

Chapitre 1 Sidérurgie

1.1.	Le haut fourneau	20
	Principe de la sidérurgie	20
	Le haut fourneau et ses installations annexes	21
1.2.	Fours électriques à fonte	29
	Caractéristiques	29
	Matières	29
1.3.	Transformation fonte-acier	32
1.4.	Acier Thomas	33
	Conduite des opérations	33
1.5.	Acier à l'oxygène	36
	Convertisseurs	36
1.6.	Aciers Martin	40
1.7.	Electrosidérurgie - Acier électrique	44
1.7.1.	Le four à arc	44
1.7.2.	Le four à induction	50
1.8.	Application du vide en aciérie	54
	Four à électrode consommable	58
	Four à induction sous vide	58
1.9.	La coulée de l'acier	60
1.10.	Les défauts des lingots	62
1.11.	Ferro-alliages	65
	Principaux ferro-alliages	65

Légendes fig. 1-1

MATIÈRES EMPLOYÉES AU DÉPART

- CHARGE** 1. Minerai de fer
2. Coke
3. Fondant
- APPAREIL** 4. Haut fourneau
- PRODUITS** 5. Laitier et son emploi
6. Fonte coulée en gueuses
7. Fonte coulée dans de grands moules
8. Gueuses de fonte employées dans le cubilot
- STOCKAGE** 9. Mélangeur

TRANSFORMATION DE LA FONTE EN ACIER

- APPAREILS** 10. Convertisseur - Thomas
11. Convertisseur à oxygène - LD - OLP
12. Four Martin
13. Poche de coulée
14. Four électrique à arc - Héroult
15. Four électrique à induction
- CHARGE** 16. Ferraille
- PRODUIT** 17. Acier coulé en lingots
- STOCKAGE** 18. Four Pit

TRANSFORMATION DE L'ACIER BRUT

- APPAREILS** 19. Laminoirs pour les demi-produits - les profilés - les produits plats

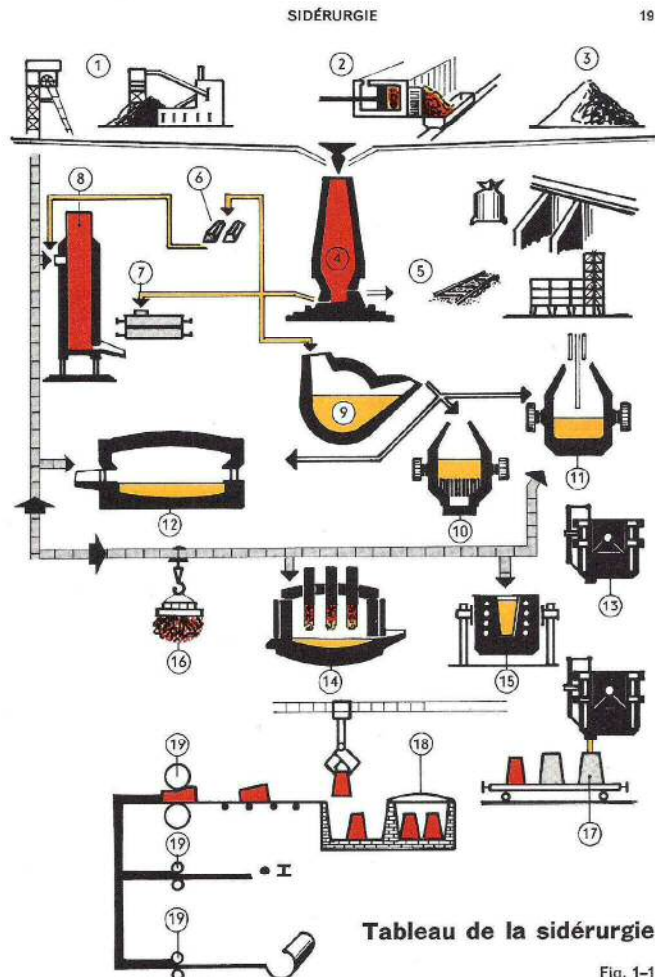


Tableau de la sidérurgie

Fig. 1-1

1. 1. Le haut fourneau

Légendes fig. 1-2

Principe de la sidérurgie

Le minerai à traiter, comprenant de l'oxyde de fer (fer + oxygène) et de la gangue, il faut pour obtenir le métal:

1° **Libérer le fer** en faisant agir un corps susceptible de se combiner avec l'oxygène de l'oxyde.

Un tel corps est appelé **réducteur**. Pratiquement, c'est le carbone qui est utilisé.

Pour que cette réduction soit possible, il est nécessaire de fournir de la chaleur. Aussi fait-on brûler un excès de carbone.

