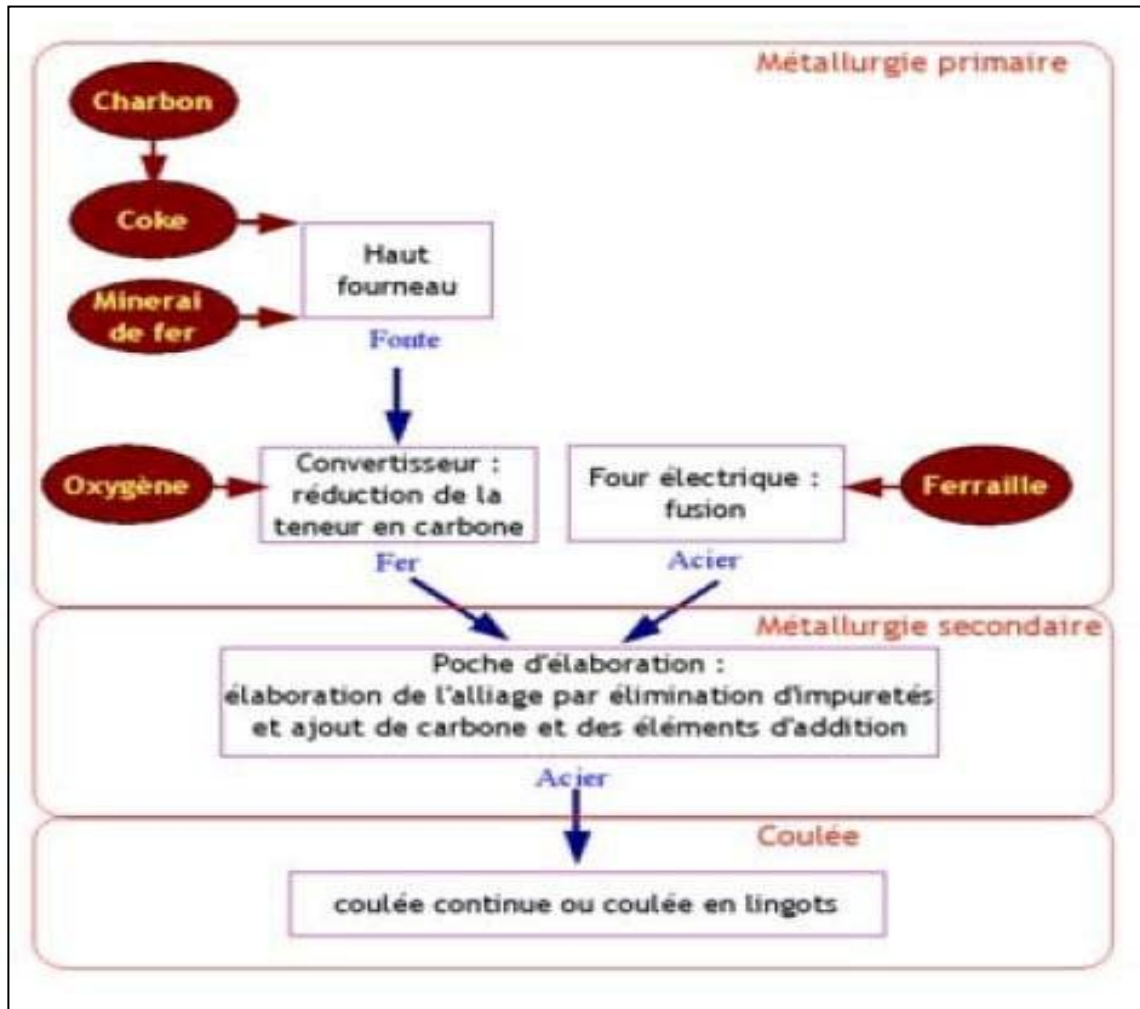


II. ELABORATION DE L'ACIER

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 de rétablir par des additions convenables les teneurs de ces éléments au niveau désiré.

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



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

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

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

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

La ferraille, le calcaire, les ferro-alliages et CaF_2 sont introduits dans les fours ou convertisseurs à l'état solide, dans certains cas sont chauffés au préalable. La fonte est introduite soit à l'état liquide (1250°C) dans le cas des procédés par soufflage d'air ou d'oxygène ce qui nécessite un préchauffage du four. La chaleur est obtenue lors de

l'oxydation des éléments alliés au fer dans la charge, ce procédé ne nécessite aucun apport de chaleur extérieure pour atteindre la température de fusion de l'acier (1600°C), soit à l'état solide, dans le cas des procédés des fours à sole, ce qui exige à fournir de la chaleur en grande quantité pour la fusion de la charge solide et atteindre la température de fusion de l'acier, la chaleur utilisée est la chaleur de combustion du combustible tels que mazout, gaz naturel ou énergie électrique.

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

II.1. Processus d'élaboration de l'acier

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

II.1.1. 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.

II.1.2. Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier

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

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

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

II.1.2.1. Influence des éléments chimiques constants

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

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

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

a) Le carbone

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

La ferrite une fois associée à la cémentite nous donne la perlite. Le carbone est l'élément qui a une grande influence sur les propriétés de l'acier. L'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement,

la striction et la résilience. Notons toute fois que la résistance commence à chuter à partir de 1,2% C. Les propriétés physiques changent aussi et on observe :

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

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

b) Le silicium

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

c) Le manganèse

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

d) Le phosphore

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

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

e) Le soufre

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A froid le soufre amène également une diminution importante de la résistance la teneur limite en soufre doit être inférieure à 0,035 + 0,06%, généralement inférieure à % de la teneur en manganèse. Parfois on utilise des aciers de décolletage riches en soufre ($0,015 \wedge 0,025$) % 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 , SiO_2 , Al_2O_3 (oxydes) et Fe_4N (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 H_2 s'observe souvent lors du soudage, l'hydrogène est alors une source de criques à froid dans le métal d'apport et de base. La coulée et fusion sous vide, diminuent sensiblement la teneur en H_2 dans l'acier.

II.1.2.2. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier

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

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

II.1.3. Périodes de la marche d'une opération d'affinage

a) 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 :



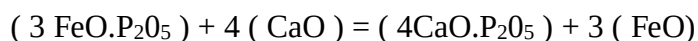
Lors de la décarburation le $| \text{CO} |$ obtenu n'est pas soluble dans le bain métallique ce qui permet l'élimination d'une grande partie du carbone et se crée un équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse. Donc l'apport de l'oxygène lors de l'affinage de l'acier joue un rôle important pour 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 pour chaque procédé est différent par exemple pour le procédé THOMAS 0,35% de carbone sont oxydés par minute et dans le procédé Martin (sans soufflage d'oxygène) seulement 0,003%-0,005% de carbone / minute sont oxydés, les causes sont dues à la formation de CO dans la sole et non dans le bain métallique.

b) Déphosphoration

L'élimination du phosphore de la fonte liquide joue un rôle important dans l'élaboration des aciers. Dans les aciers le phosphore ne doit pas dépasser 0,020 - 0,050 % (exception faite pour les aciers destinés aux outils de presse à chaud avec 0,1% de phosphore).

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

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



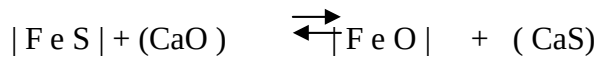
Le CaO est une base forte pouvant décomposer le FeO de sa liaison avec le P_2O_5 et par la suite peut se lier solidement avec le P_2O_5 . Pour une bonne oxydation et scorification du phosphore dissout dans le métal il faut un potentiel d'oxygène élevé dans la scorie et un pourcentage élevé d'oxygène dans le bain métallique. Le phosphore doit être éliminé avant d'atteindre de hautes températures c'est à dire l'élimination du phosphore ne semble donc pouvoir se faire qu'après décarburation totale du bain, car il y a le processus inverse, dissolution du phosphore dans le bain métallique et ça par la réduction du P_2O_5 par le carbone aux hautes températures. Cela signifie que la solubilité du phosphore dans le fer augmente avec la température.

c) Désulfuration

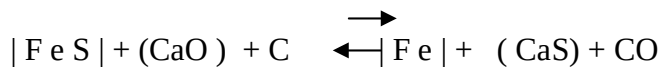
La désulfuration (scorification du soufre) consiste à éliminer le soufre dissout dans le fer et se passe seulement dans les conditions oxydantes. La teneur exigée en soufre dans les aciers ne doit pas dépasser 0,01 + 0,05%, car c'est un élément nocif et indésirable. A l'exception de quelques aciers dont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

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

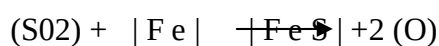
L'élimination du soufre se fait principalement par la réaction déjà rencontrée au haut-fourneau.



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



En général une désulfuration poussée nécessite une température élevée et un milieu basique et très réducteur. La désulfuration est difficile surtout dans le procédé Martin basique, car il y a formation de 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.

d) 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.

e) Élimination du manganèse et du silicium

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

f) 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 que CO) et de les lier solidement, c'est à dire entre la scorie et les deux phases (bain métallique et phase gazeuse) doivent exister des réactions.

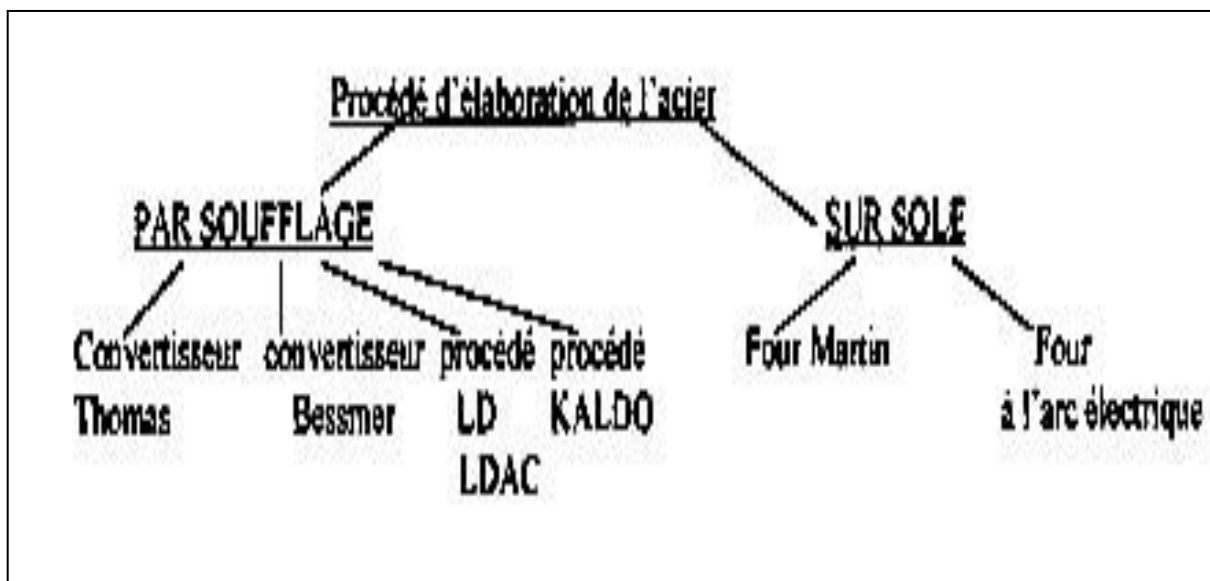
La scorie joue aussi un rôle important dans la désulfuration et déphosphoration du bain métallique aussi que l'élimination du silicium. Il existe deux types de scorie :

