

2. ELABORATION DES METAUX FERREUX

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 (2,8 %), Cu (0,01 %), le reste est constitué par les autres éléments dont la part est insignifiante par exemple : l'or ($5 \cdot 10^{-7}$ %) et Ag ($1 \cdot 10^{-5}$ %).

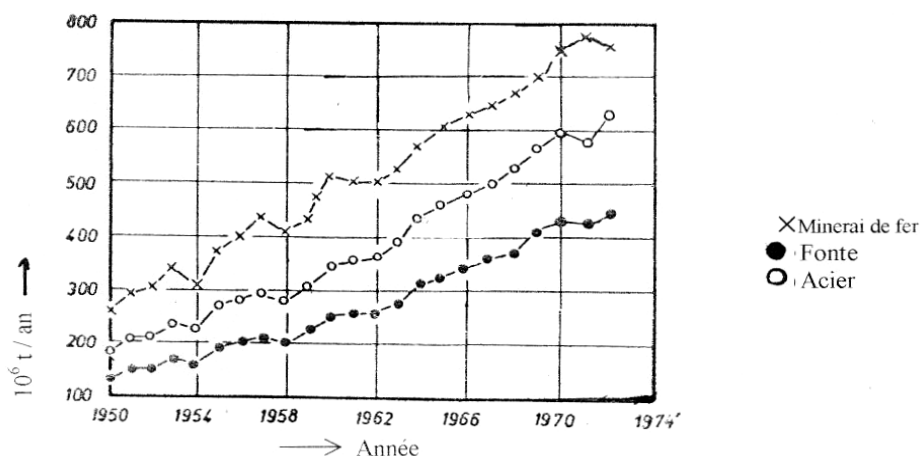
Les éléments ne sont pas répartis d'une façon homogène dans les différentes régions. On peut rencontrer différentes compositions chimiques et différentes concentrations des éléments d'une région à une autre. Donc les métaux sont rencontrés sous formes de minerais qui sont des minéraux ou mélange de minéraux 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, ils 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 son minerai, (élaboration du métal), on distingue deux procédés:

- Le procédé métallurgique par voie ignée (thermique), fusion et réduction du minerai, l'agent réducteur le plus employé est le carbone (C) ou le CO.
- Le procédé par électrolyse en fusion.

2.1. Elaboration des métaux ferreux (fonte et acier)

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 comme le montre la figure 91.



(fig.91) : production annuelle mondiale du minerai de fer, acier et fonte

La production mondiale en aciers et fontes a triplé 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 très longtemps 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 à 15 % des aciers sont déjà substitués par les plastiques, l'aluminium, le verre et les matériaux composites.

Une substitution totale de l'acier et de la fonte par d'autres métaux et non métaux, pour l'instant, n'est pas avantageuse du point de vue économique. La répartition de la production d'acier par pays producteur en 1972 étant la suivante :

- URSS : 126 millions de tonnes.
- USA : 121 millions de tonnes.
- Japon : 97 millions de tonnes.
- RFA : 44 millions de tonnes.
- Grande Bretagne : 25 millions de tonnes.
- France : 24 millions de tonnes.
- Chine : 23 millions de tonnes.
- Pologne : 13 millions de tonnes.
- CSSR : 13 millions de tonnes.
- RDA : 16 millions de tonnes.
- Algérie : 200 000 tonnes.

Les causes de surpassement des importances techniques des métaux ferreux, par rapport aux autres métaux, réside 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 bas prix. 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 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.

2.1.1. Elaboration de la fonte

Le principal moyen 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 de près de 1400°C et avec une teneur en carbone de 3,5 % à 4,5 % et de teneur variable en Si, Mn, P et 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-(arbores). Le produit secondaire obtenu lors de l'élaboration de la fonte est le laitier (dit aussi scorie) dont les principaux composants sont CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO.

2.1.2. Matières premières

Comme il a été mentionné auparavant, les matières premières destinées pour l'élaboration de la fonte sont : le minerai de fer, le coke et les fondants.

2.1.2.1. 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 chimiques, on distingue plusieurs types de minerai de fer :

- a. La magnétite (Fe₃O₄). sa couleur varie du gris foncé au noir.
- b. L'hématite rouge (Fe₂O₃). sa couleur varie du rouge foncé au gris foncé.
- c. L'hématite brune (Fe₂O₃ H₂O), sa couleur varie du noir au jaune.
- d. Le fer spathique ou sidérose (FeCO₃), sa couleur varie du jaune pâle au gris.

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

Les minerais de fer sont souvent très pauvres en manganèse, l'un des éléments améliorant les propriétés de fonte. Il est essentiellement utilisé pour l'élaboration des fontes riches en manganèse tels que les ferro-manganèses et fonte spiegel. Le plus souvent on utilise les oxydes tels que MnO₂, et Mn₂O₃ dont la teneur en manganèse peut atteindre 50.

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

Type	Composition chimique								humide
	Fe	Mn	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CO ₂	
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 FeO 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

2.1.2.2. 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 à 80 % de carbone
- 8 à 11 % de sandre
- 2 à 6 % H₂O
- 0,8 à 1,2 % de soufre
- 2 à 3 % d'éléments volatils

Le rôle du coke dans le haut fourneau est de :

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

2.1.2.3. 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 CaCO₃, et très rarement la dolomite MgCO₃ ou CaCO₃.

2.1.3. Le haut-fourneau

Le haut-fourneau est un four à forme circulaire, comme le montrent les figures 92 et 93, 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. Le Blindage métallique ayant le même profil que le haut-fourneau.
7. Les éléments de refroidissement du blindage métallique.
8. Idem que point 7.
9. La fondation.
10. Le minerais de fer et la fonte.
11. Le coke.
12. L'évacuation des gaz.
13. La tuyère.

La composition des charges à introduire dans le haut-fourneau pour l'élaboration d'une tonne de fonte ainsi que les produits obtenus sont :

a. Charges introduites :

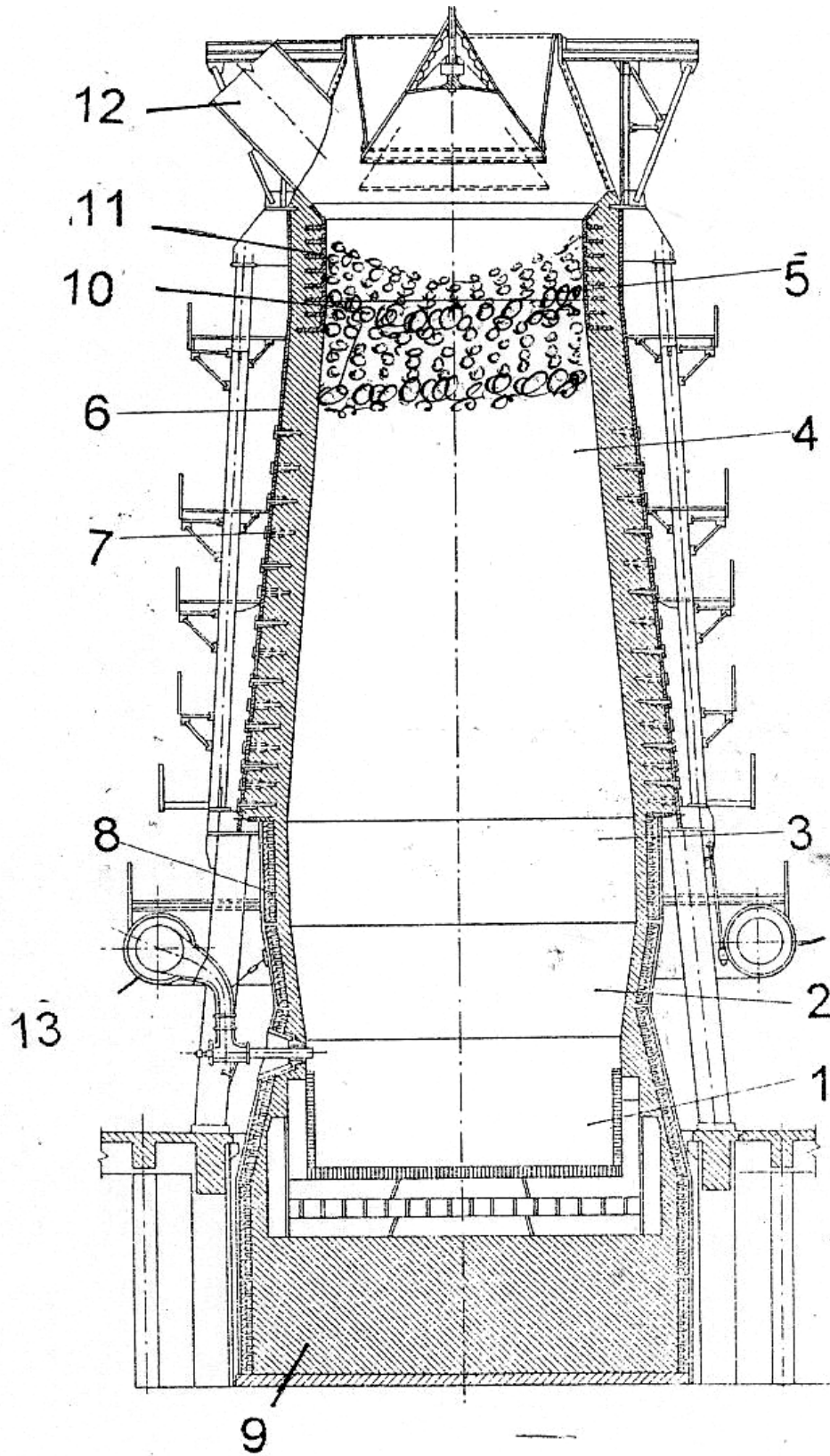
- minerais de fer et addition :	2 160 kg/t de fonte
- fondant (calcaire) :	470 kg/t de fonte
- coke :	960 kg/t de fonte
- rend chaud (humide) :	3 125 kg/t de fonte
Total =	6 715 kg/t de fonte

b. Produits obtenus :