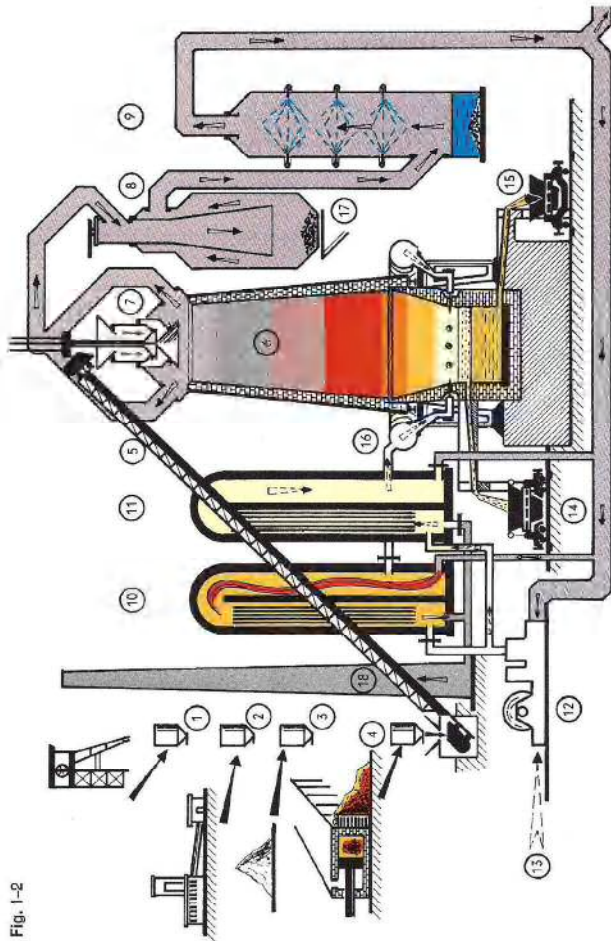
2° **Séparer le fer de la masse** par fusion du métal qui coule et se rassemble à la partie inférieure du four. La chaleur nécessaire à ce changement d'état est fournie par la combustion du carbone.

3° **Éliminer la gangue**. On ajoute pour cela un fondant (pierre à chaux ou à magnésie) qui donne avec la gangue un verre grossier: le **laitier**. Plus fusible et plus léger que le fer, ce laitier coule et se rassemble au-dessus du métal liquide. On peut alors l'évacuer à l'extérieur du four par **décantation**.

Le laitier est utilisé à diverses fins, en particulier:

- moellons pour les digues
- ballast de voies ferrées
- briques
- laine de laitier en qualité d'isolant phonique et thermique

1. Le minerai
2. Le minerai aggloméré
3. Le fondant
4. Le coke
5. Skip de chargement
6. Haut fourneau
7. Cloche de gueulard relevable et abaissable hydrauliquement avec répartiteur pivotant
8. « Sac à poussière » pour la séparation primaire des poussières contenues dans le gaz du gueulard, elles sont soutirées par le bas.
9. Epurateur humide dans lequel s'opère l'épuration fine des gaz du gueulard par ruissellement d'eau. L'eau est dirigée vers un bassin de décantation
10. Appareil Cowper en cours de chauffage par la combustion des gaz du gueulard
11. Appareil Cowper « soufflant » pour réchauffer l'air de passage envoyé dans le haut fourneau
12. Soufflantes
13. Air froid
14. Laitier
15. Fonte
16. Conduite circulaire à vent chaud suivie de tuyères permettant d'insuffler l'air chaud dans le haut fourneau
17. Poussières récupérées pour être agglomérées avec le coke, le minerai et le fondant



Le haut fourneau et ses installations annexes

Fig. 1-2

HAUT FOURNEAU (Caractéristiques)

Les hauts fourneaux modernes sont des appareils c'une trentaine de mètres de hauteur, constitués principalement de deux troncs de cônes accolés par le bas :

1° Le tronc inférieur ou « étalages » se prolongeant par une partie cylindrique de 8 m, et plus de diamètre appelée « creuset », dans lequel s'accumulent les produits du travail: **La fonte et le laitier**

Par les « tuyères », tuyaux coniques placés en haut du « creuset », on insuffle un énorme volume d'air chaud (800 à 1200° C) destiné à provoquer la combustion du coke.

2° Le tronc supérieur ou « cuve » se terminant par un orifice appelé « gueulard ».

C'est par le gueulard, orifice à double fermeture, que sont introduites en couches alternées les matières premières, les charges, qui sont transportées à sa hauteur dans des bennes par un monte-charge vertical ou une sorte de funiculaire, le « skip » de chargement.

L'utilisation de courroies transporteuses est de plus en plus fréquente.

NOUVEAUX PROCÉDÉS

Parmi les perfectionnements il faut citer les techniques d'injection de vapeur d'eau et d'hydrocarbures :

- a) gaz naturel (méthane)
- b) huiles minérales (fuels légers et lourds).

Ces fluides sont introduits avec le vent chaud par les tuyères à l'aide d'un appareillage qui assure la pression et le débit désirés.

L'injection d'hydrocarbures exige une augmentation de la température du vent et de la consommation de gaz des « cowpers ».

Elles permettent en contrepartie d'économiser 10 à 20% du coke et d'accroître la production journalière de fonte, tout en régularisant et améliorant sa composition.