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

g) Procédés d'élaboration de l'acier

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

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



II.1. 4. Procédés par soufflage

II.1. 4.1. Convertisseurs Bessemer et Thomas

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

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

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

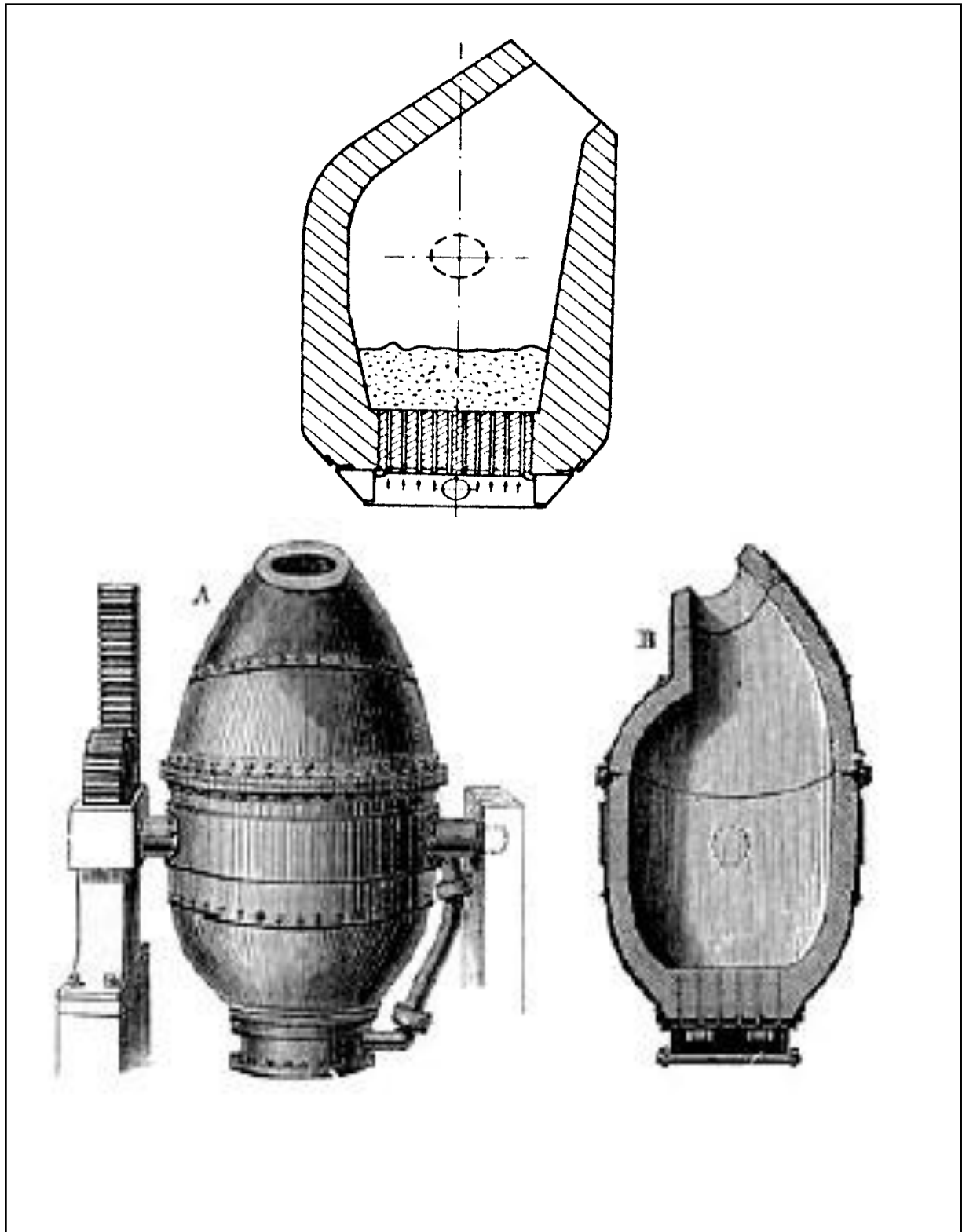
Caractéristiques du procédé Bessemer

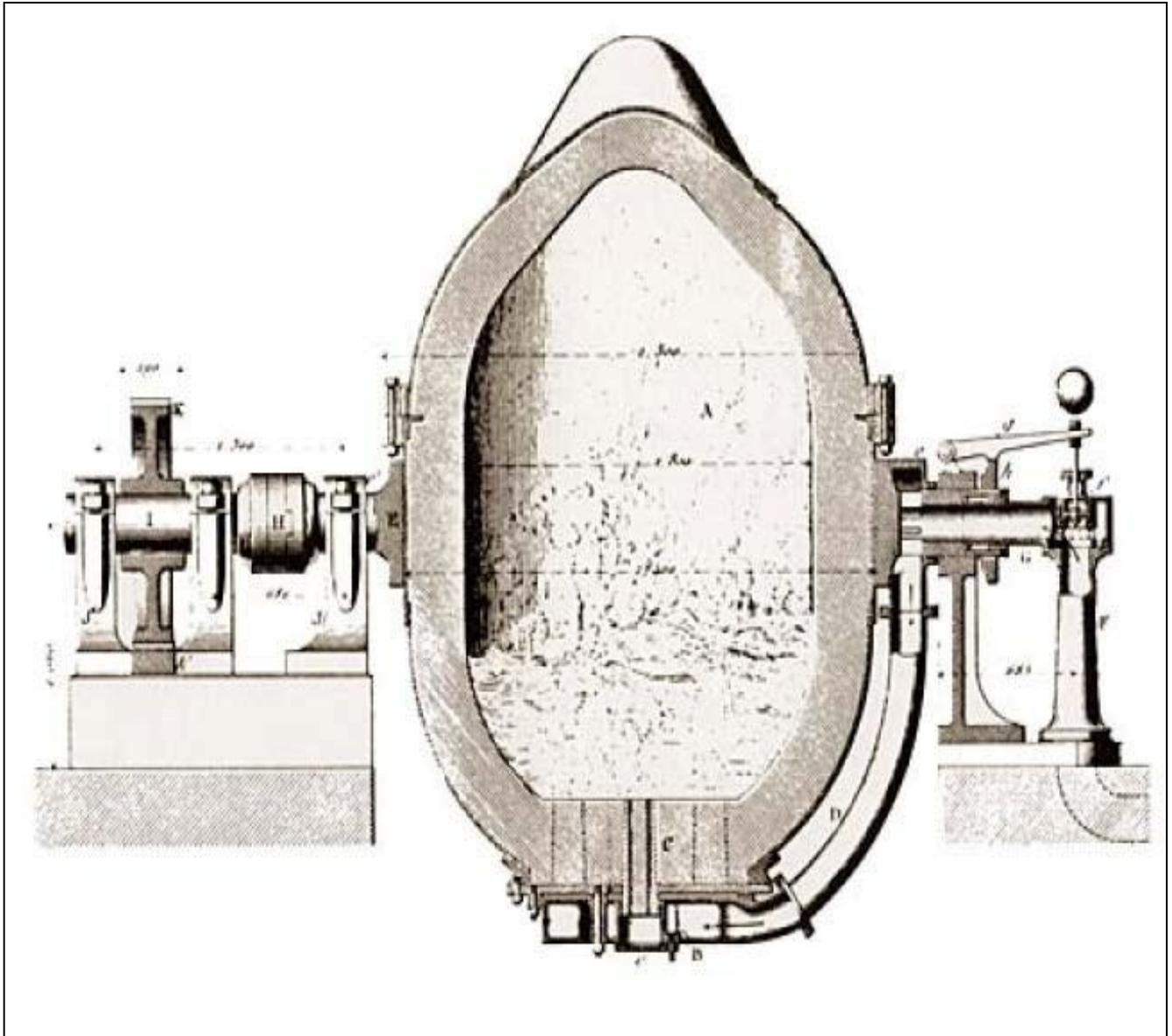
a) Construction du convertisseur

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

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

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





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 supérieure appelée Bec du convertisseur destiné au chargement et à la coulée. L'avantage de la forme donnée au Bec est de réduire les projections lors du soufflage et augmente le volume du convertisseur dans sa position horizontale.
- Le garnissage constitué de brique réfractaire acide ou basique selon le procédé Bessemer ou Thomas. Entre le réfractaire et le blindage existe une couche appelée Pise (sable, aggloméré, argile destiné à réduire les chocs thermiques). Le garnissage d'un tel convertisseur peut durer jusqu'à 300 coulées.

b) Matières premières

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

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

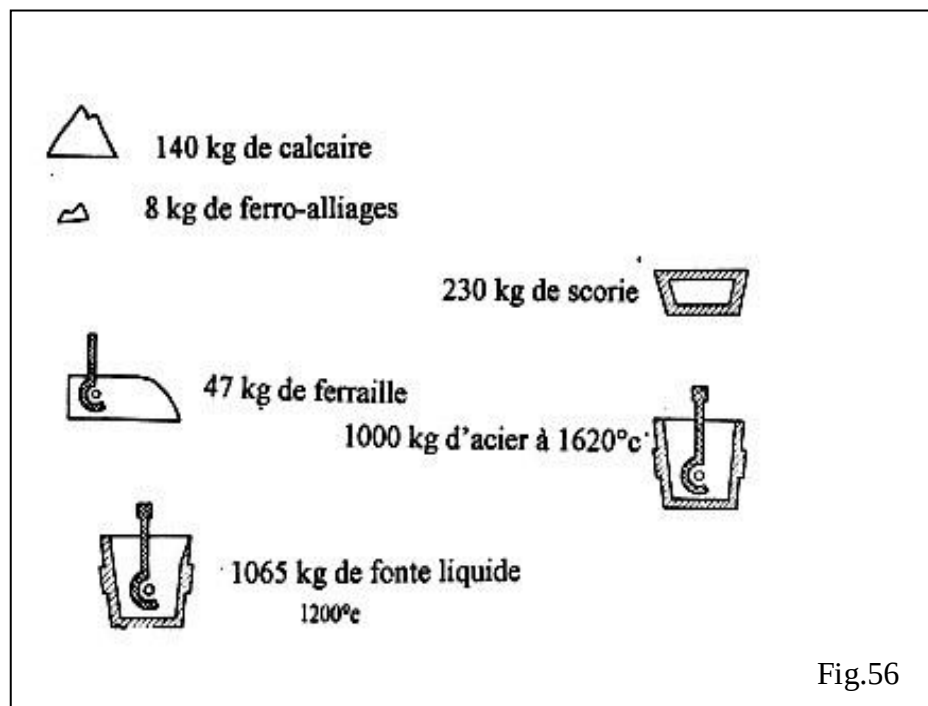


Fig.56

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

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

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

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

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

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

Les ferro-alliages (ferro-manganèse)

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

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

Oxydation

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

1- Zone de soufflage

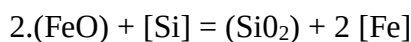
Elle se trouve au dessus des tuyères et qui est une zone de contact direct entre le métal et liquide et l'air soufflé par les tuyères

2-Zone de circulation

C'est le reste du volume du bain métallique ou le métal n'est pas en contact direct avec l'air soufflé, mais c'est dans cette partie que se déroule la totalité des réactions d'oxydation du bain métallique. L'ordre d'élimination des impuretés dépend de leur affinité pour l'oxygène et s'effectue selon l'ordre suivant :

Le silicium

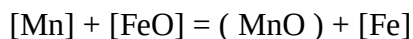
Le silicium s'oxyde le premier et forme une scorie de silicate de fer et de manganèse qui monte à la surface du bain métallique. L'oxydation du silicium est accompagnée d'une élévation de la température.



Le manganèse

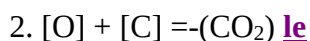
Le manganèse s'oxyde également dès le début mais il brûle moins vite que le silicium.

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



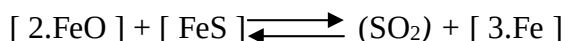
Le carbone

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



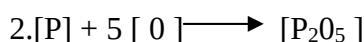
soufre

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



Le phosphore

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



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

d) Différents stades de la marche de l'opération

1-Période de scorification ou d'étincelles

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

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

2-Période de décarburation ou période des flammes

C'est la période la plus longue (8 à 12 minutes) et dépend surtout de la concentration en carbone dans le bain métallique et de la pureté de l'oxygène. Le carbone brûle en formant des oxydes tels que CO, CO_2 accompagné d'une flamme très éclairée virant vers le jaune et peut atteindre jusqu'à 4 mètres.

Avec la diminution du carbone, il y a augmentation de la concentration de l'oxyde dans le bain métallique, ce dernier permettra encore l'oxydation du silicium et du manganèse.

3-Période des fumées

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

4-Période de décrassage

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

5- Période de dosage ou de l'addition finale

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

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

II.1. 4.1. Caractéristique du procédé Thomas

a)Construction du convertisseur

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

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

b)Matières premières

Fonte Thomas

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

C	Si	Mn	P	S
---	----	----	---	---

34 à 0,8%	0,25 à 0,5%	0,3 à 1%	1,7 A 2,2%	<0,08%
-----------	-------------	----------	------------	--------

Les autres matières premières sont :

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

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

Ils possèdent deux fonctions :

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

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

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

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

Oxydations

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

Le silicium

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

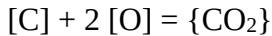


Le manganèse

Le manganèse s'élimine rapidement pendant les premières minutes et son oxydation se poursuit lentement, car elle est concurrencée par la déphosphoration. A la fin de l'opération la teneur en manganèse croît momentanément par retour du manganèse de la scorie au bain métallique. $[Mn] + [O] = (MnO)$

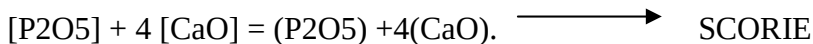
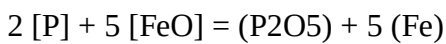
Le carbone

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



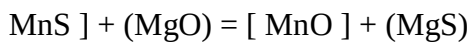
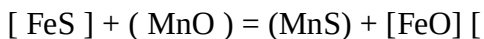
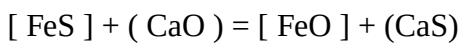
Le phosphore

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



Le soufre

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



d) Différents stades de la marche de l'opération

La mise en marche du convertisseur Thomas se fait comme dans le procédé Bessemer. 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 Bessemer. Elle caractérisée par une flamme courte, traversée par des étincelles et contenant de la poussière de la chaux.

