocons. Les flocons sont des criques très fins et d'une forme ovale ou arrondie qui apparaissent dans une cassure sous la forme de taches ou flocons argentés. Ils altèrent brusquement les propriétés de l'acier. Leur présence rend le métal inutilisable dans l'industrie. La fragilisation par H₂ s'observe souvent lors du soudage, l'hydrogène est alors une source de criques à froid dans le métal d'apport et de base. La coulée et fusion sous vide, diminuent sensiblement la teneur en H₂ dans l'acier.

5.3.3.2.Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier

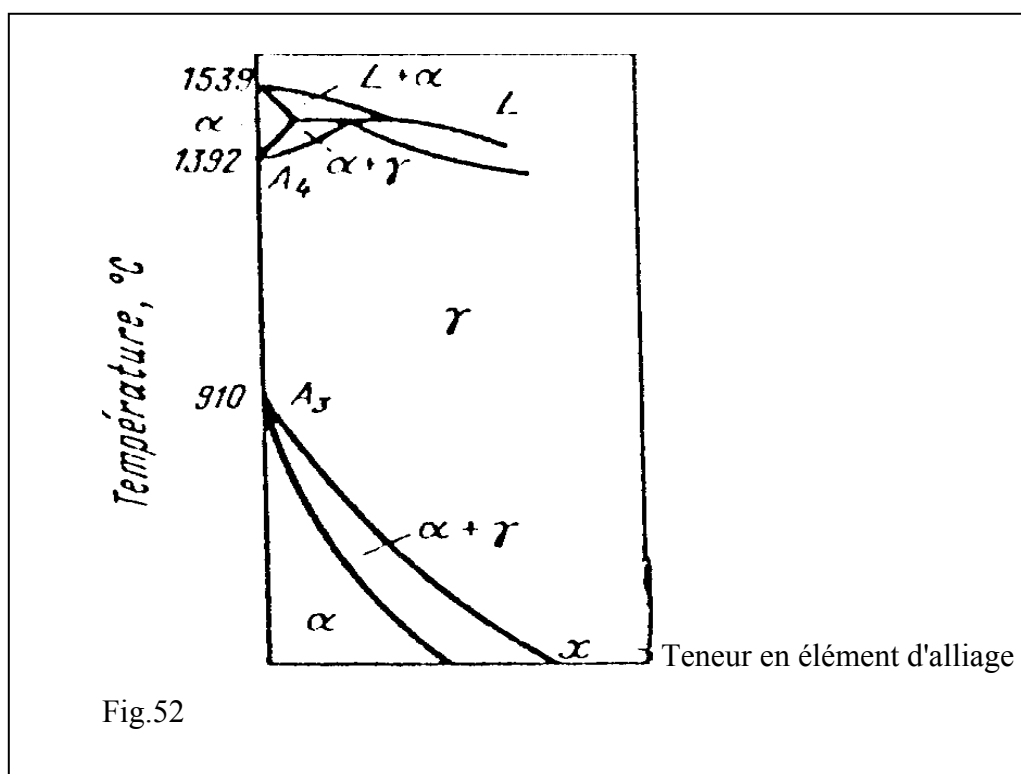
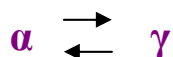
L'addition des éléments d'alliages peut donner lieu :

- a) A la formation des solutions solides dans le fer.
- b) A la dissolution de ces éléments dans la cémentite en remplaçant dans son réseau les atomes de fer ou à la formation des carbures particuliers.
- c) A la production (lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée) des composés intermétalliques avec le fer.

Les éléments d'alliages ont une influence sur les transformations allotropiques du fer. Tous ces éléments à l'exception de C, N, H et en partie du bore, formant avec le fer des solutions solides de substitution. Leur dissolution dans le fer influe fortement sur les positions des points A_{3t} (1392°C) et A_3 (910°C) qui déterminent le domaine des températures d'existence du fer α et γ . L'action exercée par les éléments d'alliages sur les variétés allotropiques du fer permet de les classer en deux groupes :

a) Eléments gamagènes (Ni, Mn)

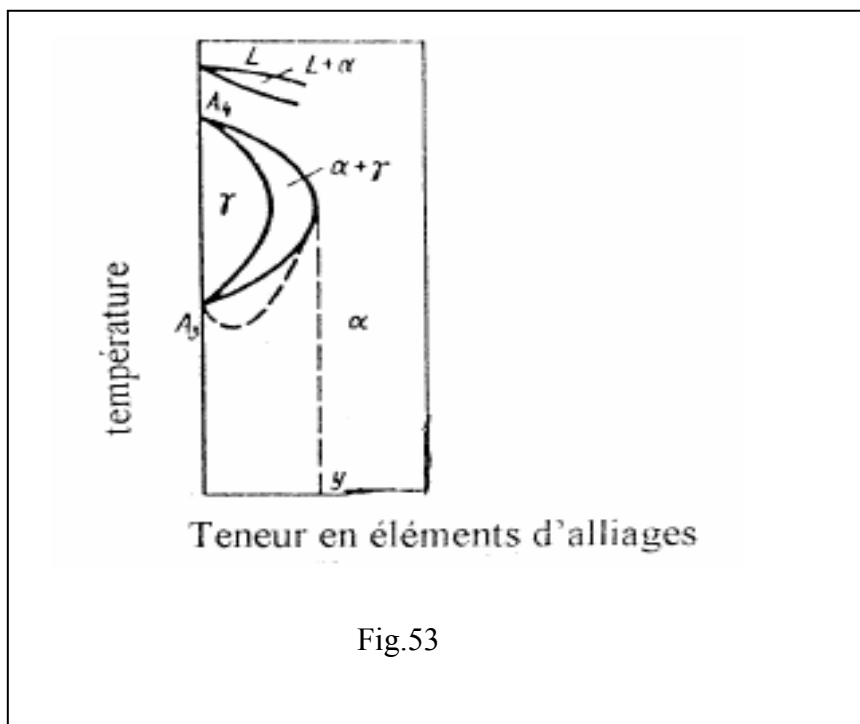
Ces éléments abaissent le point A_3 et élèvent le point A_4 ce qui donne une extension du domaine de la phase γ et une réduction du domaine de la phase α . La figure 52 montre que l'addition de ces éléments fait monter le point A_4 jusqu'à la ligne du solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage le point A_3 descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation



et les alliages de ce type sont dit austénitiques. Les alliages qui ne subissent que partiellement la transformation $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ s'appelle semi-austénitiques.

b) Eléments alphagènes

Ce sont les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si...ces éléments abaissent le point A_4 et élèvent le point A_3 . Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliages, les lignes de transformation A_3 et A_4 se rencontrent et le domaine de la phase γ , se trouve complètement fermé, c'est à dire il y a extension du domaine de la phase α (ferritique) et un rétrécissement du domaine γ (eutenitique). Les alliages de ce type sont dits " ferritique ". Lorsque la transformation $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ ne se produit que partiellement, les alliages s'appellent semi-ferritiques.



Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur l'influence des principaux éléments d'alliage sur les différentes propriétés des aciers.

Eléments	Déplacement du point S (eutectoid)	Déplacement des points de transformation	Formation de carbures	Affinage de grains	Augmente (+)	Diminue (-)
S	-	-	Non	-	Usinabilité, Fragilité à chaud.	Fluidité.
P	-	-	-	Non	Résistance à la corrosion, résistance à chaud, fragilité à froid	Allongement, Résistance aux chocs.
Si	-	↑	Non	Non	Grossissement du grain, Résistance chimique d'aciers réfractaires, Trempabilité, ce. Désoxydation.	Solubilité du carbone, Soudabilité, Vitesse critique de trempe (Vcr)
Mn	←	↑	Oui	-	Résistances aux chocs, à l'usure, à la traction, Trempabilité, Désoxydation.	Usinabilité, Température de transformation, Vcr de trempe.
Ni	←	↓	-	Oui	Résistance à la fatigue, à la corrosion, Résilience, Trempabilité.	Vitesse de grossissement du grain, Risque de surchauffe, Vcr de trempe
Cr	←	↑	Oui	-	Résistances à la traction, à la corrosion et à l'usure, Capacité de coupe, Pénétration de trempe.	Déformation, Vcr de trempe.
Mo	←	↑	Oui	-	Résistances à la traction et à la fatigue, Dureté, Trempabilité.	Allongement, Forgeabilité.
W	←	↑	Oui	Oui	Résistance à l'usure, Dureté, Capacité de coupe.	- - - -

5.3.4. Périodes de la marche d'une opération d'affinage

5.3.4.1. Décarburation

La fonte destinée pour l'élaboration de l'acier contient un pourcentage élevé en carbone qui n'est pas nécessaire dans la composition chimique de l'acier. Une grande quantité de ce carbone doit être éliminée du bain métallique lors de l'affinage de l'acier.

Le carbone est très soluble dans le fer liquide jusqu'à 5,4% à une température de 1600°C, il peut être éliminé par l'oxygène dissout dans le fer selon la réaction :



Lors de la décarburation le $| C O |$ obtenu n'est pas soluble dans le bain métallique ce qui permet l'élimination d'une grande partie du carbone et se crée un équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse. Donc l'apport de l'oxygène lors de l'affinage de l'acier joue un rôle important pour sa décarburation. Si on compare les différents procédés d'élaboration de l'acier au point de vue de la vitesse de décarburation du métal on pourra constater que le mécanisme du processus de décarburation dépend de la séparation de CO du métal dans la phase gazeuse et pour chaque procédé est différent par exemple pour le procédé THOMAS 0,35% de carbone sont oxydés par minute et dans le procédé Martin (sans soufflage d'oxygène) seulement 0,003%-0,005% de carbone / minute sont oxydés, les causes sont dues à la formation de CO dans la sole et non dans le bain métallique.

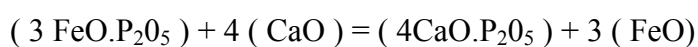
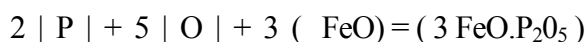
5.3.4.2. Déphosphoration

L'élimination du phosphore de la fonte liquide joue un rôle important dans l'élaboration des aciers.

Dans les aciers le phosphore ne doit pas dépasser 0,020 - 0,050 % (exception faite pour les aciers destinés aux outils de presse à chaud avec 0,1% de phosphore).

Dans les procédés LDAC ou THOMAS, le phosphore est un élément d'apport d'énergie.

Une bonne déphosphoration avec FeO n'est pas possible car elle exige une grande quantité de FeO, pour cela on ajoute de la chaux (voir réaction chimique ci-dessous) :



Le CaO est une base forte pouvant décomposer le FeO de sa liaison avec le P₂O₅ et par la suite peut se lier solidement avec le P₂O₅. Pour une bonne oxydation et scorification du phosphore dissout dans le métal il faut un potentiel d'oxygène élevé dans la scorie et un pourcentage élevé d'oxygène dans le bain métallique. Le phosphore doit être éliminé avant d'atteindre de hautes températures c'est à dire l'élimination du phosphore ne semble donc pouvoir se faire qu'après décarburation totale du bain, car il y a le processus inverse, dissolution du phosphore dans le bain métallique et ça par la réduction du P₂O₅ par le carbone aux hautes températures. Cela signifie que la solubilité du phosphore dans le fer augmente avec la température.

5.3.4.3. Désulfuration

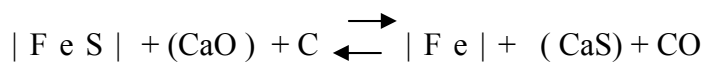
La désulfuration (scorification du soufre) consiste à éliminer le soufre dissout dans le fer et se passe seulement dans les conditions oxydantes. La teneur exigée en soufre dans les aciers ne doit pas dépasser 0,01 + 0,05%, car c'est un élément nocif et indésirable. A l'exception de quelques aciers dont sa présence est souhaitée jusqu'à une teneur de 0,3%, ce sont les aciers de décolletage, acier d'outils d'usinage à grande vitesse.

Le soufre existant dans le bain métallique provient de la fonte, ferraille, chaux et surtout des combustibles solides et liquides (procédé Martin). Pour tous les procédés d'élaboration de l'acier la désulfuration se passe de la même manière que dans le haut-fourneau.

L'élimination du soufre se fait principalement par la réaction déjà rencontrée au haut-fourneau.



La désulfuration dépend essentiellement de la quantité de CaO existante dans la scorie, elle est aussi facilitée par la réduction de l'oxyde ferreux et par l'élévation de la température qui favorise la réaction endothermique.



En général une désulfuration poussée nécessite une température élevée et un milieu basique et très réducteur. La désulfuration est difficile surtout dans le procédé Martin basique, car il y a formation de SO₂ qui réagit avec le fer du bain métallique (sulfuration du bain)



Cette transformation se passe surtout lors de la fusion de la charge lorsque le métal n'est pas couvert par la scorie. Dans ce procédé on exige un combustible avec une teneur minium en soufre.

Pour le procédé THOMAS, à part le soufre contenu dans la charge, pour remédier à la difficulté de la désulfuration dans ce procédé la fonte destinée à l'affinage doit contenir peu de soufre. Pour les autres procédés, la désulfuration est bonne et même excellente.

5.3.4.4. Désoxydation du bain métallique

L'affinage de l'acier à partir de la ferraille et de la fonte dans les convertisseurs nécessite un apport d'une quantité d'oxygène dans le bain métallique pour l'oxydation des différents éléments.

A la fin de l'affinage une grande quantité de l'oxygène reste dissoute dans le bain métallique ce qui provoque la formation d'oxyde de précipitation, ces derniers sont indésirables dans l'acier, car ils modifient les propriétés de l'acier exigé. Même l'oxygène peut former de la porosité après cristallisation de l'acier.

Afin de remédier à cela on doit éliminer l'oxygène dissout dans le métal avant sa cristallisation. La désoxydation comprend trois étapes :

- a) Dissolution du produit de désoxydation (ferro-alliages) dans le bain métallique qui doit s'effectuer à des hautes températures si possibles.
- b) Réaction entre l'oxygène dissout dans le fer avec le produit de désoxydation ce qui conduit à une diminution de la teneur en oxygène.
- c) Formation de germes du produit de désoxydation non dissout dans le bain métallique, sa croissance et son élimination du bain métallique s'effectue à la température de solidification. La totalité de l'oxygène est pratiquement éliminée de la phase métallique sous forme d'oxydes.

5.3.4.5.Élimination du manganèse et du silicium

Le silicium brûle à l'état de silice SiO_2 , cet anhydride qui correspond à un acide fort non isolé, se combine aux oxydes basiques présents MnO et FeO (et CaO s'il y a lieu) en donnant une scorie liquide qui du fait de sa faible masse volumique, monte à la surface du bain. Le manganèse brûle à l'état d'oxyde manganèse MnO , oxyde basique qui se combine à l'anhydride silicique.

5.3.4.6. Rôle de la scorie lors de l'élaboration de l'acier

Lors de l'affinage, la scorie n'a pas seulement le rôle de recevoir l'oxygène du bain métallique mais aussi d'absorber les produits de réaction (autre le CO) et de les lier solidement, c'est à dire entre la scorie et les deux phases (bain métallique et phase gazeuse) doivent exister des réactions.

La scorie joue aussi un rôle important dans la désulfuration et déphosphoration du bain métallique aussi que l'élimination du silicium.

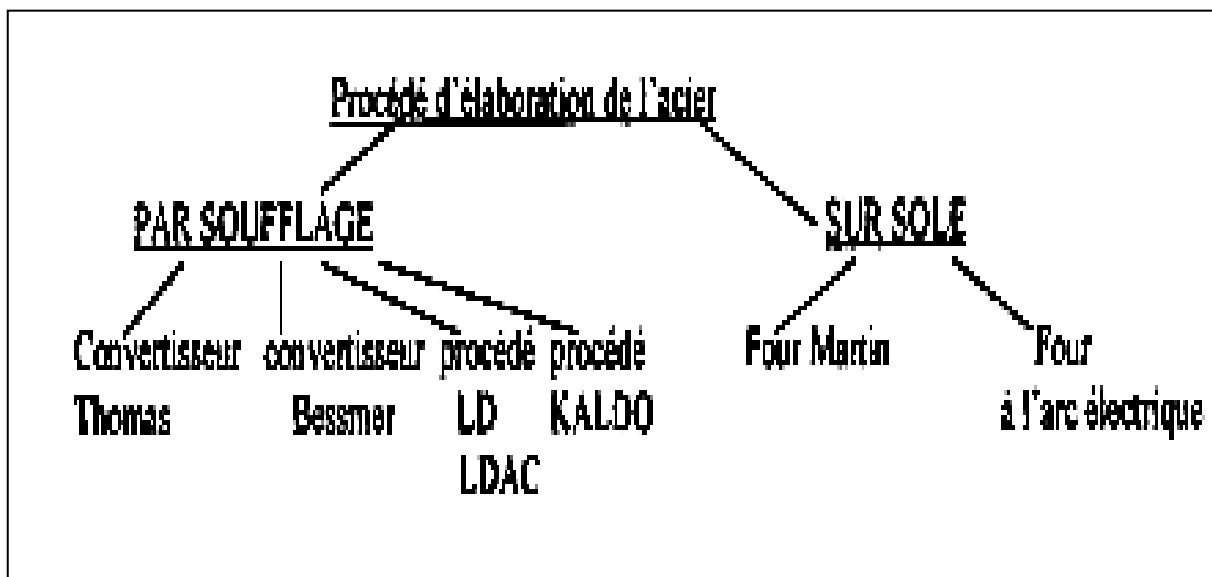
Il existe deux types de scorie :

- a) Scorie à base de deux silicates. Système $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ (48%, 15%, 14%) obtenu lors de l'affinage des fontes pauvres en phosphore (procédés Martin, électrique et LD).
- b) Scorie à base de chaux de phosphate système $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-FeO}$ (48%, 21%, 13%) obtenue lors de l'affinage des fontes phosphoreuse (procédés Thomas et LDAC).

5.3.5. Procédés d'élaboration de l'acier

Pratiquement la totalité de la production mondiale de l'acier est effectuée selon les procédés ci-dessous : On distingue les procédés par soufflage tels que :

Les procédés Thomas, Bessemer, LD, LDAC et KALDO et les procédés à SOLE tels que : le four Martin et le four à l'arc électrique. Nous étudions en général chacun de ces procédés.



5.3.5.1. Procédés par soufflage

5.3.5.2. Convertisseurs Bessemer et Thomas

C'est en 1857 que Henry Bessemer proposa le principe d'obtention de l'acier par soufflage de gaz oxydant (air) dans la fonte liquide sans dépense d'énergie (combustible). Le procédé consiste essentiellement à faire traverser le bain de fonte liquide par un courant d'air froid.

Le premier convertisseur mis au point par Bessemer n'était pas mobile, par la suite Bessemer l'améliora et ceci facilita toutes les opérations tels que chargement, coulée etc... Le procédé Bessemer ne pouvait être destiné que pour le traitement des fontes non phosphoreuses et à très faible teneur en soufre, ce qui exige un revêtement du convertisseur à caractère acide (le garnissage du convertisseur est à la base de silice SiO_2). Donc il y avait le problème de traitement des fontes phosphoreuses, qui exigeaient un garnissage basique (à base de dolomite CaO, MgO) et c'est alors en 1879 que Gilchrist Thomas développa le procédé Bessemer, en remplaçant le réfractaire acide par un réfractaire basique, mais en maintenant le même procédé de soufflage de l'air sous pression, le procédé Thomas permet donc le traitement des fontes phosphoreuses.

Le principe de fonctionnement est généralement le même pour les deux procédés dans le convertisseur la fonte est introduite avec une température avoisinant 1250°C . L'air froid est soufflé sous pression, qui oxyde les impuretés avec un dégagement de chaleur suffisant pour élever la température (jusqu'à 1500°C) et maintenir le métal à l'état liquide. Pratiquement tout l'oxygène soufflé est absorbé par le bain métallique, ce qui rend l'oxydation très énergique.

5.3.5.2.1. Caractéristiques du procédé Bessemer

a) Construction du convertisseur

La conception du convertisseur Thomas ou Bessemer est très analogue, la seule différence réside dans le caractère de revêtement intérieur (Bessemer acide et Thomas basique).

Le convertisseur proprement dit figure 54 et 55 est une grande cornue mobile d'une capacité variable de 10 à 75 tonnes et d'un diamètre intérieur de 4 + 6 mètres

Il est formé extérieurement d'un blindage de lames d'acier (cuirasse) de 20 à 25 mm d'épaisseur et intérieurement par des briques réfractaires. Il est monté sur deux tourillons destinés au pivotement et l'arrivée de l'air.

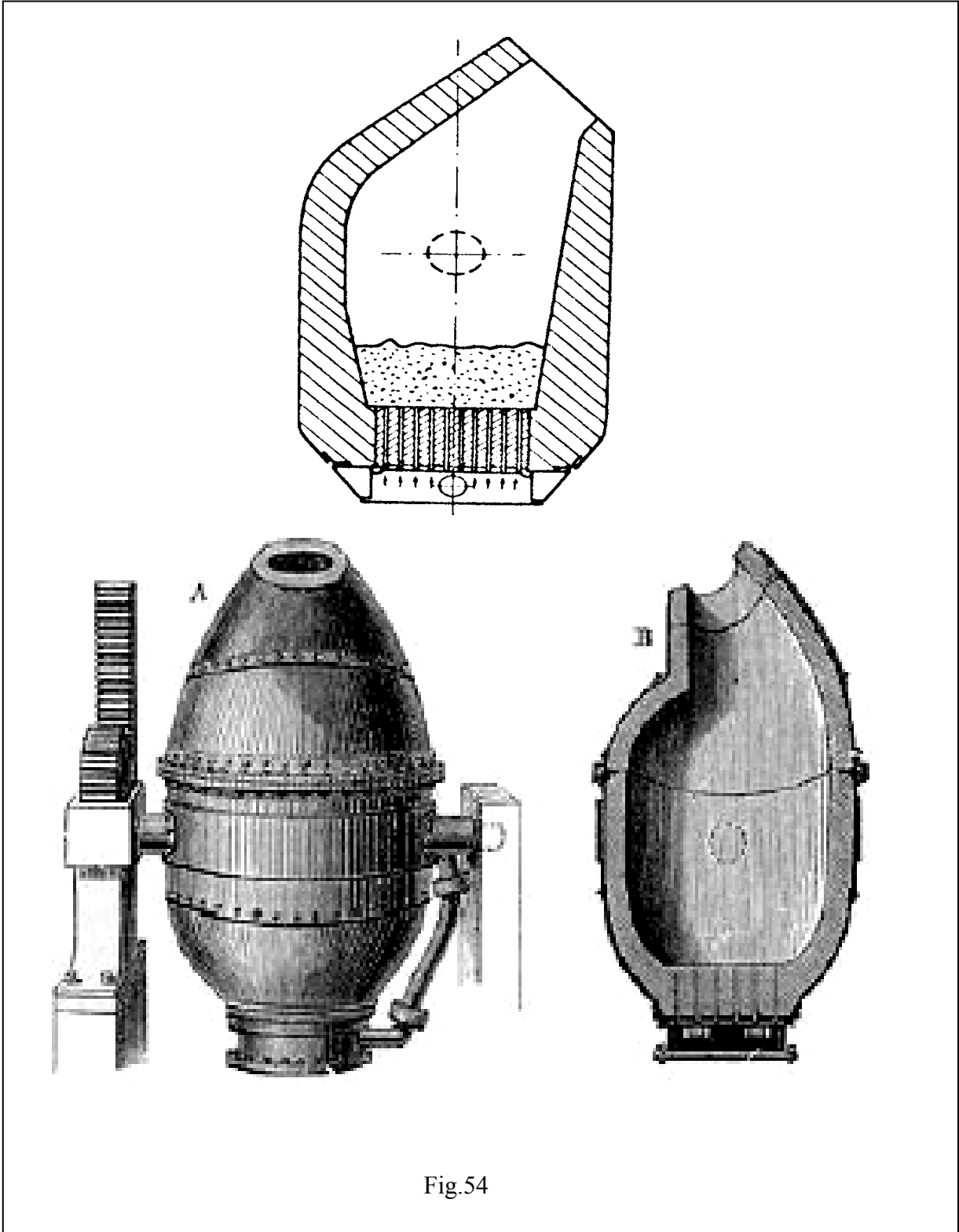


Fig.54

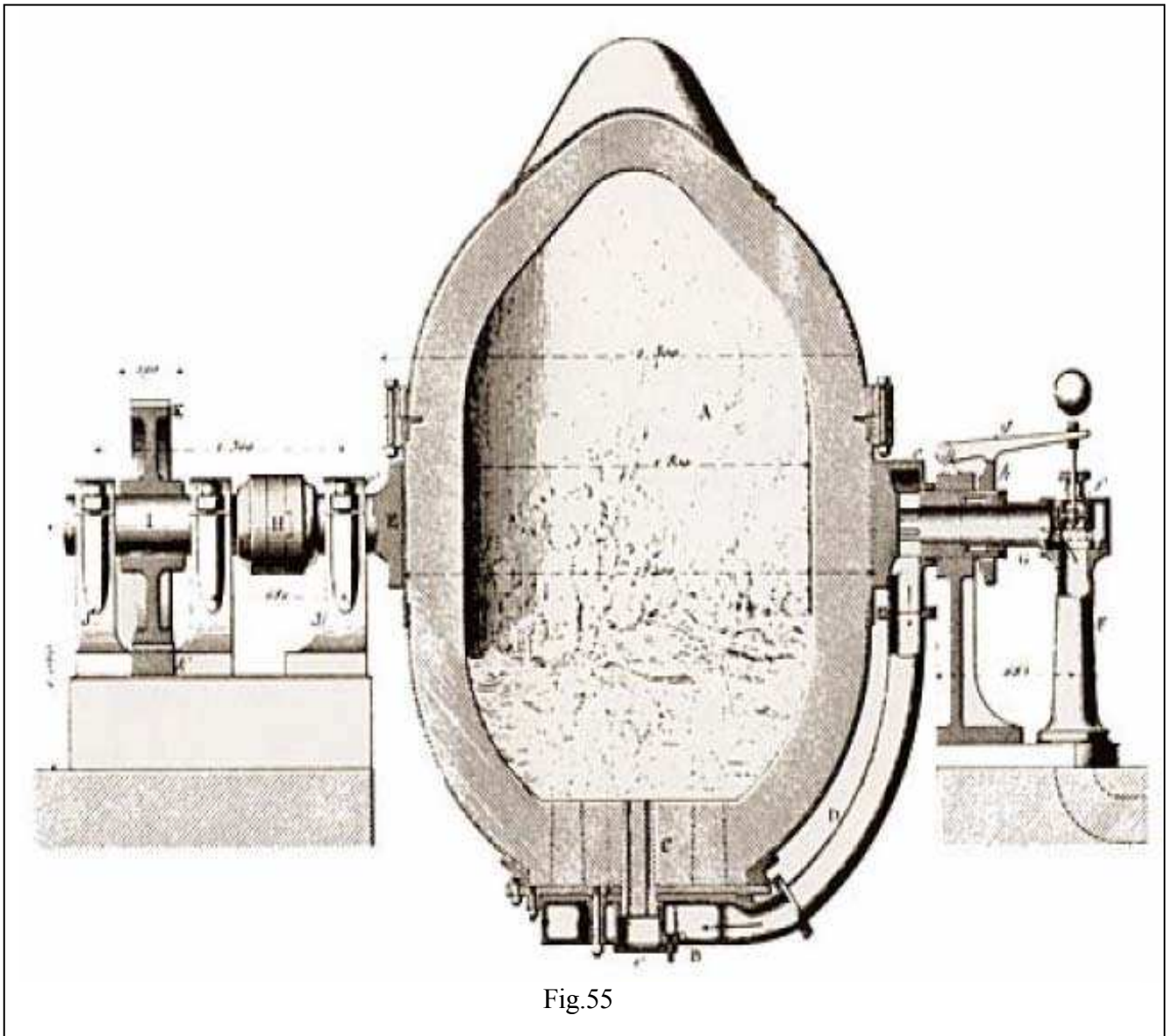


Fig.55

Généralement le convertisseur se compose :

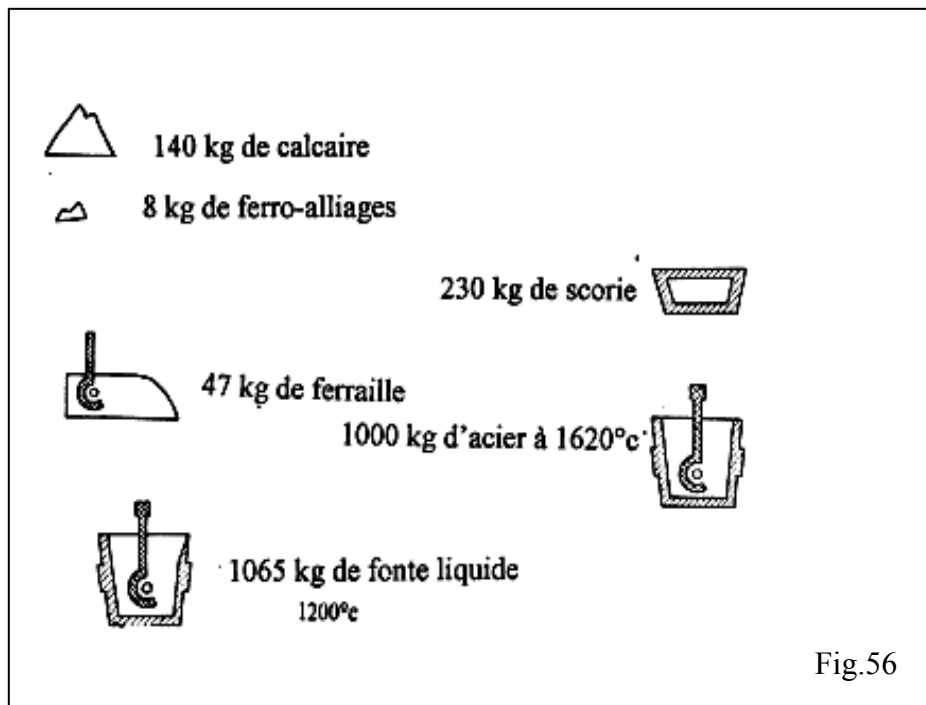
- D'une base tronconique d'orifices appelés tuyères permettant le passage de l'air (boite à vent).
- Une partie tronconique qui se rapporte à la cuve et dont la partie supérieure appelée Bec du convertisseur destiné au chargement et à la coulée. L'avantage de la forme donnée au Bec est de réduire les projections lors du soufflage et augmente le volume du convertisseur dans sa position horizontale.

- Le garnissage constitué de brique réfractaire acide ou basique selon le procédé Bessemer ou Thomas. Entre le réfractaire et le blindage existe une couche appelée Pise (sable, aggloméré, argile destiné à réduire les chocs thermiques). Le garnissage d'un tel convertisseur peut durer jusqu'à 300 coulées.

b) Matières premières

La figure 56 nous montre le bilan des matières premières pour la production d'une tonne d'acier pour le cas du procédé Thomas.

La matière première principale dans le convertisseur est la fonte liquide ($T^{\circ}\text{C} \approx 1250^{\circ}\text{C}$) acheminée sur rail du H-F vers l'aciérie dans des mixeurs (mélangeurs).



La composition chimique de la fonte destinée pour le procédé Bessemer est indiquée ci-dessous :

C	Si	Mn	P	S
3 +4%	1,5-2,5%	1 - 2%	< 0,08%	<0,05%

Les fontes Bessemer sont des fontes grises relativement riches en manganèse et pauvres en phosphore et en soufre.

Les autres matières premières introduites avec la charge dans le convertisseur sont :

- Le minerai de fer.
- La calamine.
- La ferraille, ferro-alliages.
- Le graphite, coke, bois.

La calamine est destinée pour l'apport de l'oxygène sous forme d'oxydes et pour le refroidissement du bain métallique afin d'éviter des surélévations de la température du bain lors du soufflage.

Les ferro-alliages (ferro-manganèse)

Ils sont destinés pour la désoxydation du bain métallique lors de la coulée. La chaleur est obtenue lors de l'oxydation des différents éléments par soufflage d'air ou d'air enrichi d'oxygène jusqu'à 35%. La durée de soufflage et la quantité d'air soufflée varie en fonction de la capacité du convertisseur, en moyenne cette quantité est de 300 -340 mm³ / tonne de fonte.

C) Marche d'une opération dans le convertisseur Bessemer (opération acide)

Oxydation

Durant la marche de l'opération dans le procédé Bessemer, on peut délimiter deux zones dans lesquelles vont se dérouler les réactions d'oxydation.

1- Zone de soufflage

Elle se trouve au dessus des tuyères et qui est une zone de contact direct entre le métal et liquide et l'air soufflé par les tuyères

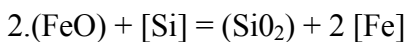
2-Zone de circulation

C'est le reste du volume du bain métallique ou le métal n'est pas en contact direct avec l'air soufflé, mais c'est dans cette partie que se déroule la totalité des réactions d'oxydation du bain métallique.

L'ordre d'élimination des impuretés dépend de leur affinité pour l'oxygène et s'effectue selon l'ordre suivant :

Le silicium

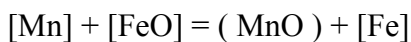
Le silicium s'oxyde le premier et forme une scorie de silicate de fer et de manganèse qui monte à la surface du bain métallique. L'oxydation du silicium est accompagnée d'une élévation de la température.



Le manganèse

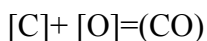
Le manganèse s'oxyde également dès le début mais il brûle moins vite que le silicium.

$[Mn] + [O] = (MnO)$ Il joue aussi un rôle régulateur en s'opposant à une trop forte oxydation du fer.



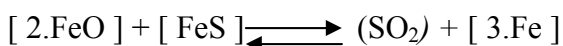
Le carbone

Il brûle rapidement et son oxydation donne principalement de l'oxyde de carbone sous forme libre ou combiné.



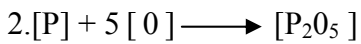
le soufre

Le soufre ne peut être éliminé complètement car ils existaient des échanges fréquents entre les sulfures et les oxydes contenus dans le bain métallique, c'est à dire le FeS possède une réaction réversible avec le FeO.