PRODUIT DU HAUT FOURNEAU

La fonte

Lorsque le creuset est plein et que les laitiers ont été évacués, on procède à la coulée de la fonte :

on débouche le trou de coulée. Comme le haut fourneau fonctionne d'une façon continue, on procède à plusieurs coulées par jour. On peut obtenir ainsi plus de 2000 tonnes de fonte par 24 heures destinées à :

- la coulée des gueuses destinées à être utilisées dans les fonderies de deuxième fusion (fig. 1-3)
- l'exécution de grosses pièces par coulée directe dans des moules
- la fabrication de l'acier. La fonte est alors coulée dans de grands récipients appelés mélangeurs. Cet appareil, qui comporte un dispositif de chauffage au gaz, vise trois objectifs :

1° Il permet une régularisation de la qualité de la fonte, puisqu'il reçoit plusieurs coulées successives

2° Il joue le rôle régulateur dans l'exploitation

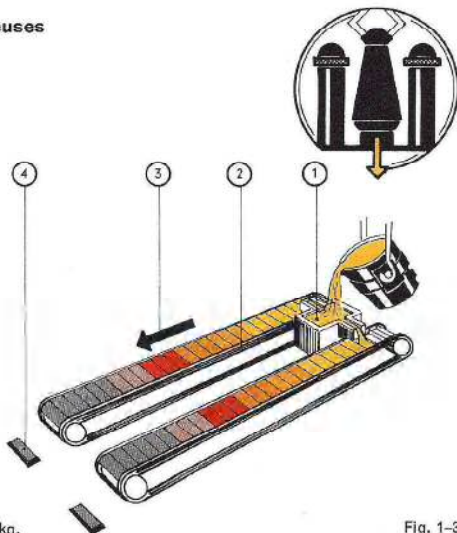
3° Enfin, par son stockage durant plusieurs heures, la fonte ainsi entreposée subit un véritable affinage qui en améliore ses qualités

USINOR DUNKERQUE Nature

Exemple d'installation Caractéristiques

Haut fourneau N° 1	Ø du creuset 8,50 m	Volume utile 1285 m ³
Haut fourneau N° 2	Ø du creuset 8,70 m	Volume utile 1350 m ³
Chargement par bandes porteuses au débit de 700 m ³ /h soit :		
Aggloméré et minéral	2000 t/h
Coke	350 t/h
Ils peuvent atteindre une production d'environ 5500 t/jour de fonte, avec une charge composée de minerais riches non phosphoreux.		

Fabrication des gueuses



- 1. Coulée de fonte.
- 2. Chaîne à coquilles.
- 3. Refroidissement.
- 4. Gueuses de 50 à 60 kg.

Fig. 1-3

HAUT FOURNEAU (Fonctionnement)

Ce sont des appareils qui fonctionnent en marche continue, et qui sont le siège d'un double mouvement :

Marche ascendante des gaz, par opposition à la marche descendante des solides.

1° Le mouvement de descente des solides, constitué par les charges, introduites par le « gueulard ».

Les charges sont constituées par :

- a) Le minéral à l'état d'oxyde, concassé et aggloméré.
- b) Le coke métallurgique qui doit avoir une bonne résistance à l'écrasement et une excellente porosité pour laisser passer le courant gazeux.
- c) Le fondant est un produit d'addition qui permet la séparation du métal de la gangue, à une température relativement basse. La nature du fondant dépend donc de la nature de la gangue. De la castine si la gangue est alumineuse.

De l'argile (orbue) si la gangue est calcaire.

2° Le mouvement de montée des gaz, des tuyères au gueulard.

Ces deux mouvements forment les zones suivantes :

— La dessiccation, entre 300 et 350° C. Période pendant laquelle la vapeur d'eau contenue dans les éléments des charges s'évapore. C'est une déshydratation.

— La réduction, entre 350 et 750° C, du minéral (oxyde de fer) est obtenue non par le charbon, mais par l'oxyde de carbone.

Le contact entre le minéral et le charbon serait trop grossier pour obtenir un bon rendement, le contact du minéral avec un gaz est bien meilleur.

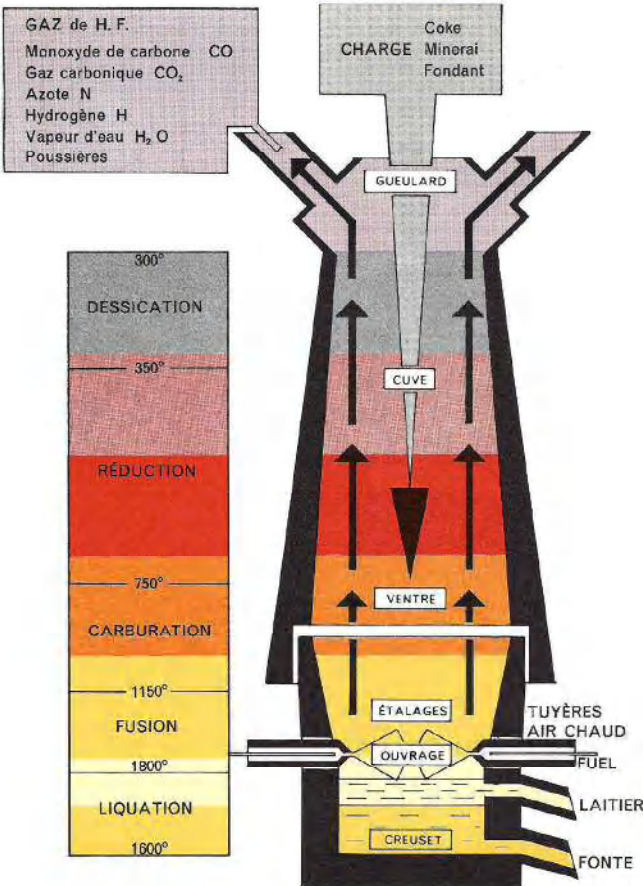
L'oxyde de fer perd son oxygène.

— La carburation, entre 750 et 1150° C. A la température élevée qui règne dans les « étalages », le fer se combine partiellement au carbone ; c'est pourquoi on n'obtient pas du fer pur, mais de la fonte, produit renfermant de 2,5 à 5% de carbone et d'autres éléments en petite quantité (manganèse, phosphore, silicium).