2- Période de décarburation

C'est la période la plus longue 8 à 10 minutes. Lorsqu'on atteint les conditions idéales des décarburation, le bain devient plus visqueux, ce qui provoque un bruit intense et des vibrations

violentes lors du passage de vent à travers le bain métallique. Au début la flamme est jaune et devient blanche à la fin.

3- Période de déphosphoration

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

4- Période de décrassage

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

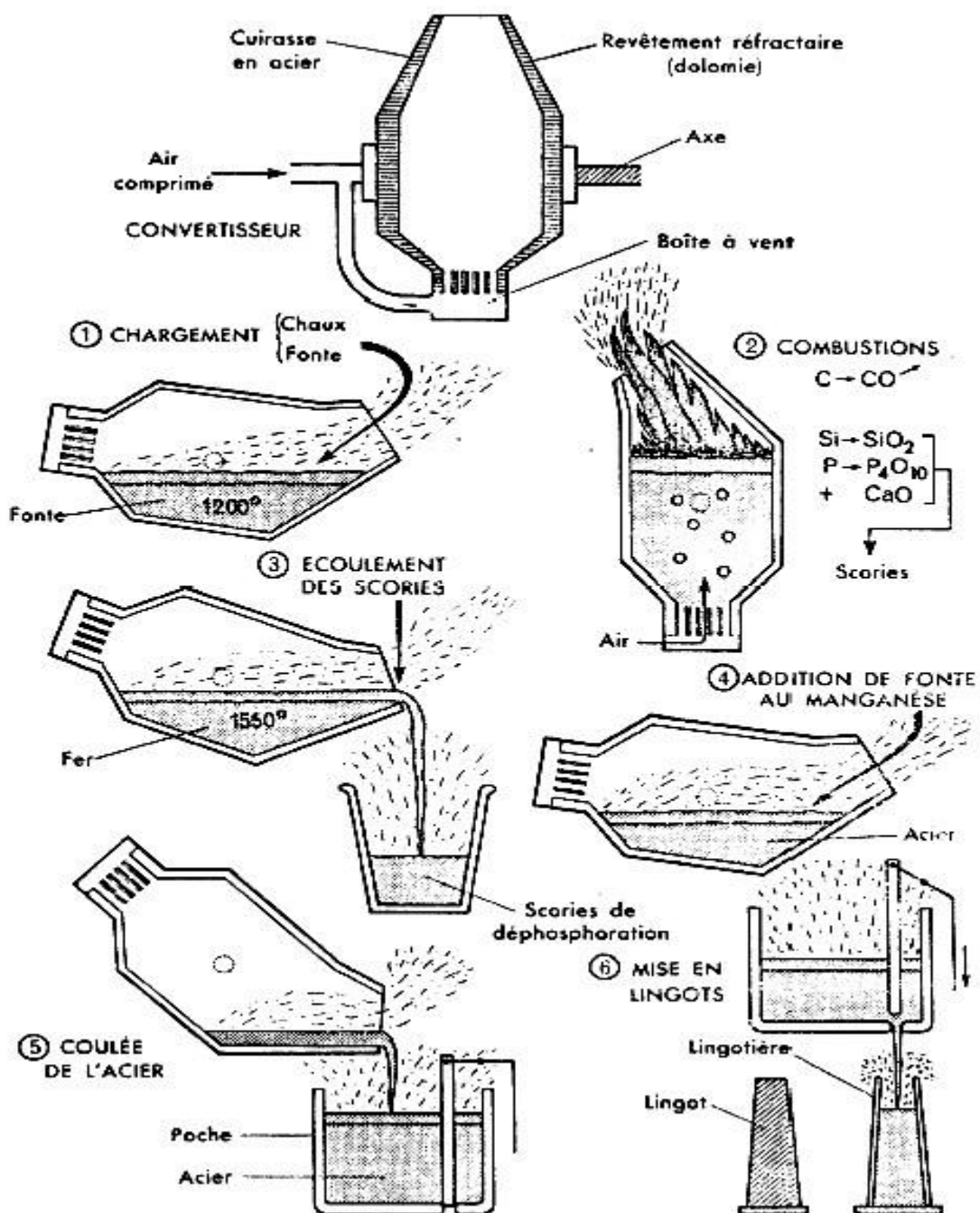
5- Période de dosage ou d'addition finale

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

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

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

L'ACIER THOMAS



II.1. 5. Convertisseur à oxygène

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

- L'emploi de l'oxygène au lieu de l'air, donc il y a absence d'azote.
- Soufflage à la surface du bain métallique à l'aide d'une lance métallique refroidie à l'eau et non pas par le fond du convertisseur (boîte à vent). Ce procédé a été développé dans les usines autrichiennes par L1NZ-DONAWITZ entre 1948 et 1952. Le premier convertisseur avait une capacité de 25 à 30 tonnes. Aujourd'hui la capacité peut atteindre jusqu'à 450 tonnes.

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

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

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

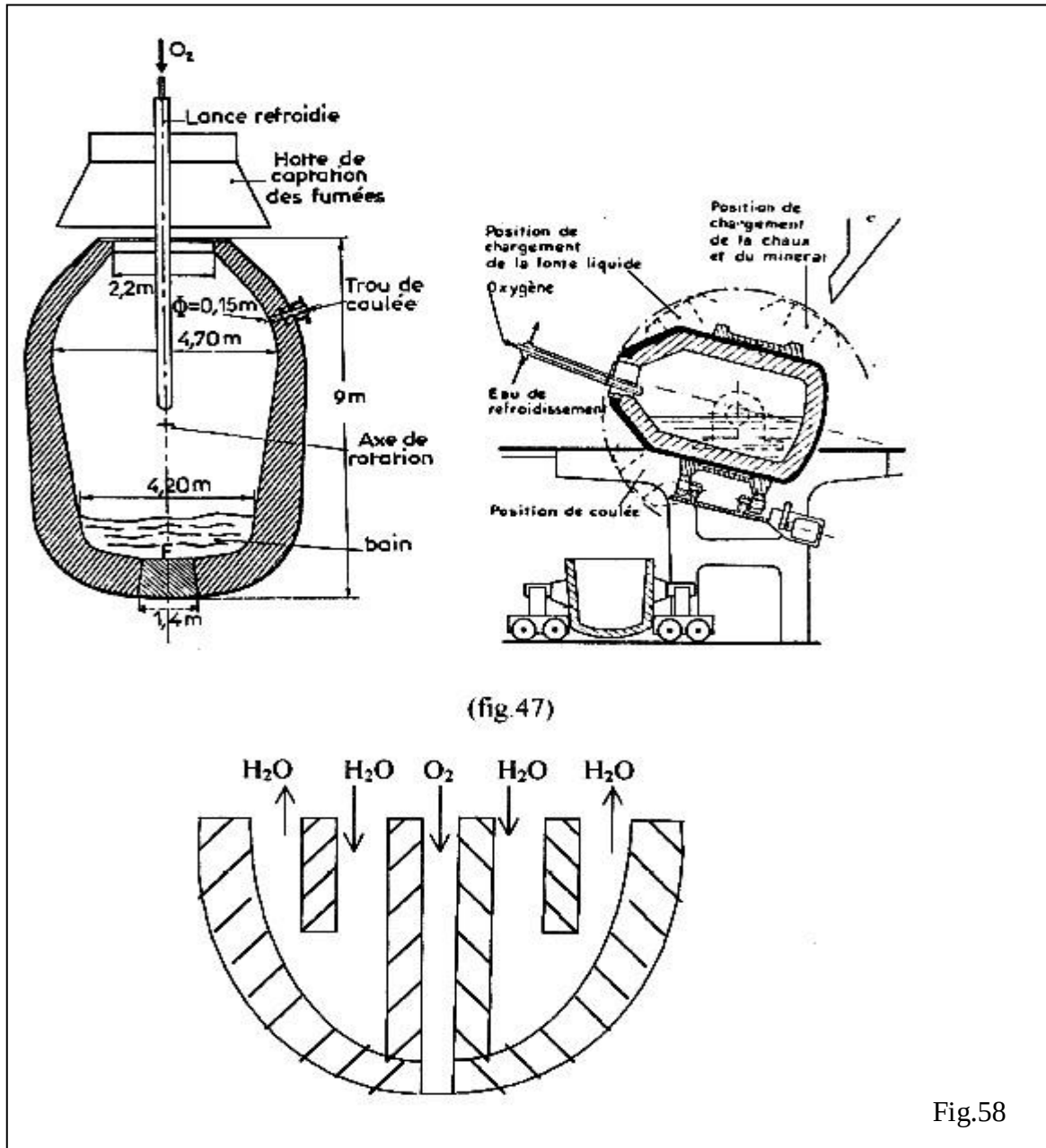
Convertisseur à oxygène LD et LDAC

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

Construction du convertisseur

C'est une dérivée du convertisseur Thomas. La maçonnerie est basique, réalisée en briques de dolomie cuite. Le soufflage est effectué par l'intermédiaire d'une lance refroidie par l'eau, sous une pression de 6 à 12 atmosphères, le soufflage se fait par dessus à une distance du bain de 0,3 à 1 mètre. La

consommation d'oxygène ($O_2 > 99\%$) est de 60 m^3 par tonne d'acier. La lance est constituée de trois tubes concentriques figure 58.



Le tube destiné au passage de l'oxygène et les deux autres permettent la circulation de l'eau de refroidissement. La coulée de l'acier s'effectue par le trou de coulée (orifice sur la partie du convertisseur). La réfection du garnissage s'effectue en moyenne après 700 opérations (coulées), les traitements de fumées est une question importante pour tous les procédés d'affinage à l'oxygène, qui

nécessitent le dépoussiérage des fumées. Les fumées contiennent environ 10kg de poussière (fer et oxyde) par tonne de fonte. Elles sont captées à leur sortie du convertisseur dans une hotte qui donne passage à la lance et à une goulotte d'alimentation pour les additions. Les fumées sont refroidies et dépoussiérées dans une tour de lavage, ou filtre électrostatique ou dans un appareil à sacs filtrants,

Matières premières

Les matières premières principales sont :

a) La fonte liquide

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

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

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

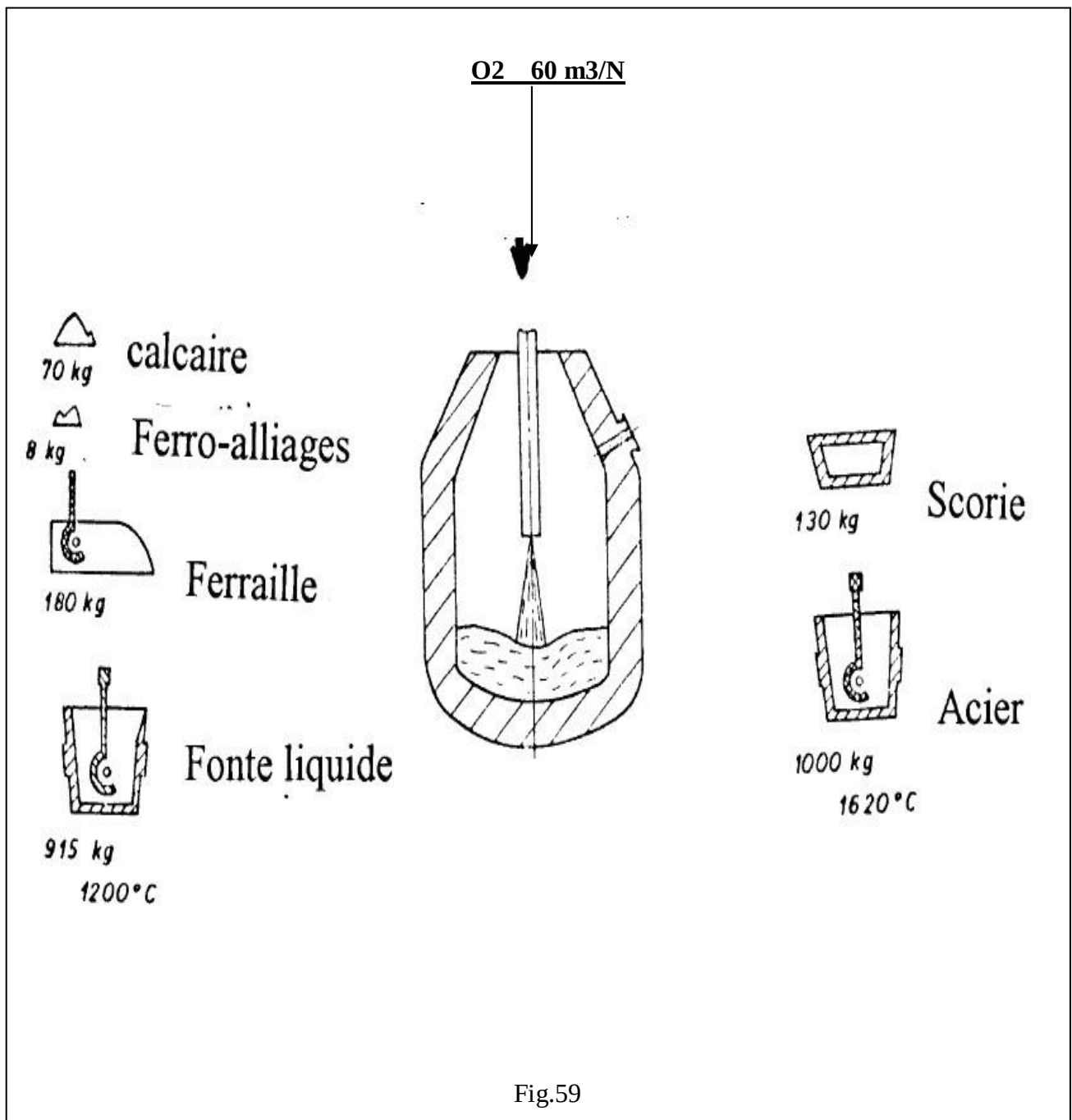
b)La ferraille : est une source permettant l'apport en fer (20 ~ 25%). L'utilisation de la ferraille est aussi avantageuse, car elle contient peu d'inclusion non métallique.