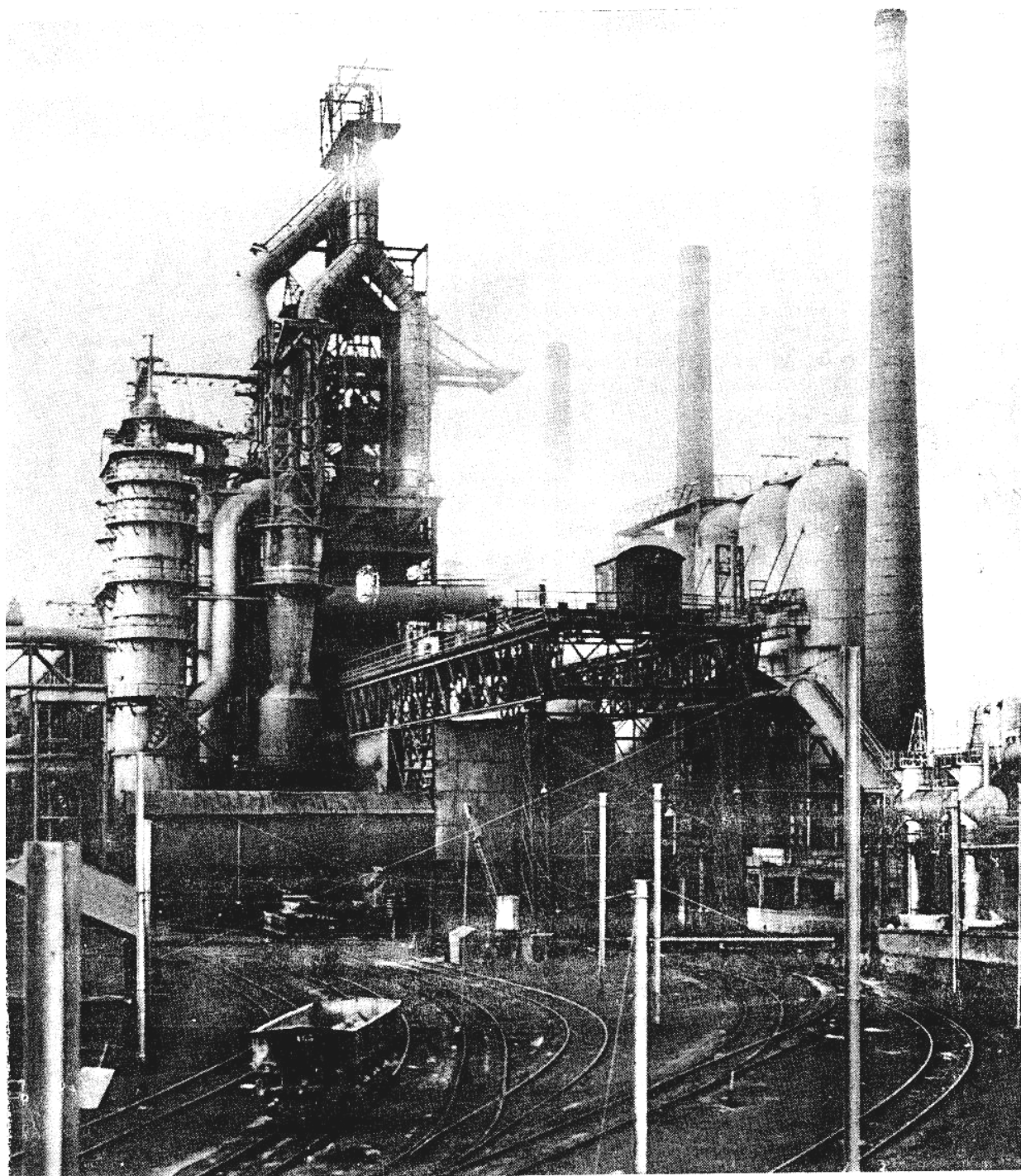
- Fonte :	1 000 kg
- Laitier :	905 kg/t de fonte
- Poussière de gaz :	130 kg/t de fonte
- Gaz de Gueulard (humide) :	4 680 kg/t de fonte
Total =	6 715 kg

Théoriquement, on obtient :

Charge introduite = produits obtenus.



(fig.92)



Cl. Sidélor.

(fig. 93)

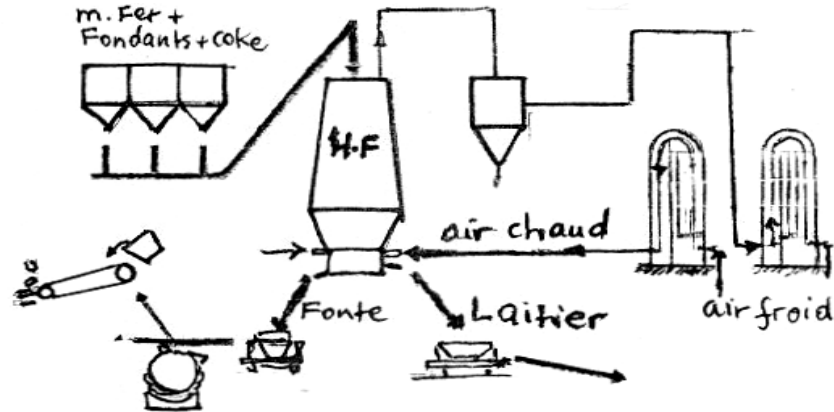
VUE D'ENSEMBLE D'UN HAUT-FOURNEAU DE GRANDE CAPACITE (1 000 m³).

Hauteur utile : 22 m - Diamètre du creuset 7m - Production : 900 t de fonte en 24 h.

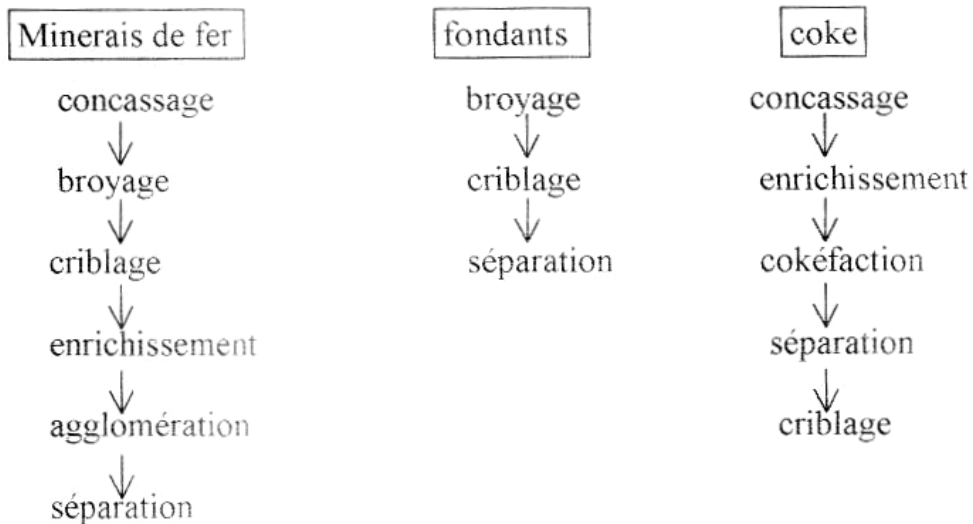
On. voit à droite une batterie de 3 cowpers (hauteur 37 m, diamètre 8 m)
et à gauche les installations de dépoussiérage et de lavage des gaz

2.1.4. Flux de 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 94.



(fig.94)



2.1.5. Processus métallurgique dans le haut-fourneau

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 donner 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 du 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 :

- a. 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.
- b. 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 énergique 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 l'oxygène, est plus grande, plus il est difficile à le réduire de 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 44, qui va suivre, 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.

A la partie supérieure de la cuve et entre 200 et 400°C, il y a décomposition des hydrates et entre 400 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.

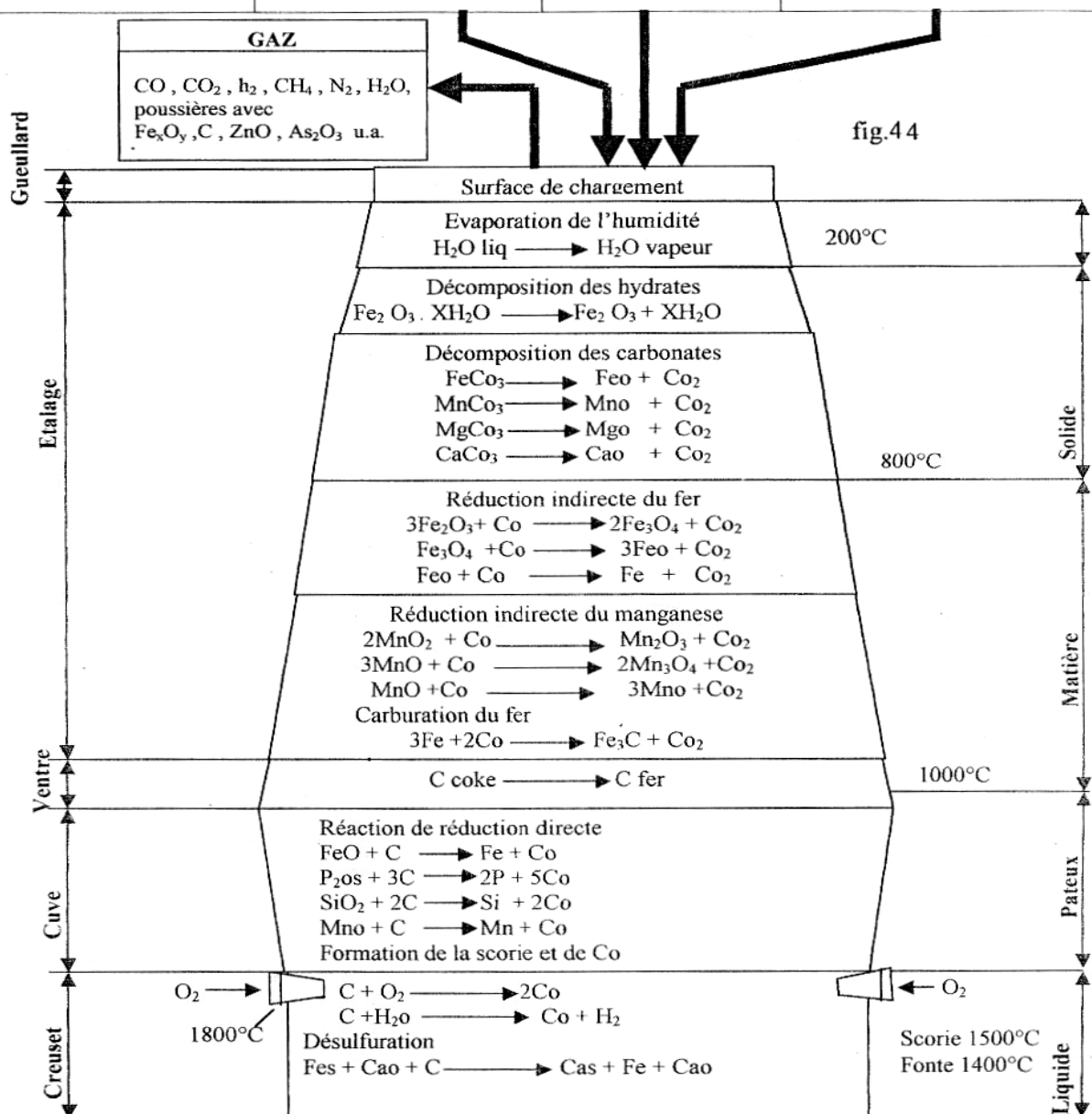
Entre 800 et 1000°C, on arrive au processus de réduction indirecte des éléments principaux tels que le fer et le manganèse (par rapport au fer le manganèse est difficile à réduire). Jusqu'au domaine de la réduction indirecte toute la charge se trouve à l'état solide.