Le phosphore

L'élimination du phosphore est très importante pour le procédé Bessemer. Le phosphore est normalement éliminé sous forme de P_2O_8 , mais dans un milieu acide (Bessemer), il se décompose en formant P_2O_5 .



Donc on est obligé d'utiliser que des fontes très peu phosphoreuses.

d) Différents stades de la marche de l'opération

1-Période de scorification ou d'étincelles

Elles se passe à une température basse, presque tout l'oxygène soufflé est consommé pour l'oxydation des éléments tels que Fe, Mn et surtout le silicium contenu dans la fonte.

La durée de cette période est de 4 à 5 minutes et elle est caractérisée par une flamme courte traversée par des étincelles et un bruit caractéristique. Cette période est caractérisée par la formation de la scorie à base de SiO_2 , MnO et FeO.

2-Période de décarburation ou période des flammes

C'est la période la plus longue (8 à 12 minutes) et dépend surtout de la concentration en carbone dans le bain métallique et de la pureté de l'oxygène. Le carbone brûle en formant des oxydes tels que CO, CO_2 accompagné d'une flamme très éclairée virant vers le jaune et peut atteindre jusqu'à 4 mètres. Avec la diminution du carbone, il y a augmentation de la concentration de l'oxyde dans le bain métallique, ce dernier permettra encore l'oxydation du silicium et du manganèse.

3-Période des fumées

A la fin de la décarburation, la flamme diminue en atteignant le bec du convertisseur et accompagnée par des fumées rousses caractérisant la combustion du fer en Fe_2O_3 . Cette période dure 2 à 3 minutes et le plus souvent est supprimée.

4-Période de décrassage

On arrête le soufflage et on évacue la scorie (200 kg/tonne de fonte), en inclinant le convertisseur.

5- Période de dosage ou de l'addition finale

Cette période est à la fois période de dosage et de réduction, le métal est désoxydé et recarburé par l'addition des ferro-alliages que l'on ajoute avant ou après la coulée.

L'oxygène inclus dans le bain métallique est éliminé par l'addition de ferro-manganèse et s'il y a recarburation on ajoute les additions tels que graphite, coke ou bois. La durée de cette période est de 20 minutes.

5.3.5.2.2.Caractéristique du procédé Thomas

a)Construction du convertisseur

Après la mise au point du procédé Bessemer il fallait trouver un procédé pouvant traiter les fontes phosphoreuses. C'est en 1859 que Gilchrist Thomas a mis au point un procédé traitant les fontes phosphoreuses, en remplaçant les réfractaires acides par les réfractaires basiques (dolomite CaCO_3 , MgCO_3) tout en conservant le même principe de soufflage de l'air sous pression. La conception du convertisseur Thomas est très analogue à celle de Bessemer, la seule différence réside, comme il a été déjà mentionné dans le garnissage. Le volume de travail du convertisseur Thomas est beaucoup plus important que celui de Bessemer et cela est expliqué :

- Par le fait que la période de décarburation dans le procédé Thomas est beaucoup plus importante et les jets de fonte seront plus nombreux.
- Le volume de la scorie est beaucoup plus considérable que dans le cas de Bessemer.

b)Matières premières

Fonte Thomas

Les fontes Thomas sont des fontes blanches très phosphoreuses, pauvres en silicium et en soufre dont la composition chimique est la suivante :

C	Si	Mn	P	S
3,4 à 0,8%	0,25 à 0,5%	0,3 à 1%	1,7 à 2,2%	<0,08%

Les autres matières premières sont :

La chaux : joue un rôle très important vis-à-vis de sa fonction, qui va donner naissance à une scorie phosphoreuse nécessaire à la déphosphoration du bain métallique. Elle doit être pauvre en silicium et en soufre.

• **Les ripions, minerais de fer, calamine :**

Ils possèdent deux fonctions :

- 1/ un apport d'oxygène sous forme d'oxyde de (FeO, F_2O_3 }, Fe₃O₄, MnO, MgO).
- 2/ Une fonction de refroidissement du bain métallique, afin d'éviter des surélévations de températures.

Les ferro-alliages : en général on utilise le ferro-manganèse destiné à la désoxydation du bain métallique lors de la coulée.

Graphite, coke, bois : servent à la récarburation des aciers Thomas, qui sont le plus souvent des aciers doux.

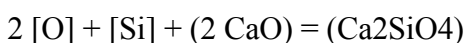
C) Marche d'une opération dans le convertisseur Thomas (opération basique)

Oxydations

Les réactions d'oxydation se déroulent généralement dans la zone de circulation. La particularité de ce procédé c'est que le métal est en contact avec un garnissage basique.

Le silicium

Le silicium se trouve en faible quantité dans le bain métallique et s'oxyde très rapidement en s'unissant aux oxydes de fer, de manganèse et aussi aux bases du garnissage et ensuite à la chaux en donnant des silicates.



Le manganèse

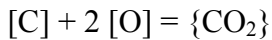
Le manganèse s'élimine rapidement pendant les premières minutes et son oxydation se poursuit lentement, car elle est concurrencée par la déphosphoration. A la fin de l'opération la teneur en manganèse croit momentanément par retour du manganèse de la scorie au bain métallique.



Le carbone

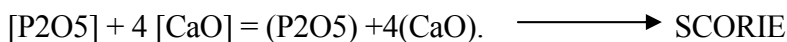
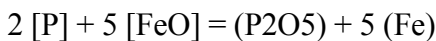
Suite au faible quantité de silicium dans le bain métallique, le carbone s'élimine plus vite que dans le procédé Bessemer. Durant l'opération la teneur de l'oxyde dans le bain est très basse, ce qui

montre la grande vitesse avec laquelle le FeO est réduit par le carbone.



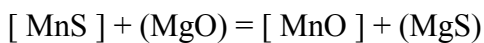
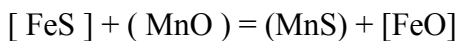
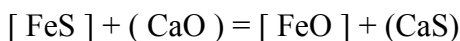
Le phosphore

La déphosphoration est très importante dans le procédé Thomas. Le phosphore ne peut être éliminé que vers la fin de l'opération quand le carbone est déjà éliminé en grande partie et que la scorie est devenue suffisamment basique pour fixer le P₂O₅.



Le soufre

Le soufre ne peut être éliminé complètement, car ils existaient des échanges fréquents entre les sulfures et les oxydes contenus dans le bain.



d) Différents stades de la marche de l'opération

La mise en marche du convertisseur Thomas se fait comme dans le procédé Bessmer. On charge la chaux ; ensuite la fonte liquide, les ferrailles et à la fin les ferro-alliages. Pour l'affinage du bain on distingue les périodes suivantes :

1-Période de scorification

La durée de cette période est de 2 à 4 minutes donc moins longue que dans le procédé Bessmer. Elle caractérisée par une flamme courte, traversée par des étincelles et contenant de la poussière de la chaux.

2- Période de décarburation

C'est la période la plus longue 8 à 10 minutes. Lorsqu'on atteint les conditions idéales des décarburation, le bain devient plus visqueux, ce qui provoque un bruit intense et des vibrations violentes lors du passage de vent à travers le bain métallique. Au début la flamme est jaune et devient blanche à la fin.

3- Période de déphosphoration

Cette période est appelée aussi période de sursoufflage. L'oxydation du phosphore commence juste à la fin de la décarburation et accompagnée d'une élévation de la température. Le phosphore est éliminé rapidement, grâce au soufflage. Si la flamme est brunâtre, cela est dû à la présence d'oxyde de fer et de manganèse.

4- Période de décrassage

Durant cette période on procède à l'évacuation de la scorie (200 kg/tonne de fonte) après arrêt du soufflage. La scorie obtenue est très utilisée comme engrais.

5- Période de dosage ou d'addition finale

Pour éliminer l'oxyde restant dans le bain liquide sous forme d'oxydes, on ajoute les ferro-alliages (Ferro-manganèse). Un filtre de chaux placé au bec du convertisseur permet de retenir la scorie restante. Toutes les réactions de réduction ont eu lieu dans la poche de coulée.

L'acier obtenu est un acier doux, mais on peut obtenir dans ce procédé des aciers mi-doux, mi-durs et durs, en ajoutant des additions recarburantes tels que graphite, coke ou bois.

Les aciers Thomas ou Bessemer sont des aciers non alliés (aciers d'usage courant), possédant des propriétés inférieures aux aciers Martin et ils sont destinés pour la fabrication de profiles, rond à béton, fils, tôles etc.. ils sont aussi destinés pour le décolletage et ressort avec des exigences de qualité faible.

L'ACIER THOMAS

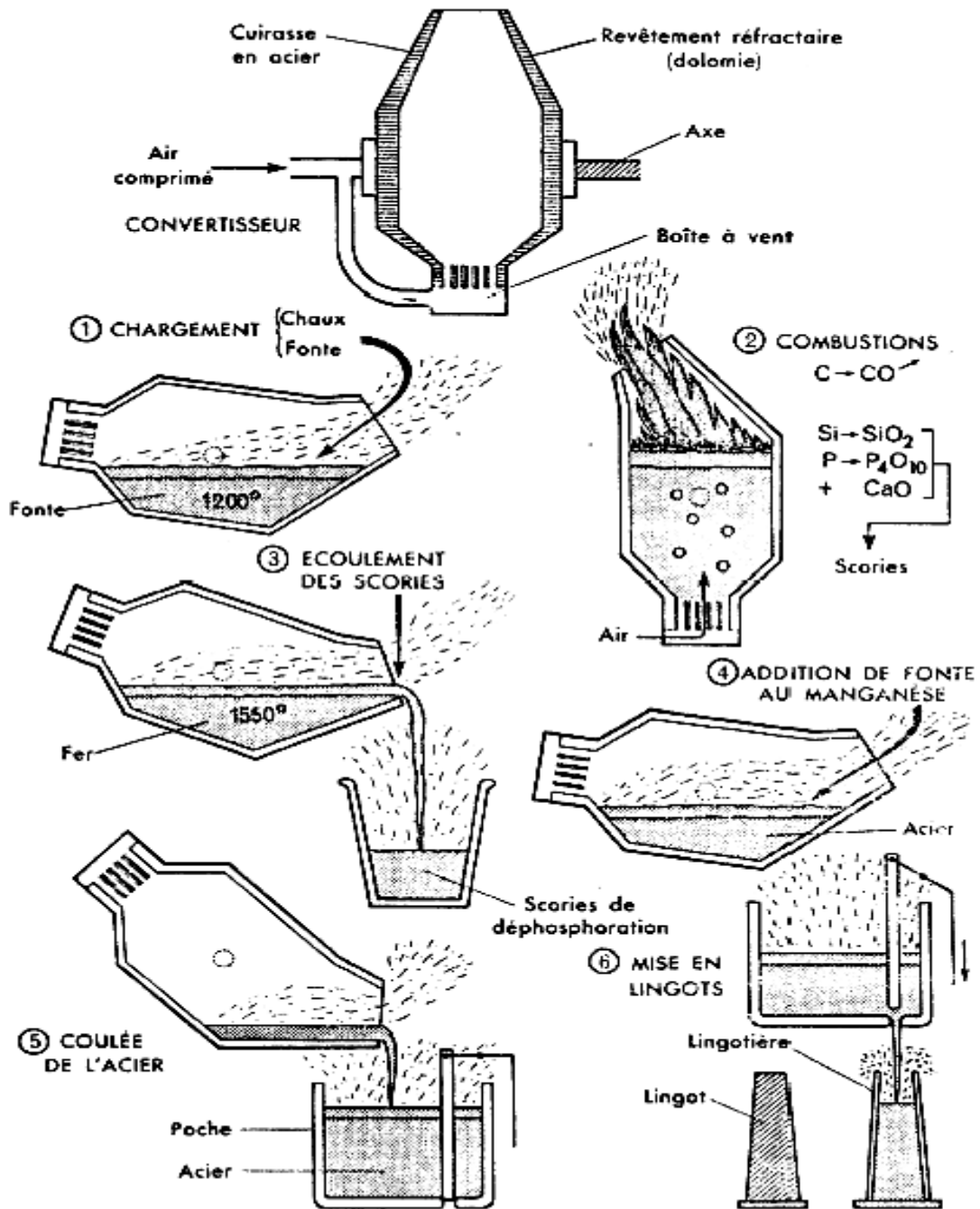


Fig.57

5.4. Convertisseur à oxygène

Dans les convertisseurs à oxygène, les aciers sont obtenus par affinage de la fonte par l'action de l'oxygène. Le principe des procédés d'oxygène est analogue à celui des procédés déjà envisagés (Bessemer et Thomas), la marche de l'opération est également la même

Les différences essentielles résident dans :

- L'emploi de l'oxygène au lieu de l'air, donc il y a absence d'azote.
- Soufflage à la surface du bain métallique à l'aide d'une lance métallique refroidie à l'eau et non pas par le fond du convertisseur (boîte à vent). Ce procédé a été développé dans les usines autrichiennes par LINZ-DONAWITZ entre 1948 et 1952. Le premier convertisseur avait une capacité de 25 à 30 tonnes. Aujourd'hui la capacité peut atteindre jusqu'à 450 tonnes.

Actuellement dans tous les pays on utilise les convertisseurs à oxygène, car ils représentent d'énormes avantages par rapport aux convertisseurs Bessemer et Thomas, dans lesquels l'élimination du soufre et du phosphore est difficile. Les convertisseurs à oxygène possèdent une grande productivité et produisent un acier avec une faible teneur en azote (0,002 - 0,005%) et utilisent une grande quantité de ferraille (15 - 20%) que dans le procédé Thomas. Dans les convertisseurs à oxygène on peut obtenir des aciers de même nuance ou meilleure que les aciers Martin.

Dans le procédé à oxygène on peut distinguer deux types de réalisation selon que, pendant le soufflage, l'appareil :

- a) reste immobile (procédé LD et ses dérivés tels que LDAC etc...).
- b) est animé d'un mouvement de rotation (procédé KALDO, ROTOR). La lance peut être utilisée verticalement ou inclinée.

5.4.1. Convertisseur à oxygène LD et LDAC

Le procédé LD peut traiter uniquement des fontes pauvres en phosphore vu le caractère de son garnissage qui est basique les fontes riches en phosphore sont traitées par les procédés dérivés de LD tels que le procédé LDAC, la déphosphoration du bain d'oxygène mélangé avec de la chaux en poudre ou de chaux magnésienne, la présence de MgO intensifie la formation de la scorie.

5.4.1.1. Construction du convertisseur

C'est une dérivée du convertisseur Thomas. La maçonnerie est basique, réalisée en briques de dolomie

cuite. Le soufflage est effectué par l'intermédiaire d'une lance refroidie par l'eau, sous une pression de 6 à 12 atmosphères, le soufflage se fait par dessus à une distance du bain de 0,3 à 1 mètre. La consommation d'oxygène ($O_2 > 99\%$) est de 60 m^3 par tonne d'acier. La lance est constituée de trois tubes concentriques figure 58.

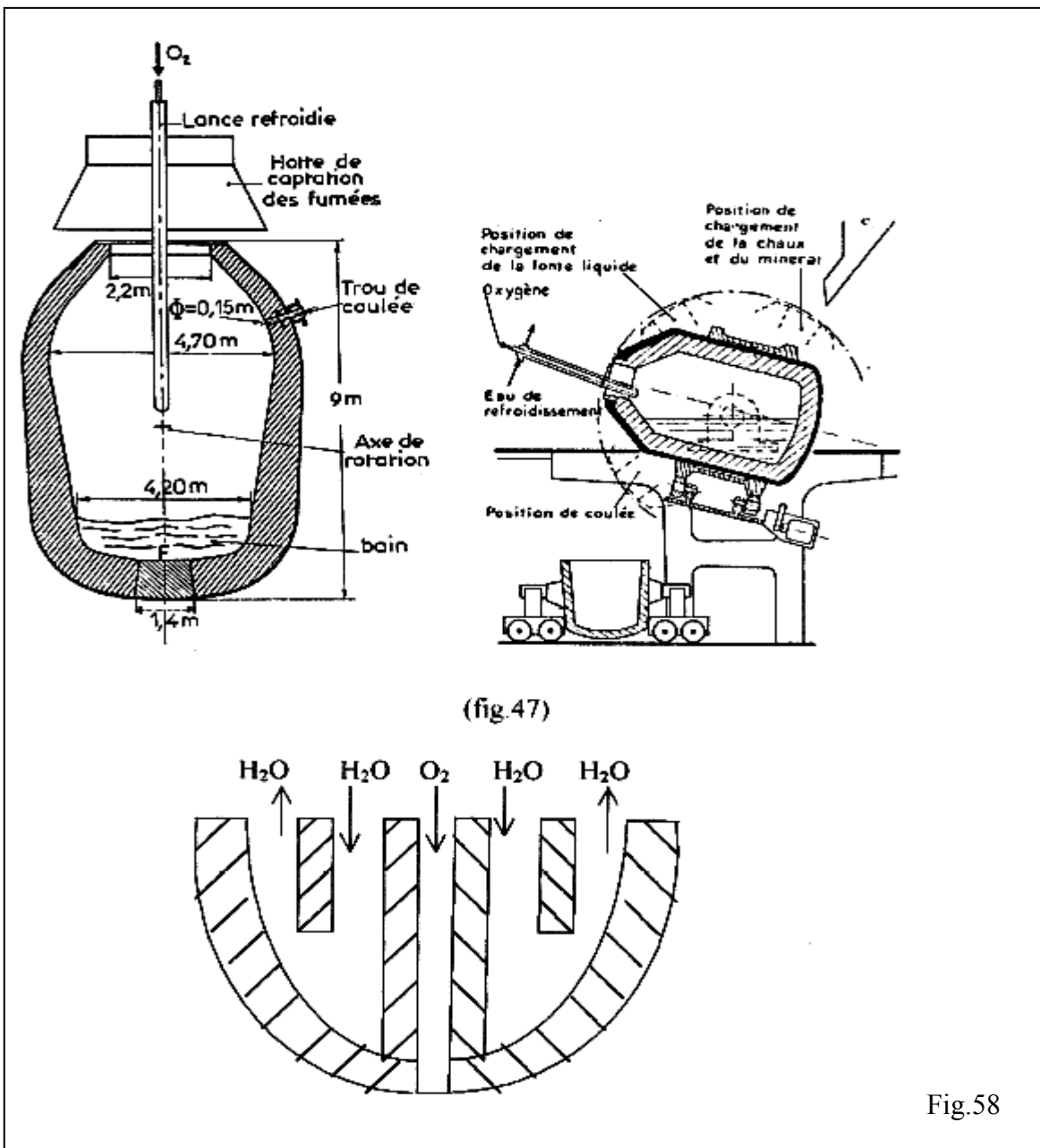


Fig.58

Le tube destiné au passage de l'oxygène et les deux autres permettent la circulation de l'eau de refroidissement. La coulée de l'acier s'effectue par le trou de coulée (orifice sur la partie du convertisseur). La réfection du garnissage s'effectue en moyenne après 700 opérations (coulées), les traitements de fumées est une question importante pour tous les procédés d'affinage à l'oxygène, qui nécessitent le dépoussiérage des fumées. Les fumées contiennent environ 10kg de poussière (fer et oxyde) par tonne de fonte. Elles sont captées à leur sortie du convertisseur dans une hotte qui donne passage à la lance et à une goulotte d'alimentation pour les additions. Les fumées sont refroidies et dépoussiérées dans une tour de lavage, ou filtre électrostatique ou dans un appareil à sacs filtrants,

5.4.1.2 Matières premières

Les matières premières principales sont :

a) La fonte liquide

Dont la portion est de 70 à 80% de charge totale et avec une température de 1200°C. Pour le procédé LD, la fonte doit être non phosphoreuse (0,18 à 0,19% de phosphore) et pour le procédé LDAC, la fonte est phosphoreuse (1,2 à 2,2% P) on ajoute parfois 10% de fonte solide. La fonte liquide est aussi la principale source de chaleur.

La composition chimique moyenne de la fonte est ci-dessous :

C	Si	Mn	P	S
4,2 ÷ 4,3%	0,5 ÷ 0,7%	0,2 ÷ 0,5%	1,8 ÷ 0,19%	0,03 ÷ 0,04%

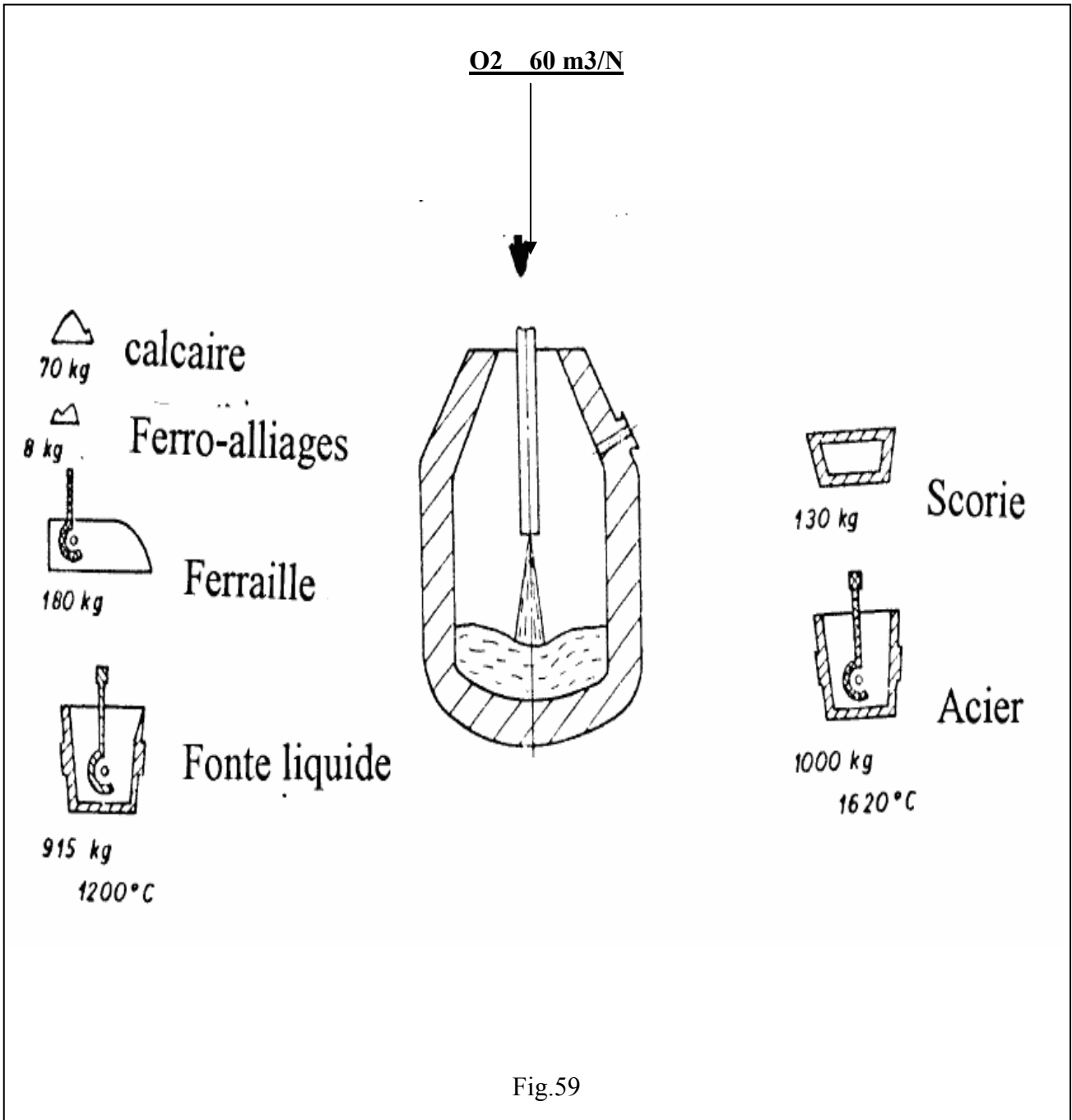
b)La ferraille : est une source permettant l'apport en fer (20 ~ 25%). L'utilisation de la ferraille est aussi avantageuse, car elle contient peu d'inclusion non métallique.

c)Les fondants : tels que : chaux, calcaire, bauxite, minerais de fer ont le rôle de :

- Former la scorie.
- Régler la composition chimique.
- Refroidir le bain métallique.

d)Les additions : sont destinées à régler la composition chimique finale de l'acier. Ils sont utilisés sous forme de ferro-alliages tels que : ferro-manganèse, ferro-silicium, ferro-chrome ou silico-manganèse.

La figure 59 nous donne un aperçu sur le bilan des matières premières (fondants, ferro-alliages, ferraille, fonte) pour la production de 1000 kg d'acier et 130 kg de scorie dans le cas du procédé LD.



5.4.1.3. Marche de l'opération

L'introduction de la charge s'effectue quand le convertisseur est en position horizontale. On commence par le chargement de la ferraille, ensuite la fonte liquide et 2/3 de la masse totale des fondants nécessaire, le reste est ajouté vers le milieu du soufflage avec le minerai de fer destiné au refroidissement du bain.

L'intensité des réactions à la surface métal-scorie dépend du débit d'oxygène et de la hauteur de la lance par rapport au bain, la durée du soufflage est de 20 minutes. Pour provoquer au début de formation intense de la scorie, on place la lance à une distance relativement importante du bain métallique, ce qui provoque l'oxydation du fer et de son passage à la scorie, ensuite la lance est approchée du bain métallique et le soufflage est intensifié pour une meilleure partition de l'oxygène dans le bain et une oxydation du carbone.

Dans ce procédé il n'existe pas de périodes nettement séparées, cela est dû à la grande quantité d'oxygène et aux hautes températures. L'opération coulée à coulée dure environ 45 minutes.

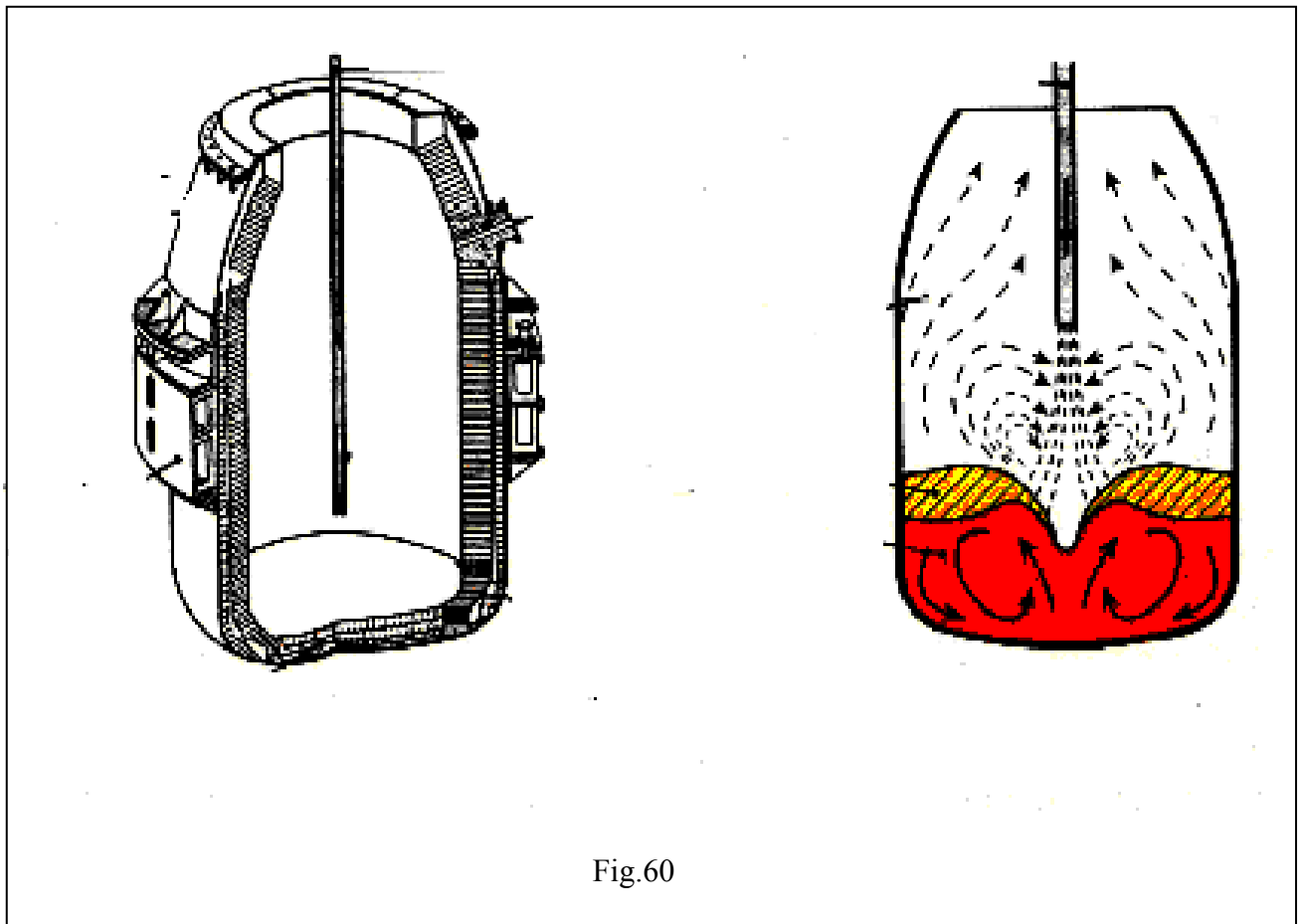


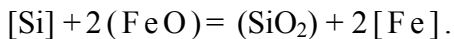


Fig.61

5.4.1.4. Réactions d'oxydations

Le silicium

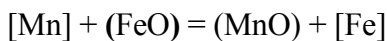
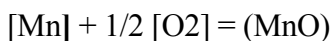
Grâce à son affinité par rapport l'oxygène, le silicium est le premier élément à s'oxyder en l'espace de 3 à 5 minutes. Tout le silicium est oxydé aussi bien dans le métal que dans la scorie.



En présence de la chaux, il forme la scorie à base de $(\text{SiO}_2) + (\text{CaO})$.

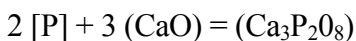
Le manganèse

L'oxydation du manganèse commence avec celle du silicium et dure de 3 ^ 6 minutes.



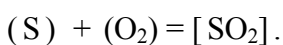
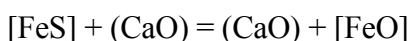
Le phosphore

La déphosphoration se déroule comme dans le convertisseur Thomas, à la surface scorie-métal et elle est conditionnée par la formation d'une scorie à base de CaO et Fe.



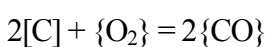
Le soufre

Il est relativement facile à éliminer que le phosphore et s'effectue selon les réactions :



Le carbone

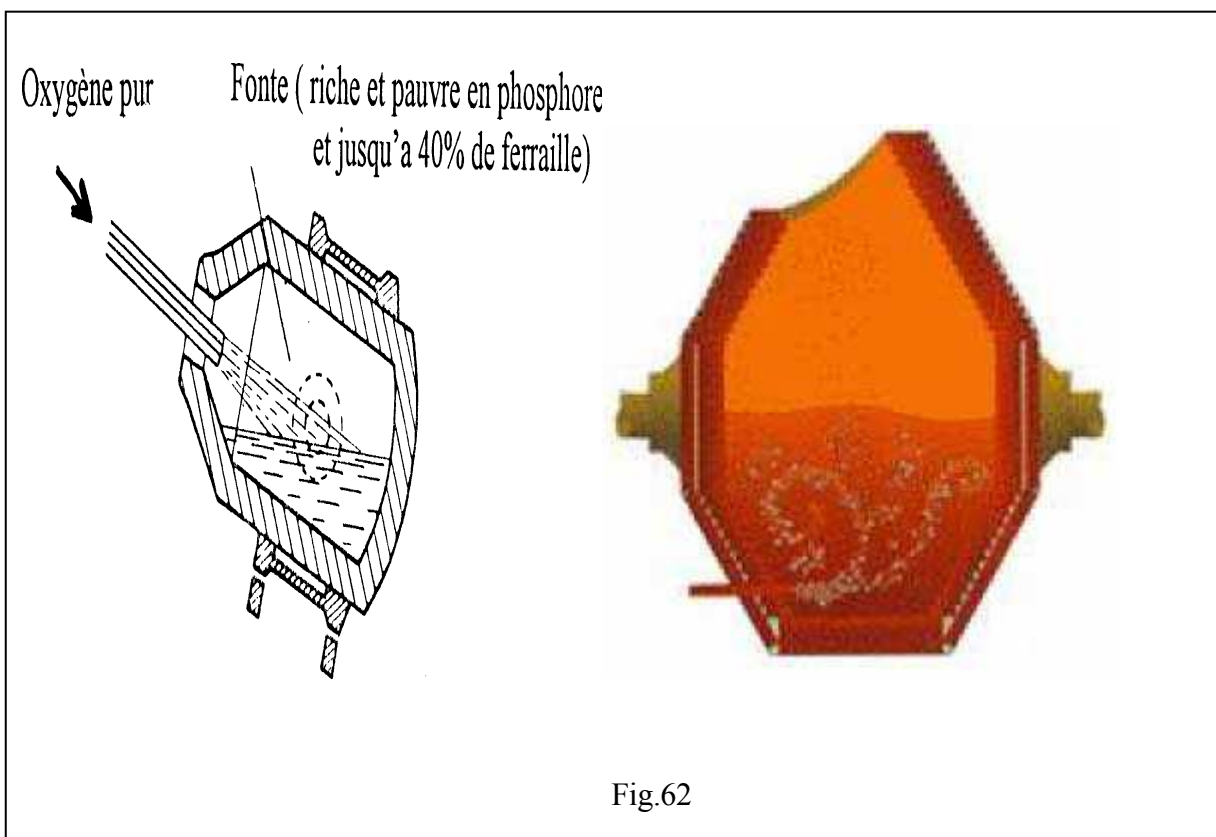
L'oxydation du carbone commence directement avec le soufflage à la couche supérieure en contact avec la lance, ensuite le processus de décarburation se prolonge et passe dans le bain métallique, les bulles de CO qui se forment vont provoquer une ébullition qui donnera naissance à un mélange acier, fonte, gaz et scorie. La décarburation se termine à la concentration critique exigée.



5.4.2. Procédé KALDO

C'est une dérivée du convertisseur à oxygène, il a été mis au point par le suédois KALLING en 1956. Il est destiné pour l'affinage des fontes riches en phosphore et permet d'obtenir des aciers doux à faible teneur en phosphore, en soufre et en azote.