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

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

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

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



Marche de l'opération

L'introduction de la charge s'effectue quand le convertisseur est en position horizontale. On commence par le chargement de la ferraille, ensuite la fonte liquide et 2/3 de la masse totale des fondants nécessaire, le reste est ajouté vers le milieu du soufflage avec le minerai de fer destiné au refroidissement du bain. L'intensité des réactions à la surface métal-scorie dépend du débit d'oxygène et de la hauteur de la lance par rapport au bain, la durée du soufflage est de 20 minutes. Pour provoquer au début de formation intense de la scorie, on place la lance à une distance relativement importante du bain métallique, ce qui provoque l'oxydation du fer et de son passage à la scorie, ensuite la lance est approchée du bain

métallique et le soufflage est intensifié pour une meilleure partition de l'oxygène dans le bain et une oxydation du carbone.

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

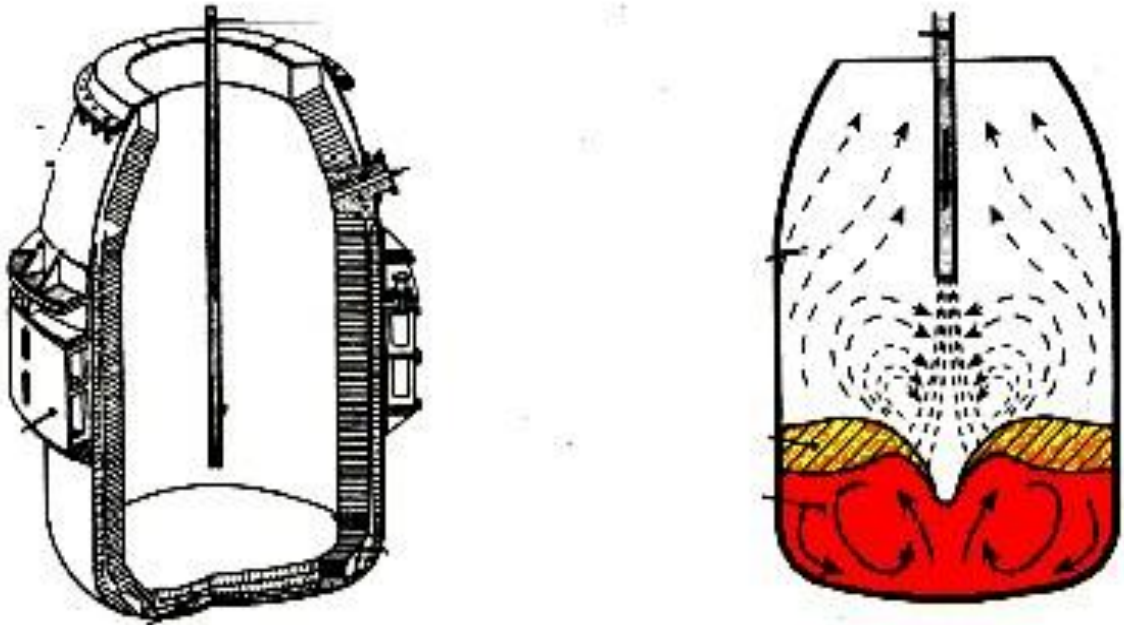


Fig.60

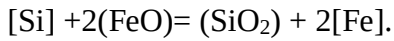
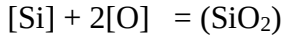


Fig.61

Réactions d'oxydations

Le silicium

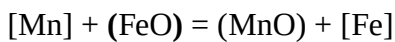
Grâce à son affinité par rapport l'oxygène, le silicium est le premier élément à s'oxyder en l'espace de 3 à 5 minutes. Tout le silicium est oxydé aussi bien dans le métal que dans la scorie.



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

Le manganèse

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



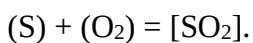
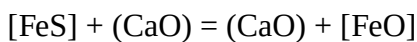
Le phosphore

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.



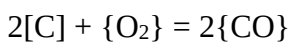
Le soufre

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



Le carbone

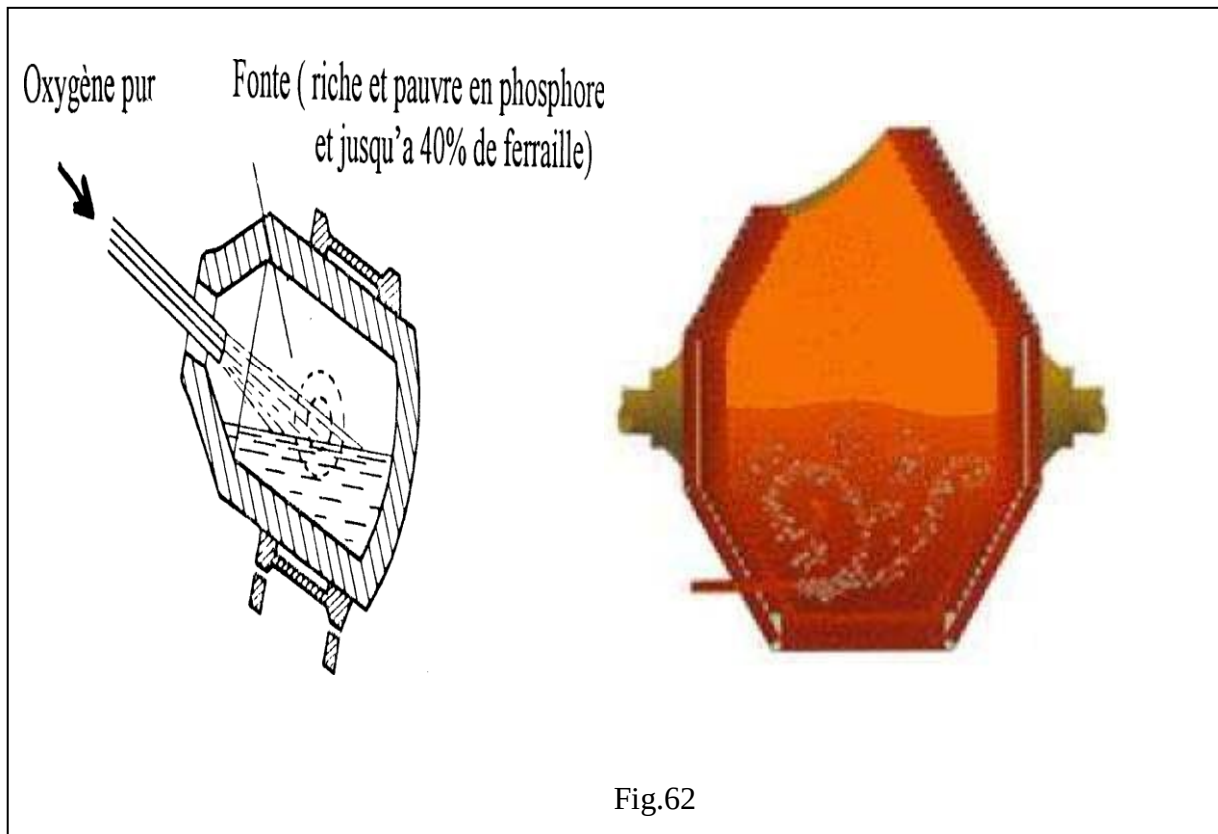
L'oxydation du carbone commence directement avec le soufflage à la couche supérieure en contact avec la lance, ensuite le processus de décarburation se prolonge et passe dans le bain métallique, les bulles de CO qui se forment vont provoquer une ébullition qui donnera naissance à un mélange acier, fonte,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



Procédé KALDO

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

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



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

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

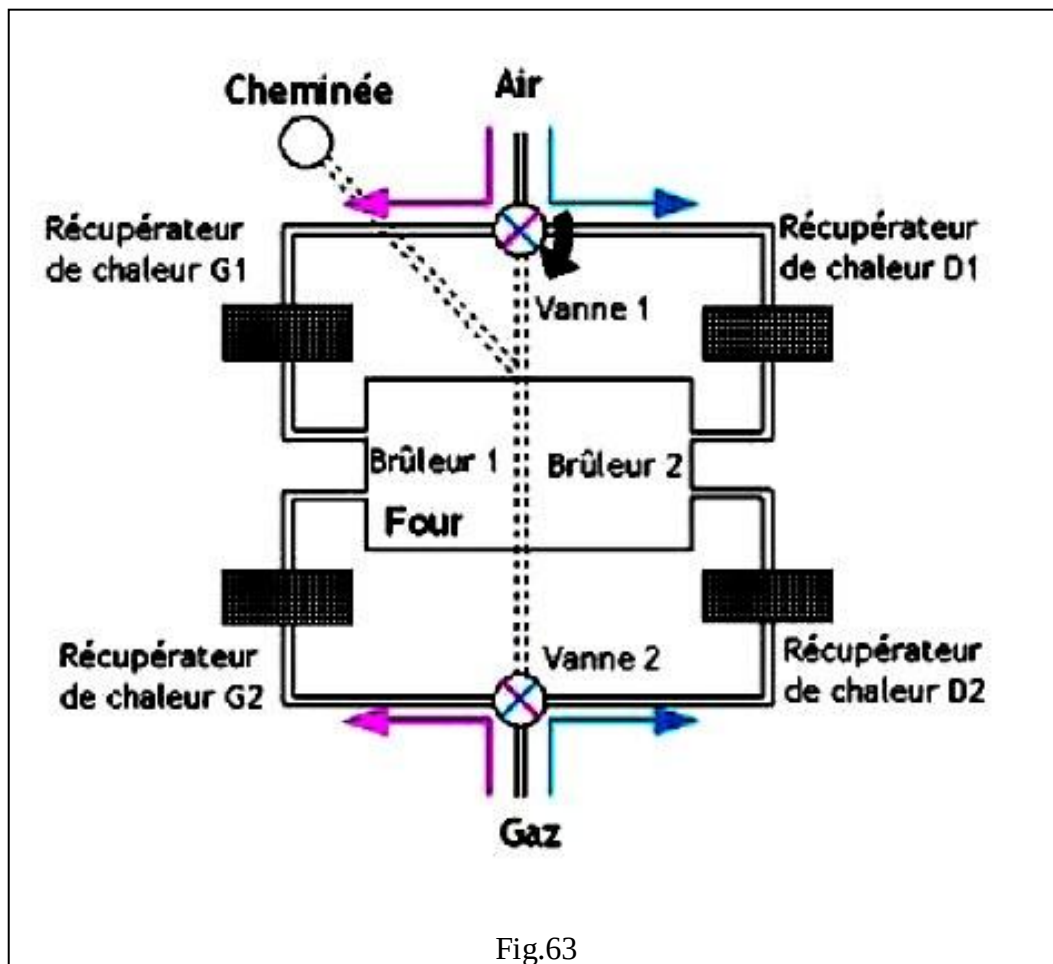
Les aciers à oxygène

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

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

II.6. Le procédé de Martin

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



Les régénérateurs sont destinés à récupérer la chaleur des gaz de fumées qui se forme lors de la combustion du mazout et éventuellement gaz naturel et mazout avec l'air produit par la soufflerie. Les fumées avec une température avoisinant $1500^{\circ}C$ 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.