A 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 tonte liquide.

Matières	Coke	Minéri de fer	Calcaire
Element principal	C	Fe _x O _y	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 _x O _y , 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..



2.1.6. Les fontes du haut-fourneau

Les fontes obtenues dans le haut-fourneau 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 leur compositions chimiques. Le tableau ci-dessous nous indique les différents types de fontes obtenues dans le haut-fourneau avec leur composition chimique.

	C	Si	Mn	P	S
Type de fontes H-F	%	%	%	%	%
Fonte pauvre en Mn	rd.4%	bis 1	(<1)	0,08-0,12	bis 0,05
Fonte riche en Mn	rd.4%	bis 1	(2 - 3)	0,08-0,12	bis 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	bis 0,04
Fonte de Fonderie	3,5 - 4,2	2 - 3	bis 1,0	0,5 - 1,0	bis 0,07
Fonte Hématite	3,5 - 4,2	2 - 2,5	0,7 - 1,5	0,08 - 0,12	bis 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 alphas ou gammas 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.
- Antigrahitisantes (Cr, Mo, Mn, S, V, W, B, ...).

Nous donnons, ci-dessous, quelques indications spécifiques des principaux éléments contenus dans les fontes.

- a. **Cuivre et nickel** : éléments graphitisants qui contribuent fortement à l'affinement de la perlite par leur action gamma. En outre, le cuivre est fortement antiferritisant, alors que le nickel est sans effet. L'introduction dans la fonte de 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 réfractarité des fontes et leur tenues 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 fer 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 a la for nation de soufflures dans les pièces moulées.

2.1.7. 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 des divers minerais. des fondants et de la sandre du coke. Les principaux éléments constituant le laitier sont donnes 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 le 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.

2.2. Elaboration 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 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 telles que l'oxydation des différents éléments d'impuretés, la décarburation de

la fonte et l'addition d'éléments alliés nécessaires pour améliorer les différentes propriétés. Les matières premières nécessaires pour l'élaboration de l'acier sont :

- Fonte liquide ou solide (selon le procédé).
- Ferraille.
- Additions.
- Ferro-alliages (alliages des 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, ils 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 de 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 haut-fourneau, la fonte subit une seconde fusion. Si l'aciérie est près du haut-fourneau, il est évidemment économique d'utiliser la fonte liquide, laquelle est coulée directement du haut-fourneau dans un vaste réservoir sur rail appelé mélangeur. Le mélangeur rend donc la marche de l'aciérie indépendante de celle du haut-fourneau.

2.2.1. 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, la 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.

Du 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 ΔG° (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 :

- Quelle concentration sous les conditions extérieures (P,T) caractérise l'équilibre de la réaction.
- 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 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

2.2.2. 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.

2.2.2.1. Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier

Les aciers se composent de plusieurs autres inclusions ou impuretés constantes ou inévitables telles que Mn, Si, P, S, O, N, H, etc., qui influent sur leurs 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).
- Leur passage dans l'acier lors de l'opération de désoxydation (Mn, Si).
- 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.

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.
- La température.

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

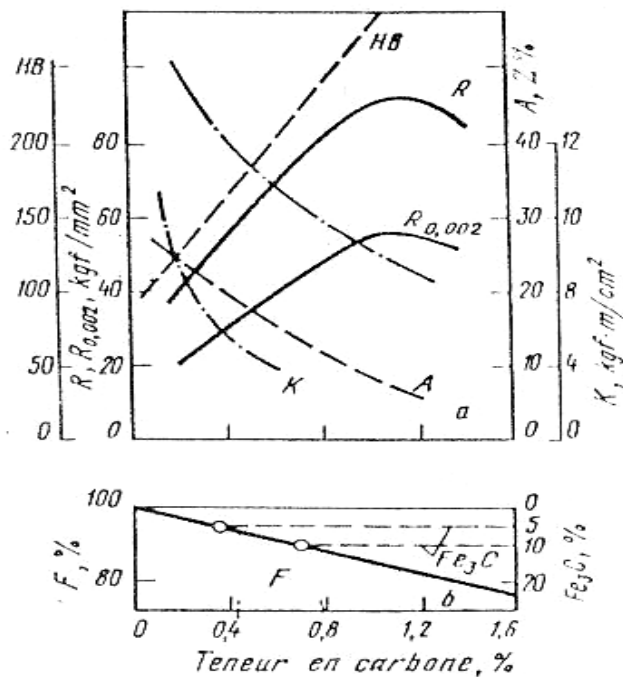
a. Le carbone :

Après refroidissement lent, la structure d'un acier se compose de la ferrite et de la cémentite (deux phases), la quantité de cémentite est directement proportionnelle à la teneur en carbone (fig. 95).

La ferrite, une fois associée à la cémentite donne la perlite. Le carbone est l'élément qui a la 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 toutefois 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. On observe également 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 la trempe on obtient un constituant très dur, appelé la martensite.



Influence du carbone :
a-sur les propriétés mécaniques de l'acier;
b-sur le nombre de phases présentes dans l'acier

(fig.95)

b. Le silicium :

La teneur du silicium dans l'acier varie de 0,05 à 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 toutefois 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 Mn₃C associé à la cémentite Fe₃C. 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, il 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 ségréguant facilement, il 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 à 0,06 %, généralement inférieure à $\frac{1}{4}$ de la teneur en manganèse.

Parfois on utilise des aciers de décolletage riches en soufre (0,015 à 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'H₂ 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.

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

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

a. La formation des solutions solides dans le fer.

- b. 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. La production (lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée) des composés intermétalliques avec le fer.

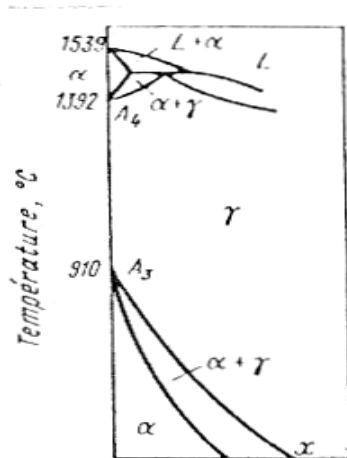
Les éléments d'alliages ont une influence sur les transformations allotropiques du fer. Tous ces éléments à l'exception de C, N, H et en partie du bore, formant avec le fer des solutions solides de substitution.

Leur dissolution dans le fer influe fortement sur les positions des points A_4 (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. Éléments 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 96 montre que l'addition de ces éléments fait monter le point A_4 jusqu'à la ligne du solides. 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 : $\alpha \leftrightarrow \gamma$.



Teneur en élément d'alliage

(fig.96) :

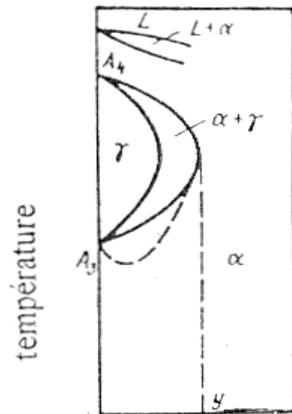
Les alliages de ce type sont dit austénitiques. Les alliages qui ne subissent que partiellement la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ s'appellent semi-austénitiques.

b. Éléments 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 (euténitique), (fig. 97). Les alliages de ce type sont dit. " ferritiques " .

Lorsque la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ ne se produit que partiellement, les alliages s'appellent semi-ferritiques.



Teneur en éléments d'alliages

(fig.97)

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

Eléments	Déplacement du point S (eutectoïde)	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, σ_e , Désoxydation.	Solubilité du carbone, Soudabilité, Vitesse critique de trempe (V_{cr})
Mn	←	↓	Oui	-	Résistances aux chocs, à l'usure, à la traction, Trempabilité, Désoxydation.	Usinabilité, Température de transformation, V_{cr} de trempe.

Eléments	Déplacement du point S (eutectoïde)	Déplacement des points de transformation	Formation de carbures	Affinage de grains	Augmente (+)	Diminue (-)
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.	

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

2.2.3.1. 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 :



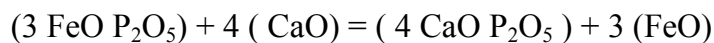
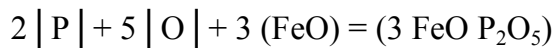
Lors de la décarburation, le $|CO|$ obtenu, n'est pas soluble dans le bain métallique, ce qui permet l'élimination d'une grande partie du carbone et se crée un équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse. Donc l'apport de l'oxygène lors de l'affinage de l'acier joue un rôle important pour sa 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 chaque procédé est différent.

Par exemple pour le procédé THOMAS avec 0,35 % de carbone sont oxydés par minute et dans le procédé MARTIN (sans soufflage d'oxygène), seulement 0,003 % à 0,005 % de carbone par minute sont oxydés, les causes sont dues à la formation du CO dans la sole et non dans le bain métallique.