— La fusion, entre 1150 et 1800° C. Passage du fer carburé (fonte) de l'état solide à l'état liquide.

— La liquation. La température est voisine de 1600° C. Le métal liquide (fonte) coule dans le fond du creuset ; sur le métal surnage le laitier, la séparation se faisant par différence de densité.

Le laitier constitue un écran de protection à l'air des tuyères, pour empêcher la fonte de s'oxyder.



Marche du haut fourneau

Fig. 1-4

MINÉRAI DE FER

(5% de l'écorce terrestre environ)

Généralités

La nature ne nous fournit pas de fer à l'état pur (à part les petites quantités de fer météorique), mais sous forme de **combinaisons chimiques** de métaux agglomérés à des roches ou de la terre; cet aggloméré s'appelle « gangue », composé de silice, alumine, chaux, magnésie.

Tout l'ensemble porte le nom de minéral.

La valeur marchande du minéral dépend de la teneur en fer contenu dans le minéral, désignée en pour-cent (au minimum 28%) et de la composition chimique du minéral:

a) avec de l'**oxygène** pour former des **oxydes**.

1° **La magnétite** Fe₃O₄. Minéral très riche, 60 à 65% de fer.

Ce minéral donne des aciers d'excellente qualité.

On le trouve en Suède, Espagne, Algérie, Etats-Unis, Russie.

2° **L'hématite rouge**, Fe₂O₃.

Couleur rouge vif, c'est le plus pur et le plus recherché de tous les minerais de fer.

Une bonne hématite contient 60 à 68% de fer, le reste est l'oxygène et il ne s'y trouve que peu d'impuretés.

On la trouve en France, Algérie, Angleterre, Allemagne, Etats-Unis.

En Suisse, le gisement de Gonzen, près de Sargans, contient environ un million de tonnes d'hématite rouge à 50% de fer (fermé en 1966).

4° **Le fer oolithique**

Des gisements très abondants se trouvent en Lorraine où cette variété est appelée « minette »; ce minéral présente l'inconvénient d'être riche en

phosphore mais la découverte du procédé Thomas et Gilchrist pour la déphosphoration des aciers a permis au bassin lorrain de connaître un grand essor.

b) avec l'**acide carbonique** pour former des carbonates.

1° **La sidérose** ou **fer spathique** FeCO₃.

Il est d'une réduction facile, après avoir subi une calcination.

Pauvre en phosphore et très recherché pour sa teneur en manganèse.

c) avec le **soufre** pour former des **sulfures**.

1° **La pyrite de fer**, FeS₂.

Peu utilisé par suite des difficultés d'éliminer complètement le **soufre**, par grillage.

LE COKE

Le coke joue, dans l'élaboration de la fonte, un double rôle: celui de combustible et celui de **réducteur**.

Un réducteur est un corps qui peut s'emparer de l'oxygène combiné à d'autres éléments.

Le coke provient de la distillation, en vase clos, de charbon ayant des caractéristiques particulières.

Les charbons doivent contenir très peu d'impuretés car celles-ci formées en majeure partie de **soufre** et de **phosphore** passeraient tout entières dans la fonte.

CARBONE

Symbole C de masse atomique 12

Généralités

C'est un métalloïde solide très résistant à la chaleur, et que ni les gaz ni les solides ne peuvent attaquer.

Il se volatilise vers 3500° C.

Le carbone est insoluble dans les liquides, à l'exception de quelques

HAUT FOURNEAU

Les fontes

La fonte produite par le haut fourneau est appelée: **fonte de première fusion**.

a) **FONTE BLANCHE**

Dans la fonte blanche, tout le carbone est combiné au fer pour donner du carbure de fer (cémentite), corps très dur, très fragile, dont la couleur est gris clair avec éclat métallique. Aussi la cassure de la fonte est-elle **blanche**, compacte, sans trace de graphite.

Cette fonte est très dure. Elle ne s'usine pratiquement pas ou difficilement.

Elle est utilisée comme fonte d'affinage pour la fabrication de l'acier.

Elle est obtenue en haut fourneau marchant à allure froide (moins de coke et vent moins chaud que pour l'obtention de la fonte grise).

La composition moyenne présente les valeurs suivantes:

C = 2,3 à 3%; P = 2%; Mn = 1,5%; Si = 0,6%; Fe reste.
Masse volumique: 7,4 kg/dm³.
Point de fusion: 1200° C.

b) **FONTE GRISE**

(Voir fonderie, chapitre 7)

Dans la fonte grise, presque tout le carbone se trouve à l'état libre sous forme de graphite. Ce sont les petites paillettes noires de graphite, mélangées aux cristaux de fer, qui donnent à la cassure de la fonte une teinte grise. La présence du silicium a favorisé la précipitation du carbone sous forme de graphite.

Cette fonte sert à faire des gueuses pour les fonderies de deuxième fusion et moulage de grosses pièces.

La composition moyenne présente les valeurs suivantes:

C = 3 à 4,5%; Si = 1,5 à 5%; Mn = 1%; P = 0,08%; S = 0,054.
Masse volumique: 7,4 kg/dm³.
Point de fusion: vers 1200° C.