Le convertisseur est incliné de 7° par rapport à l'horizontale et animé d'un mouvement de rotation autour de son axe, avec une vitesse de 30 trs/min (voir figure 61).



Le soufflage s'effectue à l'aide d'une lance inclinée de 30° - 40° par rapport à l'axe horizontal du convertisseur. La pression de soufflage de l'oxygène est de 3,5 -h 4 atmosphères, ce qui rend possible une utilisation de 40% de ferraille du volume de la charge totale sans aucun apport de chaleur. Le garnissage du convertisseur est basique. Lors de l'oxydation il y a dégagement de CO, ce dernier provoque une combustion avec l'oxygène ce qui fait augmenter la température à l'extérieur du bain métallique. L'élévation de la température peut détériorer le garnissage, afin d'éviter cela, le convertisseur est animé d'un mouvement de rotation pour que le métal liquide refroidit le garnissage c'est à dire éviter que la chaleur se concentre en un seul endroit du garnissage.

La capacité d'un tel convertisseur peut atteindre jusqu'à 180 tonnes. Dans ce procédé, une vitesse de rotation faible favorise l'élimination du phosphore et une vitesse de rotation élevée favorise celle du carbone.

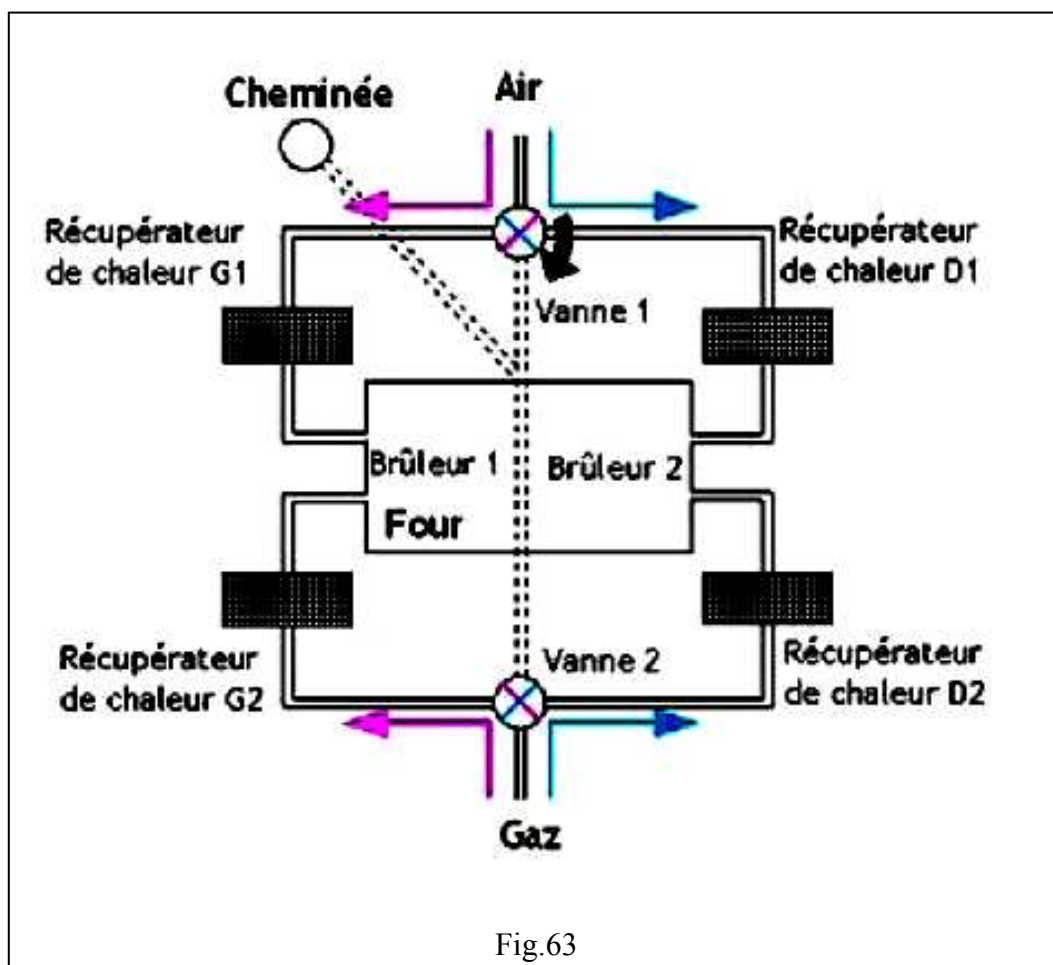
5.4.3. Les aciers à oxygène

Les convertisseurs à oxygène sont qualifiés surtout pour produire les aciers doux non alliés, aciers spéciaux avec $0,05 + 0,1\%C$, les aciers durs, aciers étirés et de construction jusqu'à une teneur en carbone de $0,65\%$.

Actuellement on peut même produire par ces procédés les aciers alliés et fortement alliés.

5.5. Le procédé de Martin

Le premier four Martin a été conçu en 1864 en France par P.Martin. C'est un four à réverbère, sur la sole duquel la charge métallique solide est fondue par le contact direct avec la flamme. La partie inférieure du four comprend deux régénérateurs ou récupérateurs de chaleur.



Les régénérateurs sont destinés à récupérer la chaleur des gaz de fumées qui se forme lors de la combustion du mazout et éventuellement gaz naturel et mazout avec l'air produit par la soufflerie. Les fumées avec une température avoisinant 1500°C passent dans la chambre à crasse où s'effectue l'opération de dépoussiérage (le changement de direction et l'élargissement brusque du volume provoquent la précipitation des particules solides contenues dans les fumées et en passant par le régénérateur, une partie de la chaleur de ces fumées est absorbée par l'empilage réfractaire du régénérateur, donc il y a emmagasinement de la chaleur, ensuite elles se dirigent vers l'extérieur par la cheminée avec une température avoisinant 600°C.

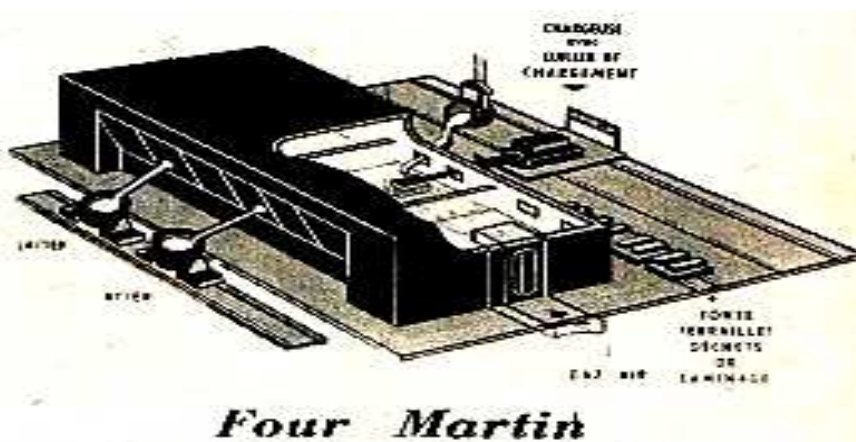
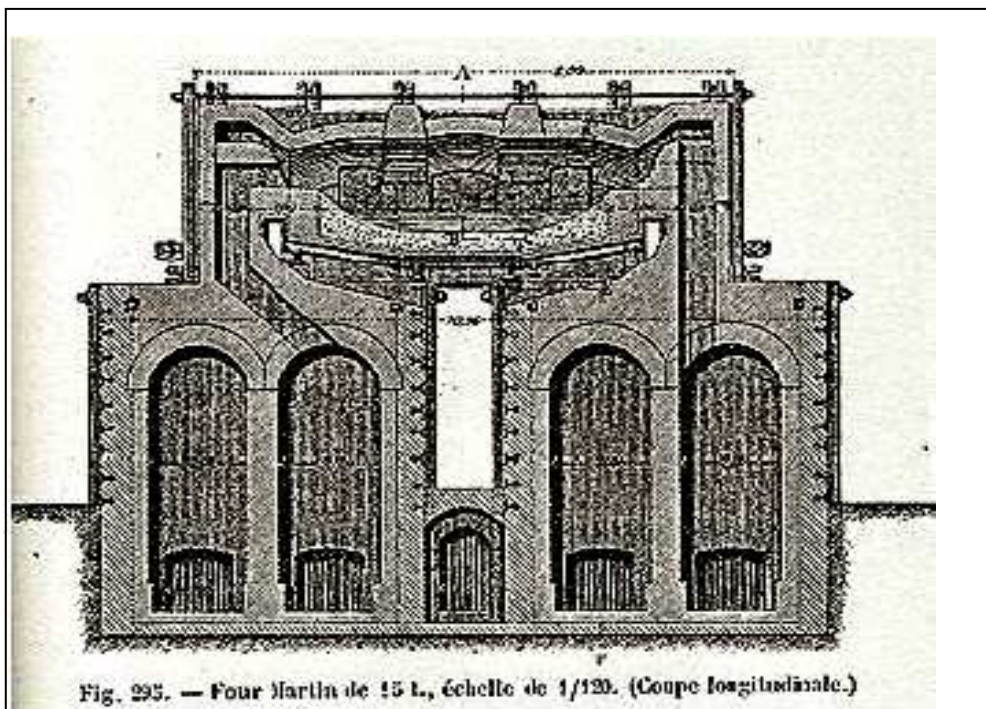


Fig.64

Les pertes de chaleur dans le four Martin sont très importantes et cela est dû à la durée de fusion de la charge qui est très longue et à la haute température des fumées qui s'échappent vers l'extérieur. Pour accélérer le processus d'affinage, parfois on a recourt à des éléments d'oxydation (minerai de fer), ou à l'utilisation de l'oxygène soufflé par des lances directement dans le bain métallique. Donc une partie de la chaleur de combustion produite par la flamme ($T = 1800$ à 1900°C) est absorbée par la charge métallique dans le four par rayonnement et l'autre partie est absorbée par l'air froid lors de son passage dans les régénérateurs. A la sortie du régénérateur l'air est chauffé à une température $T = 1200^{\circ}\text{C}$, ce dernier est utilisé pour la combustion du combustible, donc il y a apport de la chaleur par l'intermédiaire de l'air chaud provenant des régénérateurs. L'atmosphère dans l'espace de travail du four est très oxydante à cause de l'excédent d'air lors de la combustion.

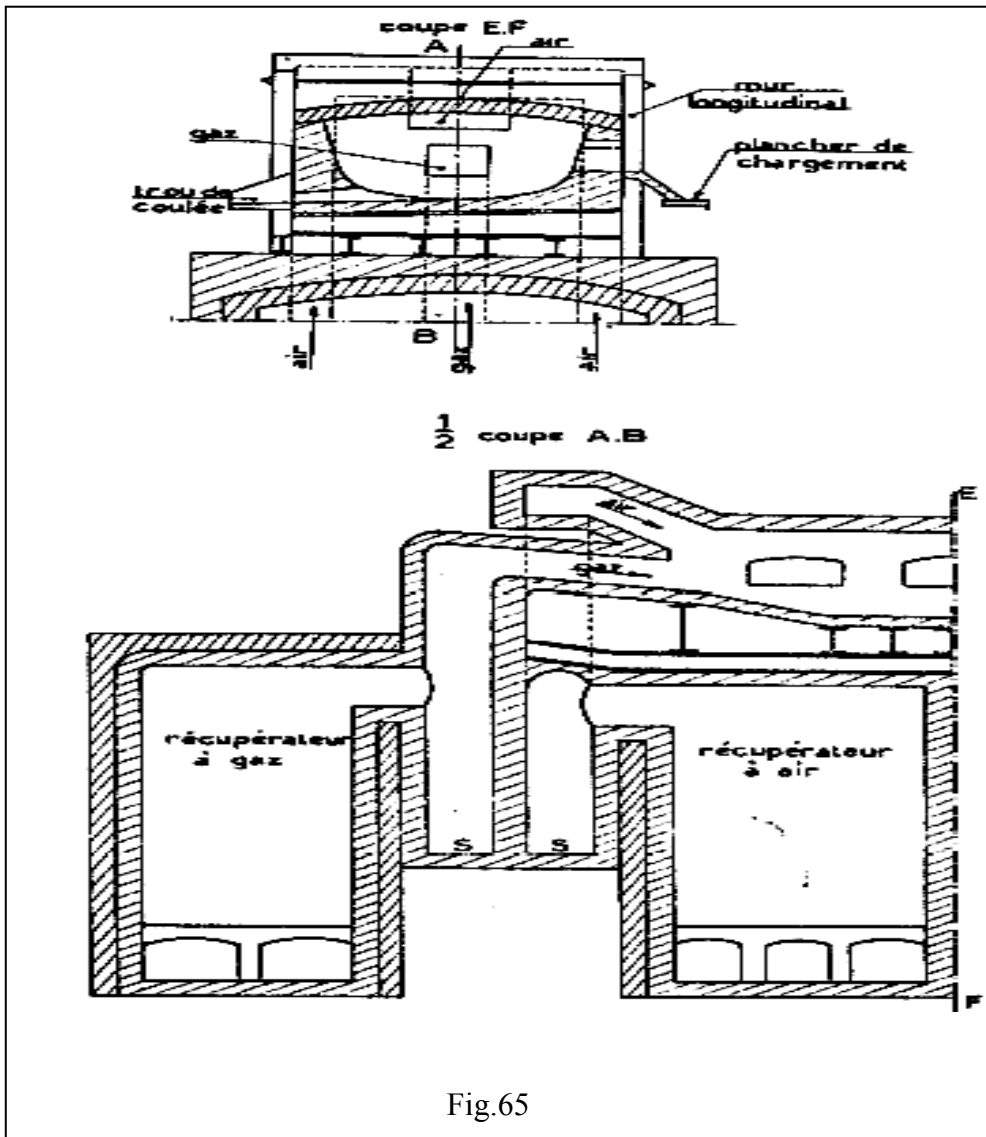


Fig.65

5.5.1. Types du procédé Martin

Actuellement il existe deux types du procédé d'affinage dans le four Martin :

a) Scrap-procédé

Le revêtement du four peut être basique ou acide. Dans ce procédé, la matière première est constituée essentiellement de la ferraille et de la fonte liquide ou solide (en gueuse). La proportion de la fonte est de 20 à 40% de la charge totale et dont les composants tels que le silicium, le soufre et le phosphore ne doivent pas dépasser respectivement 1%, 0,05% et 0,15%.

b) Procédé à fonte liquide

Le garnissage du four est uniquement basique. La propagation de la fonte liquide est de 50 à 80% de la charge totale, le reste c'est de la ferraille ou du minerai de fer.

5.5.2. marche générale de F opération dans le four Martin

La figure 52 illustre le bilan de matière pour la production de 1000 kg d'acier et 120 kg de scorie dans le cas du Scrap-procédé.

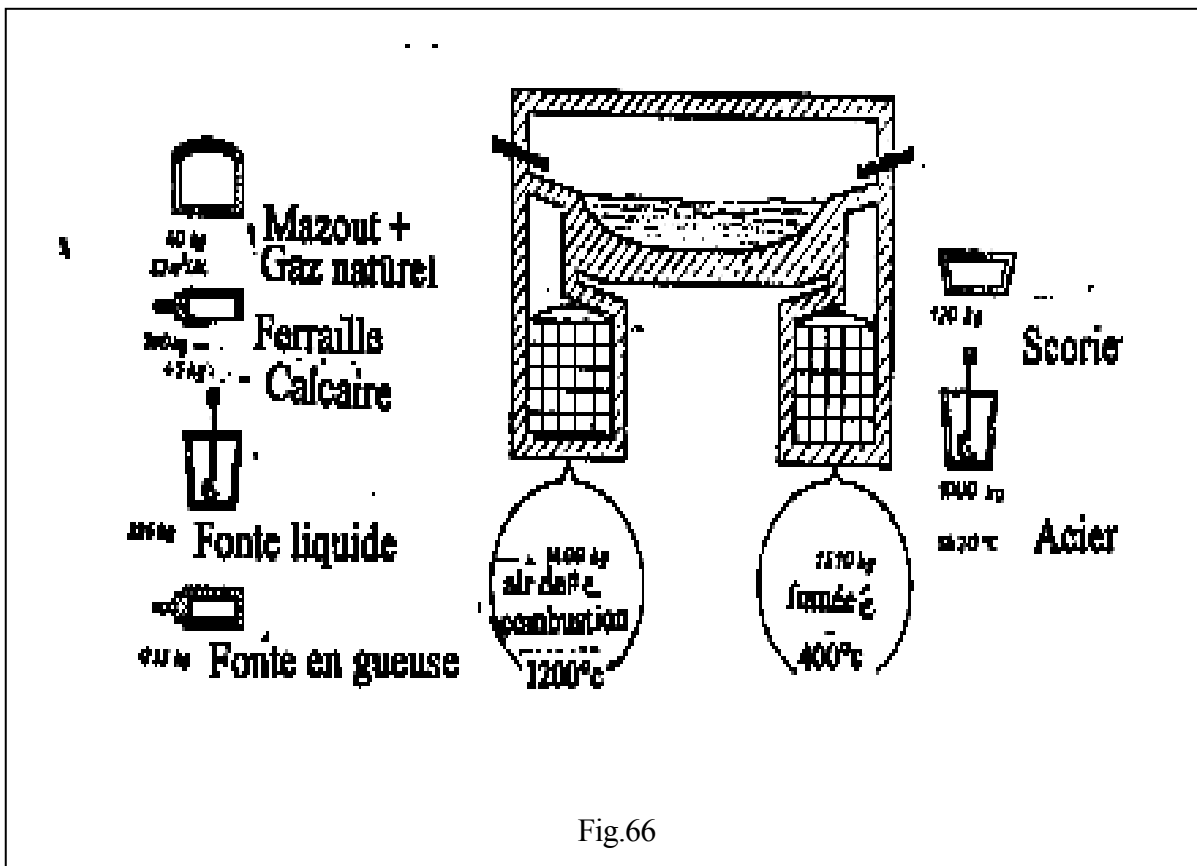


Fig.66

La marche de l'opération dans le four Martin diffère de l'opération par le vent (Thomas et Bessmer), d'une part parce que la température au cours de l'opération est plus élevée et d'autre part la lenteur de l'opération. Les divers réactions d'affinage se poursuivent simultanément et l'on n'observe pas ici les périodes nettement distinctes constatées dans les procédés à vent. Les opérations principales sont:

a) Préparation du four

Après chaque coulée on procède à la réparation du four qui consiste à recharger les endroits détériorés (érosés) du garnissage ainsi que bouchage du trou de coulée. Cette opération dure de 40 minutes à 1 heure 30 minutes et dépend de la capacité du four et de l'état des endroits détériorés, la réparation est suivie par la cuisson des endroits réparés.

b) Chargement du four

Tout d'abord on introduit la ferraille légère afin d'éviter les endommagements de la sole, ensuite les fondants (castine + minerais de fer) pour le procédé Scrap-basique le sable de quartz et la scorie acide de la coulée précédente sont introduits dans le cas du Scrap procédé-acide. Ensuite la ferraille lourde et la fonte en gueuse ou liquide. La durée de cette opération varie de 20 minutes à 2 heures.

c) Préchauffage de la charge métallique

Le préchauffage de la charge métallique dure de 15 à 45 minutes et jusqu'à la couleur rouge (900°C), il est nécessaire afin d'éviter les projections (explosions) dans le four et d'accélérer le processus de fusion de la charge.

d) Fusion de la charge métallique

Durant cette période on procède au chargement de la fonte liquide dans le cas du procédé à fonte liquide. Cette période est caractérisée.

e) Fusion de la charge métallique

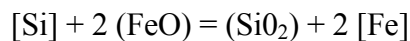
Durant cette période on procède au chargement de la fonte liquide dans le cas du procédé à fonte liquide. Cette période est caractérisée par un bouillonnement uniforme du bain recouvert par la scorie. A la fin de la fusion on effectue le décrassage de la scorie et prélèvement des échantillons pour contrôler le pourcentage du carbone qui doit être de 0,4 à 0,8%, une concentration excédentaire du carbone est nécessaire pour l'affinage du bain.

5.5.3. Affinage du bain métallique

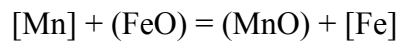
L'affinage du bain métallique est très nécessaire pour :

- La désulfuration du métal.
- La déphosphoration du métal
- Bouillonnement du bain métallique.
- Chauffage du bain jusqu'à la température de coulée exigée. Les réactions essentielles durant l'affinage sont :

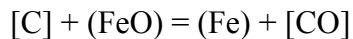
- L'oxydation complète du silicium s'effectue à la fin de fusion



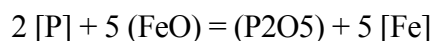
- Le manganèse s'oxyde en s'éliminant sous forme de MnO



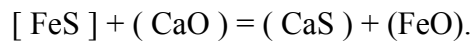
- La décarburation du métal favorise la répartition de la chaleur, le dosage du bain métallique, la déphosphoration et la désulfuration ainsi que l'élimination des inclusions non métalliques par flottation (bouillonnement)



- Pour une bonne déphosphoration (procédé basique), la scorie doit être riche en calcaire et en oxyde de fer, donc on doit renouveler deux à trois fois la scorie (par décrassage).



- Pour une bonne désulfuration, des températures élevées sont exigées



5.5.4 Les aciers Martin

Le procédé Martin est utilisé pour l'élaboration d'une grande variété d'aciers non alliés et faiblement alliés (aciers d'usage courant, aciers de qualité) avec des pourcentages en carbone de 0,03 à 1% et en phosphore et soufre inférieure à 0,040%.

Actuellement il est impossible d'élaborer des aciers fortement alliés avec 2,5% Mn, 2,5% Cr ou 1,5% Si.

5.6. Le four électrique

Les aciers électriques sont élaborés dans des fours chauffés par l'énergie électrique. La différence existante entre ce procédé et le procédé Martin réside dans le mode de chauffage et la construction du four. La matière première destinée à la fusion est constituée essentiellement de ferraille. Les réactions d'oxydation et d'affinage s'effectuent sensiblement de la même façon, seulement l'atmosphère neutre ne peut pas contribuer à la formation d'oxyde de fer à la surface du bain des aciers électriques. Lors de l'élaboration des aciers électriques, l'opération de réduction joue un rôle très important. La température du bain peut dépasser 1800°C ce qui facilite la fusion des inclusions et favorise la réduction des oxydes, la température peut être facilement réglée. Grâce à l'élimination poussée du phosphore, du soufre et de l'oxygène, le procédé électrique est le seul procédé permettant l'élaboration des aciers de qualité supérieure avec des concentrations de $P = 0,01\%$, $S = 0,008\%$ et $O_2 = 0,003\%$, ainsi que tous types d'aciers alliés et en particulier les aciers à forte teneur en métaux réfractaires.

5.6.1.Types de fours électriques

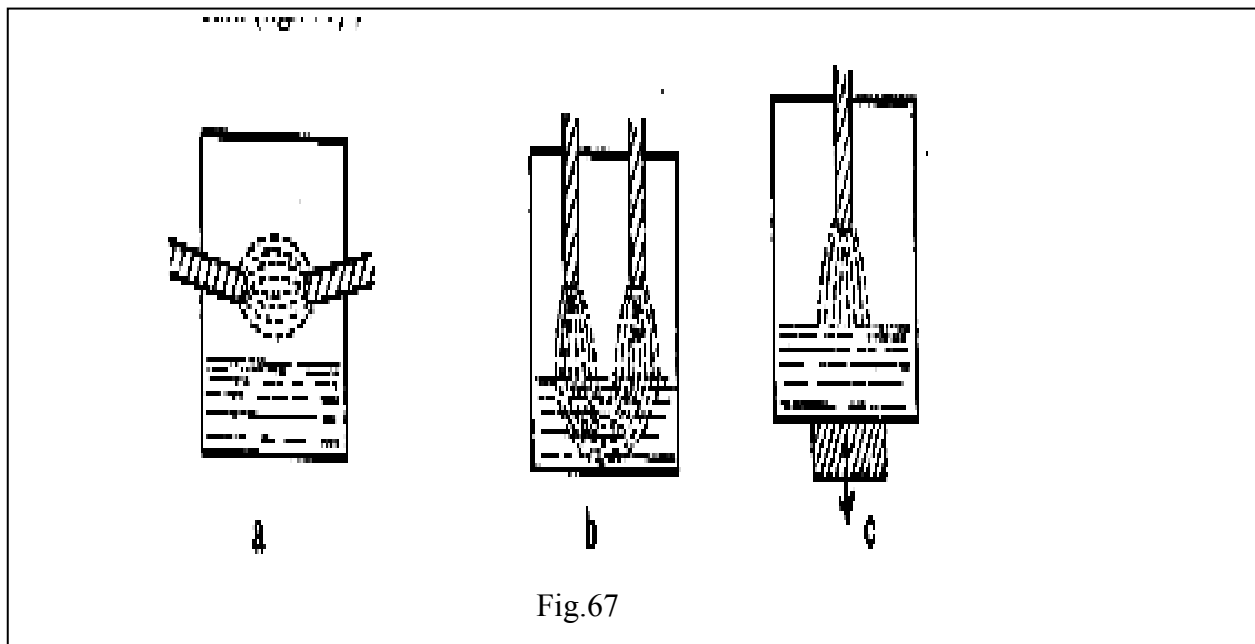
D'une façon générale, on distingue trois types de fours électriques :

1-Fours à résistance : La chaleur se dégage dans un circuit qui entoure le four. Les résistances usuelles ont, soit un point de fusion trop bas (alliages à base de nickel), soit une résistance à l'oxydation insuffisante (graphite, tungstène), pour que l'on puisse réaliser des fours à résistance permettant l'élaboration de l'acier.

2-Fours à induction : Le bain d'acier est chauffé par effet joule par le courant qui y est créé par induction par un courant alternatif.

3-Fours à arc : Ce sont en somme des fours à résistance, celle-ci étant surtout constituée par le milieu gazeux compris entre l'électrode et la matière à chauffer. Seuls ces deux derniers types de fours sont actuellement utilisés, mais les fours à arc sont de beaucoup les plus importants. On les classe en trois catégories suivant leur mode de fonctionnement :

- a) Le courant ne passe pas dans le bain ; l'arc jaillit au dessus du bain, le chauffage à lieu par rayonnement, convection et par réverbération sur la voûte.
- b) Le courant traverse le bain allant d'une électrode à l'autre, les électrodes étant hors du bain.
- c) Le courant amené par une électrode, traverse le bain et sort par la sole conductrice.



Les fours du premier type donnent lieu à une mauvaise répartition de la chaleur dégagée. Les fours à sole conductrice (dont plusieurs types sont encore en service) tendent à être abandonnés en raison de la fragilité de la sole qui est essentiellement constituée par un pisé de magnésie. Le four Héroult, qui appartient au second type, est de beaucoup le plus employé.

[5.6.2.Le fourHEROULT](#)

Le principe de ce procédé a été défini par P.Heroult et le premier four a été mis en service en 1906. Le four fig.54 a une forme circulaire avec un système de basculement permettant la coulée de l'acier et e la scorie, sa capacité peut atteindre jusqu'à 400 tonnes.

Le garnissage des murs et de la sole sont à la base de matériaux réfractaires basiques, la voûte est le plus souvent en réfractaire acide (peut être aussi en réfractaire basique), quand au garnissage de la pise, il est basique ou acide selon le procédé en question.

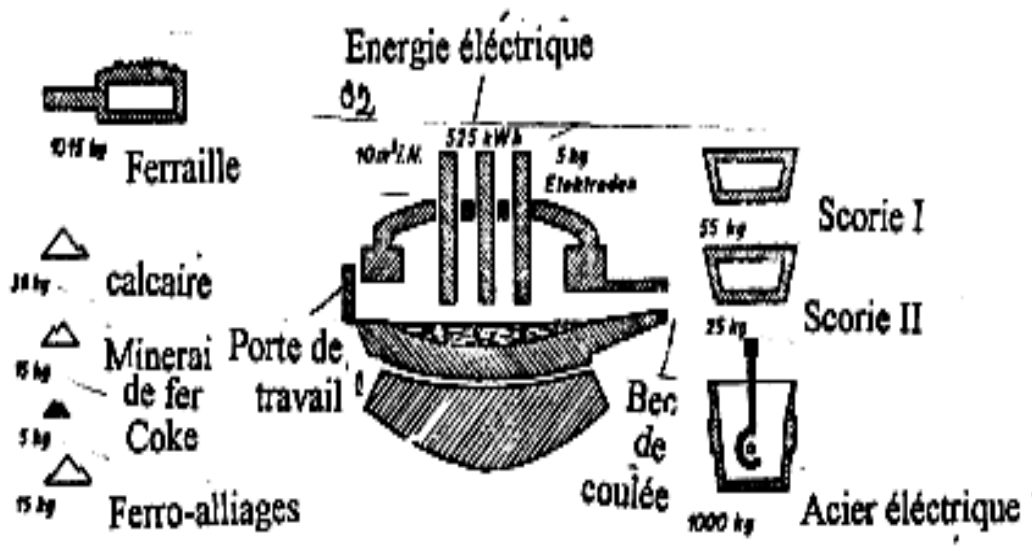


Fig.68 Schéma du bilan de matière (procédé avec deux scories) pour la production de 1000kg d'acier

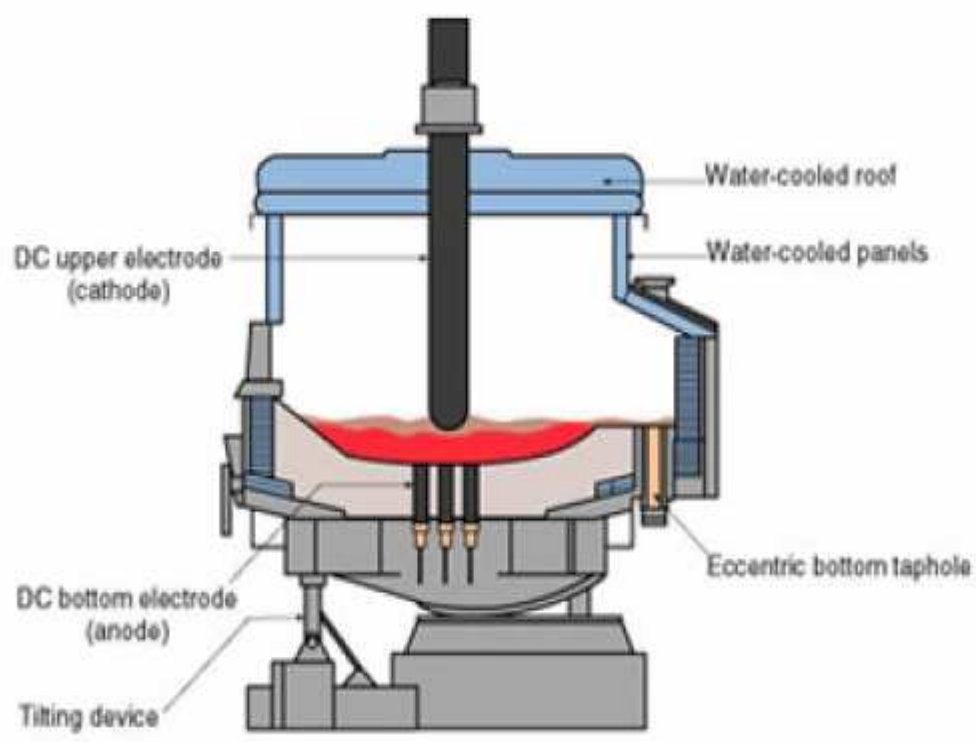


Fig.68

La chaleur nécessaire pour la fusion de la charge et du chauffage du bain métallique est obtenue par l'arc électrique jaillissant entre les électrodes et le bain métallique. Les électrodes sont en graphite ou en carbone amorphe alimentées par un courant triphasé, leur consommation est de 5 à 9 kg/tonne d'acier.

Elles sont mobiles pour deux buts :

- Assurer leur raccordement.
- Réglage de la longueur de l'arc électrique (c'est à dire de l'énergie amenée dans le bain métallique).

Pendant la fusion on travaille avec des aciers allongés, afin de faciliter leur pénétration dans le bain et éviter l'endommagement de la voûte par rayonnement e l'arc, alors que pendant l'affinage, les arcs courts suffisent. En général le four à l'arc électrique démarre toujours avec une charge à 100% de ferraille. La teneur nécessaire en carbone dans le métal liquide est obtenue par addition de la fonte ou d'éléments de carburation. Les hautes températures de l'arc électrique et l'absence des gaz des flammes est une possibilité l'espace de travail du four de l'extérieur par une voûte mobile.

La possibilité de travailler avec une scorie oxydante ou réductrice (ce qui permet d'élaborer des aciers fortement alliés et des aciers à haute teneur en carbone). Dans le cas d'affinage par oxydation, la charge doit contenir un excès en carbone (0,4 à 0,6%). Pour l'élimination du Si, Mn, P, C on ajoute soit le minerai de fer ou on souffle de l'oxygène, ainsi on obtient un bouillonnement du bain métallique ce qui assure le dégazage, la déphosphoration et la décantation des inclusions non métalliques. Pour le deuxième mode d'affinage par réduction, la charge est constituée de chutes d'aciers alliés ne contenant pas de phosphore. Dans ce cas il n'est pas utile d'ajouter les éléments oxydants, donc absence de bouillonnement du bain métallique et l'opération consiste tout simplement à refroidir les chutes d'aciers alliés pour obtenir un acier de composition chimique presque analogue.