2.2.3.2. Déphosphoration

L'élimination du phosphore de la fonte liquide joue un rôle important dans l'élaboration des aciers. Dans les aciers, le phosphore tic doit pas dépasser 0,020 à 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 éléments 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 chaud (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.

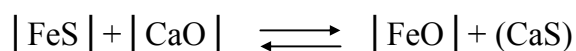
Pour une bonne oxydation et scorification du phosphore dissout dans le métal, il faut un potentiel d'oxygène élevé dans la scorie et un pourcentage élevé d'oxygène dans le bain métallique.

Le phosphore doit être éliminer 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 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.

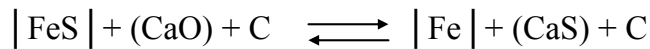
2.2.3.3. Désulfuration

La désulfuration (scorification du soufre) consiste à éliminer le soufre dissout dans le fer et elle se passe seulement dans les conditions oxydantes. La teneur exigée en soufre dans les aciers ne doit pas dépasser 0,01 à 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, les aciers d'outils d'usinage à grande vitesse.

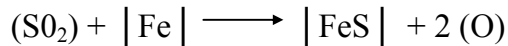
Le soufre existant dans le bain métallique provient de la fonte, de la ferraille, de la chaux et surtout des combustibles solides et liquides (procédé Martin). Pour tous les procédés d'élaboration de l'acier, la désulfuration se passe de la même manière que dans le haut-fourneau. L'élimination du soufre 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 SO_2 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 minimum 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.

2.2.3.4. 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.

2.2.3.5. Elimination 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.

2.2.3.6. 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 ainsi que l'élimination du silicium. Il existe deux types de scorie :

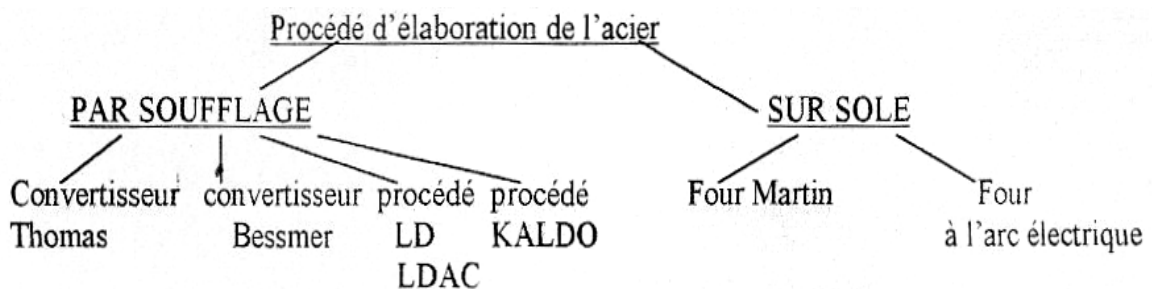
- Scorie à base de deux silicates. Système : $CaO-SiO_2-FeO$ (48 %, 15%, 14 %) obtenu lors de l'affinage des fontes pauvres en phosphore (procédés Martin, électrique et LD).
- Scorie à base de chaux de phosphate. Système : $CaO-P_2O_5, FeO$ (48 %, 21 %, 13%) obtenue lors de l'affinage des fontes phosphoreuse (procédés Thomas et LDAC).

2.3. 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, Bessmer, LD, LDAC et KALDO
- Les procédés à SOLE tels que le four Martin et le four à l'arc électrique.

Nous étudions en général chacun de ces procédés



2.3.1. Procédés par soufflage

2.3.1.1. Convertisseurs Bessmer et Thomas

C'est en 1857 que Henry Bessmer 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 Bessmer n'était pas mobile, par la suite, Bessmer l'améliora et ceci facilita toutes les opérations tels que chargement, coulée etc,

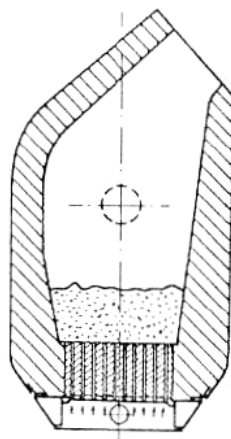
Le procédé Bessmer ne pouvait être destiné que pour le traitement des fontes non phosphoreuses et à très faible teneur en soufre, ce qui exige un revêtement du convertisseur à caractère acide (le garnissage du convertisseur est à la base de silice SiO_2). Donc il y avait le problème de traitement des fontes phosphoreuses, qui exigeaient un garnissage basique (à base de dolomite CaO , MgO) et c'est alors en 1856 que Gilchrist Thomas développa le procédé Bessmer, 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, ce 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.

2.3.1.2. Caractéristiques du procédé Bessmer

a. Construction du convertisseur :

La conception du convertisseur Thomas ou Bessmer est très analogue, la seule différence réside dans le caractère de revêtement intérieur (Bessmer acide et Thomas basique). Le convertisseur proprement dit sur la figure 98, est une grande cornue mobile d'une capacité variable de 10 à 75 tonnes et d'un diamètre intérieur de 4 à 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. 98)

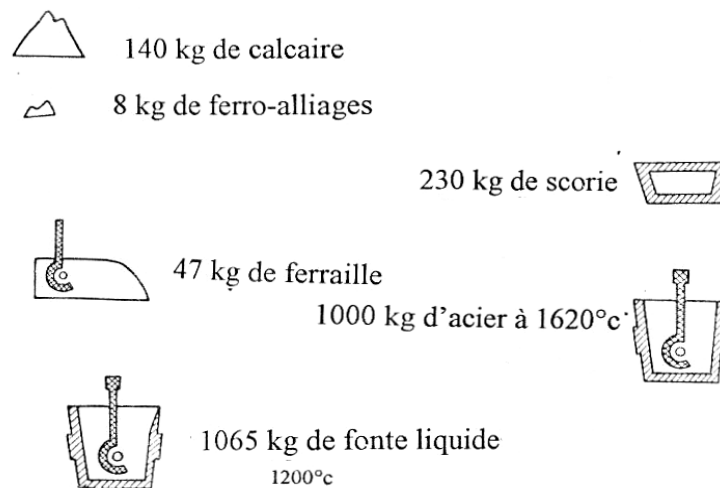
Généralement le convertisseur se compose :

- d'une base tronconique d'orifices appelés tuyères permettant le passage de l'air (boîte à vent.)

- Une partie tronconique qui se rapporte à la cuve et dont la partie super curé appeler 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 briqué réfractaire acide ou basique selon le procédé Bessmer ou Thomas. Entre le réfractaire et le blindage existe une couche appelée pise (sable, aggloméré, argile destine à réduire les chocs thermiques). Le garnissage d'un tel convertisseur peut durer jusqu'à 300 coulées.

b. Matières premières :

La figure 99 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 (1250°C) acheminée sur rail du haut-fourneau vers l'aciérie dans des mixeurs (mélangeurs).



(fig.99)

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

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

Les fontes Bessmer 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) : 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 varient en fonction de la capacité du convertisseur, en moyenne cette quantité est de 300 à 340 mm³ / tonne de fonte.

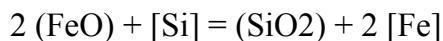
c. Marche d'une opération dans le convertisseur Bessmer (opération acide) :

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

- **Zone de soufflage** : Elle se trouve au-dessus des tuyères et qui est une zone de contact direct entre le métal et le liquide et l'air soufflé par les tuyères.
- **Zone de circulation** : C'est le reste du volume du bain métallique où 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 :

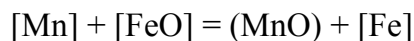
Le silicium : s'oxyde le premier et forme une scorie de silicate de fer et de manganèse qui monte à la surface du bain métallique. L'oxydation du silicium est accompagnée d'une élévation de la température



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



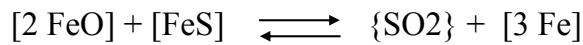
Il joue aussi un rôle régulateur en s'opposant à une trop forte oxydation du fer.



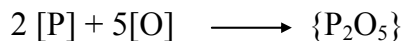
Le carbone : brûle rapidement et son oxydation donne principalement de l'oxyde de carbone sous forme libre ou combinée.



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



Le phosphore : L'élimination du phosphore est très importante pour le procédé Bessmer. Le phosphore est normalement éliminé sous forme de P_2O_8 , mais dans un milieu acide (Bessmer), 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 et 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, elle 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 de ferro-alliages que l'on ajoute avant ou après la coulée. L'oxygène inclus dans le bain métallique est éliminé par l'addition de ferromanganèse et s'il y a recarburation on ajoute des additions tels que le graphite, le coke ou le bois. La durée de cette période est de 20 minutes.