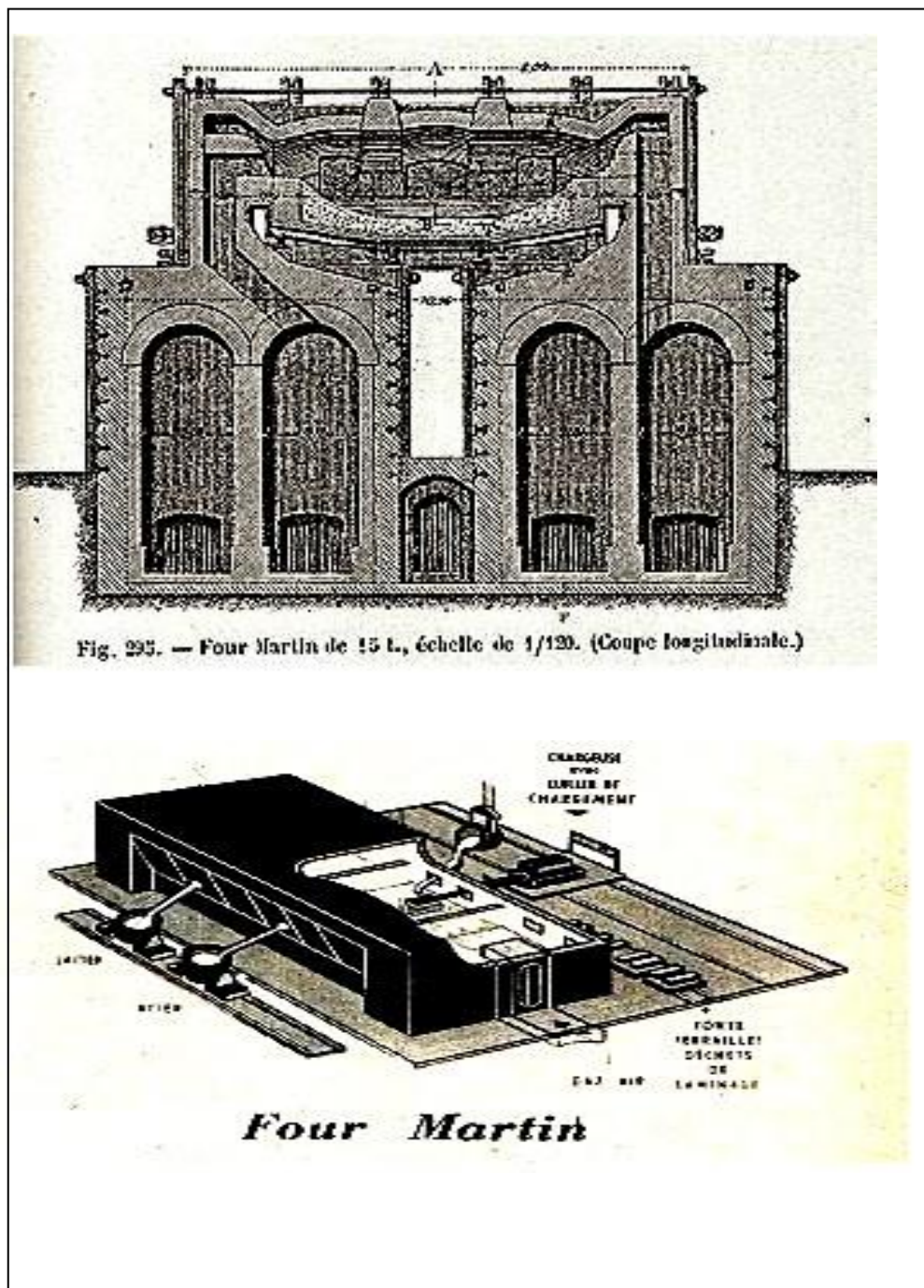


Fig.64

Les pertes de chaleur dans le four Martin sont très importantes et cela est dû à la durée de fusion de la charge qui est très longue et à la haute température des fumées qui s'échappent vers l'extérieur. Pour accélérer le processus d'affinage, parfois on a recourt à des éléments d'oxydation (minerai de fer), ou à l'utilisation de l'oxygène soufflé par des lances directement dans le bain métallique. Donc une partie de la chaleur de combustion produite par la flamme ($T = 1800$ à 1900°C) est absorbée par

la charge métallique dans le four par rayonnement et l'autre partie est absorbée par l'air froid lors de son passage dans les régénérateurs. A la sortie du régénérateur l'air est chauffé à une température $T = 1200^{\circ}\text{C}$, ce dernier est utilisé pour la combustion du combustible, donc il y a apport de la chaleur par l'intermédiaire de l'air chaud provenant des régénérateurs. L'atmosphère dans l'espace de travail du four est très oxydante à cause de l'excédent d'air lors de la combustion.

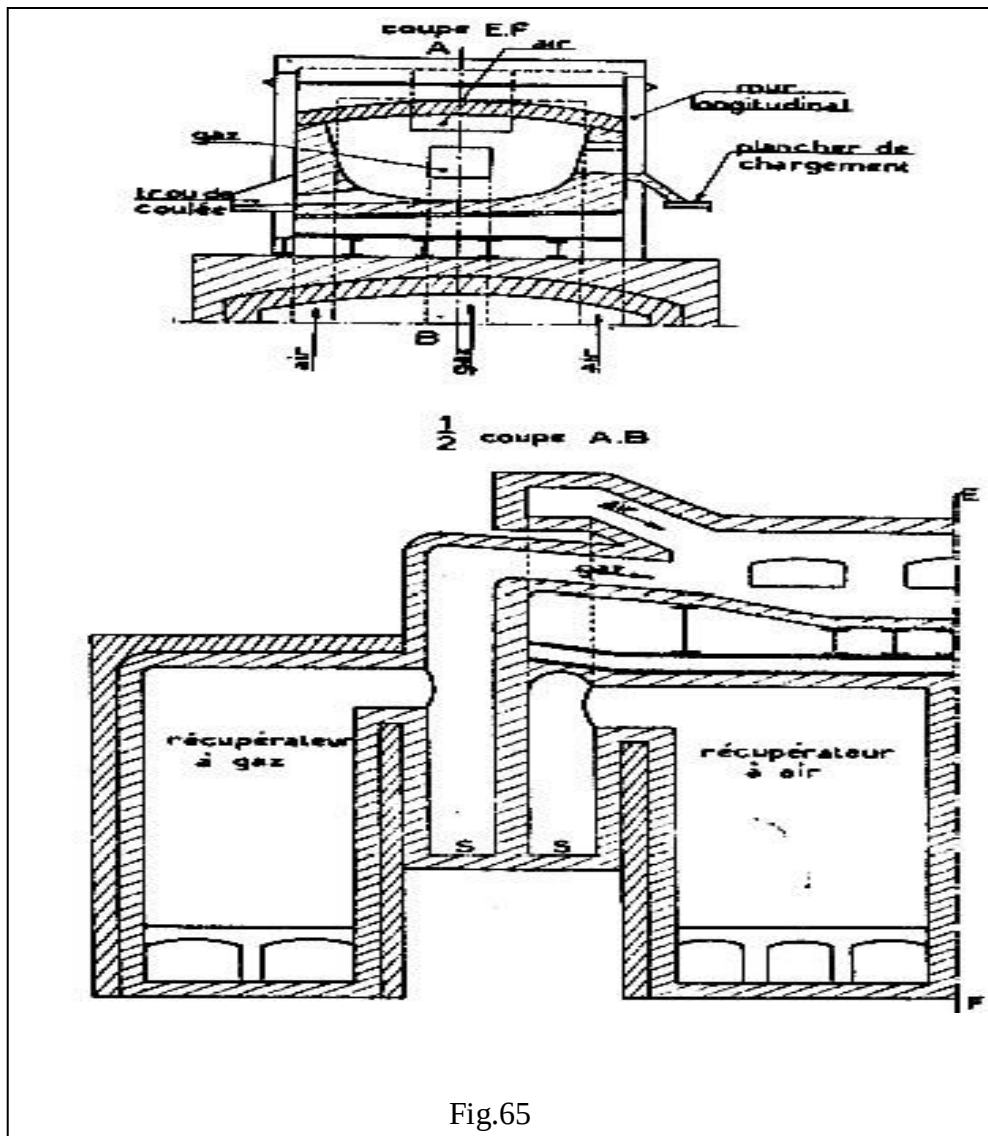


Fig.65

Types du procédé Martin

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

a) Scrap-procédé

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

b) Procédé à fonte liquide

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

marche générale de l'opération dans le four Martin

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

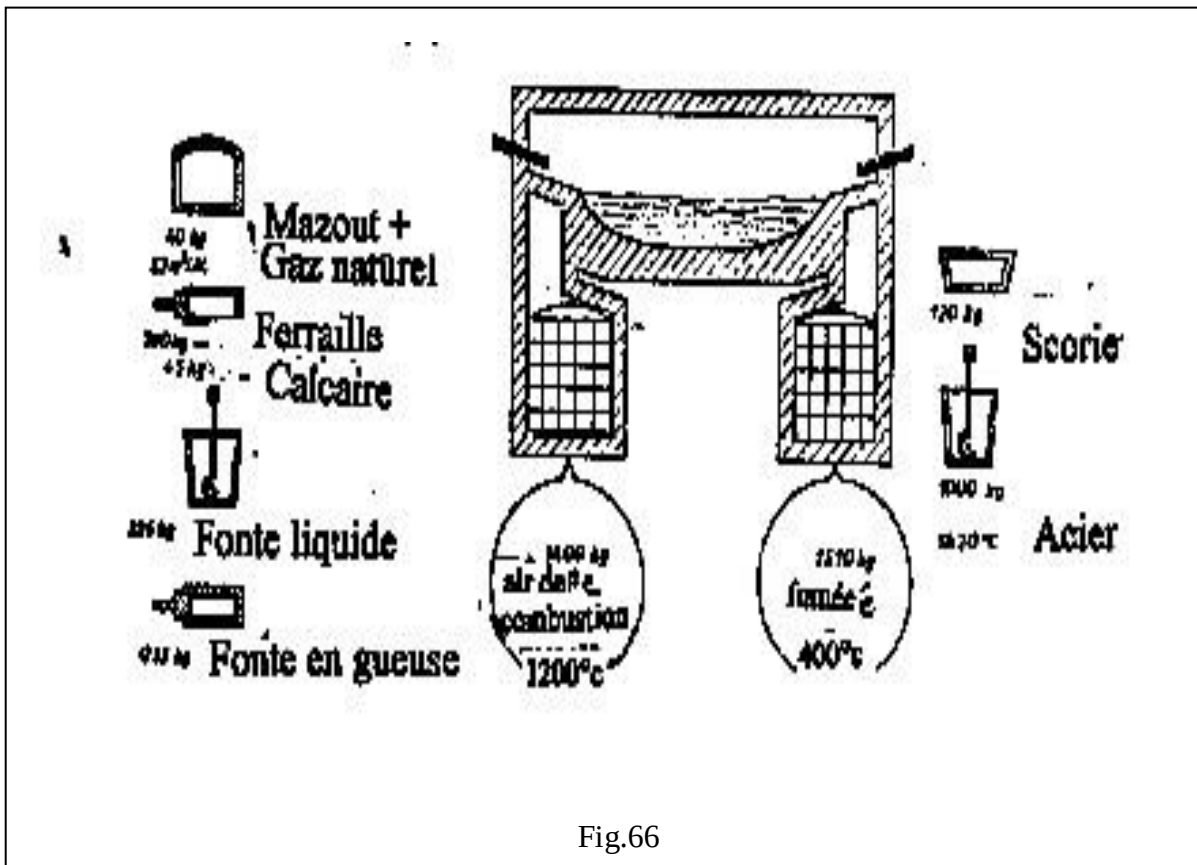


Fig.66

La marche de l'opération dans le four Martin diffère de l'opération par le vent (Thomas et Bessemer), 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 diverses réactions d'affinage se poursuivent simultanément et l'on n'observe pas ici les périodes nettement distinctes constatées dans les procédés à vent. Les opérations principales sont:

a) Préparation du four

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

b) Chargement du four

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

Préchauffage de la charge métallique

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

d) Fusion de la charge métallique

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

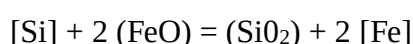
e) Fusion de la charge métallique

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

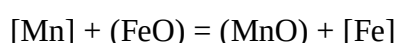
Affinage du bain métallique

L'affinage du bain métallique est très nécessaire pour :

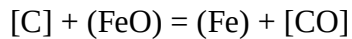
- La désulfuration du métal.
- La déphosphoration du métal
- Bouillonnement du bain métallique.
- Chauffage du bain jusqu'à la température de coulée exigée. Les réactions essentielles durant l'affinage sont :
- L'oxydation complète du silicium s'effectue à la fin de fusion



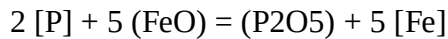
- Le manganèse s'oxyde en s'éliminant sous forme de MnO



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



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



- Pour une bonne désulfuration, des températures élevées sont exigées $[FeS] + (CaO)$
 $= (CaS) + (FeO)$.