5.6.3. Les principales matières premières du four électrique

a) La ferraille

La charge se compose essentiellement de la ferraille, dont la proportion varie jusqu'à 90%. La ferraille ne doit pas contenir les métaux non ferreux, elle doit être propre (ne contenant pas de la rouille $Fe_2O_3.H_2O$), car la rouille contient du EL, dont il est difficile de l'éliminer pendant la période de désoxydation.

b) Fonte en gueuse

Elle doit être pauvre en phosphore, sa proportion est de 8% de la charge totale.

c) Rébus des aciers

Ils doivent être classés selon leur composition chimique et selon leur utilisation.

d) Fondants

Leur rôle a été déjà donné dans les procédés précédents. Comme fondants on utilise :

- **La castine** : contenant plus de 97% de CaCO_3 et de faible quantité de soufre.
- **La chaux** : contenant plus de 90% de CaO et de faible quantité en soufre et en humidité. La castine et la chaux sont destinées pour former la scorie basique.

e) Le sable de quartz

Utilisé comme fondant pour former la scorie acide et pour la fluidisation de la scorie basique, ou encore utilisé pendant la période de désoxydation.

f) La chamotte

Ce sont des déchets de briques réfractaires et spath-fluor (CaF_2), utilisé pour la fluidisation de la scorie.

g) Le minerai de fer

Employé comme oxydant, il doit contenir peu de soufre, phosphore. Le plus employé est le Fe_2O_3 .

h) Les ferro-alliages

Sont employés essentiellement pour la désoxydation et dosage du bain métallique selon les nuances de l'acier à obtenir. Les principaux ferro-alliages utilisés sont :

Chargé dans le four	{	<p>Fe-Mn (Mn = 76 ÷ 80%, Fe = 12 ÷ 14%)</p> <p>Fe-Si (Si = 10 ÷ 90%)</p> <p>Fe-Cr (Cr ≈ 70%)</p> <p>Fe-Va (35 ÷ 80%)</p> <p>Fe-ti (35 ÷ 50%)</p>	}
Dosage de L'acier	{	<p>Si-Al (Si = 30 ÷ 75%, Al = 20 ÷ 50%)</p> <p>Si-Ca (Si = 60 ÷ 64%, Ca = 34 ÷ 36%)</p> <p>Fe-W (W = 80%)</p> <p>Fe-Mo (Mo = 60%)</p>	}

On utilise aussi F aluminium dans la poche de coulée pour la désoxydation définitive de l'acier et pour régler la grosseur des grains d'austénite (acier de construction).

5.6.4. Marche d'une opération dans le four électrique

Une opération au four à arc électrique comporte des éléments nettement distincts et elles sont les suivantes :

a) Entretien du four

Cette opération consiste à l'évacuation du reste du métal et de la scorie et la réparation des endroits érodés sa durée est de 10 à 20 minutes.

b) Chargement du four

La durée dépend de la capacité du four, pour des raisons économiques, on part presque uniquement de ferraille de façon à réduire l'importance de l'affinage. Afin d'obtenir une charge compacte et une fusion rapide, on charge en premier la ferraille légère (15%), ensuite la ferraille lourde (45%) et moyenne (40%).

c) Fusion

La période de fusion commence simultanément avec le chargement cette période se déroule sous une tension maximum et jusqu'à la fusion complète du métal. Durant cette période commence aussi l'oxydation des éléments tels que Ca, Mg, Si, Mn, Fe (dans le cas de l'affinage par réduction, la période d'oxydation n'existe pas, on a la période de réduction qui suit directement la fusion.

d) Période d'oxydation

A la fin de la fusion, on ajoute les éléments oxydants par petites partitions tels que la chaux, minerai de fer, on emploie parfois l'oxygène soufflé sous pression par les portes de travail, afin d'accélérer le processus d'oxydation et de décarburation. Cette période existe seulement dans le cas du mode d'affinage par oxydation. L'oxydation est destinée à abaisser la teneur des éléments non désirés, surtout le phosphore et le soufre et obtenir des températures du bain métallique dépassant la température de coulée. Un autre rôle, c'est le dégazage du métal lors de son bouillonnement. A la fin de cette période, on procède au décrassage du métal et même à sa recarburation s'il y a lieu. Sa durée est de 15 à 45 minutes.

e) Période de désoxydation

Durant cette période s'effectuent la désoxydation et le dosage du bain métallique. Le dosage commence par l'addition des recarburants (chutes d'électrodes, fonte en gueuse, coke etc...) et des ferro-alliages.

L'ordre d'enfournement de ces derniers dépend de l'affinité chimique des éléments par rapport à l'oxygène. Les éléments d'alliages possédant une grande affinité à l'oxygène sont enfournés à la fin de l'opération juste avant la coulée.

5.6.5. Classification des aciers selon le procédé d'affinage et le pourcentage du carbone

L'acier est l'alliage de fer le plus utilisé, vue ses bonnes propriétés mécaniques par rapport à ceux de la fonte.

L'acier est élaboré principalement à partir de la fonte. Selon les procédés d'affinage on distingue les aciers suivants obtenus à partir de la :

1- Fonte non phosphoreuse

- **Convertisseur Bessemer** => **acier ordinaire classe A ou E.**
- **Convertisseur à oxygène** => **acier ordinaire et fin classe A ou E.**
- **Four Martin** => **acier fin + faiblement allié classe XC.**
- **Four électrique** => **acier fin et allié classe XC.**

2-Fonte phosphoreuse

- **Convertisseur Thomas** => **acier ordinaire classe A ou E.** Selon le pourcentage de carbone :

Aciers	%C	Principaux usages
Extra-doux	$<0,15\%$	Chaudières, boulons, rivets
Doux	$0,13 < C < 0,25$	Tôle de navire
Demi-doux	$0,25 < C < 0,35$	Arbres
Demi-dur	$0,35 < C < 0,45$	Coutellerie
Dur	$0,45 < C < 0,60$	Ressorts, marteaux, limes, freins.
Très dur	$0,60 < C < 0,75$	Outils, fraise, scie
Extra-dur	$C > 0,75$	Outils de tour, câbles, roulements

5.7. Coulée de l'acier

Avant sa solidification l'acier est coulé selon plusieurs procédés :

- Soit coulé dans des moules en sables pour obtenir des pièces de fonderie.
- Soit coulé dans des lingotières, lorsqu'il doit être ultérieurement travaillé (forgeage, laminage etc...). Ce procédé est souvent le plus utilisé.

Généralement l'acier à sa sortie du four ou du convertisseur est déversé dans une poche, le plus souvent on utilise les poches à quenouille, qui représente un réservoir conique en tôle épaisse revêtue intérieurement de briques réfractaires. La quenouille est destinée à soulever le tampon du siège (ouverture dans son fond par laquelle s'écoule l'acier de la poche).

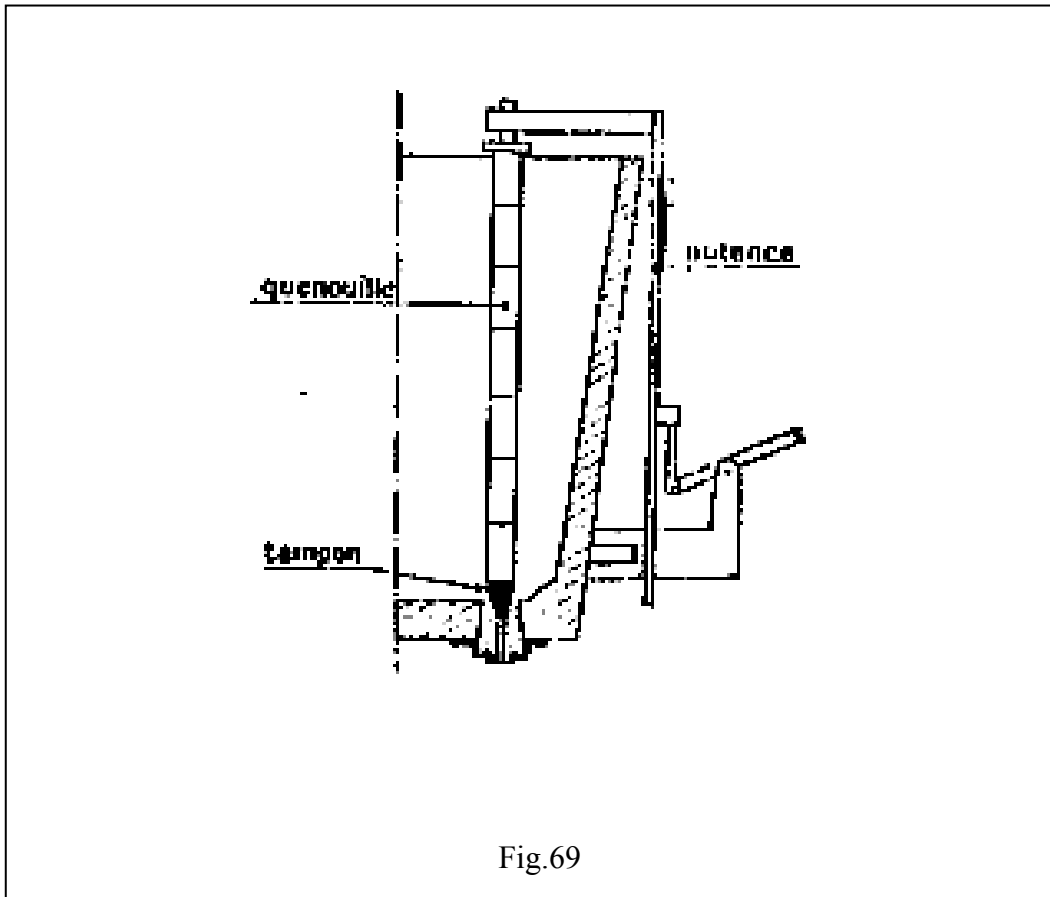


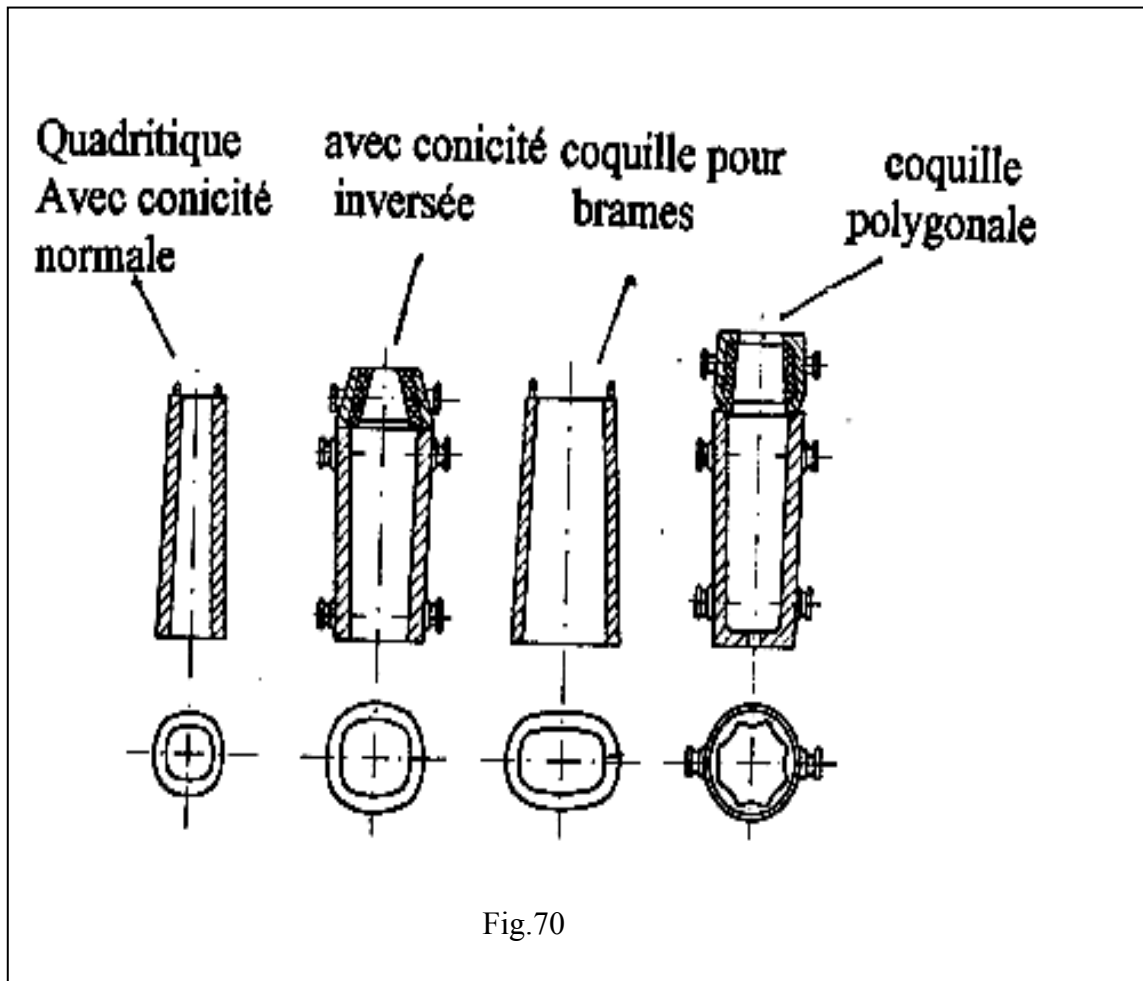
Fig.69

Grâce à la faible densité de la scorie par rapport à celle du métal, cette dernière monte à la surface et le métal bien décanté s'écoule par le bas de la poche dans les lingotières. L'acier à sa sortie du four doit être surchauffé de 100 à 150°C au dessus de sa température de fusion. La surchauffe est nécessaire pour la compensation des pertes de chaleur occasionnées par la durée de la coulée qui peut parfois dépasser 1 heure 30minutes. Mais cette surchauffe doit être contrôlée car des températures très élevées peuvent provoquer les criques, la ségrégation chimique et la haute teneur en gaz. Les températures basses peuvent contribuer aussi à la mauvaise qualité de la surface et la haute teneur en inclusions métalliques.

5.7.1. Coulée en lingotières

Les lingotières sont en fonte et peuvent avoir des formes et sections variables tels que carrée, rectangulaire, hexagonale etc.... Le poids du lingot varie de 100 kg à 100 tonnes, mais les plus répandus sont les lingots de 6 à 8 tonnes.

Pour faciliter l'extraction des lingots solidifiés, leurs parois intérieures sont lubrifiées au préalable à l'aide de goudron et d'aluminium en poudre. L'extraction des lingots est facilitée aussi par l'inclinaison donnée aux parois.



Selon le procédé de coulée en lingotières on distingue plusieurs types tels que :

a) La coulée en chute

Le métal est directement versé dans la lingotière. Au début pour éviter les projections du métal sur les parois, l'acier est coulé lentement, une fois la couche amortissant le métal liquide est formée, on augmente la vitesse de coulée au maximum. A la fin lorsque le niveau du métal s'approche de la masselotte on diminue la vitesse de coulée, afin de réaliser la retassure en haut. La durée de remplissage d'une lingotière de 2 + 20 tonnes est de 2 à 8 minutes.

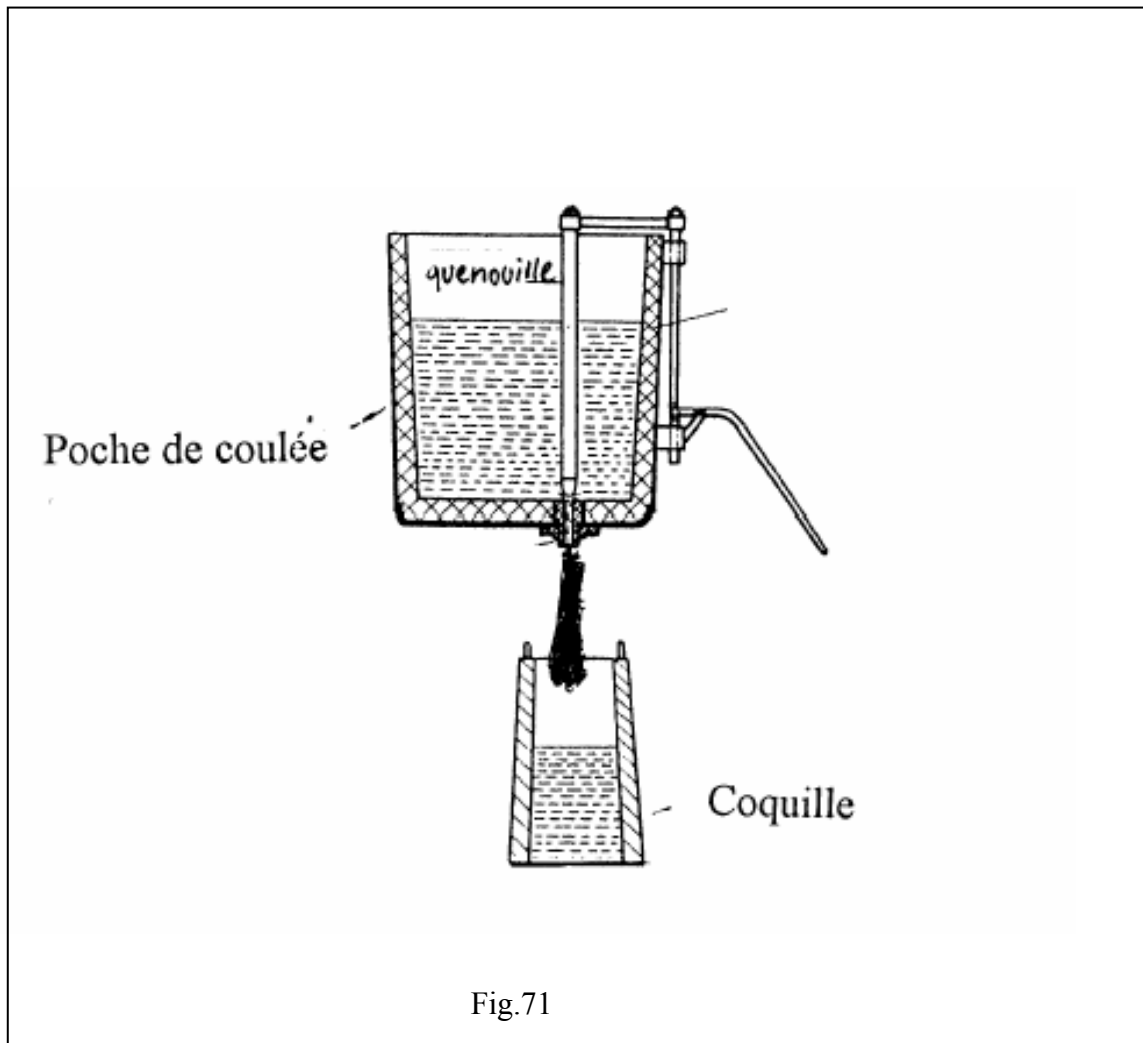
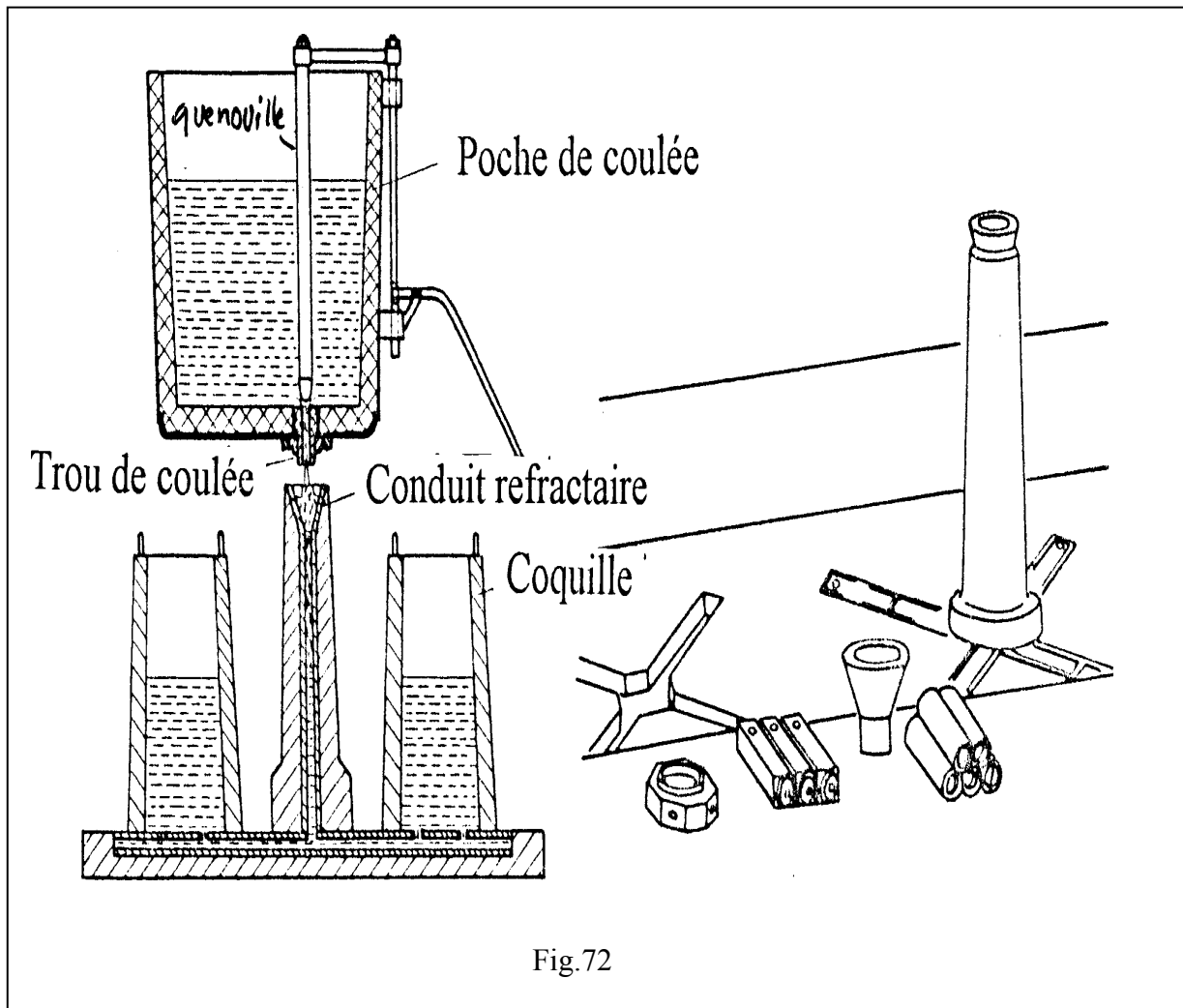


Fig.71

Beaucoup de métaux présentent un déficit de volume après leur refroidissement (pour le fer est de $8 \text{ } ^\wedge \text{ } 9\%$). Ce phénomène est appelé contraction et conduit à la formation de retassure dans la partie supérieure de bloc. Les retassures représentent 2 à 3% du volume total. Les lingotières normales ne sont pas utilisées à cause de la position de la retassure, car généralement la retassure est éliminée du bloc par oxycoupage. Le plus souvent on utilise des lingotières à conicité inverse et avec isolation thermique ou à calotte exothermique dans lesquelles le métal peut être maintenu longtemps à l'état liquide, afin que le volume de retrait se passe à la partie supérieure et il n'y aura pas de retassure dans les parties du bloc. Cette opération peut être aussi améliorée par chauffage de la partie supérieure du bloc.

b) La coulée en source

L'acier est versé dans un conduit vertical qui par l'intermédiaire d'un canal horizontal en matériaux réfractaires vient se raccorder aux moules principaux (lingotières).



Ce procédé présente plusieurs inconvénients tels que :

- L'entretien des conduits réfractaires.
- La fusion du métal solidifié restant dans les conduits réfractaires.
- Le séchage après réparation des conduits réfractaires.

Son avantage, il donne un métal de qualité nettement supérieure à celui obtenue dans la coulée en chute.

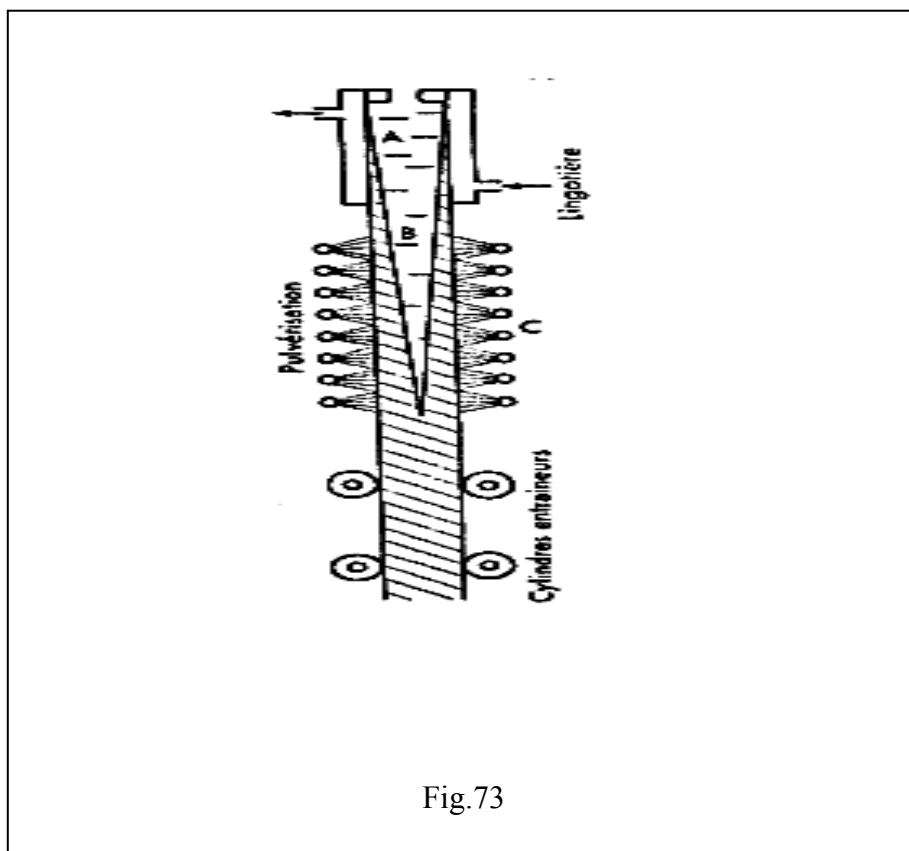
5.7.2. La coulée continue

La coulée continue est un procédé moderne permettant d'obtenir des demi-produits destinés aux opérations tels que : laminage, forgeage etc... Une ligne de coulée continue comprend généralement :

a) Une lingotière en cuivre

Sans fond, avec son dispositif de refroidissement et dans laquelle s'effectue la coulée continue du métal liquide. La forme de la lingotière est le plus souvent prismatique ou cylindrique d'une hauteur de 1 à 7 m, l'épaisseur des parois peut varier de 15 à 60 mm.

La lingotière est refroidie énergiquement par un courant d'eau dont le débit massique est égal à 6 fois celui de F eau coulée.



b) Un système de pulvérisation d'eau pour refroidir le métal coulé. Ce système se trouve hors lingotière. La solidification immédiate du métal liquide commence lors de son contact avec les parois de la lingotière en formant une gaine présentant une certaine rigidité cette dernière se détache de la paroi, tout en gardant à l'intérieur du métal non solidifié. Afin d'éviter d'éventuels risques de rupture du lingot, l'épaisseur du métal solidifié doit atteindre au moins 20 mm à sa sortie de la lingotière. A ce moment le jet d'acier est maintenu avec sa forme et ses dimensions initiales grâce à un corset formé d'un ensemble de cylindres entraîneurs. La solidification complète du liquide est assurée par le système de pulvérisation déjà indiqué.

c) Un exemple de cylindres d'entraînement permettant l'extraction régulière du métal solidifié. Ce sont des cages comprenant chacune deux rouleaux, l'un fixe définit la direction de la coulée et l'autre mobile, appuyé par des ressorts, exercent une pression constante et provoque l'entraînement de l'acier solidifié.

La vitesse d'extraction du lingot varie de 0,4-10 m/min et elle se détermine suivant la section transversale du lingot, voir tableau ci-dessous :

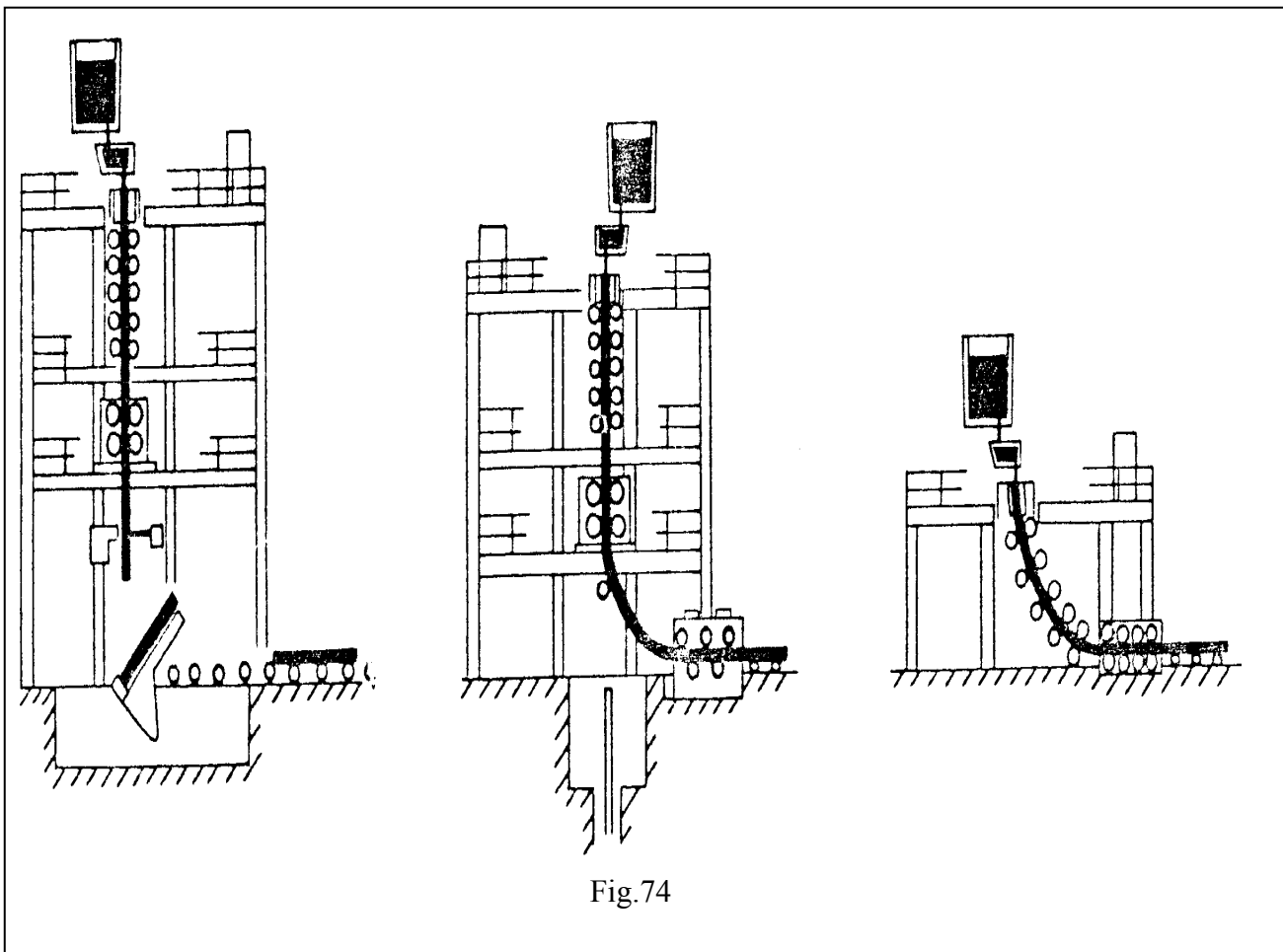
Section transversale (mm)	Vitesse d'extraction (m/min)
50 x 50	7-10
100 x 100	1,8-3,5
200 x 200	0,9-1,5
300x 300	0,5- 1,1
(150-300) x (500-2000)	0,4- 1,1

d) Un système de cisailage (oxycoupage)

Permettant de couper les lingots selon la longueur exigée. Pour des sections jusqu'à 250 cm² on utilise des cisailles hydrauliques et pour des sections plus grandes on utilise le chalumeau oxyacétylénique ou oxypropane. Dans certains cas l'utilisation de deux chalumeaux est exigée.

La coulée continue est plus économique par rapport aux procédés, grâce à sa rapidité et à l'économie en main d'œuvre et de manutention.

La figure 74 nous montre les différents types de construction du système de coulée continue.



Différents types de coulée selon le degré de désoxydation

Il existe essentiellement trois types de coulée :

- La coulée calmée.
- La coulée effervescente.
- La coulée sous vide.

5.8.1. La coulée calmée (acier calmé)

Ce type d'acier est complètement désoxydé avant sa coulée, il est caractérisé par une faible teneur en $O_2 < 0,004$ à $0,006\%$, donc sa solidification s'effectue sans formation de soufflure (porosité des gaz). L'acier liquide est désoxydé dans la poche de coulée par addition de silicium ou d'aluminium, généralement la quantité dissoute de ces éléments ne doit pas dépasser $0,20\%$ de silicium ou $0,020\%$ d'aluminium

La figure 75 nous montre la section d'un lingot d'acier calmé.