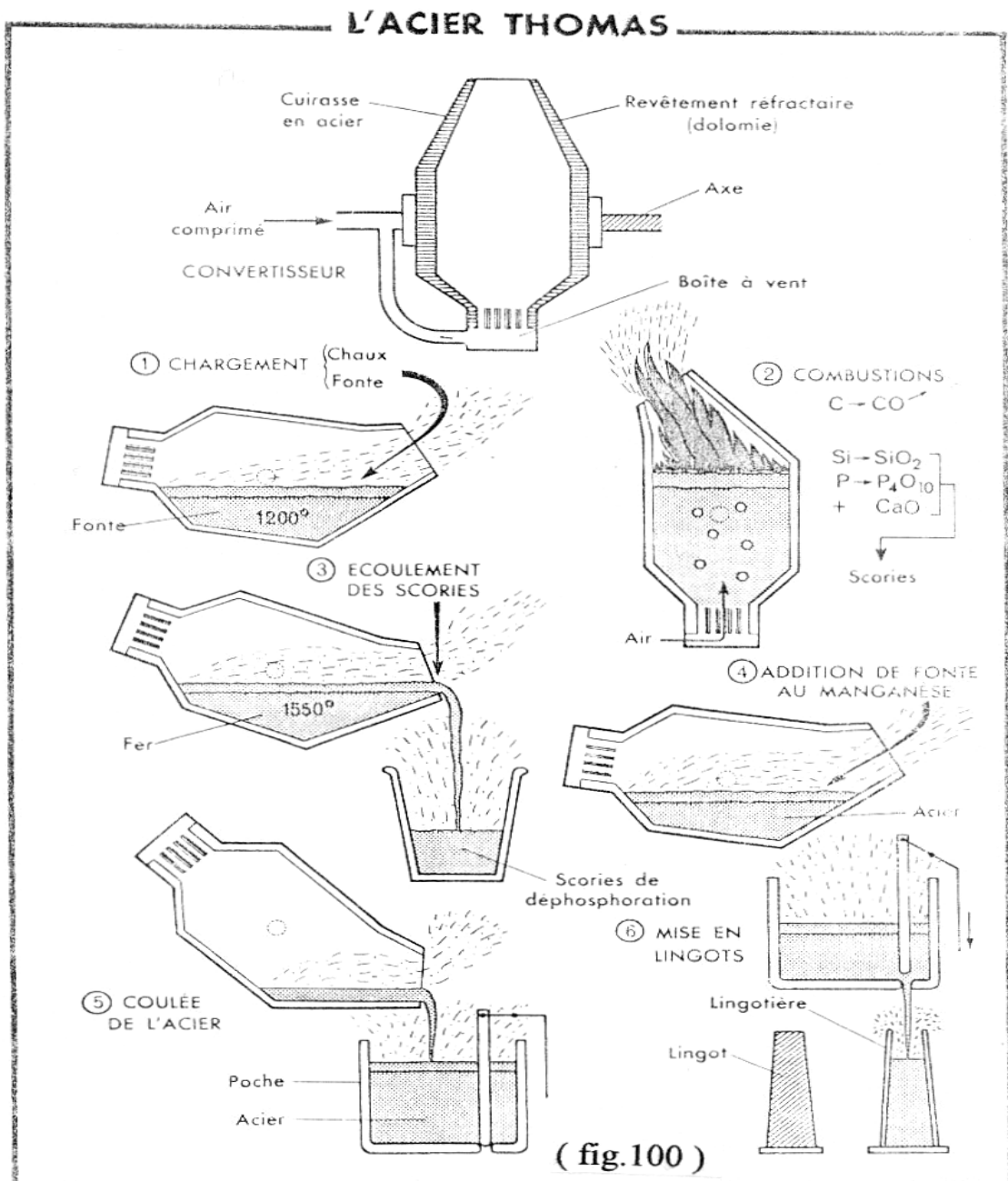
2.3.1.3. Caractéristique du procédé Thomas

a. Construction du convertisseur :

Après la mise au point du procédé Bessmer, 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 Bessmer, 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 Bessmer 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 Bessmer.



b. Matières premières :

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 riblons, minerais de fer, calamine : Ils possèdent deux fonctions :

- un apport d'oxygène sous forme d'oxyde de (FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, MnO, MgO).
- Une fonction de refroidissement du bain métallique, afin d'éviter des surélévations de températures.

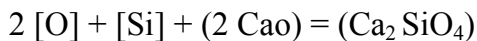
Les ferro-alliages : en général, on utilise le ferro-manganèse destiné à la désoxydation du bain métallique lors de la coulée.

Graphite, coke, bois : servent à la recarburation 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 : 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.

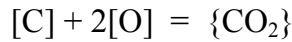
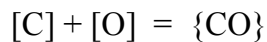


Le manganèse : s'élimine rapidement pendant les premières minutes, et son oxydation se poursuit lentement, car elle est concurrencée par la déphosphoration. A la fin de l'opération, la teneur en manganèse croît momentanément par retour du manganèse de la scorie au bain métallique.

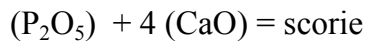
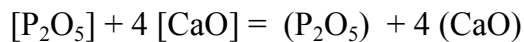
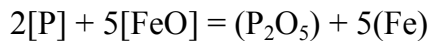


Le carbone : Suite à la faible quantité de silicium dans le bain métallique, le carbone s'élimine plus vite que dans le procédé Bessmer. Durant l'opération, la teneur de l'oxyde dans

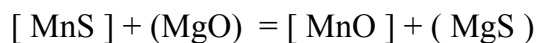
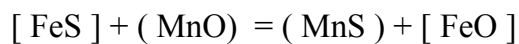
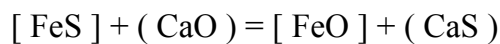
le bain est très basse, ce qui montre la grande vitesse avec laquelle le FeO est réduit par le carbone.



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 P_2O_5 .



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 est 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, elle est de 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 due 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 le graphite, le coke ou le bois.

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

2.4. 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 (Bessmer 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.
- Le 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 Bessmer 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 quantité de teneur en azote (0,002 à 0,005 %) et utilisent une grande quantité de ferraille (15 à 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, la lance peut être utilisée verticalement ou inclinée mais on peut distinguer deux types de réalisations selon que, pendant le soufflage, l'appareil :

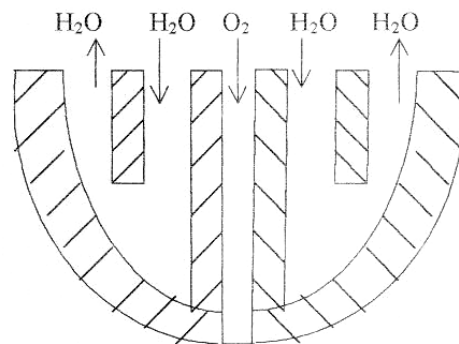
- a. reste immobile (procédé LD et ses dérivés tels que LDAC, etc....).
- b. est animé d'un mouvement de rotation (procédé KALDO, ROTOR).

2.4.1. Convertisseur à oxygène LD et LDAC

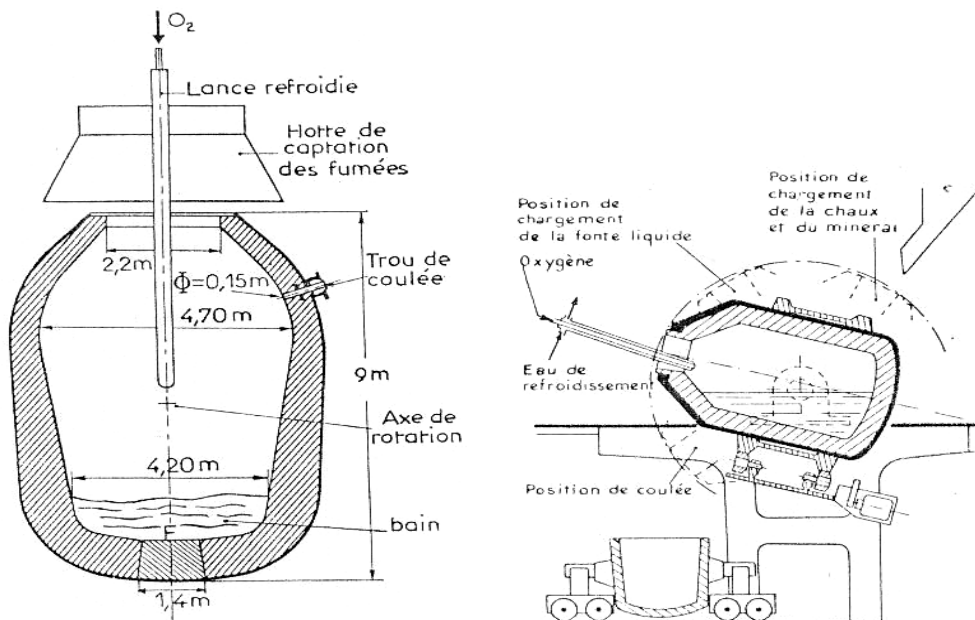
Le procédé LD peut traiter uniquement des fontes pauvres en phosphore vu le caractère de son garnissage qui est basique. Les fontes riches en phosphore sont traitées par les procédés dérivés de LD tels que le procédé LDAC. La déphosphoration du bain d'oxygène, mélangé avec de la chaux en poudre ou de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

2.4.1.1. Construction du convertisseur

C'est une dérivée du convertisseur Thomas, voir (fig. 102). La maçonnerie est basique, réalisée en briques de dolomie cuité. Le soufflage est effectué par l'intermédiaire d'une lance refroidie par l'eau, sous une pression de 0 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 (fig. 101).



(fig.101)



(fig.102)

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 dépolluage des fumées.

Les fumées contiennent environ 10 kg 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 dépolluées dans une tour de lavage, ou filtre électrostatique ou dans un appareil à sacs filtrants

2.4.1.2. Matières premières

Les principales matières premières 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%) et l'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 donnée ci-dessous :

C	Si	Mn	P	S
4,2 à 4,3 %	0,5 à 0,7 %	0,2 à 0,5 %	1,8 à 1,9 %	0,03 à 0,04 %

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

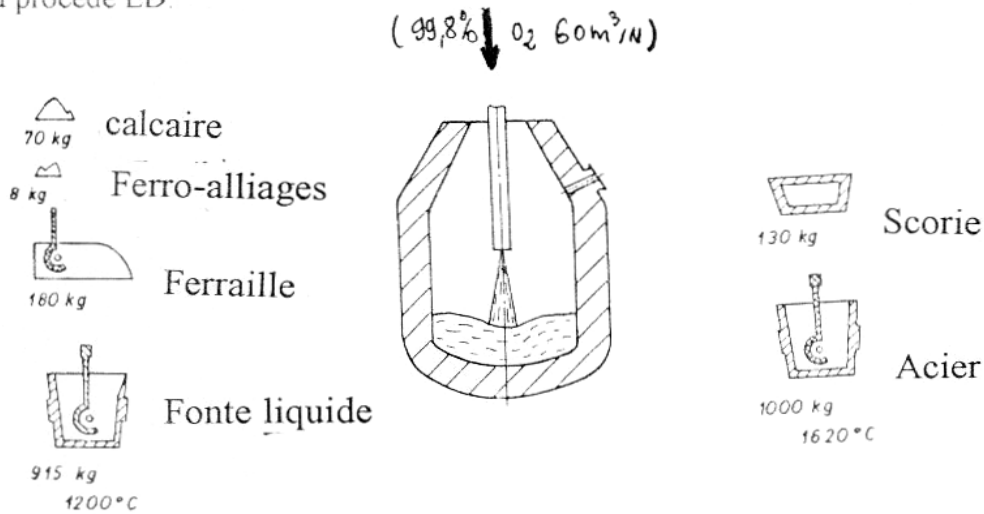
c. Les fondants : tels que la chaux, le calcaire, la bauxite, les minerais de fer ont le rôle de :

- 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. elles sont utilisées sous forme de ferro-alliages tels que ferre-manganèse, ferre-silicium ferre-chrome ou silico-manganèse.