Pour 1t de fonte = il faut =
2t de minerai
1t de coke
1t de fondant
3000 m³ d'air surchauffé.

métaux en fusion, le **fer** en particulier. Les atomes de carbone ont la propriété remarquable de pouvoir s'attacher les uns aux autres jusqu'à former de très longues chaînes.

Le carbone existe dans la nature à l'état pur sous deux formes différentes:



Fig. 1-5

a) **Le diamant** (fig. 1-5). — Il est formé de cristaux, parfois transparents, appartenant au système dit cubique.

On l'extrait des mines d'Afrique du Sud, du Brésil, de l'Australie ou de l'Inde.

C'est le plus dur de tous les corps connus.

Dureté Mohs 10

Masse volumique . . . 3 à 3,5 kg/dm³

Isolant électrique excellent.

Les applications commerciales et industrielles du diamant sont: fabrication des trépan destinés à perforer les roches très dures lors de la recherche du pétrole, diamant des vitriers, burins...

b) **Le graphite**. — C'est un corps noirâtre, tendre, au touché onctueux, formé de cristaux à base hexagonale. On le trouve à Madagascar, au Canada, en Bohême.

Masse volumique: 2,2 kg/dm³.

Très bon conducteur du courant électrique.

Les applications commerciales et industrielles du graphite sont: fabrication des électrodes, revêtement intérieur de certains fours, fabrication des « mines » de nos crayons...

Les combinaisons du carbone sont extrêmement nombreuses: carbure d'hydrogène, alcool, sucre, graisse, albumine, cellulose.

Elles entrent pour une part importante dans la constitution des organismes animaux et végétaux (homme 17% C).

c) **Les charbons**. — Ils contiennent une quantité plus ou moins abondante de carbone associé à des impuretés diverses, ils proviennent de la décomposition de la matière végétale enfouie à des périodes géologiques anciennes.

On extrait principalement:

L'antracite (90 à 95% de C)

La houille (75 à 90% de C)

Le lignite (50 à 70% de C)

La tourbe (20 à 40% de C)

1. 2. Fours électriques à fonte « TYSLAND HOLE »

Principe: four à réduction électrique à cuve basse du système norvégien « TYSLAND HOLE ».

Dans le four électrique, le charbon est utilisé exclusivement pour la réduction du minerai et pour la carburation du fer, ce qui représente environ les deux cinquièmes de la quantité de charbon utilisé dans les hauts fourneaux à coke, les trois cinquièmes restant sont remplacés par l'énergie électrique qui produit la chaleur nécessaire à la fusion.

Dans le haut fourneau, la combustion du charbon est possible grâce à l'introduction du vent des souffleries.

Dans le four électrique, avec la suppression des charbons de combustion, **les vents sont également supprimés.**

Caractéristiques

Comme l'indique le nom de l'appareil, on voit qu'il s'agit d'un four de hauteur réduite et qui se rapproche même plus d'un four à sole que d'un four à cuve.

Les diamètres des appareils sont, par contre, relativement grands. Pour des fours de 200 à 250 tonnes de fonte par jour, on obtient, en effet, un diamètre de l'ordre de 12 m.

Le chargement est généralement réalisé par des bennes qui déversent leurs contenus dans des trémies, ces dernières alimentent directement de nombreux points de chargement aménagés dans la voûte du four.

Les électrodes sont au nombre de 3, disposées en triangle. Sur les grands fours, les électrodes atteignent des

dimensions impressionnantes de l'ordre de 1,80 m de diamètre.

La régulation de la hauteur de l'électrode dans la charge peut être faite manuellement ou de façon automatique.

Matières

Dans le haut fourneau au coke, il était de prime importance que le coke introduit dans le four soit fabriqué spécialement avec une bonne résistance à l'écrasement et une excellente porosité pour laisser passer le courant gazeux ascendant, conditions qui ne sont plus du tout nécessaires dans le four électrique.

Les minerais peuvent être aussi plus fins.

Pour un meilleur rendement, la charge doit être préparée par agglomération. Bien que la production de fonte actuelle dans les fours électriques atteigne à ce jour au maximum 1% de la production mondiale, **ce système de fusion est considéré comme étant la méthode moderne.**

Les pays: Brésil - Bulgarie - Israël - Italie - Espagne - Canada - Pérou - Suisse - Suède - Norvège - Vénézuéla - Russie - Japon - Yougoslavie, etc...

L'usine de Choindéz de von Roll SA
La Société des usines de von Roll SA, de Choindéz, possède un four électrique à cuve basse du type « TYSLAND HOLE ». (Fig. 1-8.)

Caractéristiques

Cette entreprise utilise 200 tonnes de matières premières par jour.

Soit:

1° Du minerai de Fricktal à 28-29% de fer. Des cendres de pyrite, sous-produit des usines d'acide sulfurique, 60% de fer.

2° Du coke des usines à gaz suisses mélangé à des anthracites français à forte teneur en cendre.

3° Un fondant, du calcaire.