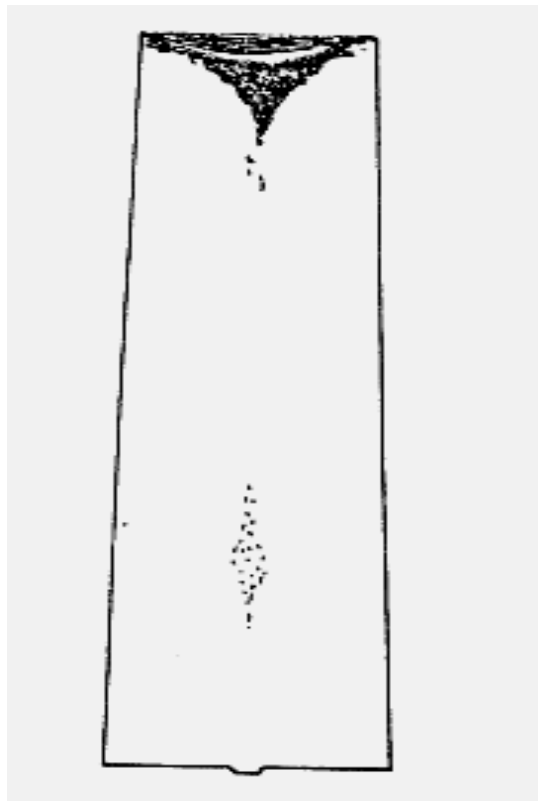
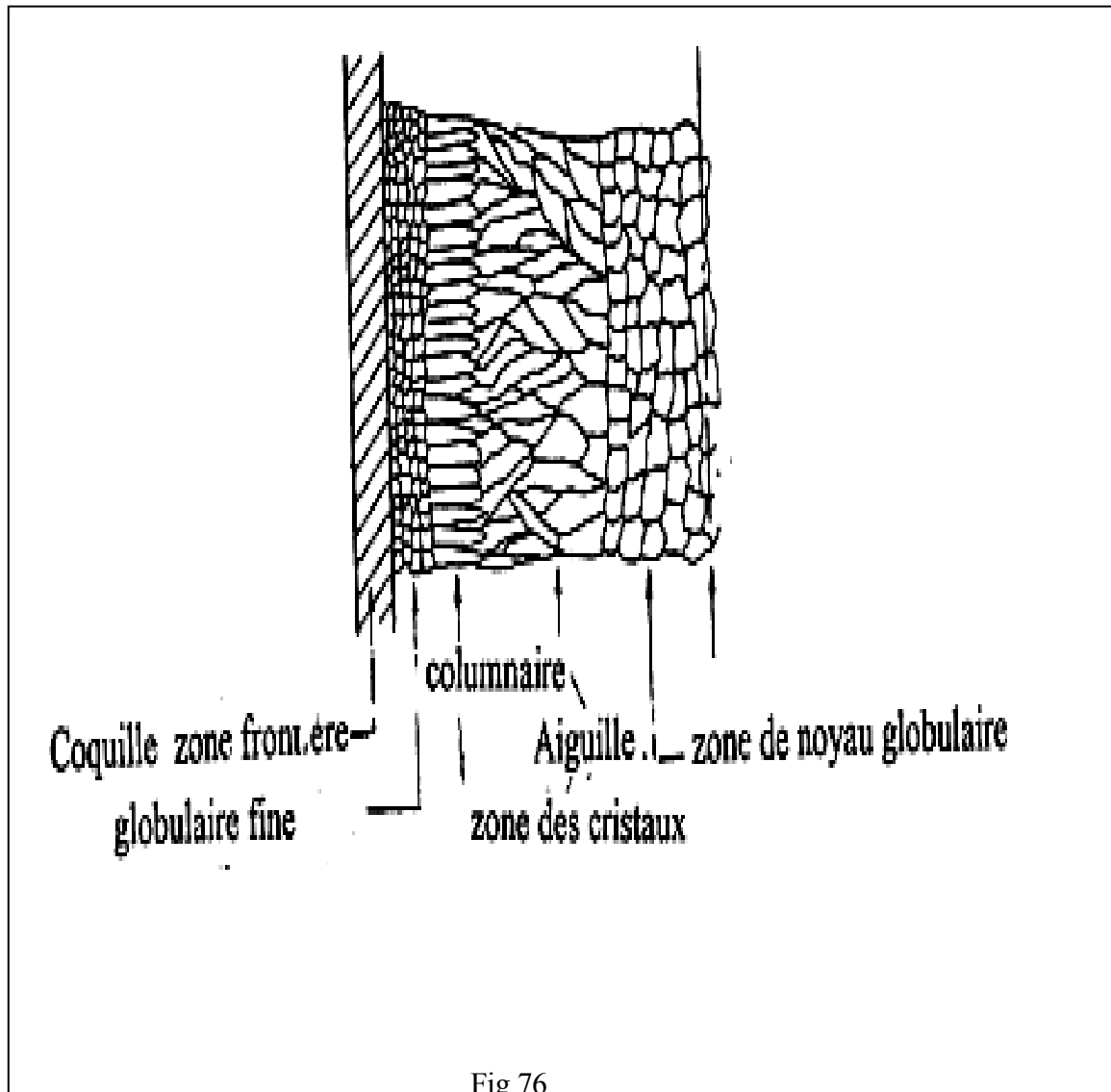


Fig.75

Une caractéristique de l'acier calmé c'est l'hétérogénéité qui peu se former dans la structure primaire ou dans la composition chimique. Le retrait de l'acier lors de sa solidification provoque la formation de retassure et suite a la variation des conditions de solidification, de même aussi que le degré de surfusion du métal liquide, de la formation des germes et de la vitesse de cristallisation. Les' lingots coulés présentent une différence dans leurs structures (une structure non homogène). La figure 76 nous illustre la formation de la structure d'un lingot calme, avec différentes zones de refroidissement.



Au contact avec la paroi froide de la lingotière, il y a formation d'une structure globulaire fine avec des cristaux désordonnés. L'épaisseur de cette zone peut atteindre jusqu'à 20 mm et elle est caractérisée par une grande vitesse de refroidissement. La zone suivante est la zone transcristalline ou zone de dendrites orientées, cette zone ne subit aucune influence de la paroi de la lingotière. Près de cette zone la vitesse de refroidissement diminue, ce qui donne une structure différente composée de cristaux arborescents orientés. Avec l'avancement du front de solidification vers l'intérieur du bloc, la structure arborescente se perd et on obtient dans la zone centrale une structure globulaire à gros cristaux. Lorsque l'évacuation de la chaleur se ralentit, les cristaux croissent perpendiculairement aux parois de la lingotière.

5.8.2.La coulée effervescente (l'acier effervescent)

L'acier effervescent ne subit aucune désoxydation dans la poche de coulée, à l'exception de l'addition du manganèse utilisé pour des corrections éventuelles de la composition chimique. La teneur en oxygène dissout reste très élevée et pendant la coulée de l'acier effervescent se forme le CO sous forme de gaz et durant la solidification complète de l'acier 0,01 + 0,02% de carbone s'oxyde et forme 1,3 + 2.5 m³ de CO/tonne d'acier. Une partie de CO s'évacue pendant la solidification et le reste forme de bulles de gaz (soufflures) dans le bloc solidifié. Selon le processus de solidification on divise le bloc solidifié fig.77 en plusieurs zones :

- a) Zone extérieure de soufflures qui se compose de soufflures allongées et se trouvant au moins à 15 mm de la paroi de la lingotière.
- b) Zone intérieure de soufflures.
- c) Zone de répartition irrégulière des soufflures (zone centrale à petites portions de soufflures).

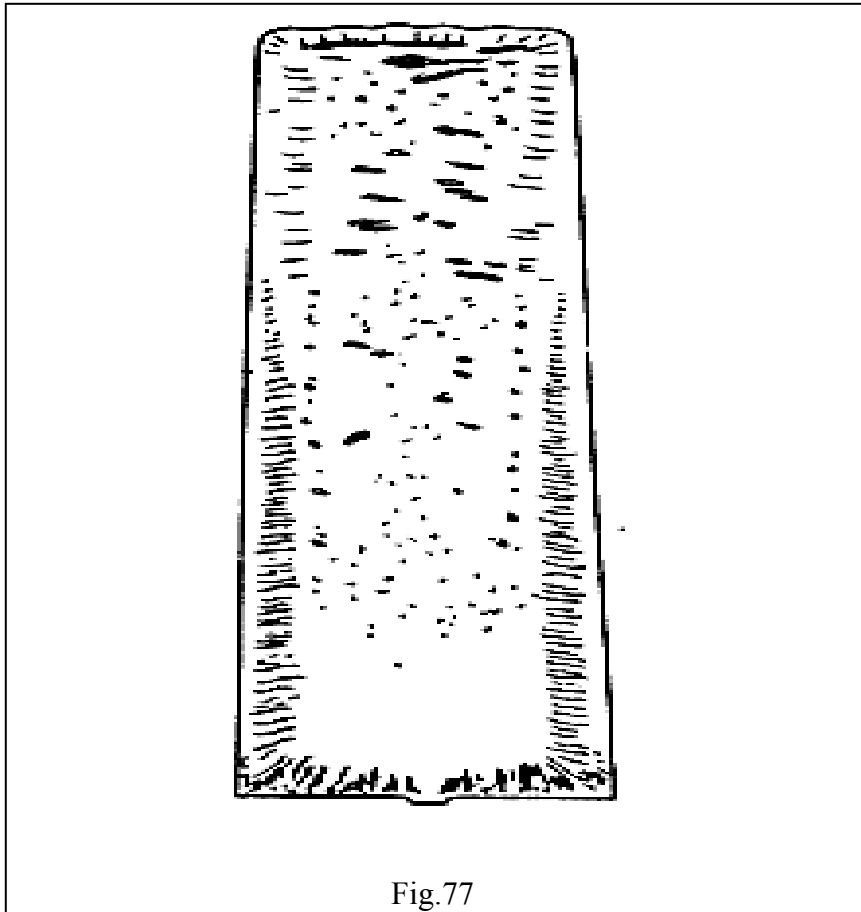


Fig.77

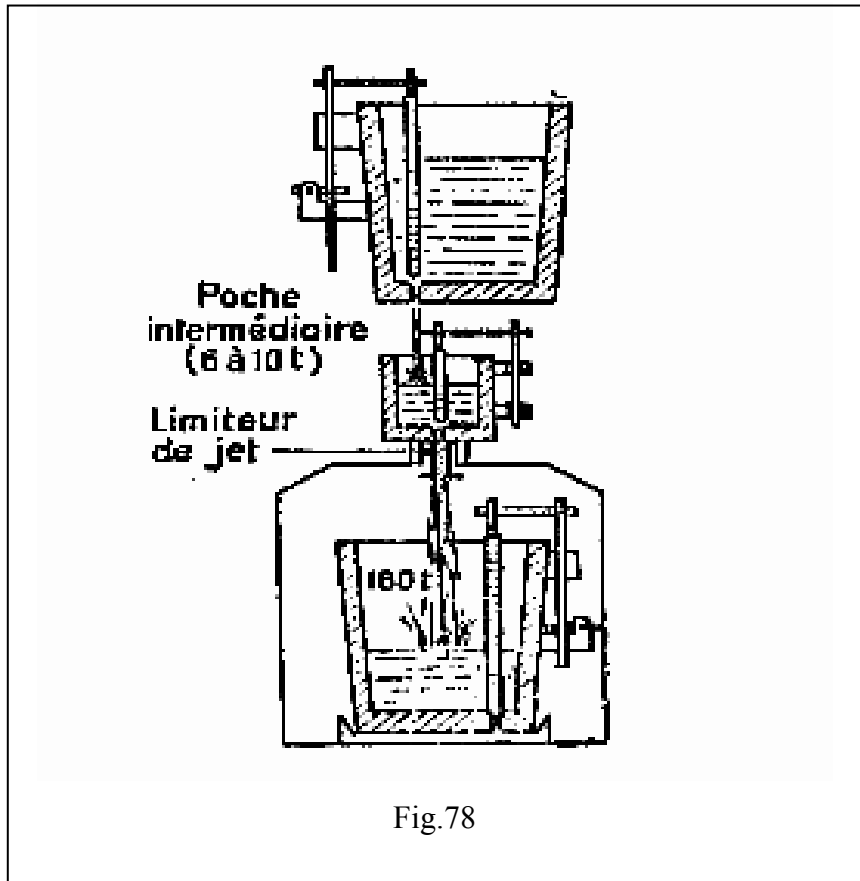
5.8.3. La coulée semi-calmée (l'acier semi-calmé)

L'acier reçoit des désoxydants dans la poche de coulée, mais en quantité plus faible que l'acier calmé. La désoxydation du métal liquide s'effectue le plus souvent avec 0,14-0,15% de silicium et de faible quantité en aluminium. La coulée semi-calmée est difficile à maîtriser mais présente des avantages vis-à-vis du prix de revient.

5.9. Coulée sous vide

Ce type de coulée est destiné essentiellement pour obtenir un métal avec des teneurs en éléments gazeux moins élevés, avec une élimination jusqu'à 60% de l'hydrogène et un abaissement de la teneur en azote de 20 + 75%.

La figure 78 nous montre l'ensemble du système de coulée sous vide.



La poche de coulée est introduite dans une cloche à vide, dans laquelle est versé le métal liquide, ensuite l'acier est coulé normalement à l'air dans les lingotières.

On peut pratiquer le dégazage en lingotières, en reliant chacune d'elles à une canalisation branchée sur une pompe à vide.

5.10. Défauts des lingots

Après solidification, les lingots d'acier présentent plusieurs défauts, tels que : hétérogénéité, retassure, soufflures, criques et tapures.

a) Hétérogénéité chimique ou ségrégation

C'est une répartition irrégulière des composants d'alliages et des impuretés dans les lingots. Un lingot n'est jamais un solide homogène et isotrope. Après analyse macrographique, quatre zones de cristallisation très différentes peuvent se distinguer dans le lingot et leur importance varie considérablement d'un lingot à l'autre selon le type d'acier, son mode d'élaboration et les conditions de coulée et de solidification.

La ségrégation est due aux températures de surfusion supérieures à la température de fusion de l'acier lors de sa solidification, où on peut constater un déplacement des concentrations, ce qui provoque la formation des cristaux avec une faible concentration en éléments d'alliages.

La teneur en carbone de l'acier qui se solidifie croît progressivement et le refroidissement est toujours trop rapide pour que la diffusion du carbone ait le temps de s'opérer parfaitement, la teneur des parties solidifiées les premières est de l'ordre de la moitié de la teneur moyenne et cette dernière valeur est nettement dépassée à la fin de la solidification. La ségrégation peut entraîner à une altération sensible des propriétés des parties dont l'acier est moins ductile et plus difficile à travailler à chaud.

La ségrégation est un défaut inévitable dans la coulée classique et il est plus important pour l'acier effervescent que pour l'acier calmé, à cause de dégagement gazeux qui entraîne les inclusions et les parties restées liquides riches en impuretés, dans l'intérieur du lingot.

Pour atténuer l'hétérogénéité de l'acier, on a recours au façonnage à chaud par forgeage ou laminage suivi ou non d'un recuit d'homogénéisation. Le façonnage à chaud détruit la structure dendritique, dissémine les inclusions et favorise ainsi la diffusion occasionnée par la haute température en rapprochant les parties d'inégale composition. La coulée continue entraîne la suppression de la ségrégation moyenne (répartition irrégulière des composants de l'alliage dans le lingot), d'autre part, la rapidité de la solidification conduit à un grain fin. L'acier présente donc une meilleure homogénéité que dans la coulée classique et le rapport propriétés en travers/propriétés en longueur est plus élevé.

b) Retassure

Lors de son refroidissement l'acier subit un retrait dû à sa contraction lors de la solidification. Le retrait dans les lingots d'acier calmé est de 6% du volume.

La solidification de l'acier commence près des parois de la lingotière et de sa surface supérieure, l'accroissement de l'épaisseur du métal solidifié s'effectue en direction du centre du lingot.

Le plus souvent la partie liquide n'est plus suffisante pour remplir l'espace compris entre les parois solides, le vide ainsi créé augmente et finalement il se forme une poche de retassure ayant la forme d'un cône dont la pointe est dirigée vers le bas. La partie du lingot comprenant la retassure ne peut pas être utilisée pour d'éventuelles opérations métallurgiques, ce qui exige donc le rejet de cette partie (la tête) du lingot.

Elle représente jusqu'à 1/3 du volume du lingot. Les aciers effervescent ne présentent pas de poche de retassure, mais une infinité de soufflures. Afin de remédier à ce défaut, plusieurs procédés existent tels que :

1) Élimination par chute

Ce procédé consiste à rejeter la tête du lingot où se trouve la retassure, la retassure est localisée lors de la coulée, la perte du métal est très importante, car la retassure peut représenter jusqu'à 1/3 du volume du lingot.

2) Localisation de la retassure

Ce procédé consiste à localiser la poche de retassure à la partie supérieure et à la maintenir à l'état liquide afin de diminuer l'importance de chute, plusieurs méthodes sont utilisées tels que :

- Chauffage au chalumeau ou à l'arc électrique.
- Combustion de charbon sur la couche superficielle de la scorie.
- Utilisation de poudre aluminothermique.
- Calorifuge de la partie supérieure de la lingotière.

3) Emploi de masselottes

La masselotte est une masse de métal placée à la partie supérieure du lingot et qui constitue une réserve de métal liquide. Donc un moule réfractaire est placé au dessus du lingot, afin de maintenir le métal assez longtemps liquide pour remplir convenablement la poche de retassure.

4) Compression du lingot pendant la coulée

Ce procédé nécessite une installation compliquée et coûteuse, mais c'est le moyen le plus sûr pour obtenir un lingot sain. La compression s'effectue par le haut ou le bas du lingot.

C) Soufflures

Les gaz qui ne peuvent pas atteindre la surface du métal provoquent pendant la solidification les soufflures. Ces gaz contiennent surtout du CO, H₂ et N₂. Le CO provient de la réduction des oxydes de fer et de manganèse par le carbone et entraînant les autres gaz dissous dans l'acier, dont la solubilité diminue avec la température.

L'hydrogène provient de la réduction de l'eau introduite par l'atmosphère du four ou par la charge.

Les soufflures se rencontrent surtout dans les aciers effervescent et elles ont la forme d'ampoules à pointes effilées et une direction sensiblement perpendiculaire à la paroi de la lingotière. L'utilisation de l'aluminium ou du ferro-silicium comme désoxydant dans la poche de coulée ou dans la lingotière peuvent réduire l'effervescence et par conséquent les soufflures au minimum.

c) Criques et tapures

Les criques sont des déchirures de la peau du lingot ; elles se produisent à haute température pendant le début du refroidissement. Le retrait met la couche extérieure solidifiée la première en tension, ce qui occasionne des ruptures.

Les tapures sont des déchirures internes qui se produisent à température plus basse ; les contraintes internes qui les causent sont dues à ce que les déformations plastiques sont hétérogènes, d'une part à cause de la répartition non uniforme des températures et d'autre part par suite de l'hétérogénéité chimique du métal et de l'inégale répartition des inclusions qui entraînent des variations des dilatabilités aux différents points.

6. Diagramme Fer-Carbone

6.1. Le fer et ses caractéristiques

Le fer est le métal de base le plus important pour les alliages techniques. Il est relativement abondant dans l'écorce terrestre (4,7% en masse) sous forme d'états combinés dans de nombreuses roches. Le fer pur n'est pas employé dans l'industrie, les plus employés sont les alliages de fer avec le carbone qui sont la fonte et l'acier. Le fer pur est obtenu soit ;

- Par électrolyse des sels de fer (fer électrolytique).
- Par décomposition thermique du pentacarbonyl de fer ($\text{Fe}(\text{CO})_5$).
- Ou encore par recuit de longue durée du fer doux dans un courant d'hydrogène à des température de 1000°C à 1400°C . Avec 99,9% de fer, il est déjà pur, mais il contient toujours des trous de différents éléments Le fer le plus pur qui peut s'obtenir actuellement contient 99.999% de fer. Le fer est de couleur blanche avec les caractéristiques suivantes : Masse atomique : 55,85, Nombre atomique : 26, Rayon atomique : 1,27 Å (CFC), Masse volumique : $7,8\text{g}/\text{cm}^3$ Température de fusion : 1539°C .

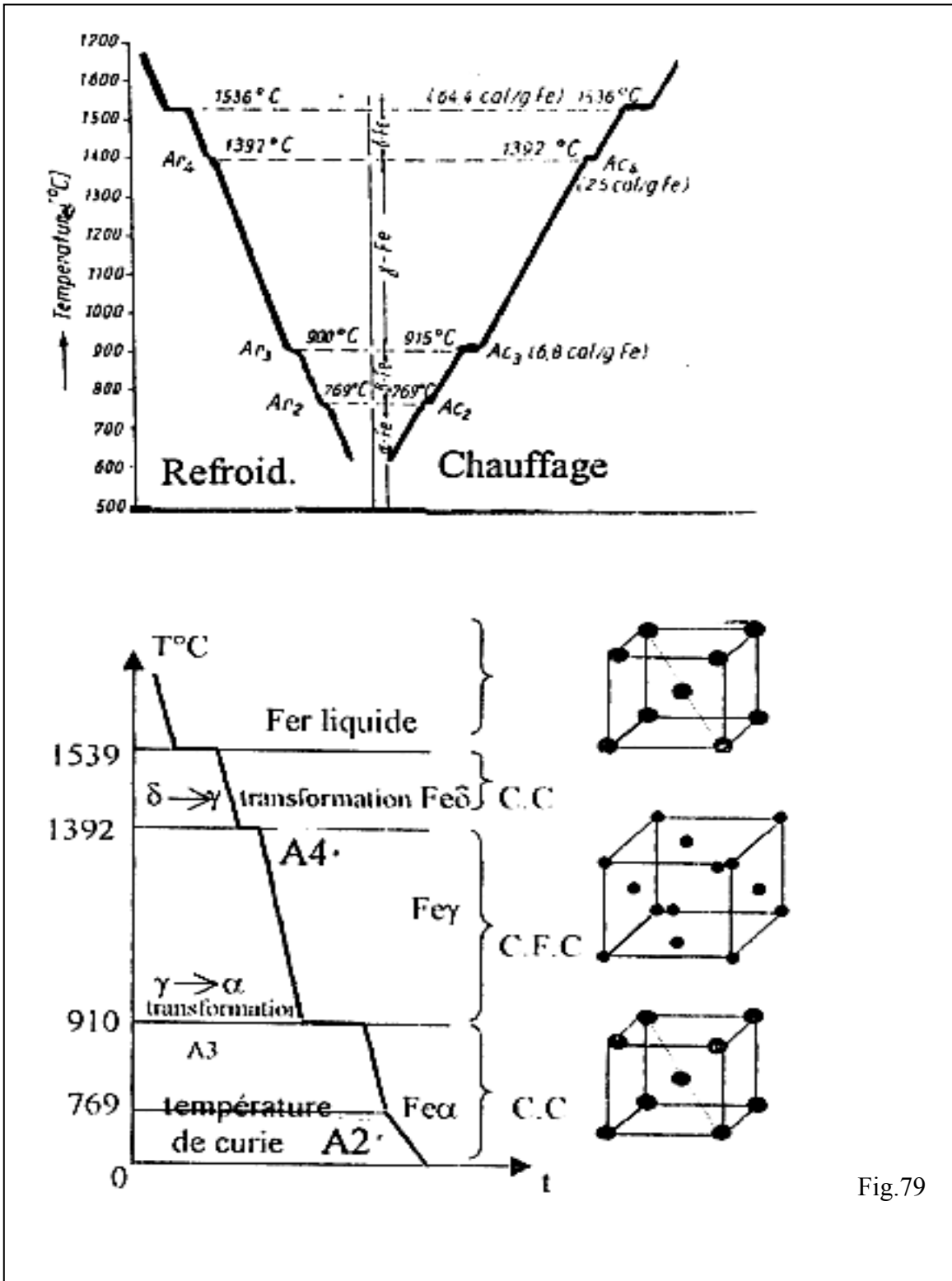
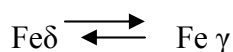


Fig.79

Ces transformations sont établies grâce aux paliers thermiques des courbes de refroidissement ou de chauffage. Les courbes (fig.79) de chauffage ou de refroidissement du fer sont caractérisées par plusieurs points d'arrêt (point critique ou palier) correspondant à des températures définies pour des transformations déterminées.

Phase	Réseau Cristallin	Constante du Réseau en nm	domaine d'existence	solubilité maximale	desig. structure
Fe δ	C.C	a = 29,3 T = 1425°C	1536 > T > 1392°C	0,10% T = 1493°C	δ -Ferrite
Fe γ	C.F.C	a = 36,4 T = 1100°C	1392 > T > 911°C	2,06% T = 1147°C	Austénite
Fe α	C.C	a = 28,66 T = 20°C	T < 911°C	0,02% T = 723°C	Ferrite
Fe $_3$ C	Rhombédrique	a = 45,15 b = 50,84 c = 67,30 } T = 20°C	T < 1330°C		Cémentite

Le fer α existe aux températures T < 910°C et T > 1392°C. Aux températures T > 1392°C, le fer α est désigné par Fe δ . Le fer α possède un réseau cubique centré, il est magnétique jusqu'à la température T = 768°C, cette température est appelée point de curie, qui correspond à la transformation magnétique. Le fer γ existe entre 910°C et 1392°C, il est paramagnétique et il a un réseau cristallin cubique à faces centrées. Si on étudie les courbes de refroidissement et de chauffage on peut constater les transformations suivantes, le premier point d'arrêt apparaît à la température de 1539°C (température de fusion du fer). Avec l'abaissement de la température, la totalité du fer se solidifie et se cristallise à la température de 1392°C, à cette température il y a apparition du deuxième point d'arrêt correspondant à la transformation :



Ce point est désigné par A_{R4} ou A_{<M} respectivement pour le chauffage ou le refroidissement.

Ac₄ correspond à $\text{Fe}\delta \longrightarrow \text{Fe}\gamma$

A_{R4} correspond à $\text{Fe}\gamma \longrightarrow \text{Fe}\delta$

Le troisième point critique (palier) se trouve à la température $T = 91\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce point est désigné par A_{C3} . ou A_{R3} .

A_{R3} . Correspond à la transformation $Fe\gamma \longrightarrow Fe\alpha$ lors du refroidissement.

A_{C3} . Correspond à la transformation $Fe\alpha \longrightarrow Fe\gamma$ lors du chauffage.

Le quatrième point est désigné par A_{R2} ou A_{C2} correspondant à la transformation magnétique dont la température est de 768°C , appelé aussi point de curie. Au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques et devient paramagnétique Si on examine un morceau de fer à l'aide d'un aimant à la température de 750°C et 800°C , on constate qu'à $T = 750^{\circ}\text{C}$ il est toujours attiré par l'aimant, tandis qu'à $T = 800^{\circ}\text{C}$ il n'est plus attiré. Au dessous de A_{R2} ou A_{C2} on a la présence du $Fe\alpha$

6.2. Le carbone et ses caractéristiques

C'est un élément non métallique peut abondant (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales, pétrole, charbon, bois, houille etc..

Ses caractéristiques sont les suivantes :

Numéro atomique : 6

Masse atomique : 12

Rayon atomique : 0,77 Å

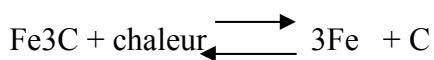
Masse volumique : 2,5 g/cm

Température de fusion: 3500°C

C'est un élément polymorphe et il existe deux variétés cristallines dans les conditions ordinaires, le diamant et le graphite. La variété du diamant est métastable à réseau cristallin CFC et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est un isolant électrique. Le graphite possède un réseau hexagonal simple, c'est un matériau réfractaire, relativement bon conducteur d'électricité. On l'utilise à l'état poudre pour mines de crayons, pour la lubrification (combinaison de graphite et de graisse) dans les bronzes graphités ou encore en suspension colloïdale.

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite où se combine avec le fer en formant une phase intermétallique Fe₃C appelée cémentite ou carbone de fer.

La phase intermétallique cémentite a une structure très compliquée et elle est très dure (HB=800kp/mm). La formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement). Lorsque le refroidissement du métal liquide est lent les atomes de carbone se cristallisent en formant le graphite et dans le cas contraire lorsque le refroidissement est rapide on a la formation de la cémentite (Fe₃C) qui ne peut se décomposer à la température ambiante, mais à un maintien de température supérieure à 500°C et d'une durée très longue, la cémentite peut se décomposer en graphite suivant la réaction :



La présence aussi du silicium peut favoriser la décomposition de la cémentite (formation du graphite). Donc on a l'existence de deux diagrammes d'équilibres :

- **Le diagramme d'équilibre stable Fe-graphite.**
- **Le diagramme d'équilibre métastable Fe-Fe₃C (cémentite).**

6.3. Diagramme d'équilibre Fer-cémentite

C'est le diagramme d'équilibre Fer-carbone métastable. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (6,67%). La cémentite correspond à 6,67% de carbone. La figure 80 représente à la fois les deux diagrammes, celui représenté par des traits en pointillés correspond au diagramme stable **fer-graphite** et l'autre en trait continu au diagramme métastable **fer-cémentite**.

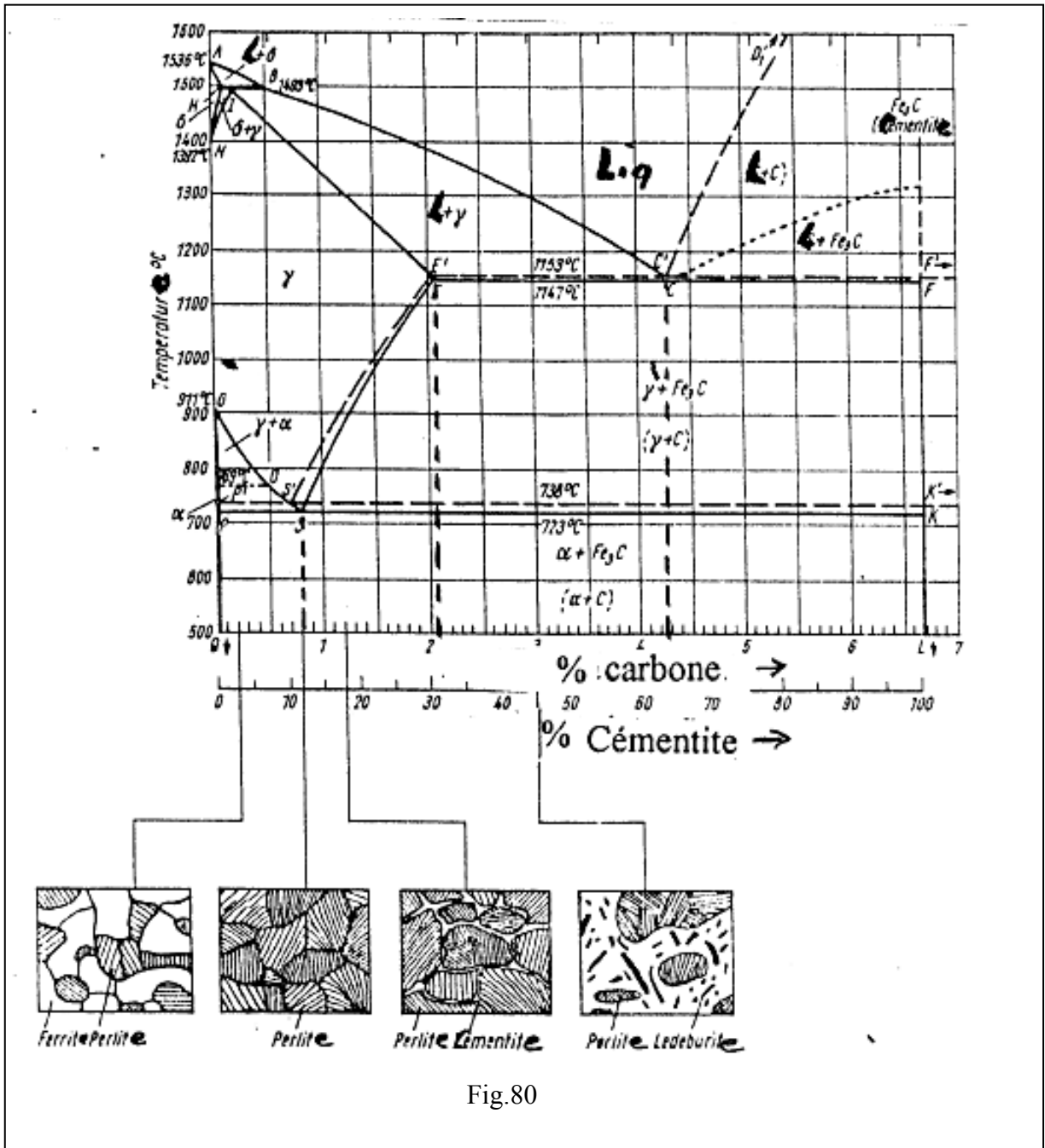


Fig.80

Pour des températures élevées la cémentite se décompose en fer et carbone et c'est la cause qui ne laisse pas connaître la température de fusion de la cémentite, on considère sa température de fusion $T_f \approx 1392^\circ\text{C}$, peut être elle est plus élevée. Sur la figure 80 le fer pur représente la partie limite gauche et la cémentite la partie limite droite. La cémentite contient 6,67% de carbone.

Les alliages de fer et de carbone contenant plus de 6,67% de carbone n'ont aucun intérêt dans l'industrie, à part les ferro-manganèse qui contiennent de 6 à 8% de carbone.

Le diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C métastable possède une structure analogue à celle du système eutectique plomb-antimoine, les complications qui existent dans le fer sont les différentes modifications allotropiques du fer et les différentes capacités de dissolution du carbone.

Les aciers en général et aciers de moulage se solidifient selon le système métastable, tandis que la solidification des fontes de moulage s'effectue le plus souvent suivant la forme stable et métastable suite à la haute teneur en carbone et au refroidissement lent.

6.3.1. Les points caractéristiques du diagramme

A : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).

D : correspond à la température de fusion de la cémentite (1392°C)

B: 0,51% C dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite δ et l'austénite à la température péritectique 1493°C .

H : 0,10% C teneur limite du carbone dans la ferrite δ à 1493°C .

I : 0,16% C dans l'austénite à la température péritectique 1499°C .

N (1392°C) et **G** (910°C) : marquent la transformation polymorphe ferrite $\delta \rightleftharpoons$ austénite (γ)

E: 2,1% C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF 1147°C).

S : 0,8% C dans l'austénite à la température eutectoïde 727°C .

P : 0,02% C teneur limite dans la ferrite à la température eutectoïde 727°C

C : 4,3% C transformation eutectique à la température 1147°C .

Les liquides du diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C qui déterminent le processus de cristallisation ont la notation et le sens physique suivant :

AB : Liquidus qui matérialise la température de début de cristallisation de la ferrite δ à partir de l'alliage liquide.

NH et **NI**: Limite supérieure et inférieure de la coexistence des deux phases ferrite δ et austénite γ

BC : Liquidus qui marque le début de cristallisation de l'austénite A à partir de l'alliage liquide.

CD : Liquidus correspondant au début de cristallisation de la cémentite primaire (C_{ml}) à partir de l'alliage liquide.

Donc **ABCD** représente la ligne liquidus pour tout le diagramme, au dessus de **ABCD** tous les alliages sont à l'état liquide.

AH : Ligne de solidus traduisant les températures délimitants le domaine de l'alliage liquide et les cristaux Fe δ. Au dessous de AH existent uniquement les cristaux de ferrite δ.

HIB : Ligne de transformation péritectique (T = 1499°C = este). A la température inférieure à 1499°C, on a l'amorce de la réaction péritectique (interaction du liquide de composition B avec les cristaux de ferrite S de composition H dégage de l'austénite de composition I.



ECF : Cette ligne correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé Lédéburite (L_b).

Donc **AHIECF** représente la ligne de solidus, au dessous de cette ligne tous les alliages se trouvent à l'état cristallin (solide).