Les aciers Martin

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

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

II.7. Le four électrique

Les aciers électriques sont élaborés dans des fours chauffés par l'énergie électrique. La différence existante entre ce procédé et le procédé Martin réside dans le mode de chauffage et la construction du four. La matière première destinée à la fusion est constituée essentiellement de ferraille. Les réactions d'oxydation et d'affinage s'effectuent sensiblement de la même façon, seulement l'atmosphère neutre ne peut pas contribuer à la formation d'oxyde de fer à la surface du bain des aciers électriques. Lors de l'élaboration des aciers électriques, l'opération de réduction joue un rôle très important. La température du bain peut dépasser 1800°C ce qui facilite la fusion des inclusions et favorise la réduction des oxydes, la température peut être facilement réglée. Grâce à l'élimination poussée du phosphore, du soufre et de l'oxygène, le procédé électrique est le seul procédé permettant l'élaboration des aciers de qualité supérieure avec des concentrations de P = 0,01%, S = 0,008% et O₂ = 0,003%, ainsi que tous types d'aciers alliés et en particulier les aciers à forte teneur en métaux réfractaires.

Types de fours électriques

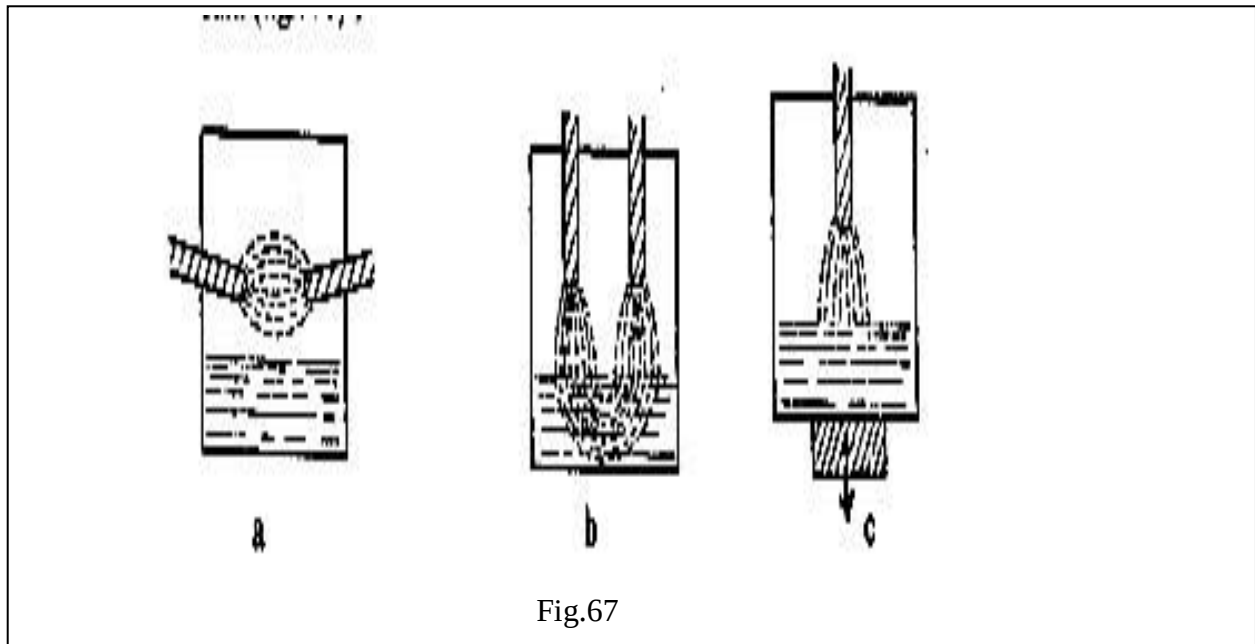
D'une façon générale, on distingue trois types de fours électriques :

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

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

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

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



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

Le four HEROULT

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

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

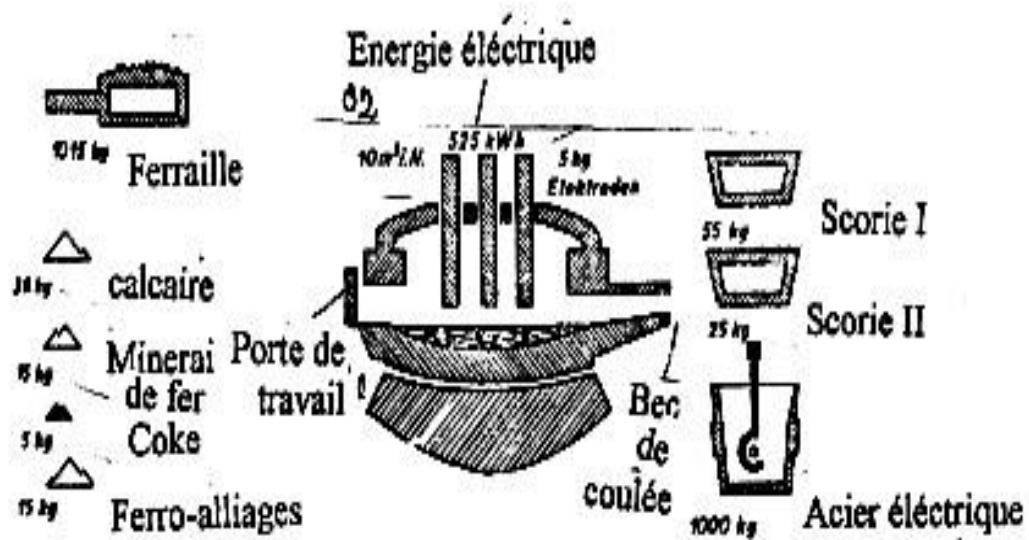


Fig.68 Schéma du bilan de matière (procédé avec deux scories) pour la production de 1000kg d'acier

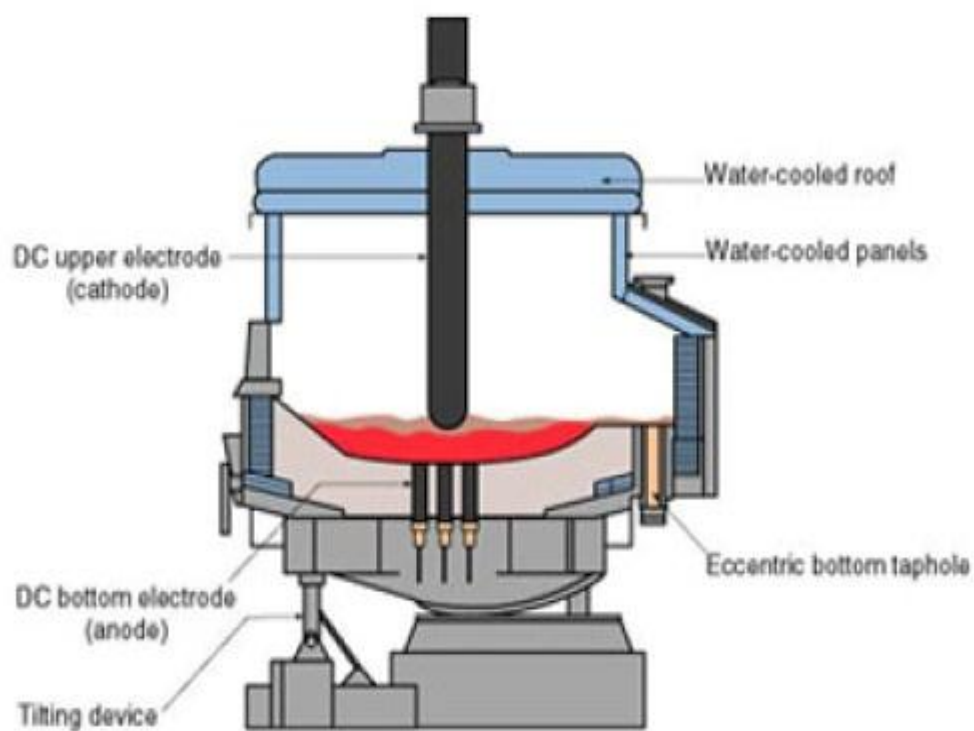


Fig.68

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

Elles sont mobiles pour deux buts :

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

Pendant la fusion on travaille avec des aciers allongés, afin de faciliter leur pénétration dans le bain et éviter l'endommagement de la voûte par rayonnement e l'arc, alors que pendant l'affinage, les arcs courts suffisent. En général le four à l'arc électrique démarre toujours avec une charge à 100% de ferraille. La teneur nécessaire en carbone dans le métal liquide est obtenue par addition de la fonte ou d'éléments de carburation. Les hautes températures de l'arc électrique et l'absence des gaz des flammes est une possibilité l'espace de travail du four de l'extérieur par une voûte mobile. La possibilité de travailler avec une scorie oxydante ou réductrice (ce qui permet d'élaborer des aciers fortement alliés et des aciers à haute teneur en carbone). Dans le cas d'affinage par oxydation, la charge doit contenir un excès en carbone (0,4 à 0,6%). Pour l'élimination du Si, Mn, P, C on ajoute soit le minerai de fer ou on souffle de l'oxygène, ainsi on obtient un bouillonnement du bain métallique ce qui assure le dégazage, la déphosphoration et la décantation des inclusions non métalliques. Pour le deuxième mode d'affinage par réduction, la charge est constituée de chutes d'aciers alliés ne contenant pas de phosphore. Dans ce cas il n'est pas utile d'ajouter les éléments oxydants, donc absence de bouillonnement du bain métallique et l'opération consiste tout simplement à refroidir les chutes d'aciers alliés pour obtenir un acier de composition chimique presque analogue.

Les principales matières premières du four électrique

a) La ferraille

La charge se compose essentiellement de la ferraille, dont la proportion varie jusqu'à 90%. La ferraille ne doit pas contenir les métaux non ferreux, elle doit être propre (ne contenant pas de la rouille $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), car la rouille contient du EL, dont il est difficile de l'éliminer pendant la période de désoxydation.

b) Fonte en gueuse

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

Rébus des aciers

Ils doivent être classés selon leur composition chimique et selon leur utilisation. **d)**

Fondants

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

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

e) Le sable de quartz

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

f) La chamotte

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

g) Le minerai de fer

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

Les ferro-alliages

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

:

Chargé dans le four	$\left[\begin{array}{l} \text{Fe-Mn (Mn = 76 } \div \text{ 80\%, Fe = 12 } \div \text{ 14\%)} \\ \text{Fe-Si (Si = 10 } \div \text{ 90\%)} \\ \text{Fe-Cr (Cr } \approx \text{ 70\%)} \\ \text{Fe-Va (35 } \div \text{ 80\%)} \\ \text{Fe-Ti (35 } \div \text{ 50\%)} \end{array} \right]$
Dosage de L'acier	$\left[\begin{array}{l} \text{Si-Al (Si = 30 } \div \text{ 75\%, Al = 20 } \div \text{ 50\%)} \\ \text{Si-Ca (Si = 60 } \div \text{ 64\%, Ca = 34 } \div \text{ 36\%)} \\ \text{Fe-W (W = 80\%)} \\ \text{Fe-Mo (Mo = 60\%)} \end{array} \right]$

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

Marche d'une opération dans le four électrique

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

a) Entretien du four

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

b) Chargement du four

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

c) Fusion

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

période d'oxydation n'existe pas, on a la période de réduction qui suit directement la fusion. **d)**