La figure 103 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.

cas du procédé LD.



(fig. 103)

2.4.1.3. Marche de l'opération

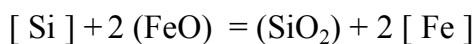
L'introduction de la charge s'effectue quand le convertisseur est en position horizontale. On commence par le chargement de la ferraille, ensuite la fonte liquide et 2/3 de la masse totale des fondants nécessaires, le reste est ajouté vers le milieu du soufflage avec le minerai de fer destiné au refroidissement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

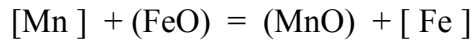
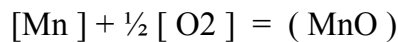
2.4.1.4. Réactions d'oxydations

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.

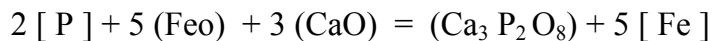
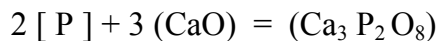


En présence de la chaux, il forme la scorie a base de $(\text{SiO}_2) + (\text{CaO})$.

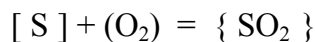
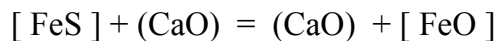
Le manganèse : L'oxydation du manganèse commence avec celle du silicium et dure de 3 à 6 minutes.



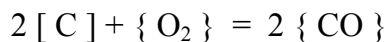
Le phosphore : La déphosphoration se déroule comme dans le convertisseur Thomas à la surface scorie-métal et elle est conditionnée par la formation d'une scorie à base de CaO et Fe.



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

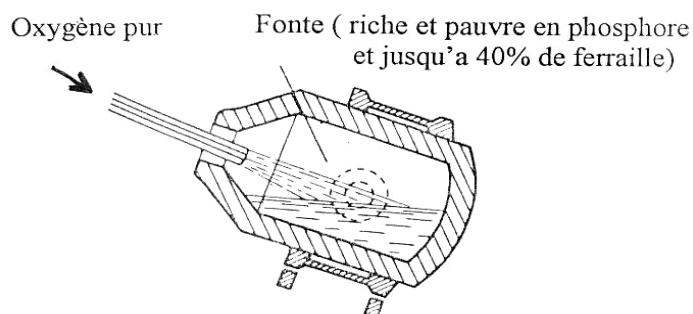


Le carbone : L'oxydation du carbone commence directement avec le soufflage à la couche supérieure en contact avec la lance, ensuite le processus de décarburation se prolonge et passe dans le bain métallique, les bulles de CO qui se forment vont provoquer une ébullition qui donnera naissance à un mélange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



2.4.2. 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 est animé d'un mouvement de rotation autour de son axe avec une vitesse de 30 trs/min, voir (fig. 104).



(fig.104)

Le soufflage s'effectue à l'aide d'une lance inclinée de 30 à 40° par rapport à l'axe horizontal du convertisseur. La pression de soufflage de l'oxygène est de 3,5 à 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 étant 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 liquidé 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.

2.4.3. Les aciers à oxygène

Les convertisseurs à oxygène sont qualifiés surtout pour produire les aciers doux non alliés, les aciers spéciaux avec 0,05 à 0,1 % C, les aciers durs, les 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.

2.5. Le procédé 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, voir (fig. 105).

Les régénérateurs sont destinés à récupérer la chaleur des gaz de fumées qui se forme lors de la combustion du mazout et éventuellement celle du gaz naturel et du mazout avec l'air, produit par la soufflerie.

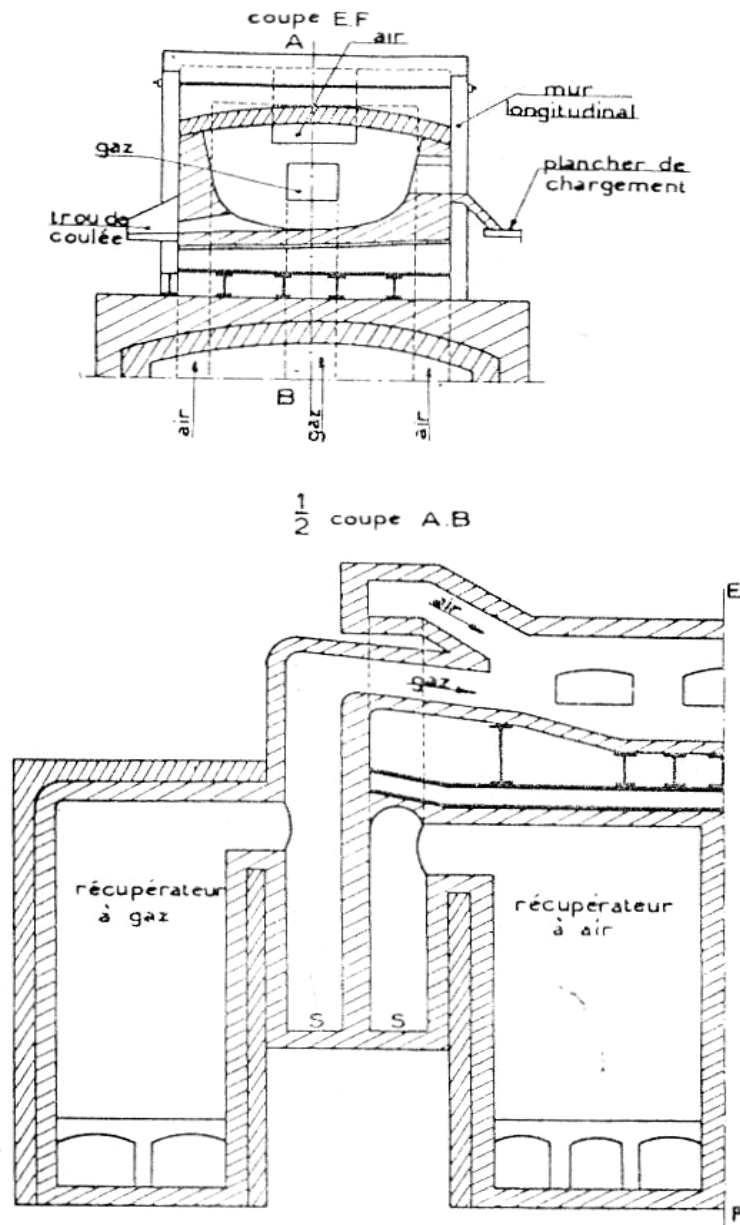
Les fumées avec une température avoisinant 1500°C passent dans la chambre à crasse où s'effectue l'opération de dépoussiérage. Le changement de direction et l'élargissement brusque du volume provoquent la précipitation des particules solides contenues dans les fumées et en passant par le régénérateur, une partie de la chaleur de ces fumées est absorbée par l'empilage réfractaire du régénérateur, donc il y a emmagasinage de la chaleur, ensuite elles se dirigent vers l'extérieur par la cheminée avec une température avoisinant 600° C.

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 soif lie du régénérateur, l'air est chauffé à une température de 1200° 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.105)

2.5.1. Types du procédé Martin

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

a. Scrap-procédé :

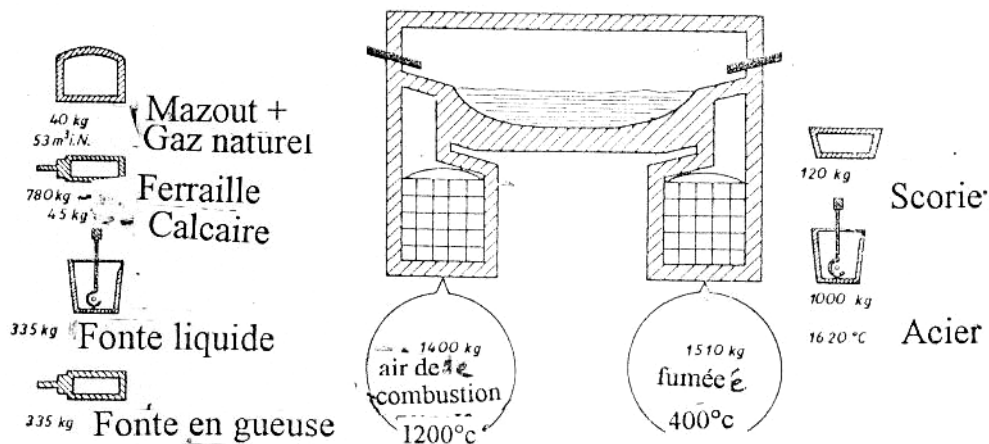
Le revêtement du four peut être basique ou acide. Dans ce procédé, la matière première est constituée essentiellement de la ferraille et de la fonte liquide ou solide (en gueuse). La proportion de la fonte est de 20 à 40 % de la charge totale et dont les composants tels que le silicium, le soufre et le phosphore ne doivent pas dépasser respectivement 1 %, 0,05 % et 0,015 %.

b. Procédé à fonte liquide :

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

2.5.2. Marche générale de l'opération dans le four Martin

La figure 106 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.106)

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 des 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 (érodés) du garnissage ainsi que bouchage du trou de coulée. Cette opération dure de 40 à 90 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 et minerais de fer) pour le procédé Scrap-basique et le sable de quartz et la scorie acide de la coulée précédente sont introduites 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 à 120 minutes.

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 par un bouillonnement uniforme du bain recouvert par la scorie.

A la fin de la fusion, on effectue le décrassage de la scorie et le 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.

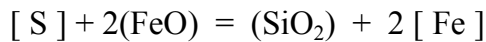
2.5.3. Affinage du bain métallique

L'affinage du bain métallique est très nécessaire pour :

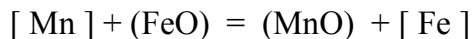
- La désulfuration du métal.
- La déphosphoration du métal.
- Le bouillonnement du bain métallique.
- Le chauffage du bain jusqu'à la température de coulée exigée.

Les réactions essentielles durant l'affinage sont :

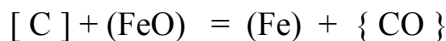
- L'oxydation complète du silicium qui s'effectue à la fin de fusion.