Entre les lignes de solidus et de liquidus tous les alliages se trouvent à l'état pâteux avec des composantes hétérogènes du liquide et de cristaux (ferrite, austénite, cémentite) ayant des compositions différentes et dans des portions variables.

Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06% C s'appellent **ACIERS** et dont la teneur en carbone est inférieure à 2,06% C s'appellent **FONTES**. Cette délimitation coïncide avec la solubilité

limite du carbone dans l'austénite. L'austénite possède une structure très plastique ce qui rend les aciers malléables, les fontes possèdent de bonnes propriétés de fonderie, un point de fusion plus bas et des retraits plus petits dus à la présence dans la structure du composant eutectique lédéburite.

Les points de transformations des aciers jouent un rôle prédominant dans la détermination des températures des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit et cémentation). Ces points sont notés par A_0 , A_1 , A_2 , A_3 et A_{cm} lors du chauffage ou du refroidissement sont notés respectivement par A_{c0} , A_{c1} , A_{c2} , A_{c3} , A_{ccm} et A_{r0} , A_{r1} , A_{r2} , A_{r3} , A_{rcm} .

A_0 : ($T = 210^\circ\text{C}$) correspond à la transformation lors du chauffage de la cémentite ferromagnétique en cémentite non magnétique.

A_1 : ($T = 727^\circ\text{C}$) correspond à la transformation réversible perlite \rightleftharpoons austénite.

A_2 : point de curie ($T = 769^\circ\text{C}$), au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques, cette température est marquée par ligne MO.

A_3 : correspond aux températures associées à la ligne SE (C_m : symbole abrégé de la cémentite).

Donc les lignes GOS et SE représentent le lieu des points A_3 et A_{cm} définissant des températures variables.

Les points caractéristiques du diagramme Fer-carbone stable et métastable

Point	Température °C	% carbone
A	1539	0
B	1499	0,51
C	1147	4,30
D	1392	6,67
E	1147	2,06
F	1147	6,67
G	910	0
H	1499	0,10
I	1499	0,16
K	723	6,67
M	760	0
N	1392	0
P	727	0,02
Q	20	0,006
C'	1147	4,30
E'	1153	2,03
S'	727	0,69

A partir du diagramme Fer-cémentite on peut définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone

Désignation	% C
Acier hypoeutectique	0,02 ÷ 0,8
Acier eutectoides	0,8
Aciers hypereutectiques	0,8 ÷ 2,06
Fontes hypoeutectiques	2,06 ÷ 4,3
Fontes eutectiques	4,3
Fontes hypereutectiques	4,3 ÷ 6,67

6.3.2. Définition des constituants micrographiques

a) Le carbone

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable du diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite (Fe₃C).

b) La ferrite (F)

C'est une solution solide de carbone dans le fer α c'est à dire la ferrite est constituée par du fer α renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone $< 0,02\%$) ainsi que d'autres inclusions. On distingue la ferrite α à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à $0,02\%$ et la ferrite δ à haute température à solubilité limite en carbone allant jusqu'à $0,1\%$. La ferrite est peu tendue et très ductile ($HV = 90$, $R_m = 300\text{N/mm}^2$, $K = 300\text{j/cm}^2$). Elle est magnétique à la température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect de *grains* homogène polyédrique. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C .

c) L'austénite (A)

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer γ . La solubilité limite du carbone dans le fer γ est de $2,14\%$. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable ($HB = 300$). La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est antiferromagnétique.

d) La cémentite (C)

La cémentite ou carbone de fer (Fe_3C) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre $6,67\%$. Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure ($HB = 700$) mais fragile.

La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

- Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- Grains dans les aciers ayant subi un traitement thermique de recuit.
- Et de précipités intergranulaires dans les aciers ayant un $\% \text{C} > 0,8$.

Au point de vue du diagramme Fe- Fe_3C et lors du refroidissement, la cémentite peut exister en trois différentes formes de liaison mais avec la même composition chimique.

Désignation	Obtention par
Cémentite primaire	Cristallisation primaire du métal liquide Suivant la ligne CD
Cémentite secondaire	Ségrégation à partir de l'austenite suivant La ligne ES
Cémentite tertiaire	Ségrégation à partir de la ferrite suivant La ligne PQ

e) La perlite (P)

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88% de ferrite + 12% de cémentite) elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8% de carbone. Elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85%. La perlite est dure (HV= 200) et assez ductile $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$, $A = 10^{40}$.

f) Troostite (T)

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes (huile). Les nodules de troostite qui se développent à partir des joints de grains sont constitués par des lamelles ferrite-cémentite non séparables en microscopie optique. Cette microstructure est caractérisée d'une trempe douce. Les caractéristiques mécaniques de la troostite sont assez importantes (HV \approx 450).

g) Bainite (B)

Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées. On distingue des bainites supérieures qui peuvent être considérées comme étant des plaquettes de ferrite contenant des carbures orientés parallèlement à l'axe de la plaquette, et des bainites inférieures

qui s'assimilent à des plaquettes de ferrite contenant une fine précipitation de carbures dispersés dans la plaquette de ferrite. Ces carbures ne sont discernables qu'en microscopie électronique. Les caractéristiques mécaniques associées à une texture bainitique approchent celles d'une structure martensitique.

h) Sorbite (S)

Ce constituant n'est plus un produit de décomposition directe de l'austénite puisqu'il correspond, en fait, à un stade de décomposition de la martensite (pour des températures supérieures à environ 400°C). C'est un mélange complexe de carbure finement réparti dans une matrice ferritique distordue. Elle conduit à des propriétés mécaniques intéressantes par exemple la dureté reste encore élevée $HV \approx (300 \text{ à } 400)$ pour une bonne résilience.

i) Martensite α' (M)

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température d'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite. La martensite possède une grande dureté ($HV = 700 - 900$), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés.

Toutes ces microtextures ou microstructures sont toutes des produits de décomposition de l'austénite. Elles sont composées d'un mélange de ferrite α , de carbure (cémentite ou carbure plus ou moins complexes). La morphologie des deux phases en présence dépend essentiellement de la vitesse de refroidissement.

i) LedeburiteI (LI)

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide avec 4,3% de carbone à la température eutectique. Le ledeburite I contient 51,4% d'austénite et 48,6% de cémentite et peut contenir de 2,06 - 6,67% de carbone. Son domaine de stabilité est 723°C - 1147°C.

k) LedeburiteII (LII)

Le ledeburite II provient durant le refroidissement du ledeburite I par décomposition eutectoidale du composant contenant 51,4% d'austénite en perlite à la température 723°C. Le ledeburite II contient 51,4% de perlite et 48,6% de cémentite. Durant la solidification des alliages de fer et de carbone il y a lieu trois types de transformations isothermiques, il s'agit des réactions péritectiques, eutectiques et eutectoides.

Remarque :

Les traitements et les textures que nous venons de passer en revue ne sont pas uniquement applicables à des aciers faiblement alliés, ils sont directement transposables à tous les alliages métalliques possédant un diagramme similaire (exemple Fe - Cu, Ti-Cu, certains laitons, certains bronzes d'aluminium, etc.). Toutefois, les caractéristiques mécaniques peuvent être différentes d'un alliage à l'autre.

Dans le tableau suivant, nous avons rapporté à titre de comparaison, la dureté des différents constituants des aciers.

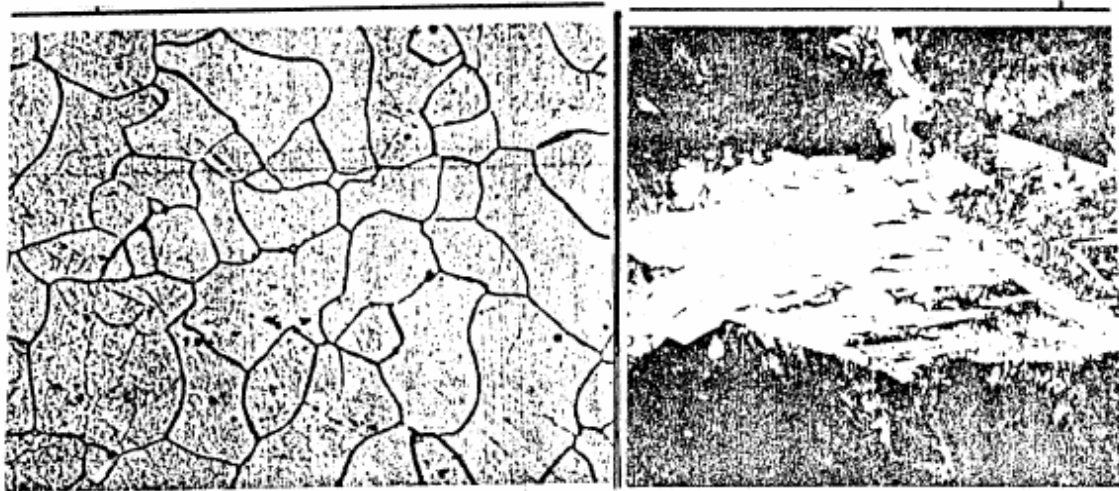
Dureté des différents constituants des aciers

Constituant pur	HB	HV	HR _C	R _m Kg/mm ²
Ferrite non alliée	≈ 45			≈ 24
Ferrite écrouie	50 + 80			
Perlite lamellaire	200 ÷ 250	215 + 265	≈ 20	≈ 75
Perlite grenue	160 + 170	≈ 175		≈ 60
Austénite	230 ÷ 280	235 + 285	20 ÷ 25	≈ 85
Sorbite	250 + 300	260 + 310	25 ÷ 30	≈ 90
Troostite	400 + 450	425 + 480	45 ÷ 50	≈ 150
Martensite	650 + 750	750 + 900	60 + 65	≈ 250
Cémentite	600 ÷ 650			≈ 225
Lédéburite	360 ÷ 375			≈ 130

Ferrite alliée : dureté après avoir ajouté successivement 1% en poids des éléments suivants							
Élément	Cr	Mo	Cu	Ni (V)	W	Mn	Ti
Dureté HV	74	80+85	80+88	80+94	80+98	≈ 90	≈ 105

Constituants micrographiques

Des aciers et fontes

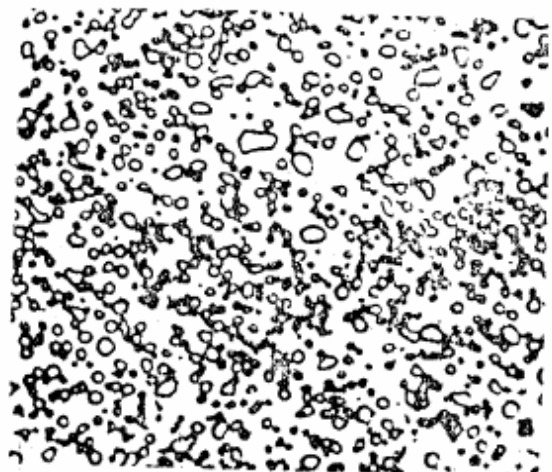


FERRITE (Gr.:150) (attaque acide picrique)

CÉMENTITE



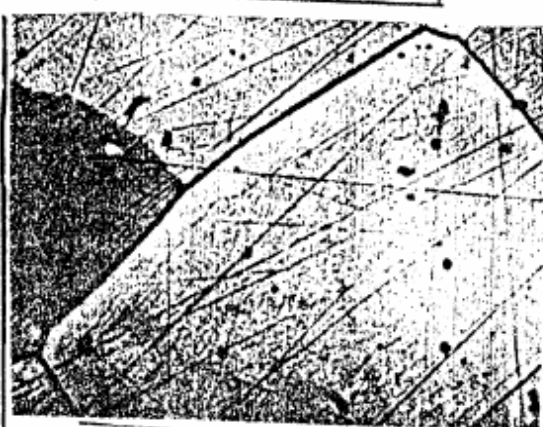
PERLITE LAMELLAIRE (Gr.:600)



PERLITE GLOBULAIRE (Gr.:900)



MARTENSITE (Gr.:600)



AUSTÉNITE (Gr.:600)

Fig.81

6.3.3. Les transformations de phases

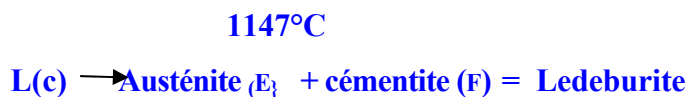
a) Transformation péritectique

Durant le refroidissement des alliages titrant de 0,1 à 0,51% de carbone se précipite la ferrite δ (F δ) suivant la ligne AB. A la température de 1493°C il y a interaction péritectique des cristaux δ (0,1% C) avec le reste du liquide de composition B (0,51% C) (LB) en formant l'austénite de composition I (0,16% C) selon la réaction péritectique :



b) Transformation eutectique

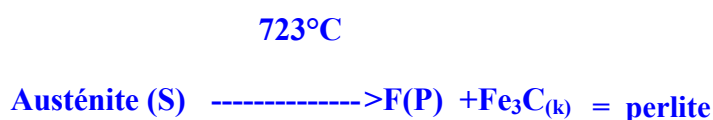
Les alliages liquides titrant de 2,06 à 6,67% C se solidifient suivant la ligne BC en donnant de l'austénite primaire suivant la ligne CD en donnant la cémentite primaire. A la température eutectique de 1147°C se décompose le liquide eutectique restant (4,3% C) en austénite (2,06% C) et cémentite (6,67% C) selon la réaction eutectique :



Le mélange formé d'austénite (E) et de cémentite (F) est appelé ledeburite selon le nom du métallurgiste allemand LEDEBUR.

c) Transformation eutectoïde

A la température eutectoïde de 723°C se décompose l'austénite eutectoïde titrant 0,8% C en formant la ferrite avec 0,02% C (Fp) et la cémentite secondaire avec 6,67% C ($\text{Fe}_3\text{C}_{(k)}$) suivant la réaction eutectoïde :



Le mélange constitué de ferrite F_p et de cémentite $Fe_3C_{(k)}$ s'appelle perlite.

La partie qui sera consacrée à l'étude de la solidification et transformation des différents alliages de fer et de carbone (fontes et aciers) pouvant exister selon le diagramme Fe- Fe_3C tels que (fig. 83)

- Aciers hypoeutectoides
- Aciers eutectoides
- Aciers hypereutectoides
- Fontes hypoeutectiques
- Fontes eutectoides
- Fontes hypereutectiques

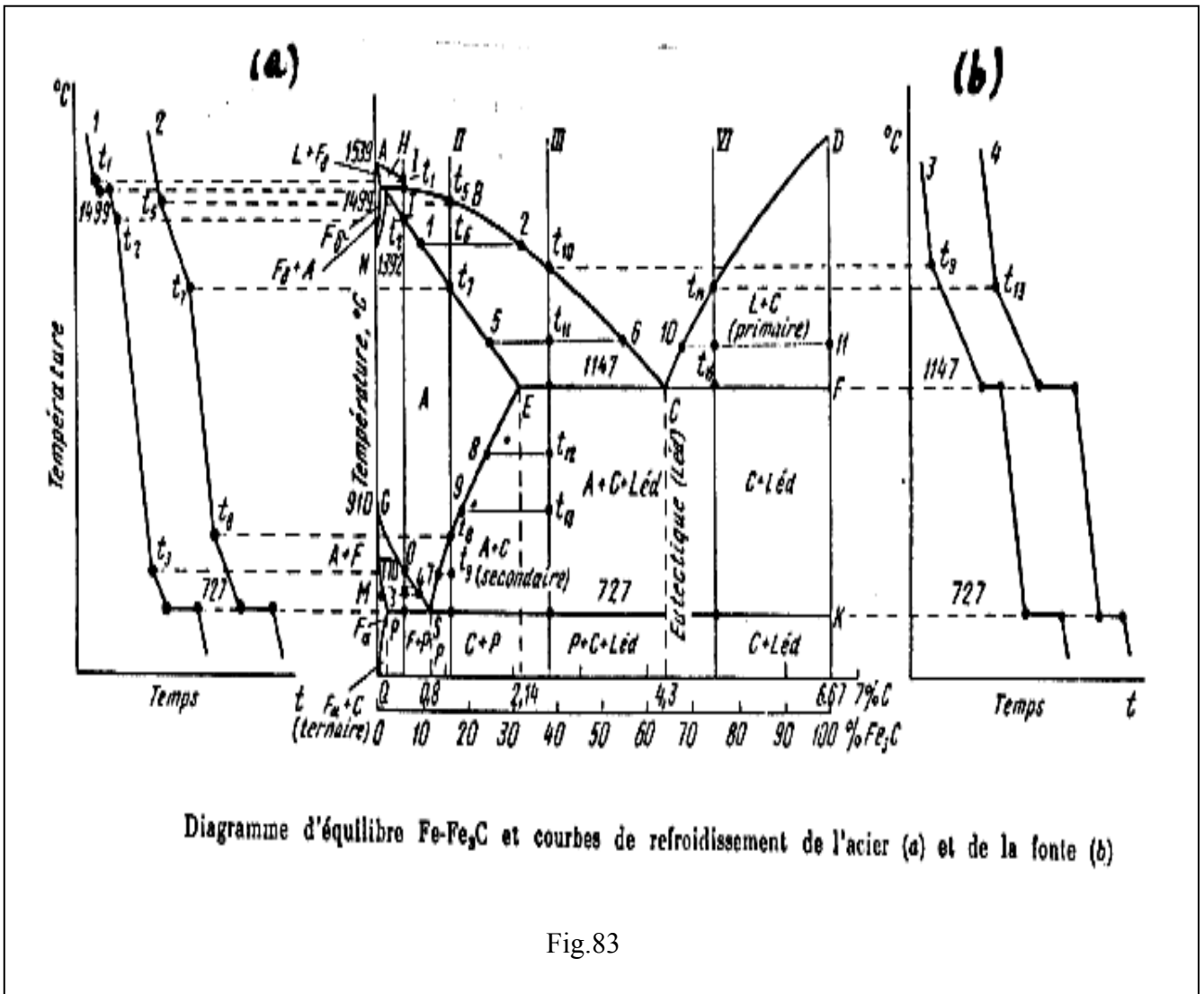


Fig.83

a) Aciers hypoeutectiques

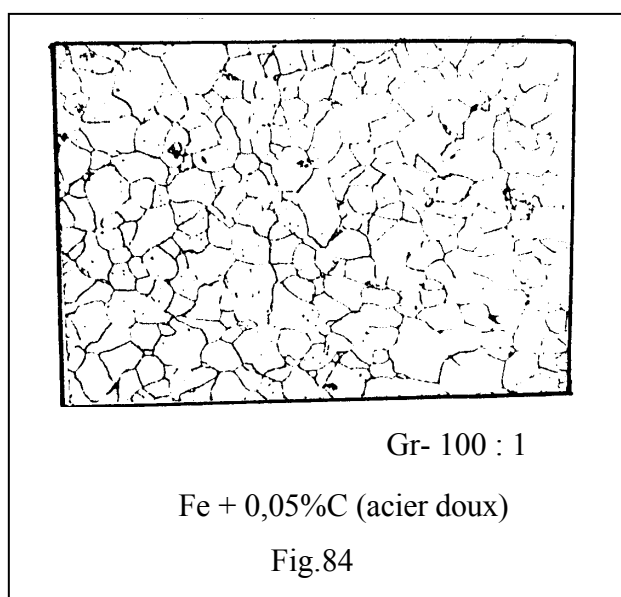
Aciers à 0,05% C

Lorsque la ligne liquidus AB est atteinte il y a précipitation des cristaux primaires Fe δ dans l'alliage liquide. Après dépassement de la ligne solidus AH (T = 1510°C) la totalité de l'alliage est solidifié et se compose de la ferrite Fe δ . A la température 1440°C (ligne NH) commence la transformation de la ferrite Fe δ en austénite (γ) pauvre en carbone et selon la réaction :



La réaction se termine à la température de 1420°C où l'acier se compose uniquement des cristaux d'austénite (γ). Lorsque la ligne GOS est atteinte (T = 900°C) il y a précipitation de la ferrite α à partir de l'austénite et le reste de l'austénite s'enrichit en carbone. A la température T = 723°C les cristaux d'austénite contenant 0.80% de carbone se décomposent en donnant la perlite suivant la réaction eutectoïde, mais en faible quantité. A la température T = 769°C la ferrite Fe α précipitée passe de l'état paramagnétique à l'état ferromagnétique, si on poursuit le refroidissement au dessous de 723°C, la solubilité du carbone dans Fe α diminue. Le carbone précipité se dépose sous forme de cémentite (cémentite tertiaire) dans les joints de grains de la ferrite Fe α . La figure 84 nous montre la structure de l'acier à 0,05% C et à la température ambiante (agrandissement 100 X).

A coté des cristaux de ferrite clairs on peut distinguer les taches sombres dans les joints de grains de Fe α , représentant la perlite et à l'intérieur des grains de Fe α les taches sombres représentant la scorie restant dans l'acier.

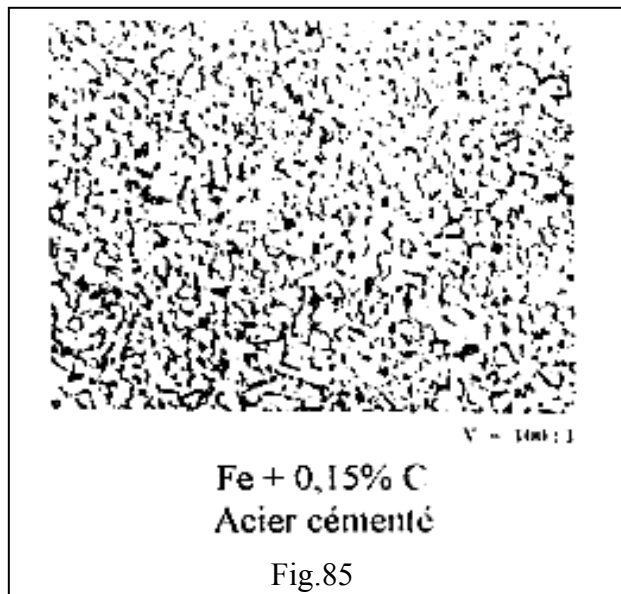


Acier à 0,15% C

A la température de 1525°C se précipitent les cristaux de ferrite δ à partir de l'alliage liquide et à la température de 1493°C, il y a transformation péritectique d'une partie de la ferrite $Fe\delta$ en austénite. Avec l'abaissement de la température tout le reste de la ferrite $Fe\delta$ se transforme en austénite.

A la température $T = 1475^\circ C$ et lorsque la ligne IN est atteinte l'acier se compose uniquement de l'austénite à 0,15% C.

A $T = 860^\circ C$ et lorsque la ligne GOS est atteinte il y a précipitation de la ferrite α pauvre en carbone à partir de l'austénite, le reste de l'austénite s'enrichit en carbone avec la diminution de la température où le % C est de 0,8% à $T = 723^\circ C$, à cette température il y a lieu la transformation eutectoïde par décomposition de l'austénite en perlite. La structure de l'acier à 0,15% C (fig.85) est constituée de ferrite (clair) et de perlite (parties sombres).

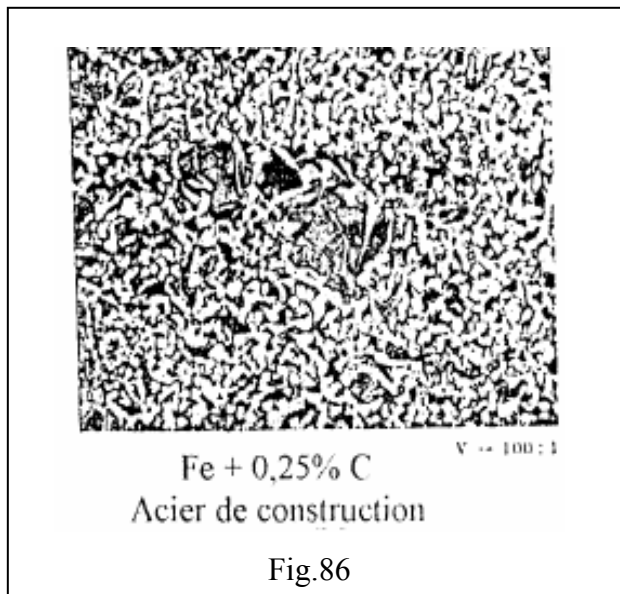


Acier à 0,25% C

A la température $T=1520^{\circ}\text{C}$ se précipitent les cristaux primaires de ferrite δ et rapidement à la température péritectique $T=1493^{\circ}\text{C}$ il y a transformation de la ferrite δ en austénite.

Avec la diminution de la température le reste du liquide se solidifie suivant la ligne IE du solidus en formant de l'austénite.

A $T = 1475^{\circ}\text{C}$ tout le liquide est solidifié et se compose uniquement de l'austénite à 0,25% C. La précipitation de la ferrite α pauvre en carbone commence lorsque la température aura atteint la ligne GOS (une cristallisation secondaire), l'austénite s'enrichit en carbone jusqu'à 0,8% C, point eutectoïde ou $T = 723^{\circ}\text{C}$ l'austénite à 0,8% C se décompose en perlite. La structure de ce type d'acier se compose de la perlite et de la ferrite.

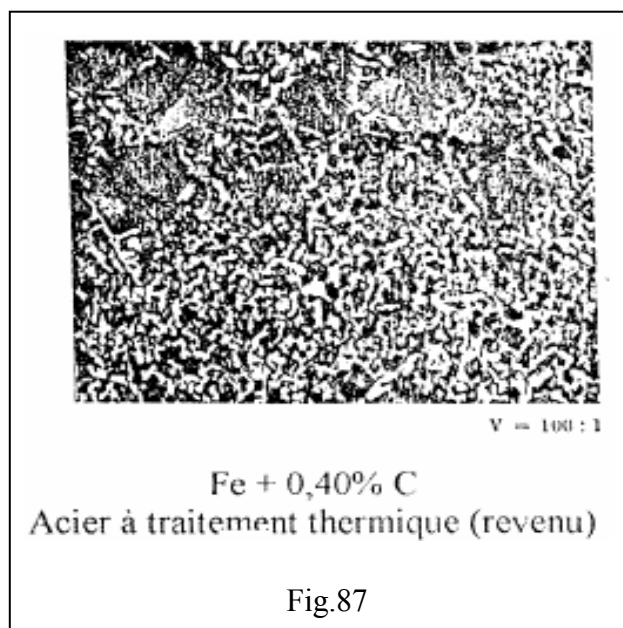


Acier à 0,40% C

Lors de la solidification et avec l'abaissement de la température se précipitent les cristaux de ferrite δ ensuite l'austénite (transformation péritectique). La cristallisation se termine à $T = 1450^{\circ}\text{C}$, ligne IE ou l'alliage se compose uniquement de l'austénite.

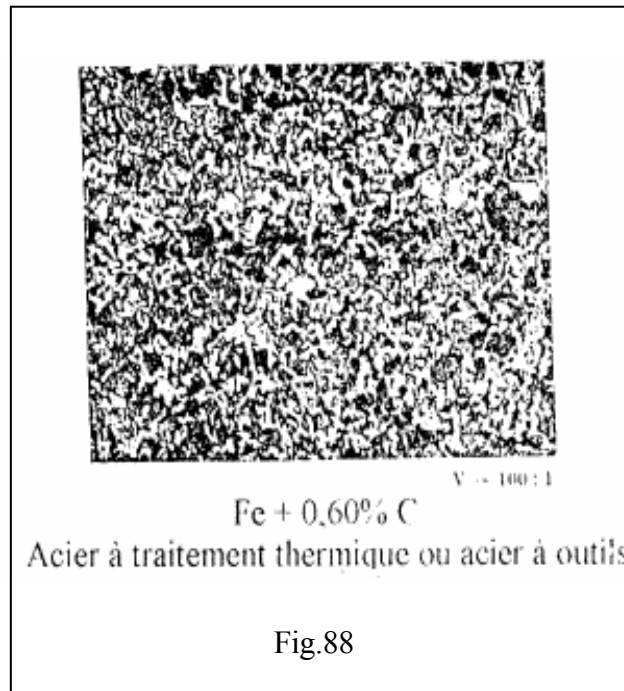
Une cristallisation secondaire débute à la ligne GOS avec précipitation de la ferrite α et se termine par la décomposition eutectoïde de l'austénite 0,8% C en perlite à $T = 723^{\circ}\text{C}$,

La structure de cet acier est représentée par la figure 87 où on distingue bien les deux composants ferrite et perlite.



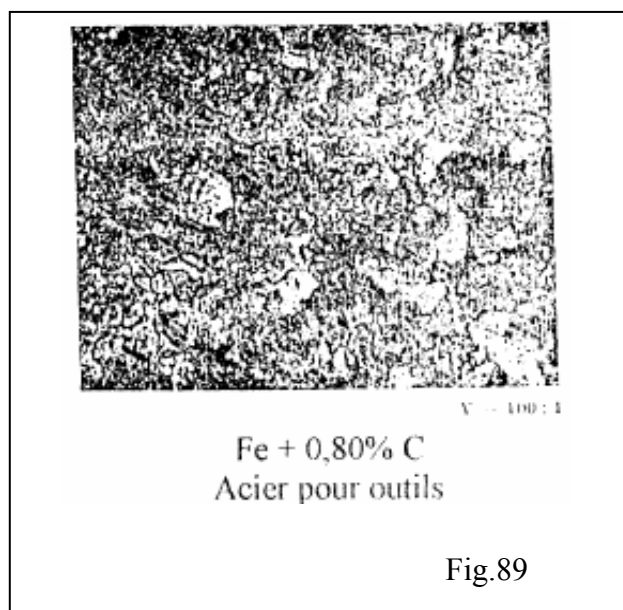
Acier à 0,60% C

Entre 1490°C et 1410°C se précipite l'austénite primaire. La cristallisation secondaire se déroule de la même façon que celle de l'acier à 0,40% C, seulement la portion de la perlite augmente par rapport à celle de la ferrite. La structure métallographique de ce type d'acier se compose de la ferrite et de la perlite fig.88.



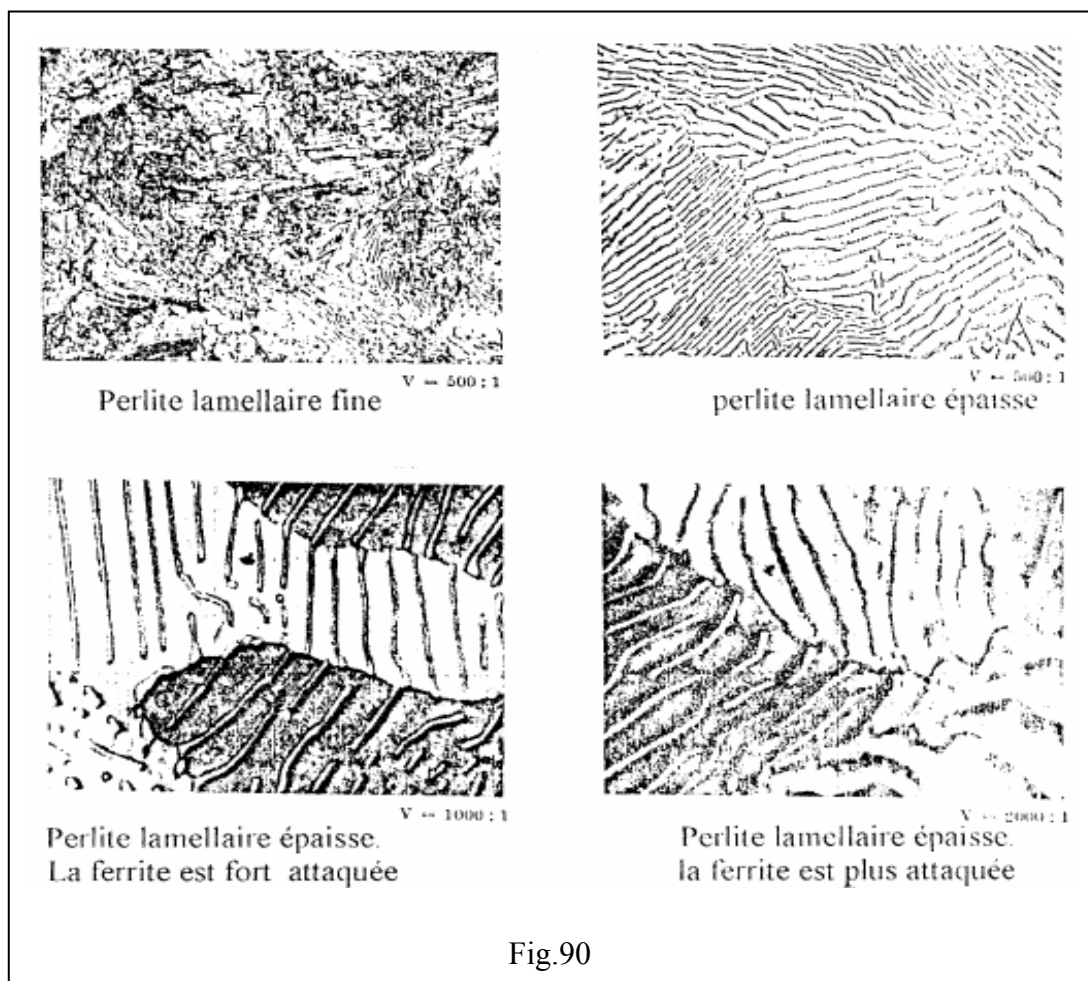
Acier à 0,80% C (acier eutectoïde)

La cristallisation primaire de cet acier s'effectue comme celle de l'acier à 0.60% C et la cristallisation secondaire s'effectue sans transformation de la ferrite, à partir de l'austénite, il y a transformation eutectoïde directe de l'austénite en perlite. Les points A3 et A1 se coïncident et la courbe de refroidissement ne porte pas de point de flexion Ar₃ ou de palier Ar1. La figure 89 nous montre la structure métallographique (perlite pure) de l'acier eutectoïde.