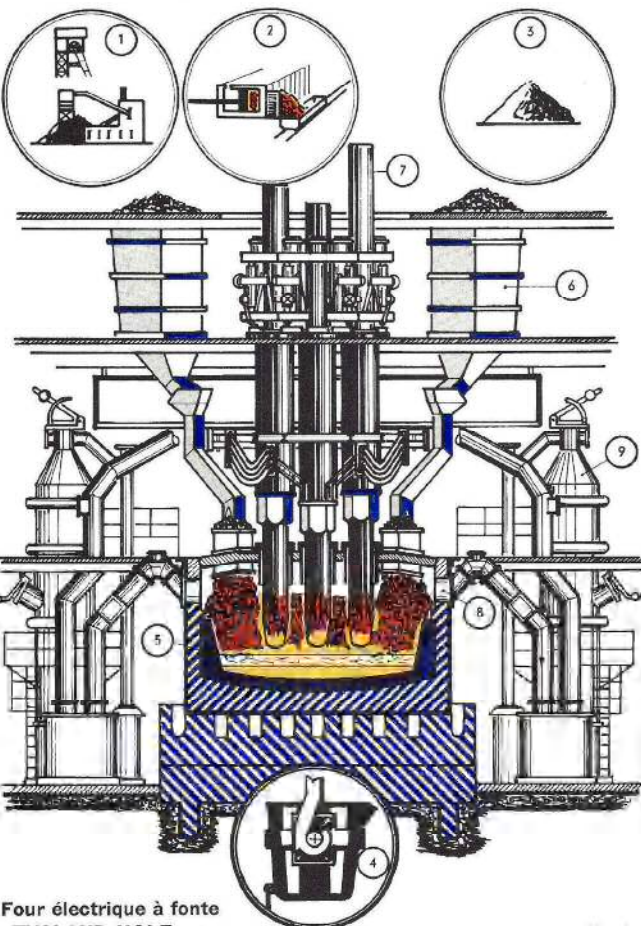
La production journalière du four à cuve basse est de **80 tonnes de fonte brute**, qui a la composition suivante: 3,5 à 4% de carbone, 2% de silicium, 0,3% de manganèse, 0,7% de phosphore et moins de 0,05% de soufre. Cette fonte est directement utilisée pour les trois quarts dans la fonderie de Choindéz, pour la fabrication des tuyaux.

Les 45 tonnes de scories sont reprises par l'industrie du ciment.

Le gaz est utilisé comme source de chaleur dans les fours à recuire les fontes et les fours à sécher.

Légendes fig. 1-8

CHARGE	1. Minerais
	2. Coke
	3. Fondant
PRODUIT	4. Fonte
	5. Sole
	6. Trémie de chargement
DÉTAILS	7. Electrode Söderberg
	8. Récupération des gaz
	9. Tour de lavage



Four électrique à fonte
« TYSLAND HOLE »

Fig. 1-8

1. 3. Transformation fonte-acier

ELABORATION DE L'ACIER

Classification des métaux ferreux

1° Fontes.

Fer + 2,5 à 6,67% de C.

2° **Aciers sauvages** (peu utilisés en raison de leurs grandes fragilités).

Fer + 1,7 à 2,5% de C.

3° Aciers.

Fer + 0,05 à 1,7% de C.

4° **Fer pur** ou fer de Suède.

Fer + trace de C.

Affinage

Pour transformer la fonte en acier, il faudra donc enlever en partie le carbone, le silicium, le manganèse et en totalité le phosphore et les impuretés.

Affinage ACIDE: fonte de première fusion obtenue par un minerai riche en Si (2%) et pauvre en P (0,07) (minerais américains).

Affinage BASIQUE: fonte de première fusion obtenue par un minerai riche en P (2%) et pauvre en Si (0,5) (minerais européens).

Quelle que soit la nature du procédé utilisé

Conversion de la fonte ou affinage sur sole: la fabrication de l'acier comporte une phase fondamentale d'élimination des impuretés d'un bain liquide.

Le résultat sera obtenu par l'action de l'**oxygène pur**, soit l'**oxygène** contenu dans l'air, ou l'**oxygène** contenu dans les oxydes de fer des minerais ou des riblons qui brûleront les corps en excès (oxydation), donnant ainsi des **produits volatils**, évacués dans les fumées, ou des **produits solides**, éva-

cués sous forme de laitiers liquides grâce à l'action d'un fondant: la chaux.

Le soufre ne fait pas partie de l'affinage, il a été éliminé en grande partie dans le haut fourneau.

Le séjour de la fonte dans le mélangeur fait baisser encore la teneur en S.

Quel que soit le procédé employé pour l'affinage, le garnissage des fours sera:

1° Briques réfractaires siliceuses (affinage acide).

2° Briques réfractaires chaux et magnésie (affinage basique) inattaquable à la chaux que l'on doit introduire pour éliminer le phosphore de la fonte.

1. 4. Acier Thomas

Convertisseur

Principe: oxydation du C de la fonte par l'oxygène de l'air. Ce procédé tend à disparaître, remplacé par l'oxygène pur.

Four: le convertisseur est une cornue en tôle avec revêtement intérieur en briques réfractaires.

Sous la partie inférieure, percée de trous (100-200 de 10 mm de diamètre), est placée une boîte à vent dans laquelle on fait arriver de l'air froid sous pression qui traverse et brasse la coulée du métal en fusion.

Le four peut basculer autour d'un axe de rotation pour permettre son remplissage et la coulée du métal.

Les grandeurs peuvent atteindre 8,50 m de hauteur et 5 m de diamètre pour contenir environ 70 tonnes de fonte.

Conduite des opérations

1° La cornue étant inclinée, on charge de la chaux, puis de la fonte liquide phosphoreuse.