- 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)



2. Fours à induction :

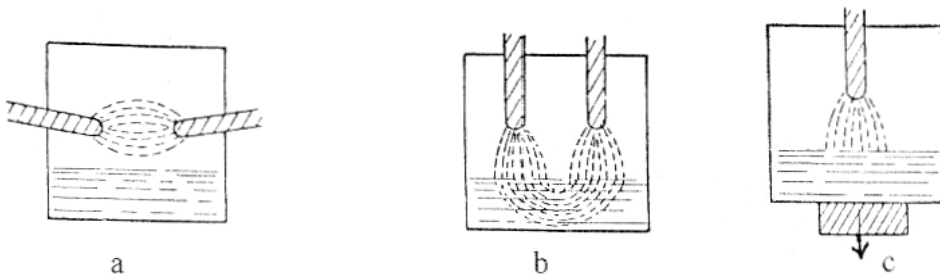
Le bain d'acier est chauffé par effet de Joule par le courant qui y est créée par induction par un courant alternatif.

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 les 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.

- Le courant ne passe pas dans le bain (fig.107a), l'arc jaillit au dessus du bain, le chauffage a lieu par rayonnement, convection et par réverbération sur la voûte.
- Le courant traverse le bain allant d'une électrode à l'autre, les électrodes étant hors du bain (fig. 107b).
- Le courant amené par une électrode, traverse le bain et sort par la sole conductrice (fig. 107c)



(fig.107)

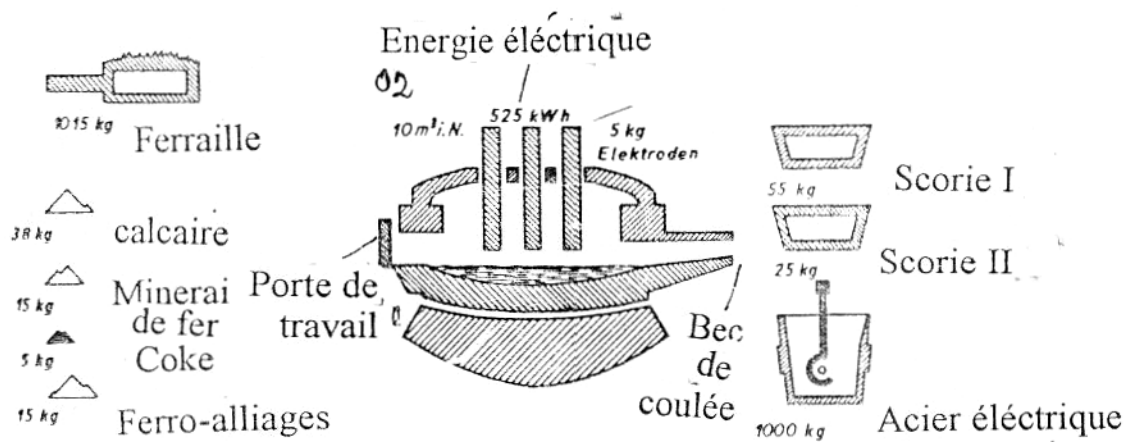
Les fours du premiers type donnent lieu à une mauvaise répartition de la chaleur dégagée. Les fours à sole conductrice (dont plusieurs types sont encore en service) tendent à être abandonnés en raison de la fragilité de la sole qui est essentiellement constituée par un mur en pisé de magnésie. Le four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

2.6.2. Le four Heroult

Le principe de ce procédé a été défini par P. Héroult et le premier four a été mis en service en 1906. Le four (fig. 108), a une forme circulaire avec un système de basculement permettant la coulée de l'acier et de la scorie, sa capacité peut atteindre jusqu'à 400 tonnes.

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

Schématisons ci-après, le bilan de matière, d'un procédé avec deux scories, pour la production de 1000 kg d'acier, (fig. 108).



(fig.108)

Schéma du bilan de matière (procédé avec deux scories) pour la production de 1000kg

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 : fissurer leur raccordement et régler la longueur de l'arc électrique, c'est à dire, régler 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 de 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 offrant l'espace de travail du four de l'extérieur par une voûte mobile. La possibilité de travailler avec une scorie oxydante ou réductrice 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 et 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

2.6.3. 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 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), car la rouille contient du H_2 , 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. Rebus 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 et la chaux qui sont destinées pour former la scorie basique.

- 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 de soufre et d'humidité.

e. Le sable de quartz : Il est 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 : Il est employé comme oxydant, il doit contenir peu de soufre et de phosphore. Le plus employé est le Fe_2O_3 .

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

- Chargés dans le four :
 - Fe-Mn (Mn : 76 à 80 %, Fe : 12 à 14 %)
 - Fe-Si (Si : 10 à 90 %)
 - Fe-Cr (Cr : 70 %)
 - Fe-Va (35 à 80 %)
 - Fe-Ti (35 à 50 %)
- Dosage de l'acier :
 - Si-Al (Si : 30 à 75 %, Al : 20 à 50 %)
 - Si-Ca (Si : 60 à 64 %, Ca : 34 à 36 %)
 - Fe-Si (Si : 10 à 90 %)
 - Fe-W (W : 80 %)
 - Fe-Mo (Mo : 60 %)

On utilise aussi l'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).

2.6.4. Marche d'une opération dans le four électrique

Une opération au four à arc électrique comporte des étapes de procédures nettement distinctes qui 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, et la période de réduction 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'effectue 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.

2.6.5. Classification des aciers selon le procédé d'affinage et le pourcentage de carbone

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

Comme l'acier est élaboré principalement a partir de la fonte, donc selon les procédés d'affinage, on distingue les aciers divers suivants obtenus à partir de la :

a. Fonte non phosphoreuse :

- Convertisseur Bessmer pour obtenir les aciers ordinaires (Classe A ou E).
- Convertisseur à oxygène pour obtenir les aciers ordinaires et fins (Classe A ou E).

- Four Martin pour obtenir les aciers fins et faiblement alliés (Classe XC).
- Four électrique pour obtenir les aciers fins et alliés (Classe XC).

b. Fonte phosphoreuse :

- Convertisseur Thomas pour obtenir les aciers ordinaires (Classe A ou E).

Une classification largement répandue selon le pourcentage de carbone dans l'acier comme le montre le tableau suivant :

Acier	% 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, fre.
Très dur	0,60 < C < 0,75	Outils, fraise, scie
Extra-dur	C > 0,75	Outils de tour, câbles, roulements

2.7. Coulée de l'acier

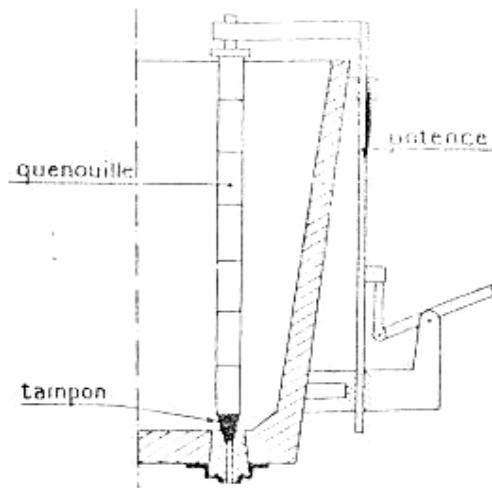
Avant sa solidification, l'acier est coulé selon plusieurs procédés dont notamment :

- Soit dans des moules en sables pour obtenir des pièces de fonderie.
- Soit 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, (fig. 109), qui représentent un réservoir conique en tôle épaisse revêtue intérieurement de briques réfractaires. La figure 109 représente une demie vue de la poche en coupe. La quenouille est destinée à soulever le tampon du siège (ouverture dans son fond par laquelle s'écoule l'acier de la poche).

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 90 minutes. 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.

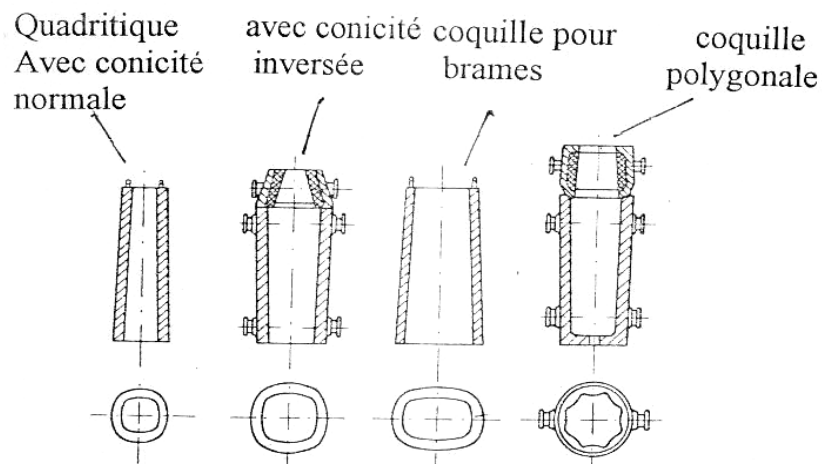


(fig. 109)

2.7.1. Coulée en lingotières

Les lingotières sont en fonte et peuvent avoir des formes et sections variables telles que la forme carrée, rectangulaire, hexagonale etc. (fig. 110), 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, leur 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.



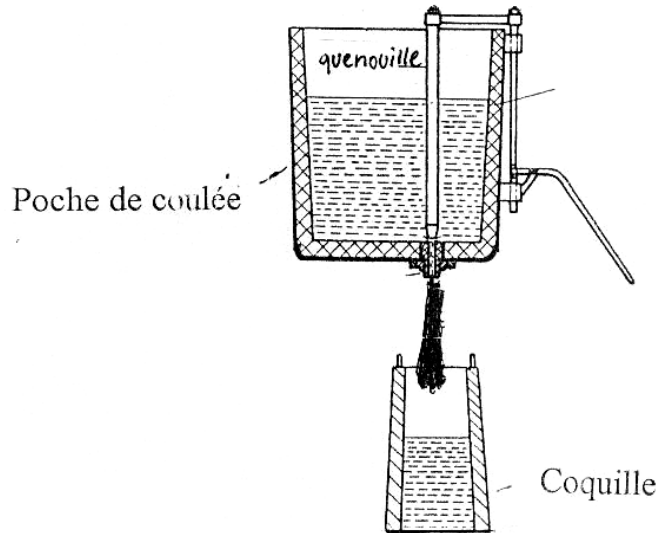
(fig. 110)

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 (fig. 111). Au début, pour éviter les projections du métal sur les parois, l'acier est coulé lentement, une fois que la couche amortissant le métal liquidé 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 à 20 tonnes est de 2 à 8 minutes.