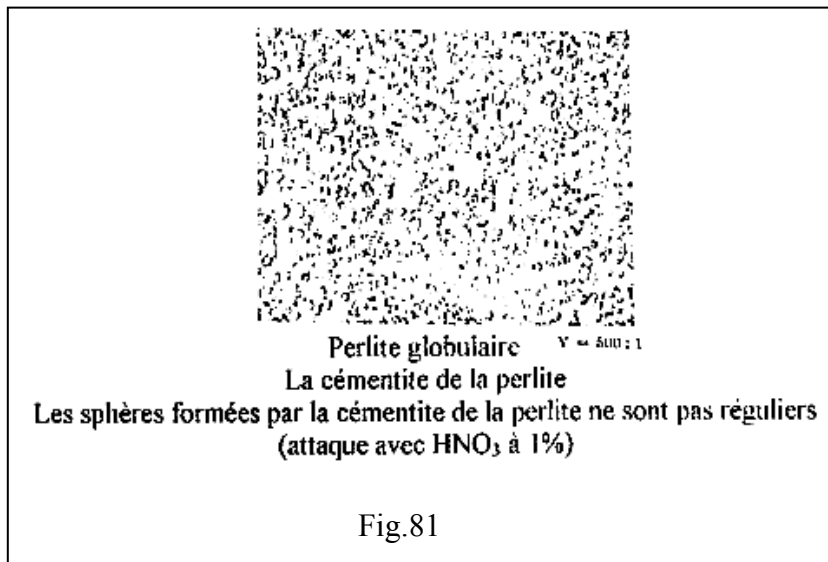
Selon le diagramme Fer-carbone, l'alliage eutectoïde se décompose en deux constituants à savoir la ferrite et la cémentite. A la température $T = 723^{\circ}\text{C}$ et avec un refroidissement lent se forme de la perlite lamellaire à cause de la présence d'une grande quantité de ferrite (88%) et d'une faible Quantité de cémentite (12%) dans l'alliage.

La figure 90 nous montre la structure fine et épaisse de l'eutectoïde perlite obtenue par les différents grossissements.

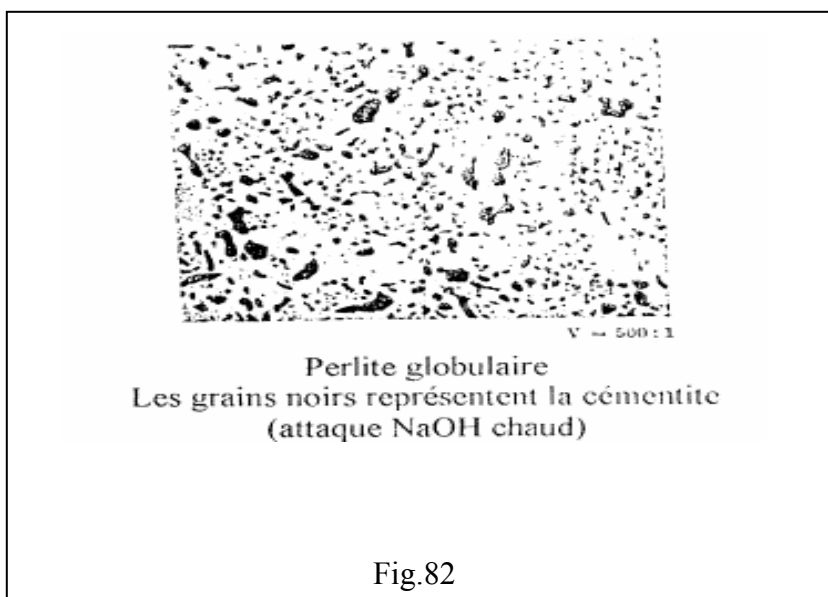


On peut modifier la forme de la cémentite lamellaire soit par l'intermédiaire d'un refroidissement extra long dans le domaine de l'austénite. ou par trempe de plusieurs heures de la perlite lamellaire à la température $T = 700^{\circ}\text{C}$. Sous l'influence de la tension superficielle les particules lamellaires de la cémentite se divisent en petites particules ayant la forme globulaire

La figure 81 nous montre la structure d'un acier à 0,90% C, lequel a été trempé durant 10 heures à $T = 700^{\circ}\text{C}$, on peut constater la transformation de la cémentite lamellaire en cémentite globulaire ce qui donne une perlite globulaire.



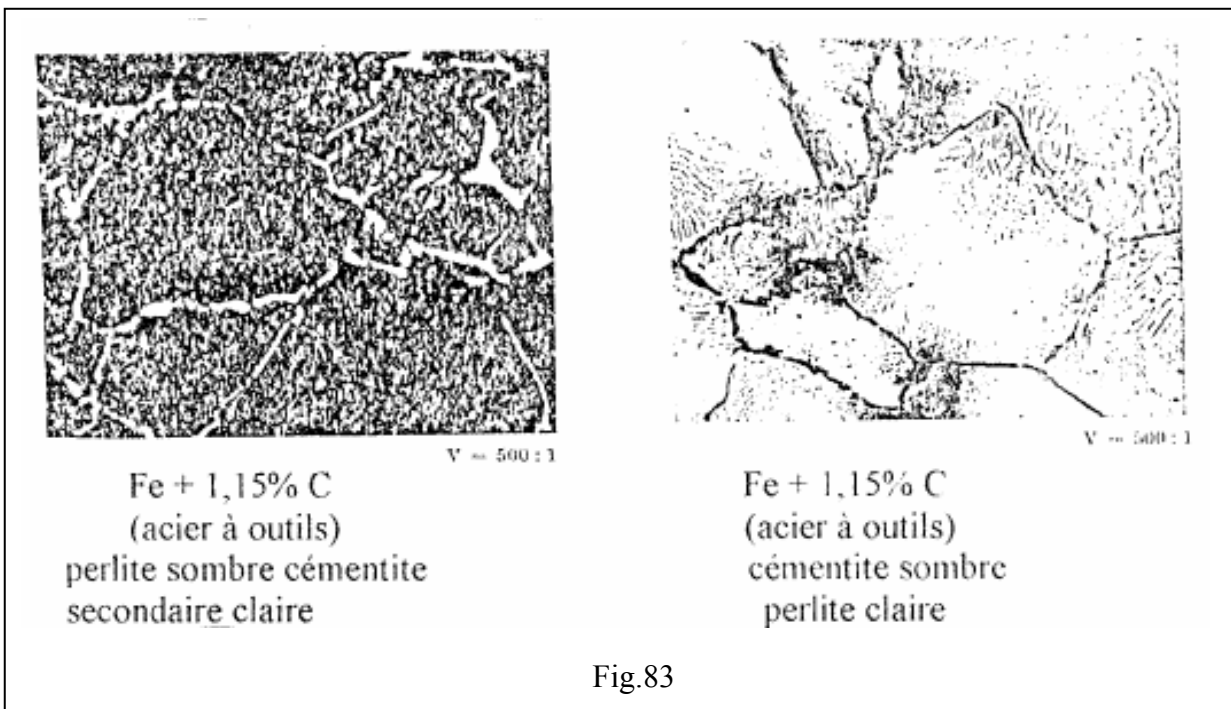
Et enfin la figure 82 nous montre la structure du même acier avec une perlite globulaire, où la cémentite est sombre et la ferrite claire. Le procédé utilisé pour l'obtention de la perlite globulaire est appelé trempe d'adoucissement, car la perlite globulaire possède une dureté faible par rapport à la perlite lamellaire.



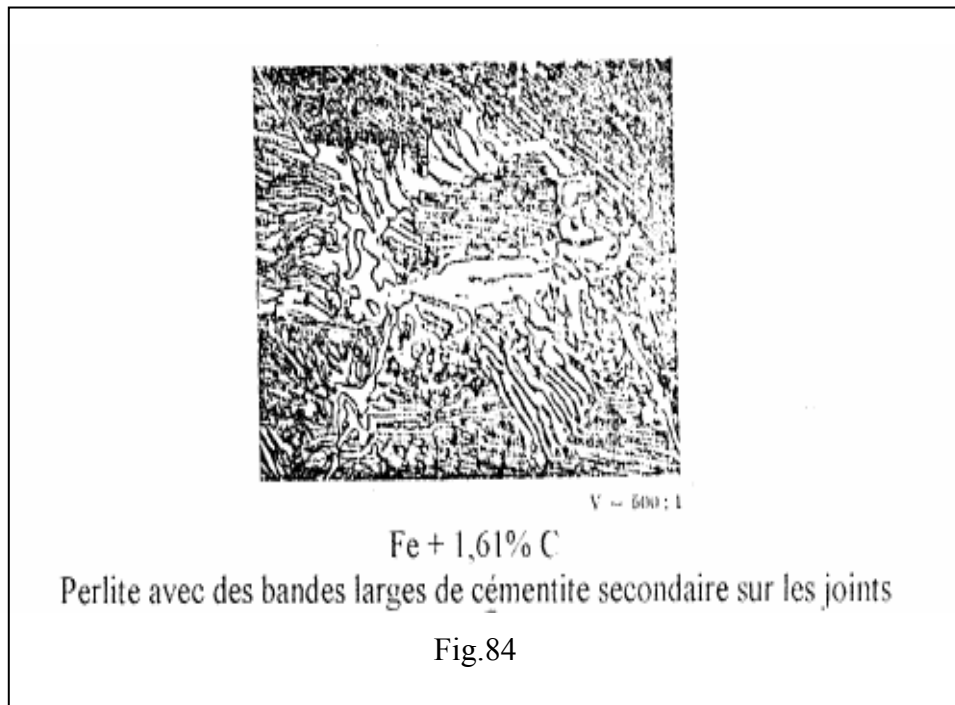
C) Aciers hypereutectoïdes

Aciers à 1.15% C

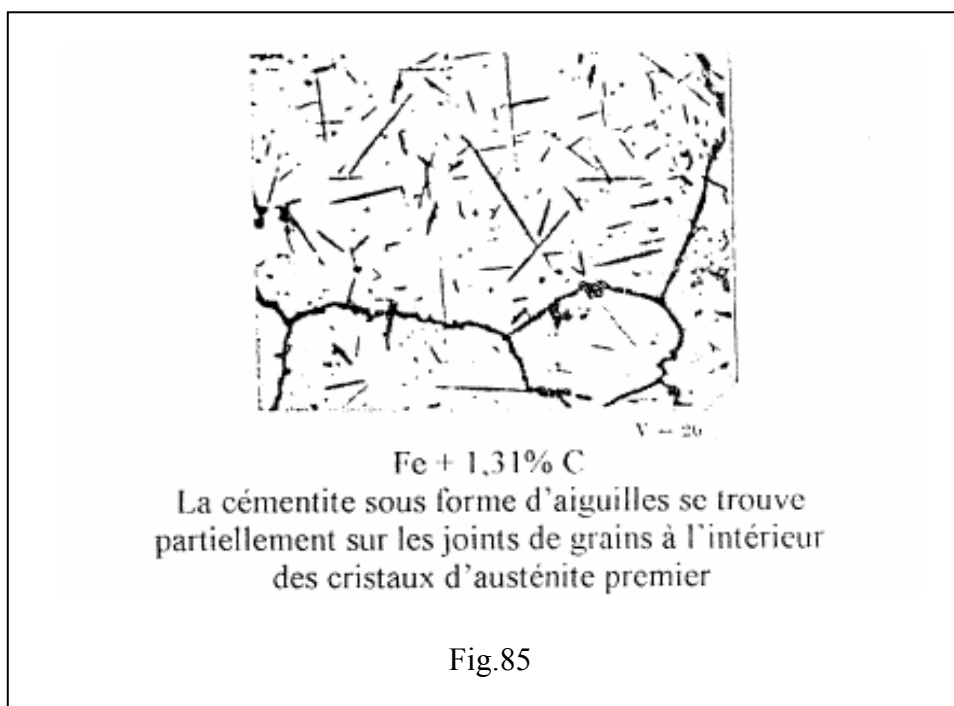
L'alliage liquide se solidifie par la précipitation de l'austénite, à la fin de la solidification et dans le domaine de température entre 850°C et 1320°C, l'acier se compose uniquement de l'austénite. Avec la diminution de la température et lorsque la solubilité de l'austénite par le carbone ligne SE est atteinte, le carbone en excès se précipite sous forme de cémentite secondaire dans les joints de grains de l'austénite. Plus la température diminue, plus la quantité de cémentite secondaire cristallisée est importante, ce qui rend les couches de la cémentite plus épaisses, mais à la température $T = 723^{\circ}\text{C}$ l'austénite contenant 0,80% C se décompose en perlite. La figure 83 montre la structure d'un acier hypereutectique à 1,15% C, elle est obtenue par l'attaque à l'acide nitrique à 1% qui donne une couleur sombre jusqu'à noire de la perlite, la cémentite n'est pas attaquée reste claire. Par contre l'autre figure, elle est obtenue par l'attaque à l'aide d'une base (solution de sodium) où la cémentite est sombre et la perlite est claire.



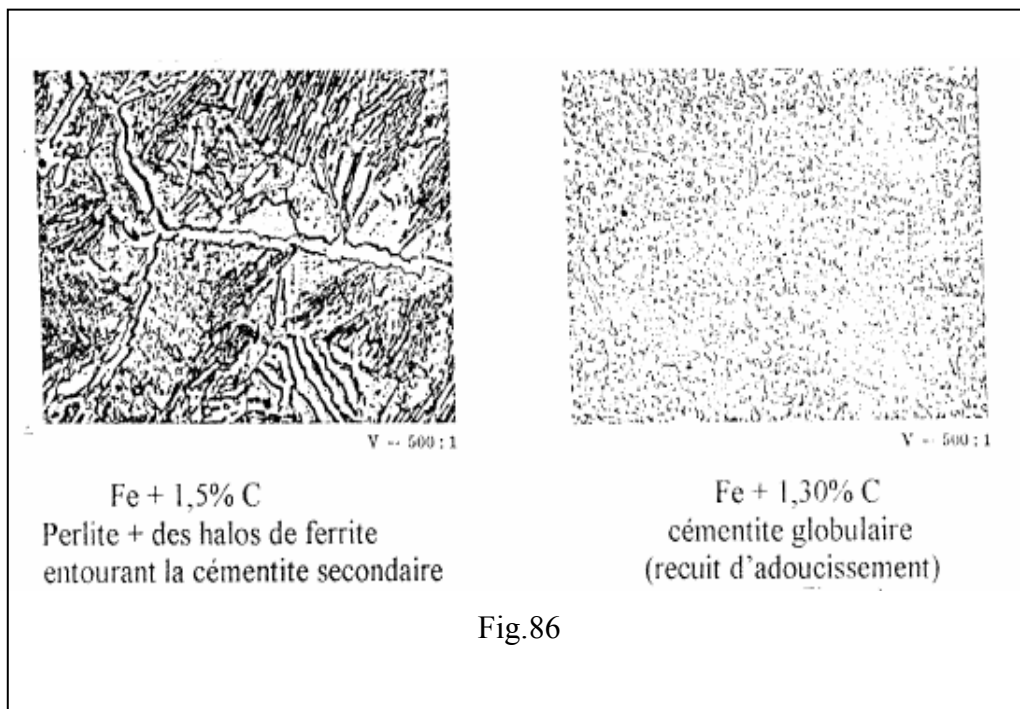
Plus la teneur en carbone dans l'acier est élevée, plus les couches de la cémentite deviennent épaisses. La figure 84 nous montre la structure d'un acier avec 1,61% C.



La perlite de la cémentite secondaire dans les joints des grains de l'austénite s'effectue seulement lorsque le refroidissement est lent, dans le cas contraire le carbone n'aura pas suffisamment de temps pour sortir de l'intérieur de l'austénite et précipiter dans les joints des grains de l'austénite, donc le résultat c'est que la cémentite secondaire se précipite partiellement ou totalement à l'intérieur de l'austénite sous formes d'aiguilles comme nous le montre la figure 85



Une telle structure n'est pas souhaitée à cause de sa fragilité. Si on veut obtenir un acier avec une structure globulaire fine et homogène, l'acier doit subir en premier un refroidissement relativement rapide au dessus de la ligne SE, ce qui donne un état perlitique fin, ensuite un traitement d'adoucissement. La figure 86 représente la structure des aciers avec 1,5% C et 1,30% C.



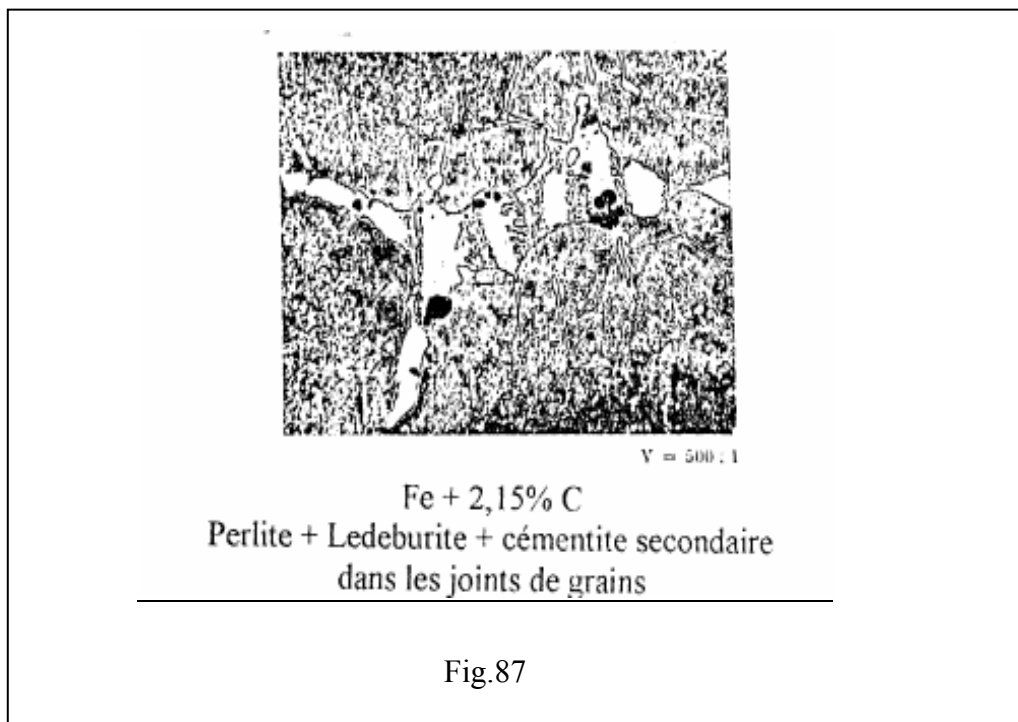
Si la teneur du carbone augmente jusqu'à 2%, il y a précipitation d'un nouveau composant structurel l'eutecticum **LEDEBURITE**. Dans ce cas les alliages ne sont plus forgeables et porte le nom de fontes blanches.

d) Fontes hypoeutectiques

Fontes à 2.15% C

A partir de l'alliage liquide et à la température de 1380°C se précipite l'austénite primaire pauvre en carbone, le reste du liquide s'enrichit en carbone. A la température $T = 1147^{\circ}\text{C}$ l'austénite contenant 2,06% C (point E) et le reste du métal contenant 4,3% C (point C) se solidifient eutectiquement en formant le **Lédéburite**.

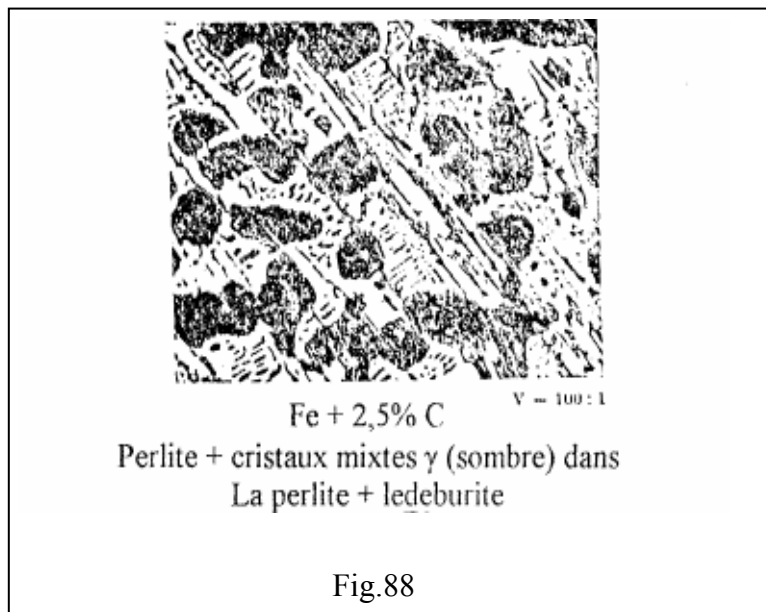
Avec l'abaissement de la température et lors du refroidissement se reproduisent des transformations dans l'alliage, à partir de l'austénite primaire se trouvant dans le Lédéburite se précipite la cémentite secondaire (CmII), jusqu'à la température $T = 723^{\circ}\text{C}$ l'austénite à 0,8% se transforme en perlite (eutectoïde). A la température ambiante la structure d'une telle fonte se compose de l'austénite primaire dissoute dans la perlite, du Lédéburite et de la cémentite secondaire dans les joints de grains (fig.87)



Fonte à 2.5% C

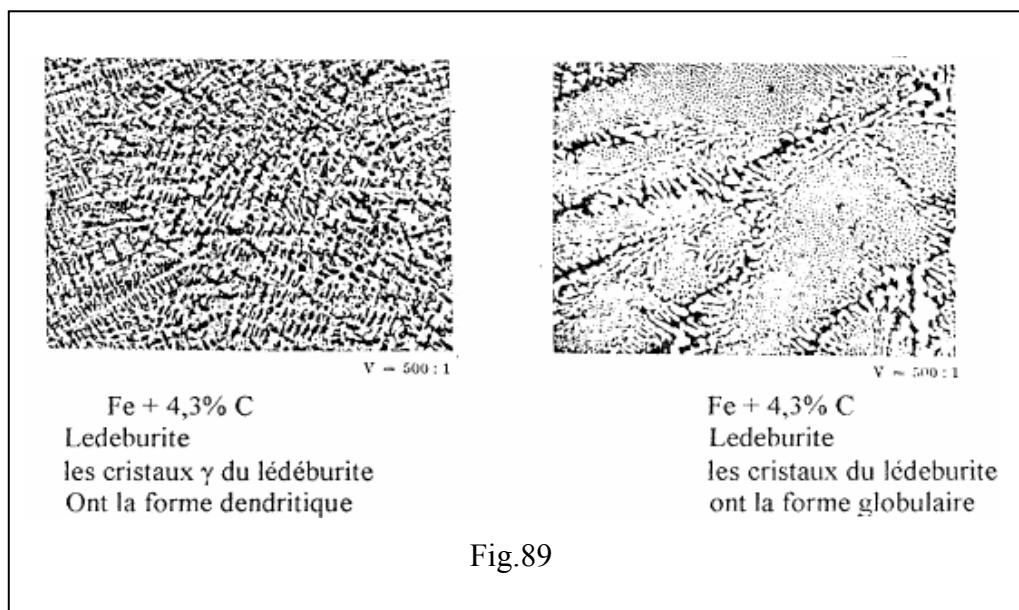
Lors du refroidissement et à partir de la température $T = 1350^{\circ}\text{C}$ se précipite l'austénite primaire suivant la ligne BC. Jusqu'à la température $T = 1147^{\circ}\text{C}$ le reste du métal liquide contient 4,3% C (point C) et se transforme eutectiquement en Lédéburite, si on poursuit le refroidissement se précipite la cémentite secondaire à partir de l'austénite et jusqu'à $T = 723^{\circ}\text{C}$ l'austénite décarburée jusqu'à 0,8% C se transforme en perlite.

A la température ambiante la structure d'une telle fonte se compose de la perlite, de l'austénite dendritique et du lédéburite (fig. 88)



e) Fonte eutectique (fonte à 4,3% C)

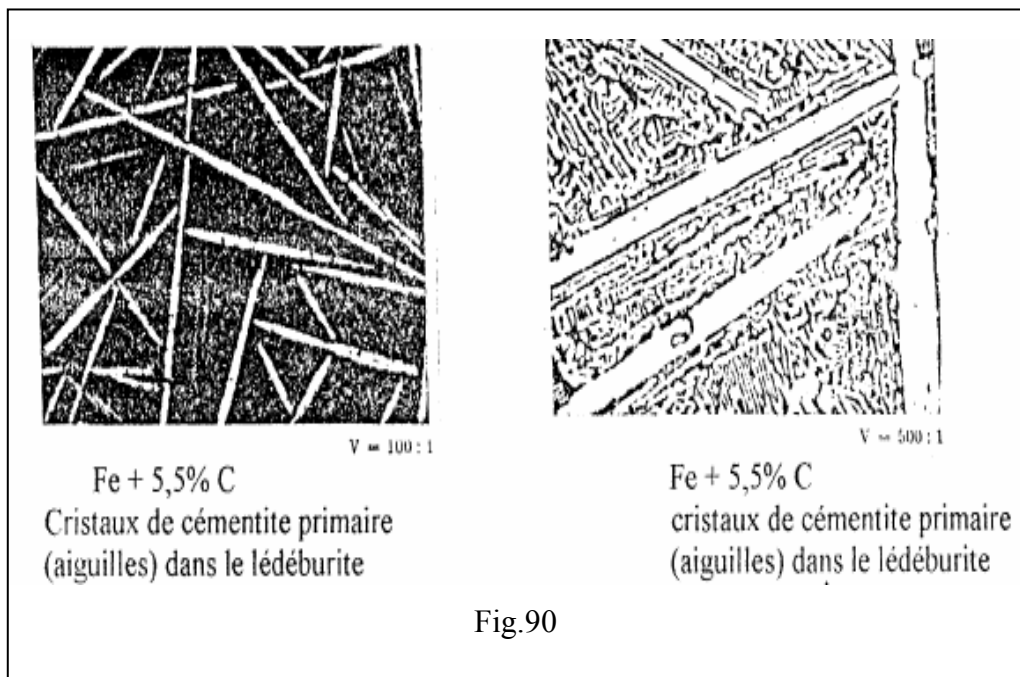
L'alliage liquide à 4,3% C se solidifie sans précipitation primaire et donne directement à $T = 1147^{\circ}\text{C}$ (point C) l'eutectique le Lédéburite. La structure caractéristique du Lédéburite est représentée par la figure89



f) Fontes hypereutectiques

Fonte à 5,5% C

Lors du refroidissement et lorsque le liquidus Cd est atteint, il y a précipitation de la cémentite primaire. Avec la diminution de la température le reste du liquide devient pauvre en carbone et contient à $T = 1147^{\circ}\text{C}$ une teneur en carbone de 4,3%, à cette température et à cette concentration il se solidifie eutectiquement en libérant du ledeburite. La structure à la température ambiante se compose de la cémentite primaire noyée dans le ledéburite est représentée par la figure 90



6.4. Détermination de la position des composants de la structure

Non seulement la quantité absolue de la ferrite et la cémentite joue un rôle important dans la détermination des propriétés de l'acier et de la fonte, mais aussi les différents constituants rentrant dans les différentes structures. Connaissant la teneur en carbone d'un alliage, on peut facilement déterminer la quantité totale de la cémentite par la règle de trois, par exemple :

$$\begin{array}{l} \text{Une fonte à } 2,5\% \text{C contient} \\ : \end{array} \quad \begin{array}{l} \underline{2,5} \\ 6,7 \end{array} \quad \begin{array}{l} \times 700\% = \\ 37,5\% \text{ de} \\ \text{cémentite} \end{array}$$

Et le reste $100\% - 37,5\% = 62,5\%$ de ferrite.

Il sera compliqué si on ne veut pas déterminer la quantité des phases, mais la quantité de chaque composant de la structure. Dans ce cas l'utilisation de la loi des leviers nous facilitera le calcul.

Selon le % du carbone ($X\% C$), la ligne PS du diagramme est divisée en deux parties PX et XS pour déterminer la portion de la ferrite et de la perlite on utilise les deux équations :

$$(1) \text{Portion de ferrite (\%)} \times PX = \text{Portion de perlite (\%)} \times SX.$$

$$(2) \text{Portion de ferrite (\%)} + \text{Portion de perlite (\%)} = 100\%.$$

Donc c'est un système d'équation à deux inconnues, par exemple pour déterminer la portion de la perlite on a :

$$\text{Portion de ferrite} = \frac{\text{portion de perlite} \times SX}{PX}$$

$$\frac{\text{perlite} \times SX}{PX} + \text{perlite} = 100\%$$

$$\text{Portion de perlite} = \frac{PX \times 100}{PX + SX}$$

$$\text{Portion de ferrite} = \frac{SX \times 100}{PX + SX} = 100 - \text{portion de perlite}.$$

A partir de la teneur de $0,8\% C$ on utilise la ligne SK pour déterminer les leviers correspondants. Si on considère dans cette ligne un alliage à $X\% C$, on peut déterminer selon les deux équations ci-dessous la quantité de la perlite et de la cémentite secondaire.

$$(3) \text{Portion de la perlite \%} + Sx = \text{portion de cémentite} \times Kx.$$

$$(4) \text{Portion de la perlite \%} + \text{portion de cémentite \%} = 100\%$$

Par exemple pour déterminer le % de cémentite secondaire on a :

$$\text{Portion de cémentite secondaire \%} = \frac{Sx \times 100}{Sx + kx}$$

$$\text{Et la portion de perlite} = \frac{kx \times 100}{Sx + kx}$$

Exemple 1

Combien de % de cémentite et de ferrite contient l'eutectoïde perlite ?

Les leviers sont :

$$a = 0,8\% - 0,0 = 0,8$$

$$b = 6,7 - 0,8 = 5,9$$

$$0,8$$

Masse de la cémentite : ----- x 100% = 12%

$$5,9 + 0,8$$

Masse de la ferrite : 100% - 12% = 88%

Exemple 2

Combien de % contient l'eutecticum lédéburite les composants l'austénite et la cémentite.

$$a = 4,3 - 2,06 = 2,24$$

$$b = 6,67 - 4,3 = 2,37$$

$$2,24$$

Masse de cémentite = ----- x 100% = 48,6%

$$2,24 + 2,37$$

Masse de l'austénite = 100% - 48,6% = 51,4%

Exemple 3

Combien contient un acier à 0,35% C, de ferrite et de perlite ?

$$a = 0,35 - 0,0 = 0,35$$

$$b = 0,8 - 0,35 = 0,45$$

$$\text{Masse de ferrite} = \frac{0,45}{0,45 + 0,35} \times 100\% = 56\%$$

$$\text{Masse de la perlite} = 100\% - 56\% = 44\%$$

Exemple 4

Déterminer le % de la cémentite secondaire et de la perlite contenue dans un acier à 1,7% C

$$a = 1,7 - 0,8 = 0,9$$

$$b = 6,7 - 1,7 = 5$$

$$\text{Masse de perlite} = \frac{5}{0,9 + 5} \times 100\% = 85\%$$

$$\text{Masse de la cémentite} = 100\% - 85\% = 15\%$$

Exemple 5

Déterminer le % de l'austénite précipité, de la cémentite secondaire et du lédéburite, d'une fonte à 2,5% C.

A la température 1147°C on a seulement la présence de l'austénite et du lédéburite, la portion de chaque composant est :

$$a = 2,5 - 2,06 = 0,44$$

$$b = 4,3 - 2,5 = 1,8$$

$$\text{Masse de l'austénite} = \frac{1,8}{1,8 + 0,44} \times 100\% = 80,5\%$$

$$\text{Masse du lédéburite} = \frac{0,44}{1,8 + 0,44} \times 100\% = 19,5\%$$

Mais les 80,5% lors du refroidissement se cristallisent en donnant la cémentite secondaire et la perlite. La quantité de cémentite précipitée à partir des 80,5% de l'austénite peut être calculée de la façon suivante : 100% d'austénite donne une quantité de 21,5% de cémentite, comme il a été calculé dans l'exemple 4. Mais dans notre cas on a seulement 80,5% d'austénite donc on aura :

$$\frac{80,5}{100} \times 21,5 = 17,3\% \text{ de cémentite secondaire}$$

et $80,5 - 17,3 = 63,2\%$ d'austénite précipitée dans la perlite à la température 723°C.

Donc une fonte à 2,5% C contient à la température ambiante 19,5% de lédéburite, 63,2% d'austénite précipitée dans la perlite et 17,3% de cémentite secondaire.

Exemple 6

Déterminer le % de cémentite primaire et de lédéburite contenus dans une fonte à 5,0% C.

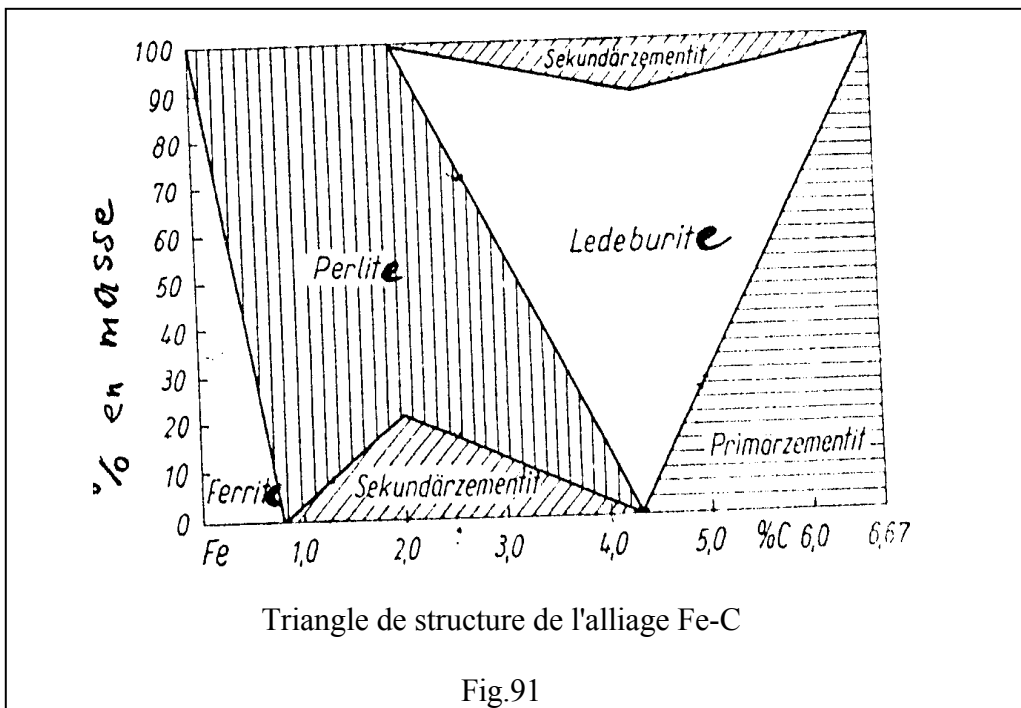
$$A = 5,0 - 4,3 = 0,7$$

$$B = 6,7 - 5,0 = 1,7$$

$$\text{Masse du lédéburite} = \frac{1,7}{1,7 + 0,7} \times 100 \% = 70,8\%$$

$$\text{Masse de la cémentite primaire} : 100 - 70,8 = 29,2\%$$

Une autre méthode plus pratique est utilisée pour déterminer les portions de chaque composant de la structure d'un alliage, elle est représentée par le diagramme de structure ou triangle de structure fig.91



Dans ce diagramme les ordonnées expriment la portion en % des différents composants structurales et l'abscisse la teneur en carbone de l'alliage. A partir d'un tel diagramme on peut lire directement les portions en % de chaque composant.