2° On donne du vent et on redresse l'appareil. L'air soufflé traversant la masse de fonte en fusion élimine par combustion:

- Étincelles, combustion du silicium, 2 à 3 min.
- Période des flammes bleues, combustion du carbone, 10 à 12 min.
- Période des fumées ou sursoufflage, combustion du phosphore, 3 à 4 min.

d) Enfin, des fumées rouges apparaissent; elles annoncent le début de l'oxydation du fer.

Le contrôle de l'opération se fait par l'aspect de la flamme observée à l'œil, au spectrographe ou également par cellule photo-électrique.

On prélève un échantillon de métal dans une petite lingotière. L'éprouvette est forgée, trempée, pliée à bloc et ne doit pas former de criques.

3° La période de décarassege correspond à l'enlèvement de la scorie abondante (25% environ de la quantité du métal) qui surnage l'acier.

Les scories broyées sont livrées à l'agriculture. Elles contiennent 15 à 25% d'anhydride phosphorique.

4° **Addition finale.** Dans la cornue, il n'y a donc plus que du fer et un peu d'oxyde de fer.

Pour transformer le métal en acier, il faut donc:

- ajouter du carbone
- réduire l'oxyde de fer

Aussi ajoute-t-on une fonte spéciale (ferromanganèse) qui contient le carbone, 6-10%, indispensable à la transformation du fer en acier. Ensuite le manganèse, 70-80%, plus avide d'oxygène que le fer, réduit l'oxyde de fer déjà formé et le transforme en fer.

5° **Coulée de l'acier.** L'opération complète est très rapide; elle dure environ vingt minutes.

La chaleur nécessaire pour maintenir la masse en fusion est poussée par la combustion des **éléments thermogènes Si Mn et C.**

Le bain ne se refroidit pas; au contraire, la température s'élève de près de 500°.

Acier Thomas

L'acier Thomas comporte trois éléments indésirables:

le soufre et le phosphore provenant de la fonte, l'azote provenant de l'air soufflé.

Le soufre augmente la fragilité à chaud.

Le phosphore augmente la fragilité à froid.

L'azote provoque le vieillissement et les inclusions de nitrures.

Légendes fig. 1-7

CHARGE

- De la chaux
- De la fonte

MARCHE DU CONVERTISSEUR THOMAS

- Période des étincelles, combustion du silicium (2 à 3 minutes)
- Période des flammes, combustion du carbone (10 à 12 minutes)
- Période des fumées ou sursoufflage, combustion du phosphore (3 à 5 minutes)

CONTRÔLE

- L'aspect de la flamme observée à l'œil
- Prélèvement d'un échantillon

SOUS-PRODUIT

- Décarassege: enlèvement des scories
- Addition finale

PRODUIT

- Coulée de l'acier Thomas

DÉTAILS

- Air sous pression (3 bars)
- Boîte à vent
- Garnissage basique. Briques réfractaires chaux et magnésie

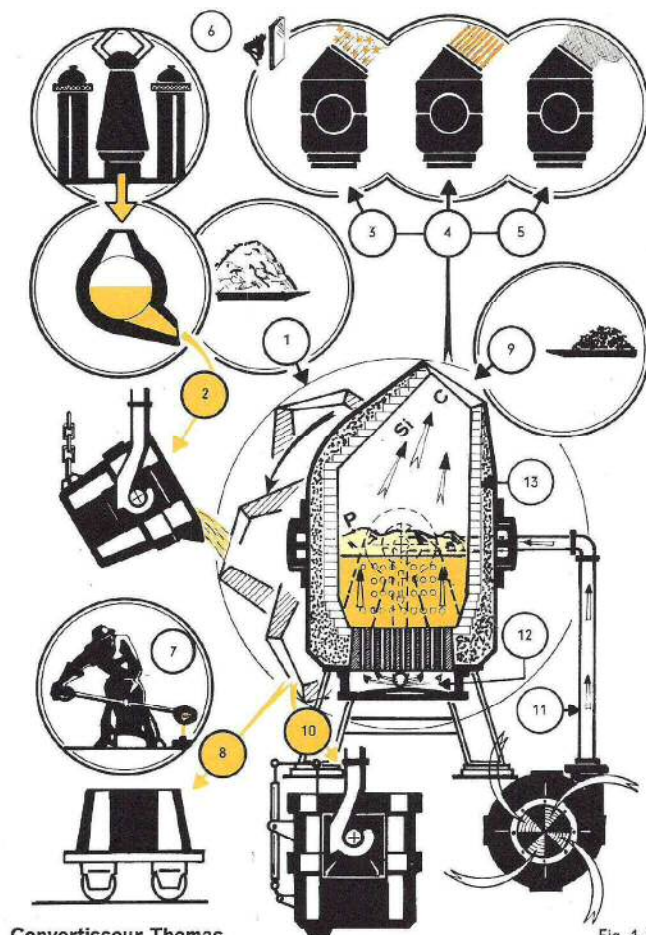


Fig. 1-7

1. 5. Acier à l'oxygène

Aciers à l'oxygène pur

Les progrès réalisés dans la fabrication de l'oxygène en grande quantité à un prix de revient peu élevé ont permis d'envisager en sidérurgie l'utilisation d'oxygène pur à la place de l'air.

Convertisseurs

LD: (Linz-Donawitz).

OLP: (Oxygène - Lance - Poussière). Fig. 1-8.

Principe

Oxydation du C de la fonte par l'oxygène pur.