(fig. 111)

Beaucoup de métaux présentent un déficit de volume après leur refroidissement (pour le fer il est de 8 à 9 %). Ce phénomène est appelé contraction et conduit à la formation de retassure dans la partie supérieure du 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.

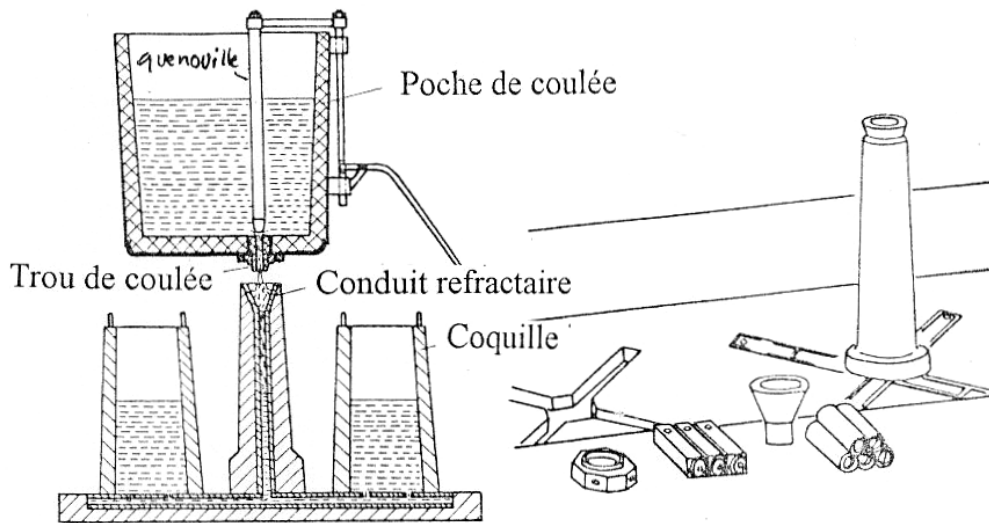
b. La coulée en source :

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), voir (fig. 112).

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 principal avantage, est de donner un métal de qualité nettement supérieur par rapport à celui obtenue dans la coulée en chute.

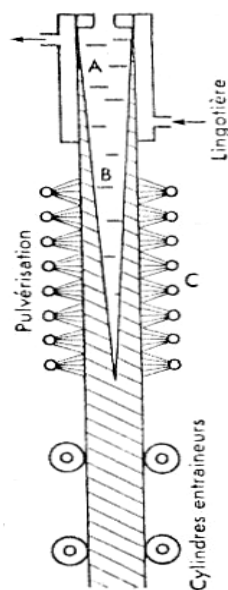


(fig.112)

2.7.2 La coulée continue

La coulée continue est un procédé moderne permettant d'obtenir des demi-produits destinés aux opérations telles que le laminage, le forgeage etc. Une ligne de coulée continue (fig. 113) 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 mètres, 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 l'eau coulée.



(fig.113)

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 restant à l'intérieur du métal non solidifié.

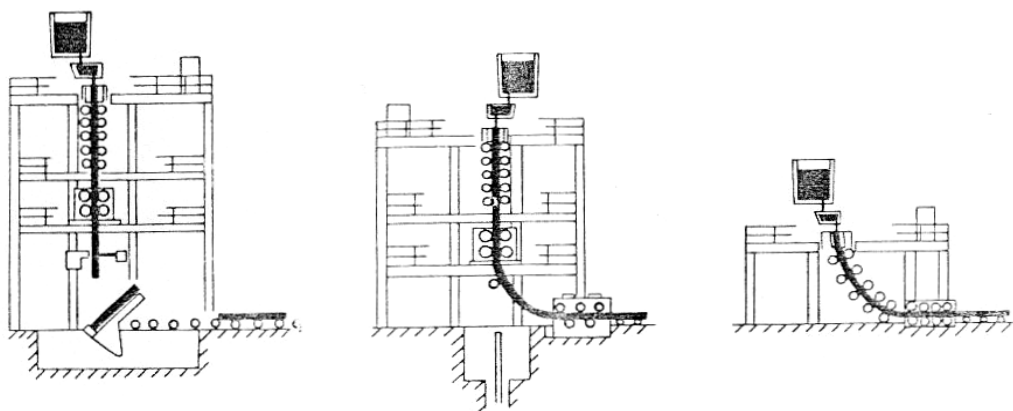
Afin d'éviter d'éventuels risques de rupture du lingot, l'épaisseur du métal solidifié doit atteindre au moins 20 mm à sa sortie de la lingotière. A ce moment, le jet d'acier est maintenu avec sa forme et ses dimensions initiales grâce à un corset formé d'un ensemble de cylindres entraînés. La solidification 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, appuyés 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 à 10 m/min et elle se détermine suivant la section transversale du lingot, voir le tableau ci-dessous.

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

d. 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 autres procédés grâce à sa rapidité, à l'économie en main d'œuvre et à la facilité de manutention. La figure 114 montre les différents types de construction du système de coulée continue.



(fig.114)

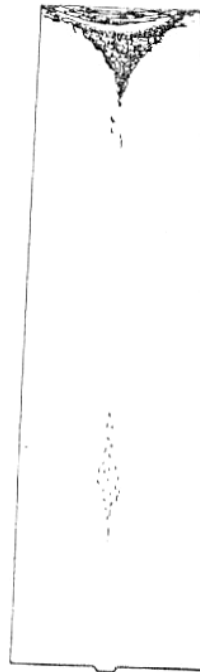
2.8. Différents types de coulée selon le degré de désoxydation

Il existe essentiellement trois types de coulées :

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

2.8.1. La coulée calmée (acier calmé)

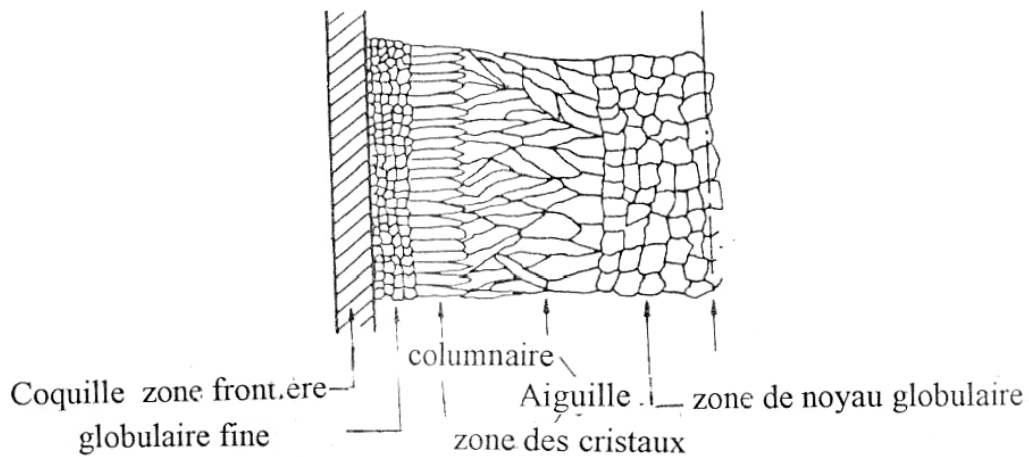
Ce type d'acier est complètement désoxydé ayant sa coulée, il est caractérisé par une faible teneur en $O_2 < (0,004 \text{ à } 0,006 \%)$, donc sa solidification s'effectue sans formation de souillure (porosité des gaz). L'acier liquide est désoxydé dans la poche de coulée par addition de silicium ou d'aluminium, généralement la quantité dissoute de ces éléments ne doit pas dépasser 0,20 % de silicium ou 0,020 % d'aluminium. La figure 115 montre la section d'un lingot d'acier calmé.



(fig.115)

Une caractéristique de l'acier calme est l'hétérogénéité qui peut 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 suite à 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 116 nous illustre la formation de la structure d'un lingot calmé avec les différentes zones de refroidissement.



(fig.116)

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 orientés, 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 l'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.

2.8.2. La coulée effervescente (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 à 0,02 % de carbone s'oxyde et forme 1,3 à 2,5 m³ de CO/tonne d'acier. Une partie de CO s'évacue pendant la solidification et le reste forme des bulles de gaz (soufflures) dans le bloc solidifié.

Selon le processus de solidification on divise le bloc solidifié (fig. 117), 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.117)

2.8.3 La coulée senti-calmée (acier semi-calmé)

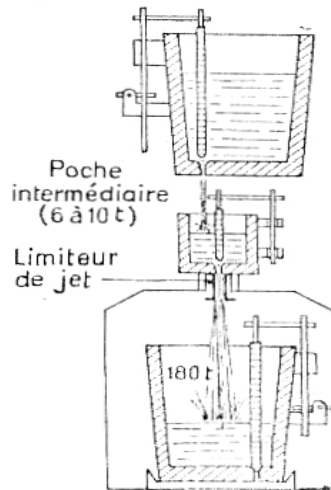
L'acier reçoit des désoxydants dans la poche de coulée, mais en quantité plus faible que l'acier calmé. La désoxydation du métal liquide s'effectue le plus souvent avec 0,1 à 0,15 % de silicium et de faible quantité d'aluminium.

La coulée semi-calmée est difficile à maîtriser, mais présente des avantages vis-à-vis du prix de revient.

2.9. 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 % d'hydrogène et un abaissement de la teneur en azote de 20 à 75 %. La figure 118 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.



(fig.118) :

2.10. Défauts des lingots

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

2.10.1. 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, à 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.

2.10.2. Retassures

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 effervescents ne présentent pas de poche de retassure, mais une infinité de soufflures. Afin de remédier à ce défaut, plusieurs procédés existent tels que :

a. Elimination 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.

b. 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.

c. 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.

d. 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 saint. La compression s'effectue par le haut ou le bas du lingot.

2.10.3. 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 dissout 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.

2.10.4. 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.