Période d'oxydation

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

e) Période de désoxydation

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

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

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

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

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

1- Fonte non phosphoreuse

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

2-Fonte phosphoreuse

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

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

II.8. Coulée de l'acier

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

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

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

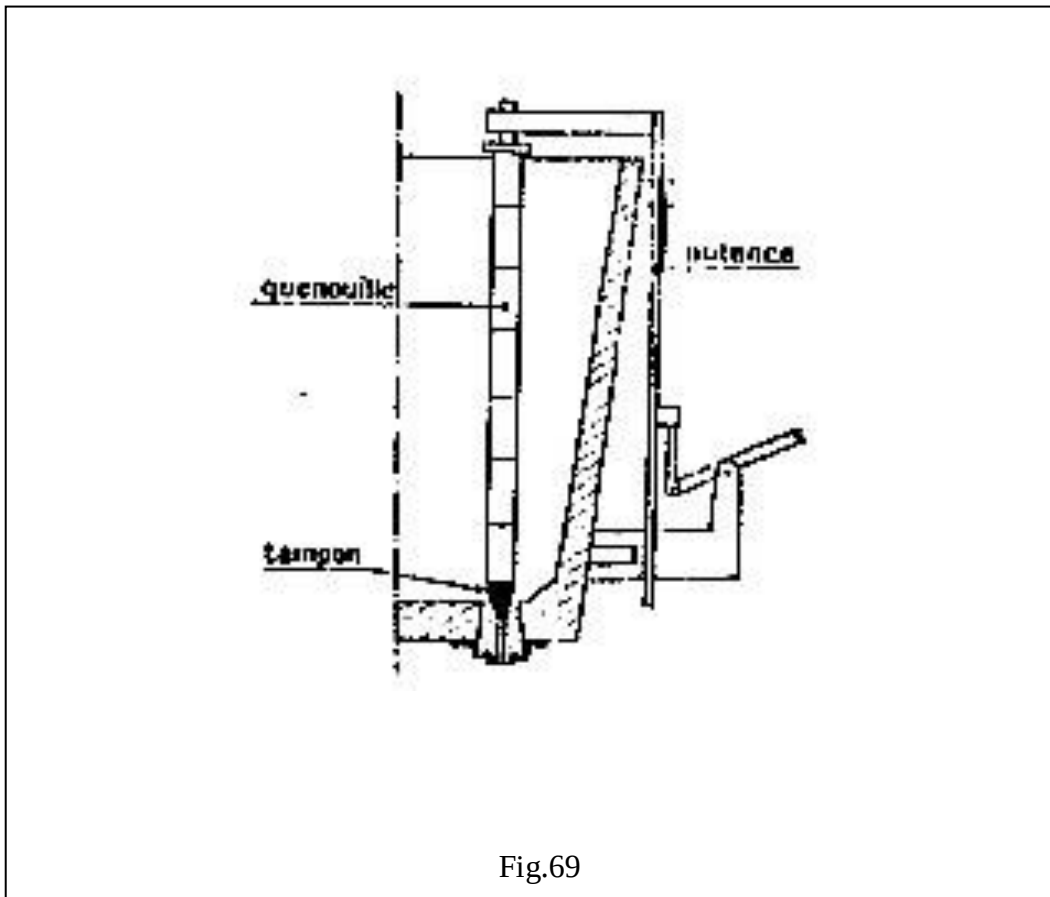


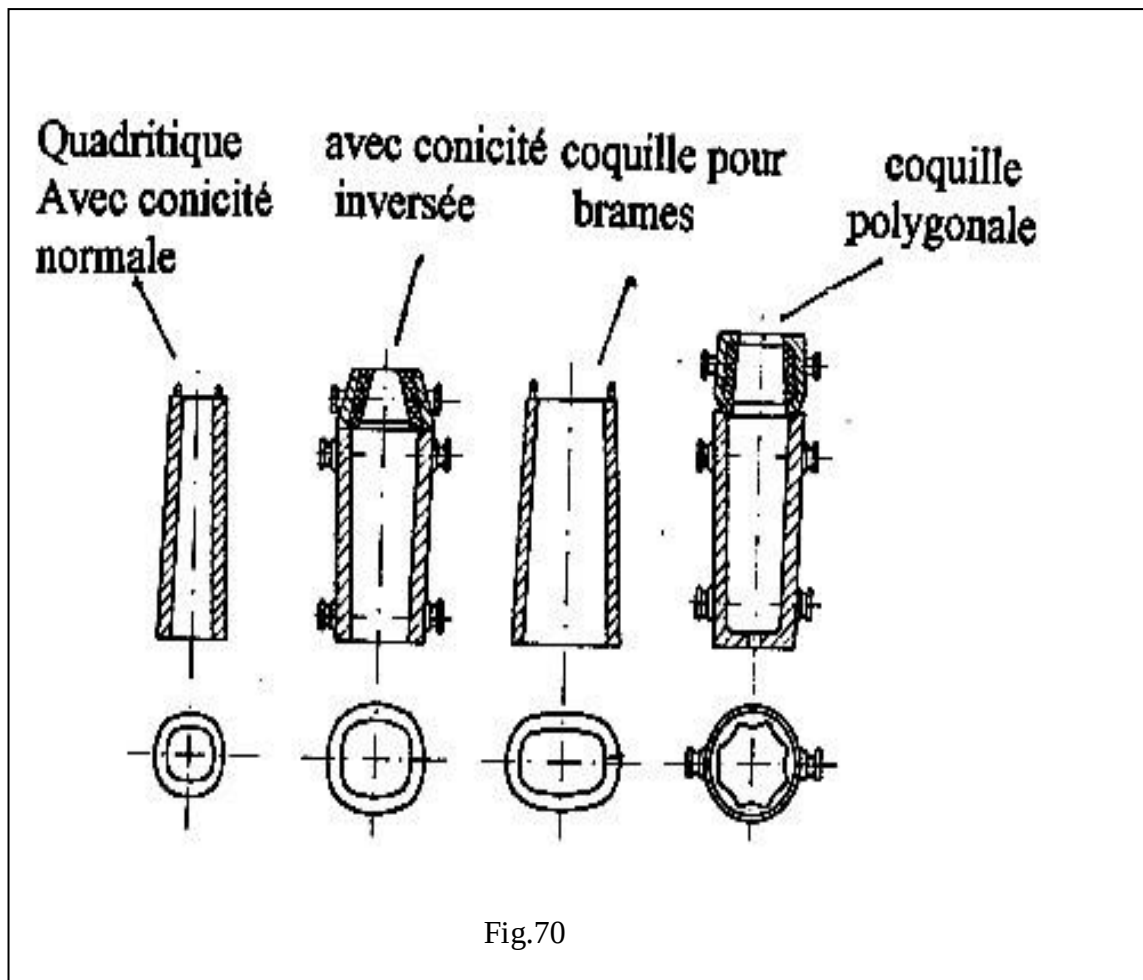
Fig.69

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

Coulée en lingotières

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

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



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

a) La coulée en chute

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

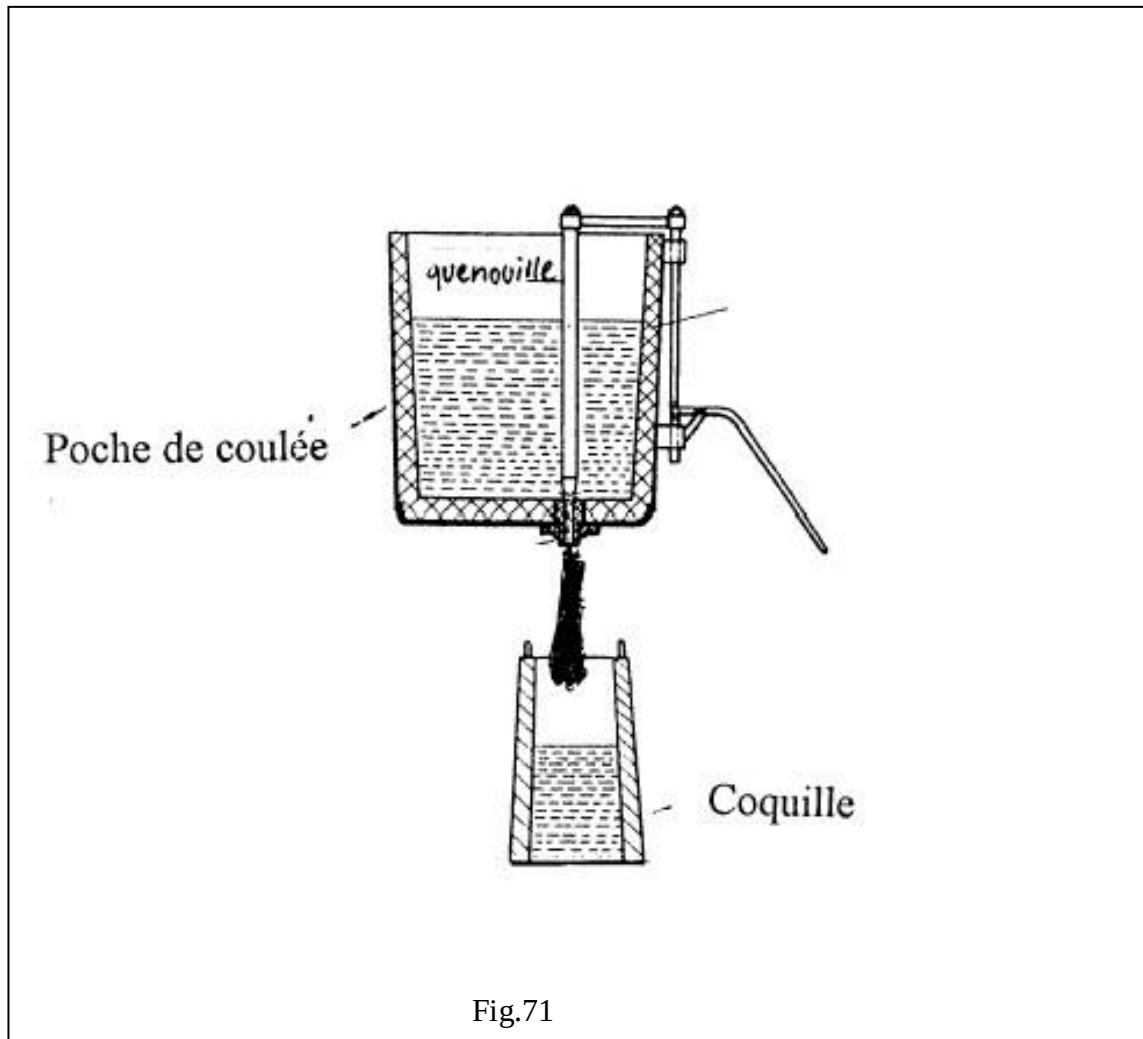
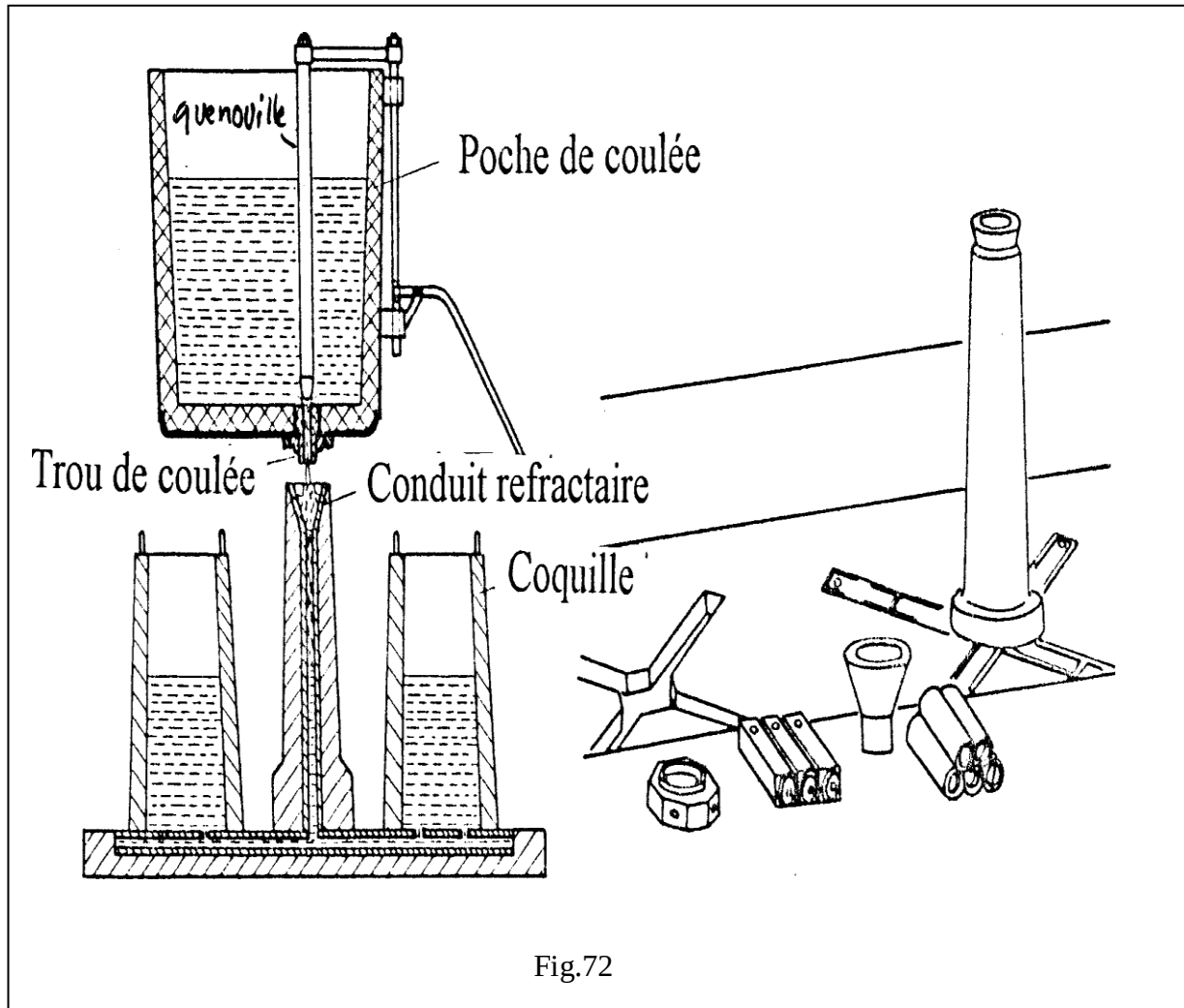