- 0% C correspond à 100% de ferrite.
- 0,8% C correspond à 100% de perlite.
- 4,3% C correspond à 100% de lédéburite.
- 6,67% C correspond à 100% de cémentite primaire.

Par exemple pour un acier à 0,6% C on peut lire directement ferrite = 25%, perlite = 75%, et pour une fonte à 2,5% C on peut en déduire directement du diagramme 17% de cémentite secondaire, 63% de perlite et 20% de lédéburite dans laquelle existe 2% de cémentite secondaire.

Un autre diagramme très utilisé en pratique est représenté par la figure 92. Dans ce diagramme les ordonnées expriment la portion en % des différents constituants structurales et l'abscisse la teneur en carbone (cémentite de l'alliage).

Seulement pour les points Si, S₂, E, et C1 il est nécessaire d'utiliser la loi de levier afin de calculer la portion et la faire correspondre avec les points correspondants du diagramme, par exemple une fonte avec 2,5% C on trouve les portions suivantes :

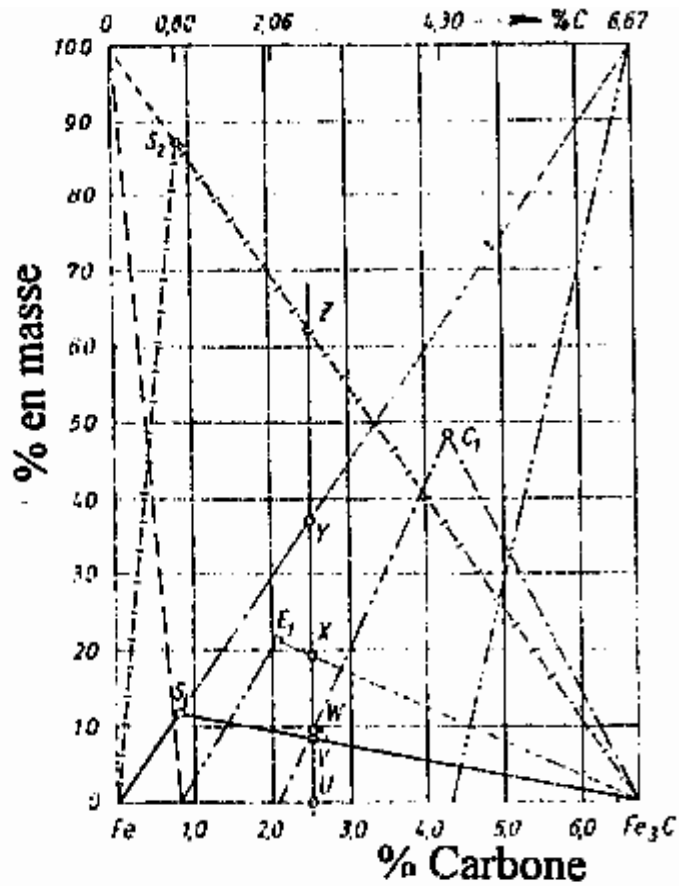
Ligne UV = 8,5% = la cémentite contenue dans la perlite eutectoïde.

Ligne UW = 9,5% = cémentite contenue dans le lédéburite eutectique.

Ligne UX = 19% = cémentite secondaire à partir des cristaux mixtes γ .

Ligne UY = 37% = 8,5 + 19 + 9,5 - 37% = cémentite totale.

Ligne UZ = 63,0% = ferrite contenue dans la perlite eutectoïde.



- cémentite totale.
- · · · — cémentite primaire.
- · · · — Cémentite secondaire.
- Cémentite eutectoïde
- · · · — Cémentite eutectique
- Ferrite totale
- · · · — Ferrite primaire
- · · · — Ferrite eutectoïde.

S₁ = 12% cémentite eutectoïde

S₂ = 88% ferrite eutectoïde.

E₁ = 21,5% cémentite secondaire.

C₁ = 48,6% cémentite eutectique.

Fig.92

Et pour un alliage avec 4,3% C, lequel se solidifie en eutectique pur se compose de 4,5% de cémentite secondaire et de 48,5% de cémentite contenue dans le lédéburite.

Donc la totalité de la cémentite sera:

$$4,5 + 11 + 48,5 = 64\%$$

Et le reste c'est à dire 36% de ferrite eutectoïde.

Pour des teneurs élevées en carbone, la cémentite n'est pas stable et se décompose surtout pour des refroidissements très lents.



Le graphite se précipite suivant la ligne CD' (voir diagramme Fe-C) est appelé graphite moussieux, car suite à sa faible densité relative à celle du fer il y a ségrégation et forme à la surface du bain une masse mousseuse. Dans la structure il est très rare de trouver le graphite primaire. Le graphite forme avec les cristaux mixtes γ pour 4,25% C à $T = 1153^\circ\text{C}$ l'eutectique graphite-austénite à cet effet la ligne de solubilité IE des cristaux mixtes γ elle n'est pas coupée par l'eutecticale à 2,06% C, mais presque à 2,03% C au point E'. La ligne ES est déplacée vers des teneurs en carbone plus basses jusqu'à E'S' et la ligne PSK vers des températures plus élevées P'S'K' (738°C au lieu de 723°C). Les alliages qui se solidifient selon le diagramme Fe-C stable (en pointillés), contiennent dans leur structure l'eutectique ferrite-graphite ou les cristaux primaires de ferrite (formés à partir de l'austénite) ou encore les cristaux de graphite emmagasinés dans l'eutectique ferrite-graphite. Les alliages se solidifient suivant le système métastable Fe-Fe₃C peuvent être transformés en système stable Fe-C par l'intermédiaire d'un recuit, où la décomposition de la cémentite commence à $T = 500^\circ\text{C}$. mais cela peut conduire à des difficultés lors de l'utilisation des fontes à des températures élevées, car la quantité du fer et du carbone obtenue après décomposition de la cémentite occupe un volume plus important que celui occupé par la cémentite primitive. Ce phénomène est appelé "croissance de la fonte " et il est désagréable pour les pièces en fonte travaillant en température élevée tels que les segments de piston. Mais d'un autre coté on utilise le phénomène de décomposition de la cémentite comme moyen pur obtenir une fonte possédant une bonne coulabilité, ductile mais fragile qui est la fonte malléable.

6.5. Diagramme d'équilibre Fer-graphite

La formation d'une phase stable de graphite dans la fonte peut se produire soit par précipitation immédiate de graphite à partir de la solution liquide (solide), soit par décomposition de la cémentite déjà formée. Le processus de formation du graphite dans la fonte s'appelle graphitisation. Sur le diagramme représenté sur la figure - 90 les traits en pointillés correspondent au diagramme Fer- graphite (système stable). Dans le système stable, le graphite primaire se cristallise suivant les températures correspondants à la ligne E'C'F' (1153°C) la ligne E'S' délimite le domaine de la précipitation du graphite secondaire et la ligne S'K' (738°C) du graphite eutecticoïde. Si lors d'une cristallisation eutectique il n'y a que le graphite qui se dégage la fonte obtenue est dite fonte grise et si la précipitation s'accompagne de cémentite le fonte s'appelle fonte truitée et enfin si la cémentite est seule à se dégager le fonte est dite blanche. La probabilité de l'apparition dans la phase liquide (austénite) de la cémentite contenant 6,67% C est nettement plus grande que celle de la formation du graphite composé d'atomes de carbone. La formation du graphite à partir de la phase liquide n'est possible qu'à très faible vitesse de refroidissement.

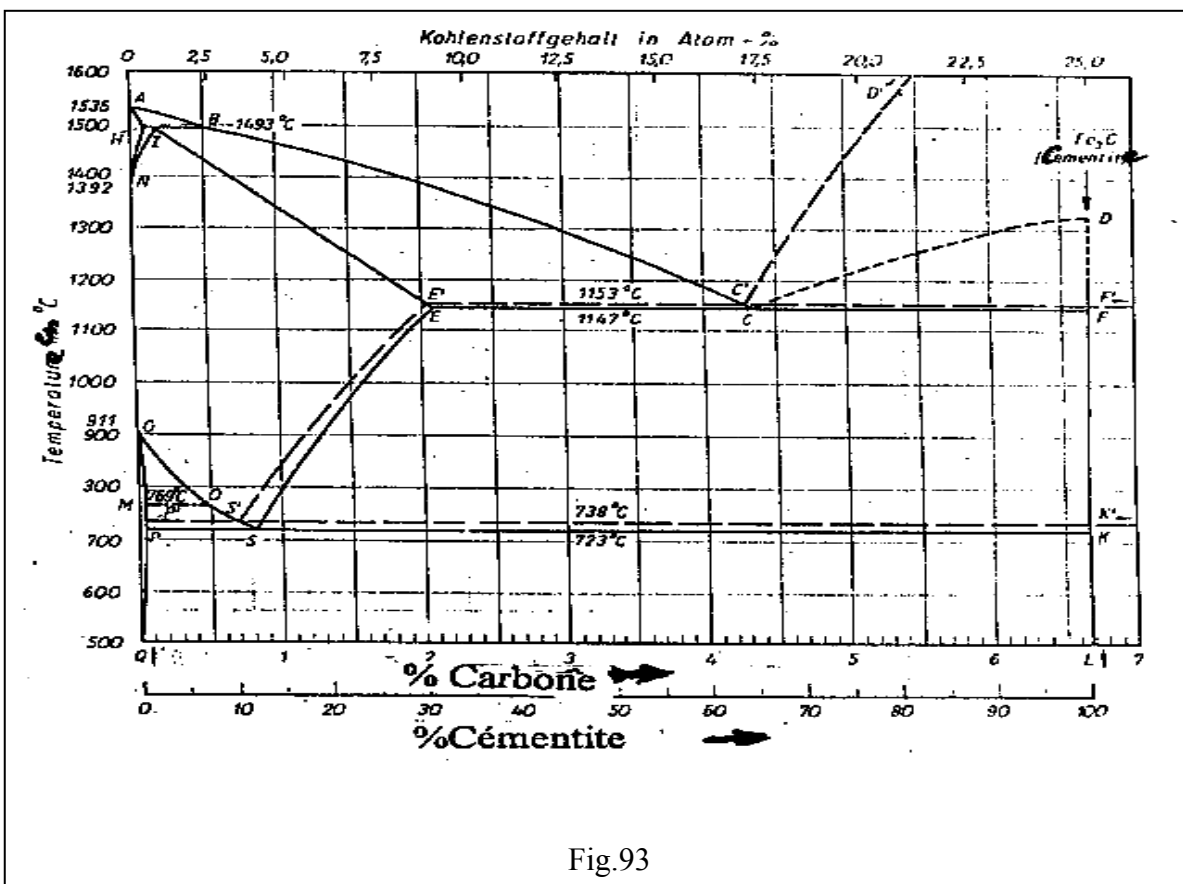


Fig.93

Lorsque le degré de surfusion n'est pas très grand, un refroidissement accéléré inhibe partiellement ou complètement la précipitation du graphite et contribue à la formation de la cémentite. La surfusion de la fonte liquide au dessous de 1147°C conduit à la formation de la cémentite.

Les inclusions tels que SiO_2 , Al_2O_3 , graphite contenus dans une fonte liquide jouent le rôle d'un support tout prêt et rendent plus facile la formation et le développement des germes de graphite. Si lors d'une cristallisation eutectique, il n'y a que la graphite qui se dégage, la fonte s'appelle " fonte grise ", si la précipitation du graphite s'accompagne de celle de la cémentite, la fonte s'appelle " fonte truitée " et enfin s'il n'y a que la cémentite qui se dégage, la fonte s'appelle " fonte blanche ". En présence des germes de graphite déjà existants, le dépôt du graphite peut avoir lieu aux températures inférieures à 1147°C. Ce dépôt est également favorisé par l'addition de silicium qui contribue à la graphitisation. Pour accélérer la graphitisation à partir de la phase liquide on introduit intentionnellement dans la fonte ce qu'on appelle les inoculants qui forment les couches de cristallisation supplémentaire. Le graphite précipité par la phase liquide se développe à partir d'un seul centre et se ramifie dans toutes les directions. Lorsque la cristallisation s'accompagne de la formation de la cémentite (primaire ou eutectique) certaines conditions sont susceptibles de déclencher sa décomposition en précipitant l'austénite et le graphite. Un refroidissement lent rend thermodynamiquement possible le dépôt de graphite à partir de l'austénite et la formation entre 727°C et 738°C du graphite eutectoïde. Dans les fontes grises, la quasi totalité du graphite se forme pendant la cristallisation à partir de la phase liquide. La graphitisation se produit également dans une fonte dont le carbone de cémentite et qui subit un chauffage prolongé à des températures élevées. A la température inférieure à 738°C, cette graphitisation consiste en une décomposition de la cémentite en graphite et en ferrite et aux températures plus élevées en graphite et austénite. Les éléments graphitants sont : Si, C, Al, Cu, Ni, Zr. Ils favorisent la formation des premiers germes servants de supports de croissance pour le graphite. Parmi les éléments le plus important est le silicium.

7. Désignation normalisée des aciers et fontes

7.1 Désignation des aciers

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires, aciers spéciaux,...).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers non alliés et alliés

% des éléments d'addition	Acier non Allié	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
Al	< 0,3	-	> 0,3
B	-	-	> 0
Co	< 0,2	0,2... 0,3	> 0,3
Cr	< 0,3	0,3... 0,5	> 0,5
Cu	< 0,4	-	> 0,4
Mn + Si	< 1,5	1,5... 3	> 3
Mo	< 0,05	0,05... 0,1	> 0,1
Ni	< 0,3	0,3... 0,5	> 0,5
Pb	< 0,4	-	> 0,4
V	< 0,05	0,05... 0,1	> 0,1
W	< 0,2	0,2... 0,3	> 0,3

7.1.1 Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. ils sont obtenus dans les convertisseurs, four martin...

Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser les valeurs limites ci-dessous :

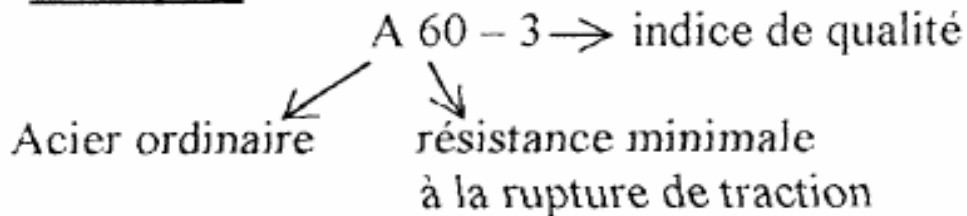
Eléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Deux solutions se présentent pour les désigner :

1) lettre A pour les aciers de constructions mécaniques.

Cette nuance est indiquée par la lettre A suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction R_m en daN/mm, éventuellement suivi des chiffres 1, 2, 3, ou 4 (*indice de qualité des propriétés mécaniques*). Le chiffre 4 indique la plasticité la plus élevée, on utilise ces chiffres, car deux aciers ayant la même charge de rupture peuvent avoir des plasticités différentes.

Exemple :



Leur désignation peut être aussi suivie des indices d'utilisation :

S— soudable

M— moulable.

L'indice de qualité est défini selon l'expression suivante :

$$N = 2,5 A + R$$

N : nombre définissant l'indice de qualité.

A : allongement en %.

R : résistance en hbar

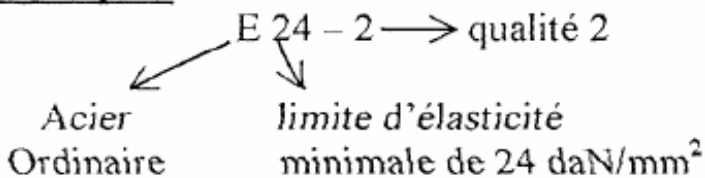
Qualité	1	2	3	4
N ≥	96	108	114	118

Exemple de nuances normalisées : A33, A34, A50, A52, A60 etc..

2) lettre E pour les aciers destinés à la construction métallique.

Cette nuance est désignée par la lettre E suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2, 3, 4.

Exemple :



La catégorie de certains aciers retenus par la norme AFNOR sont :

- E 24 - 1 E 26 - 2 E 36 - 2
- E 24 - 2 E 26 - 3 E 36 - 3
- E 24 - 3 E 30 - 3

Pour distinguer la pureté chimique en soufre et en phosphore des aciers, leur désignation peut être éventuellement suivie d'une lettre minuscule indiquant la pureté en (P+S), voir tableau ci-dessous :

Symbolc	a	b	c	d	e	f	g	h	k	m
P+S	0,140	0,120	0,100	0,090	0,070	0,065	0,060	0,055	0,045	0,035

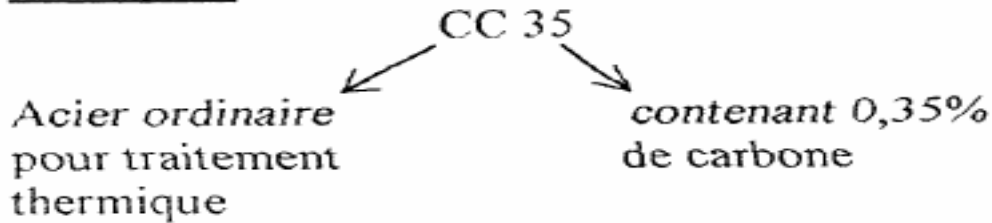
7.1.2 Désignation des aciers pour traitements thermiques

Cette catégorie d'aciers est apte aux traitements thermiques, la teneur en carbone est impurétés est contrôlée, on distingue deux nuances :

a) Les aciers courants

Ils sont désignés par les lettres CC suivies d'un nombre qui désigne la teneur moyenne du carbone en centième pour cent (100 fois la teneur en carbone).

Exemple :



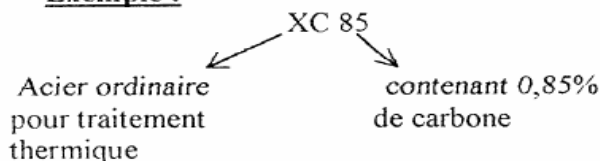
Exemple de nuances normalisées :

CC10, CC20, CC30, CC35, CC55 etc...

b) Les aciers fins

Ces aciers sont employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitement thermique, leur élaboration s'effectue dans le four martin. Leur désignation commence par les lettres XC suivies d'un nombre indiquant la teneur en carbone en centième pour cent. Dans cette catégorie d'aciers les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits, ces aciers présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impureté.

Exemple :



Leur désignation peut être aussi suivie d'une lettre minuscule indiquant l'indice de pureté.

- a- pureté minimale
- d- pureté moyenne
- m- pureté maximale

Exemple de nuances normalisées :

XC 10, XC 12, XC 18, XC 25, XC 35, XC 38 etc...

Modes de traitement thermique pour les aciers au carbone

- L'acier contenant moins de 0,30% C est destiné à subir une cémentation (appelé acier trempé).
- Les aciers contenant 0,35% à 0,50% C sont destinés à l'amélioration (trempe + revenu à haute température).
- Pour les aciers contenant 0,60% à 0,75% C (trempe + revenu à température moyenne).
- De 0,8% + 1,3% C, aciers à outils destinés à subir une trempe suivie d'un revenu à température basse.

7. 1.3 Désignation des aciers alliés

Ces types d'aciers sont obtenus par l'addition volontaire d'éléments d'alliage. Ce sont des aciers contenant outre le fer et le carbone un ou plusieurs éléments destinés à améliorer leurs propriétés mécaniques. Ce sont des aciers de grande pureté, leur élaboration s'effectue dans le four martin, four électrique ou creuset. Les principaux éléments d'alliages et leurs symboles normalisés sont présentés dans le tableau ci-dessous. La teneur des éléments d'alliages C,K,M,N,S est multipliée par 4 et pour tous les autres éléments par 10.

Eléments	Symbole		coefficient
	Chimique	normalisé	
Aluminium	Al	A	× 40
Chrome	Cr	C	× 4
Cobalt	Co	K	× 4
Cuivre	Cu	U	× 10
Etain	Sn	E	× 10
Magnésium	Mg	G	× 10
Manganèse	Mn	M	× 4
Molybdène	Mo	D	× 10
Nickel	Ni	N	× 10
Phosphore	P	P	× 10
Plomb	Pb	Pb	× 10
Silicium	Si	S	× 4
Soufre	S	F	× 10
Titane	Ti	T	× 10
Tungstène	W	W	× 10
Vanadium	V	V	× 10
Zinc	Zn	Z	× 10
Antimoine	Sb	R	× 10
cadmium	Cd	Cd	× 10

Les éléments d'addition sus-mentionnés agissent de deux façons principales sur l'acier.

a) Leur action sur la formation de l'austénite

Les éléments alphagènes tels que Si, Cr, Al, W, Mo, et V, s'opposent à la formation de l'austénite, pour une teneur suffisante l'alliage demeure à l'état perlitique depuis la température ordinaire jusqu'à la température de fusion. Les autres éléments gamagènes Ni, Mn, Co facilitent la formation de l'austénite au point de la rendre stable à la température ordinaire lorsqu'ils sont en proportion suffisante.

b) Leur action sur la formation de carbures complexes

Ils facilitent la naissance de carbures complexes généralement plus durs que le carbure de fer et qui demeurent noyés et non dissous dans le reste de l'alliage. Ces carbures influent sur les propriétés mécaniques de l'acier. Selon les éléments d'addition et leurs quantités d'addition, on distingue deux types d'aciers :

- Aciers faiblement alliés.
- Aciers fortement alliés.

7.1.3.1 Désignation des aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5%. Ils sont désignés par :

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone, exprimée en % (multiplié par 100).
- Suivie de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes (c'est à dire le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée).
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneurs moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments.

Remarque : La désignation des éléments mentionnés ci-dessous est négligée, dans le cas où leur teneur est égale ou inférieure à celle mentionnée ci-dessous.

M, S	N	C	D, V
1%	0,5%	0,25%	0,10%

Exemple

45 CD 20 – 04

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,45% de carbone.
- $20/4 = 5\%$ de chrome (c).
- $04/10 = 0,4\%$ de molybdène (D).

20 NC 6

- 0,20% de carbone.
- $6/4 = 1,5\%$ de nickel (N).
- Le % du chrome (c) est inférieure à 1,5%.

Exemple de nuances d'aciers faiblement alliés selon AFNOR :

18 CD 4,	10 NC 6,	16 NC 6,	14 NC 11	
20 NCD 2,	45 S 7,	38 C4,	100 C6,	25 CD 4
35 CD 4,	42 CD4,	20 NC 6,	30 NC 11,	etc...

7. 1.3.2 Désignation des aciers fortement alliés

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5%. Dans cette catégorie on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc..

Leur désignation normalisée est toujours précédée par le lettre Z suivie :

- D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent. -Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur
- Des chiffres indiquant la teneur moyenne en % des éléments d'addition.

Dans le cas des aciers fortement alliés les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés.

Exemple

Z 160 CDV 12

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

- 1,6% de carbone.
- 12% de chrome.

Z 6 CN 18 – 09 (c'est l'acier inoxydable courant)

- 0,06% de carbone.
 - 18% de chrome.
 - 9% de nickel.
-

Exemple de nuances d'aciers fortement alliés :

Z115WC05, Z200C13, Z200CKDV14,

Z 150 CKD 14, Z 85 WDCV 06-05-04-02, Z 130 WCV 12-04-04, Z 110 DKCVVV 09-08-04-02.

7.2. Désignation normalisée des fontes selon AFNOR

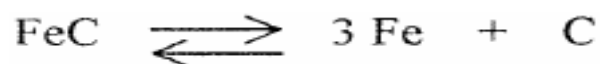
La fonte est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2%, éventuellement une fonte contient d'autres éléments introduits volontairement ou non. Les fontes se divisent en deux groupes selon leur mode d'élaboration (suivant l'état d'existence du carbone sous forme de cémentite ou de graphite).

a) Fontes blanches

La totalité du carbone se trouve sous forme de cémentite Fe_3C . Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et on obtient une fonte sans graphite. Cette fonte est dite blanche car la cassure présente un aspect métallique blanc, il y a absence de carbone libre. La teneur en Si, C, P est relativement faible, tandis que la teneur en Mn est élevée. Ces types de fontes sont obtenues dans le H-F et sont généralement utilisées pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

b) Fontes grises

La totalité du carbone est libre et se trouve sous forme de graphite, elles sont obtenues lors du refroidissement lent et température de coulée assez élevée, alors la cémentite peut se décomposer en donnant du carbone libre sous forme de graphite.



L'aspect de la cassure à une couleur grise ce qui prouve la présence de carbone libre. L'élément indispensable pour obtenir une fonte grise est le silicium jusqu'à une teneur de 3% ; ensuite viennent le cuivre et le nickel dont le premier possède un pouvoir antiferritisant énergétique au cours du refroidissement mais facilitant la formation de carbure libre (point dur) et la ferrite libre (point doux) et le second (nickel) possède un pouvoir graphitisant plus meilleur que celui du cuivre, mais un pouvoir antiferritisant négligeable. Généralement les fontes grises sont obtenues dans des fours appelés cubulots. Pour leur désignation normalisée, les fontes sont classées en deux catégories :

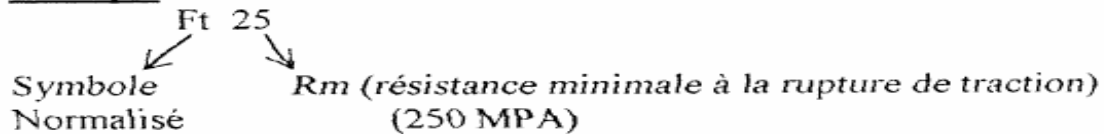
- Fontes non alliées.
- Fontes alliées.

7.2.1. Désignation des fontes non alliées

a) Fontes grise à graphite lamellaire

Pour leur désignation on utilise le symbole normalisé **Ft** suivi de la valeur en daN/mm de la résistance minimale à la rupture de traction. Elles possèdent une excellente coulabilité et usinabilité mais présentent des propriétés mécaniques assez défavorables (fragiles et non malléables).

Exemple



Exemple de nuances des fontes grises à graphite lamellaire :
Ft 10, Ft 15, Ft 20, Ft 25, Ft 30, Ft 35, Ft 40 etc...

b) Fontes à graphite sphéroïdal

Les fontes à graphite sphéroïdal possèdent de bonnes propriétés mécaniques par rapport aux fontes Ft. Plus la sphéricité des particules est élevée plus les propriétés sont bonnes. La modification de la structure du graphite (passage du graphite lamellaire au graphite sphéroïdal) est obtenue par addition d'éléments d'alliages dans le métal liquide lors de sa coulée. Le premier élément ayant été utilisé est le cerium, mais aujourd'hui on utilise le plus souvent le magnésium sous forme d'alliages nickel-magnésium ou ferrosilicium-magnésium le procédé d'obtention des fontes à graphite sphéroïdal consiste à un traitement au préalable de la fonte tels que :

- Désulfuration
- Démanganisation si nécessaire, car la teneur en manganèse doit être fixée à l'avance si on veut obtenir des structures ferritiques ou perlitiques. Pour les structures ferritiques (Mn = 0,10 - 0,30) %, pour les structures perlitiques (Mn jusqu'à 0,90%).

L'introduction du magnésium s'effectue lors de la coulée et à une température de 1350 à 1500°C et selon différentes méthodes.

a) Méthode sandwich

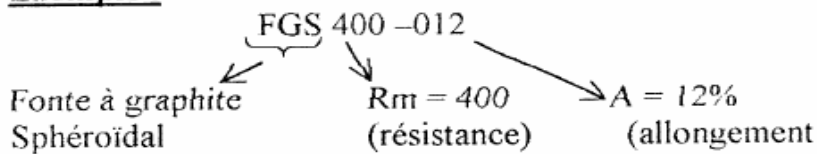
Avant la coulée le magnésium est introduit dans la poche sous forme d'alliage, recouvert de rébus de tôles d'acier. La fonte à modifier est coulée directement sur sandwich.

b) Méthode plongeur

Une "cloche en réfractaire percée de trous et contenant le magnésium est entraînée mécaniquement vers le fond de la poche remplie de fonte liquide.

Les fontes à graphites sphéroïdal sont désignées par le symbole FGS, suivi de la valeur en N/mm^2 de la résistance minimale à la rupture de traction et de la valeur de l'allongement après rupture en %.

Exemple :



Exemple de nuances : FGS 370-17, FGS 400-12, FGS 500-17,
FGS 600-3, FGS 700-2, FGS 800-2.

7.2.2 Désignation des fontes alliées

les fontes alliées sont obtenues par addition d'éléments d'alliages lors de la fusion. Ces éléments sont le Ni, Cr, Mo, Ti, Va, Si etc...

Elles possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles des fontes déjà considérées. Elles sont à graphite lamellaire ou sphéroïdal et ferritiques ou austénitiques.

Elles sont désignées par :

- Lettre L ou S : lamellaire ou sphéroïdal.
- Symboles normalisés des éléments d'addition rangés par teneur décroissante.
- Teneur moyenne en % de éléments d'addition rangés dans le même ordre que ces éléments sans facteur multiplicatif.

Exemple

L-NSC-30-5-5;

Fonte austénitique à graphite lamellaire ayant des teneurs moyennes en Ni (30%) en Si (5%) et en Cr (5%).

7.2.3. Désignation des fontes malléables

La fonte malléable est une fonte initialement blanche, qui a subit ultérieurement un recuit en atmosphère oxydante ou neutre.

Il existe deux procédés pour obtenir les différents types de fontes malléables.

a) Le procédé européen

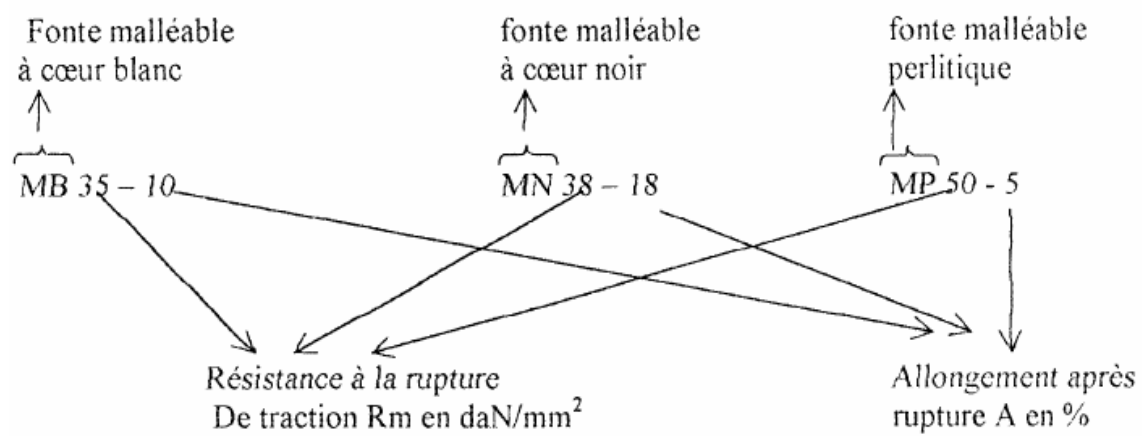
Pour obtenir la fonte malléable à cœur blanc (fonte malléable européenne) où le carbone a été en majeure partie éliminée. Dans ce procédé les pièces moulées en fonte blanche sont emballées dans de l'oxyde de fer et portées vers 980 - 1050°C durant 80 - 100 heures. Les pièces après ce long recuit, sont refroidies à la vitesse de 5 - 10°C/h et déchargées du four à 650°C pour ensuite les refroidir à l'air, alors on obtient une matrice complètement ferritique avec éventuellement quelques nodules de graphite au cœur de la pièce moulée.

b) Le procédé américain

Il est destiné à obtenir des fontes malléables à cœur noir ou perlitiques (fontes malléables américaines). Dans ce procédé, les pièces coulées en fonte blanche subissant un recuit en atmosphère neutre à une température de 870 - 950°C durant 8 - 60h. Après ce recuit elles sont refroidies aussi vite que possible jusqu'à la température de 760°C, ensuite elles sont refroidies à une vitesse de 3 - 10°C/h afin d'obtenir une ferritisation complète. La descente lente de la température est souvent remplacée par un maintien à 720°C, ensuite les pièces peuvent refroidir à l'air. On obtient finalement une matrice ferritique où tout le carbone se présente sous forme de nodules de graphite déchiquetés (fonte malléable à cœur noir). On peut supprimer la ferritisation eutectoïde en parcourant rapidement le domaine $\alpha + \gamma + g$ pour que l'austénite se transforme en perlite ce qui donne une fonte malléable perlitique.

Pour leur désignation on utilise :

- Lettre M : fonte malléable.
- Lettre B, N ou P = à cœur blanc, Noir ou Perlitique.
- Résistance minimale de rupture à la traction en daN/mm .
- Allongement après rupture en %.



BIBLIOGRAPHIE

- 1- Métallographie et traitements thermiques des métaux. L.Lakhtine, édition Mir Moscou 1978.
- 2- Matériaux I et II. N.Bouaoudja, Édition OPU 1992
- 3- Grundlagen der werkstoffwissenschaft 2.Lehrbrief Prof.Dr.F.Gunther, Edition Bergakademie Freiberg 1976
- 4- Werkstoffkunde Stahl und Eisen I Eckstein, Édition VEB deutscher verlag Leipzig 1971
- 5- Métallurgie élaboration des métaux C.Chaussin G.Hilly, Edition Dunod Paris 1972
- 6- Metallgewinnung Eisen und Stahl Teil :11 1 und 2 Lehrbrief Dozent. Dr. Ing. Helmut Burghardt, Édition Bergokademie Freiberg 1974
- 7- Eisenhuenkunde Teil 1.Métallurgie der Roheisenerzeugung Dr.Inw.Winfried Wenzel, Édition Bergokademie freiberg 1972