Fig.71

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

b) La coulée en source

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



Ce procédé présente plusieurs inconvénients tels que :

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

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

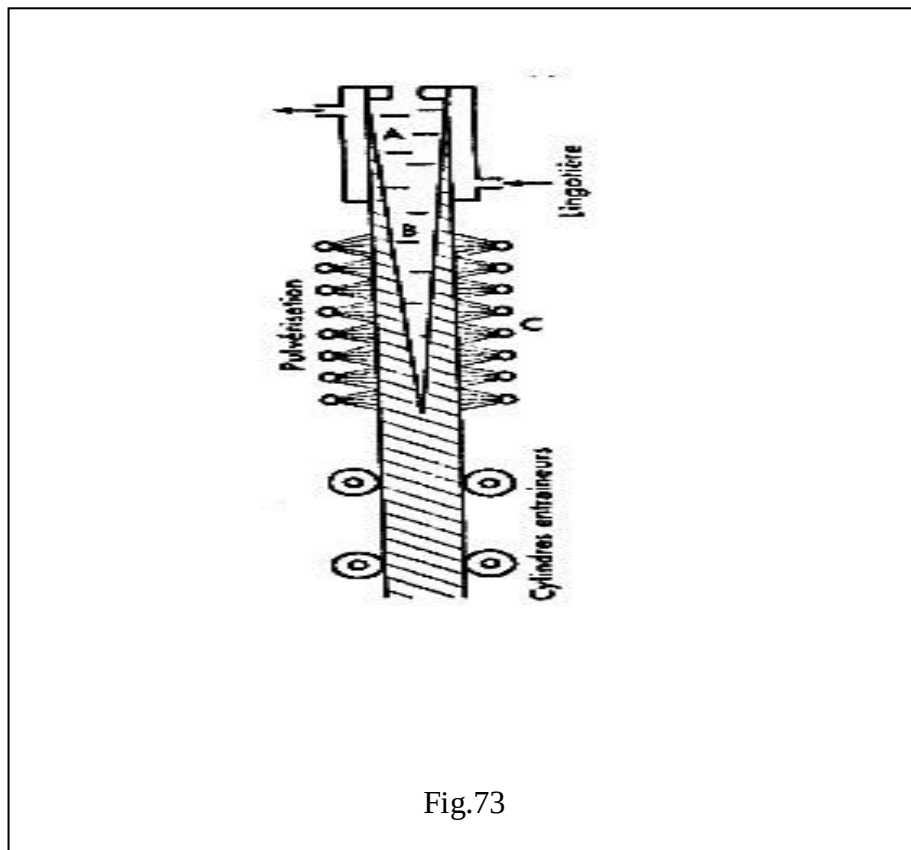
La coulée continue

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

a) Une lingotière en cuivre

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

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



b) Un système de pulvérisation d'eau pour refroidir le métal coulé. Ce système se trouve hors lingotière. La solidification immédiate du métal liquide commence lors de son contact avec les parois de la lingotière en formant une gaine présentant une certaine rigidité cette dernière se

détache de la paroi, tout en gardant à l'intérieur du métal non solidifié. Afin d'éviter d'éventuels risques de rupture du lingot, l'épaisseur du métal solidifié doit atteindre au moins 20 mm à sa sortie de la lingotière. A ce moment le jet d'acier est maintenu avec sa forme et ses dimensions initiales grâce à un corset formé d'un ensemble de cylindres entraîneurs. La solidification complète du liquide est assurée par le système de pulvérisation déjà indiqué.

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

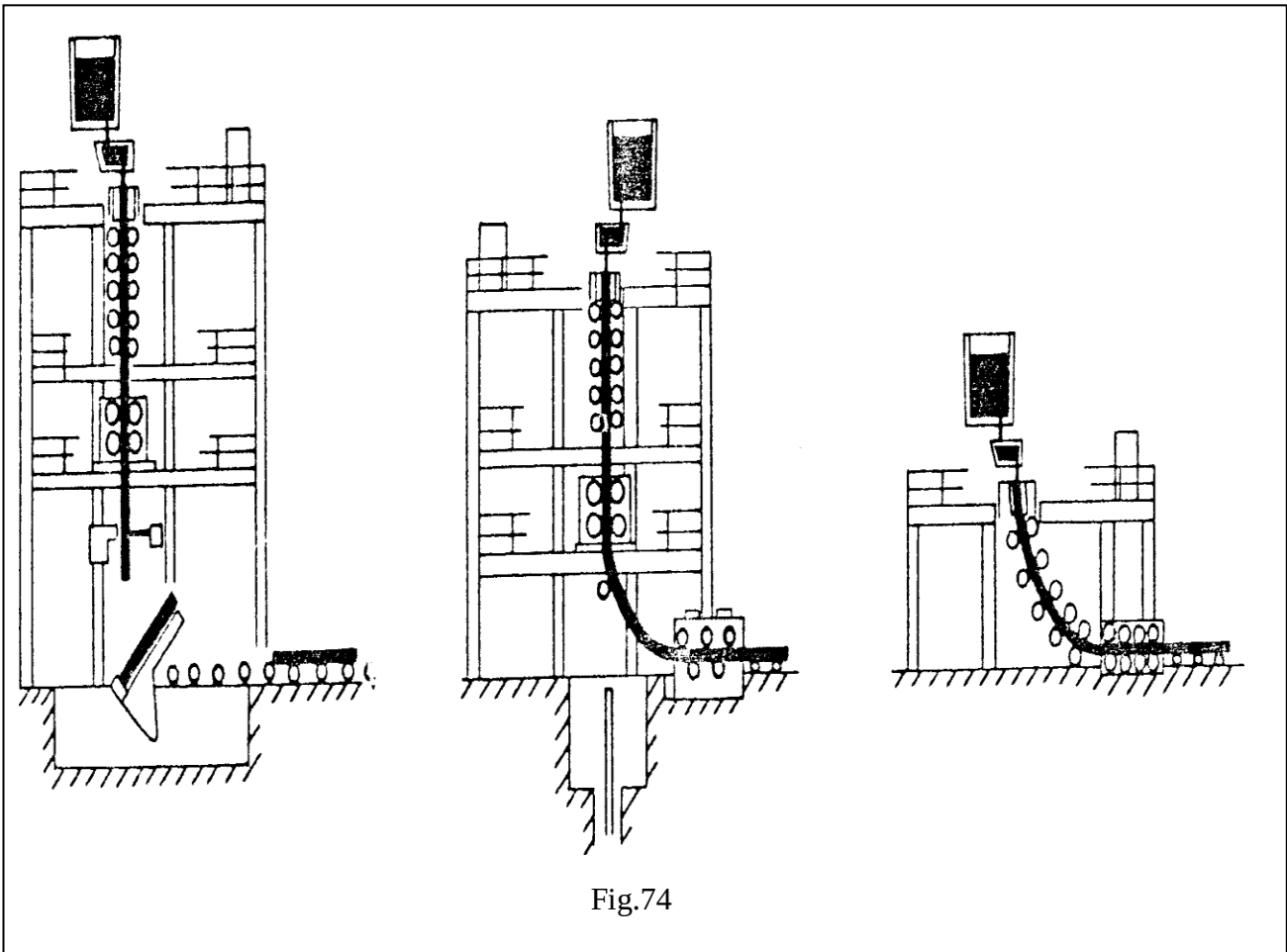
La vitesse d'extraction du lingot varie de 0,4-10 m/min et elle se détermine suivant la section transversale du lingot, voir tableau ci-dessous :

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

d) Un système de cisailage (oxycoupage)

Permettant de couper les lingots selon la longueur exigée. Pour des sections jusqu'à 250 cm² on utilise des cisailles hydrauliques et pour des sections plus grandes on utilise le chalumeau oxyacétylénique ou oxypropane. Dans certains cas l'utilisation de deux chalumeaux est exigée. La coulée continue est plus économique par rapport aux procédés, grâce à sa rapidité et à l'économie en main d'œuvre et de manutention.

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



II.9. Désignation normalisée des aciers et fontes

Désignation des aciers

Les aciers sont classés en deux groupes :

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

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

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

7.1.1 Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique

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

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

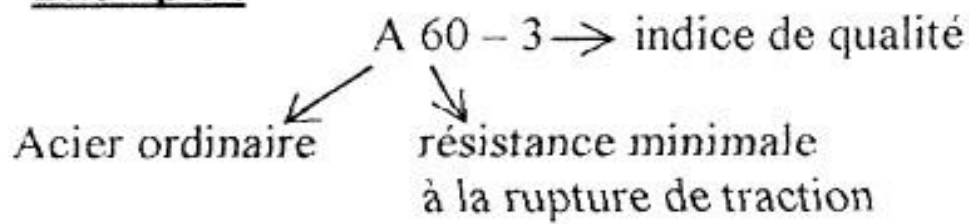
Eléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Deux solutions se présentent pour les désigner :

1) lettre A pour les aciers de constructions mécaniques.

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

Exemple :



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

S — soudable

M — moulable.

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

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

N : nombre définissant l'indice de qualité.

A : allongement en %.

R : résistance en hbar

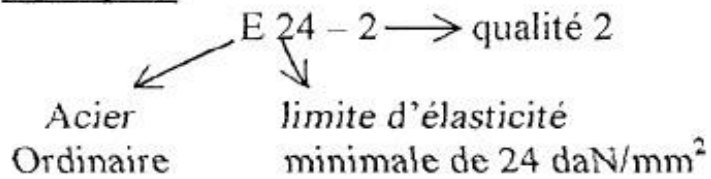
Qualité	1	2	3	4
N ≥	96	108	114	118

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

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

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

Exemple :



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

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

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

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

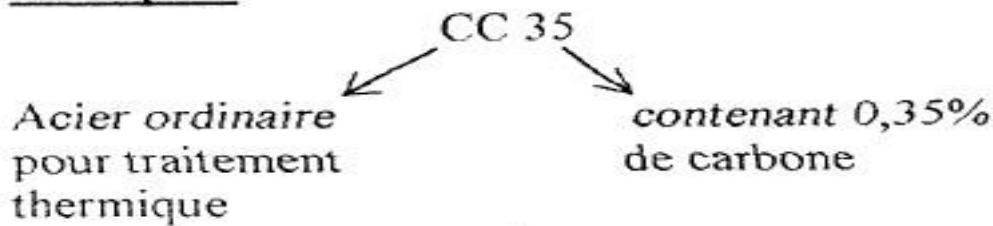
Désignation des aciers pour traitements thermiques

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

a) Les aciers courants

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

Exemple :

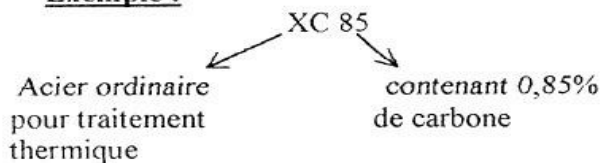


Exemple de nuances normalisées :
CC10, CC20, CC30, CC35, CC55 etc...

b) Les aciers fins

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

Exemple :



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

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

Exemple de nuances normalisées :
XC 10, XC 12, XC 18, XC 25, XC 35, XC 38 etc...

Modes de traitement thermique pour les aciers au carbone

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

Désignation des aciers alliés

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

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

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

a) Leur action sur la formation de l'austénite

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

b) Leur action sur la formation de carbures complexes

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

- Aciers faiblement alliés.
- Aciers fortement alliés.

Désignation des aciers faiblement alliés

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

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

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

M, S
1%

N
0,5%

C
0,25%

D, V
0,10%

Exemple

45 CD 20 – 04

C'est un acier faiblement allié contenant :

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

20 NC 6

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

Exemple de nuances d'aciers faiblement alliés selon AFNOR :

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

Désignation des aciers fortement alliés

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

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

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

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

Exemple

Z 160 CDV 12

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

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

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

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

Exemple de nuances d'aciers fortement alliés :

Z115WC05, Z200C13, Z200CKDV14,

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