Four

Les convertisseurs LD et OLP sont semblables aux Bessmer et Thomas dont le fond serait plein.

La hauteur peut atteindre 9,90 m et le diamètre intérieur du corps cylindrique en tôle, 7,30 m.

Volume intérieur environ 150 m³. Garnissage permanent: briques en dolomie.

Garnissage d'usure: briques en dolomie goudronnée.

La lance verticale, refroidie par circulation d'eau, pénètre par le bec et souffle de l'oxygène à une certaine distance du bain.

Capacité

180 tonnes d'acier liquide, procédé LD. 150 tonnes d'acier liquide, procédé OLP.

Conduite des opérations

1° La cornue étant inclinée, on charge de la ferraille (riblon) 30 à 45%, et l'on

déverse la fonte provenant du mélangeur.

2° Le four est ensuite redressé et l'on installe la lance en même temps que commence le soufflage de l'oxygène. Pour le convertisseur LD, les composants du laitier, chaux et fondant, sont amenés par une goulotte.

Pour le convertisseur OLP, un réglage précis de la mise en suspension de la poudre de chaux dans le courant d'oxygène supprime l'addition de produits quelconques pour constituer le laitier.

3° En observant l'image de la flamme, courte d'abord, s'allongeant ensuite pour redevenir petite, on peut déterminer avec précision la fin de l'opération.

4° Eprouvette.

5° Décarassege et coulée de l'acier avec les additions finales C, Mn, Si.

Légendes fig. 1-8

CHARGE

- Ferraille (riblon)
- La fonte
- La chaux amenée par la goulotte pour le procédé LD.
- Goulotte
- La lance à oxygène. Pour le procédé OLP la chaux est en suspension dans le courant de l'oxygène
- Eprouvette
- Décarassege
- Les additions finales C, Mn, Si, etc.

PRODUIT

- Coulée de l'acier à oxygène

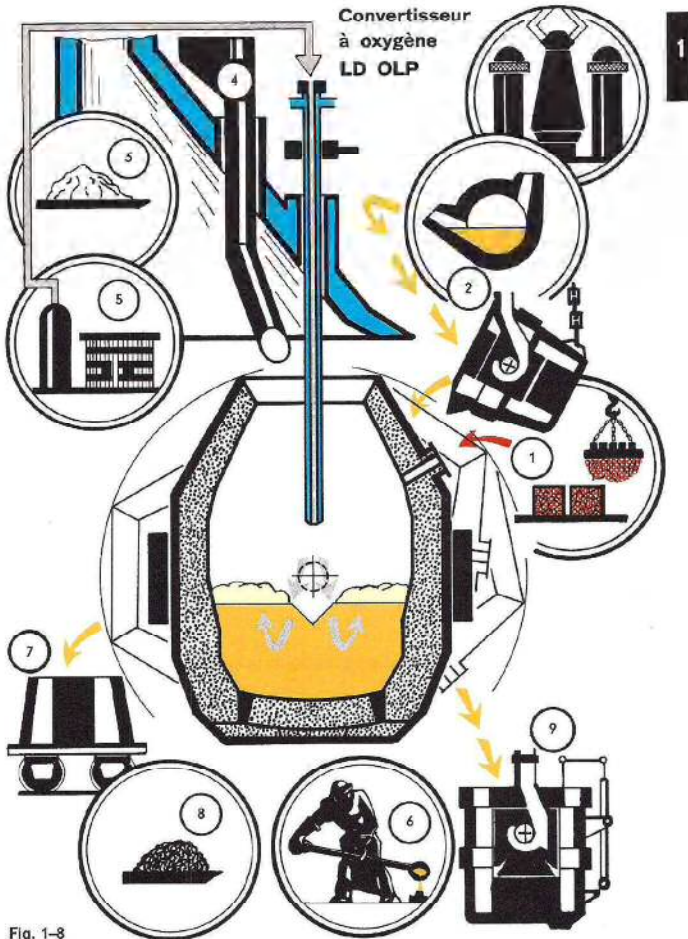


Fig. 1-8

Convertisseur KALDO
(fig. 1-9)

Principe

Oxydation du C par l'oxygène pur. Il permet en outre la combustion dans le four de l'oxyde de carbone dégagé et l'utilisation métallurgique des calories ainsi produites en fondant jusqu'à 90% de ferraille (riblon).

Four

Le four est en position inclinée et tourne sur lui-même à raison de 30 tours par minute. Cette rotation favorise les échanges entre le métal et les scories.

Le tout est monté sur un berceau de rotation, ce qui permet le chargement et la coulée.

Revêtement basique.

La lance refroidie par circulation d'eau est inclinée à 17°.

Conduite des opérations

1° Avec environ 3 tonnes de laitier partiellement solidifié de la coulée précédente, on charge environ 80 tonnes de fonte en fusion.

- 2° La moitié des ferrailles nécessaires, 30 tonnes, est chargée à son tour + 7 tonnes de chaux.
- 3° Le four est alors soufflé pour réchauffer l'ensemble.
- 4° La seconde moitié des ferrailles, 30 tonnes, est introduite.
- 5° Le soufflage continue.
- 6° Prise de l'éprouvette et premier décarburage si l'analyse est bonne.
- 7° Addition de 1,5 tonne de chaux, le soufflage reprend jusqu'à ce qu'on obtienne l'analyse voulue.
- 8° Deuxième décarburage, le laitier est séché par procédé spécial et servira dans la coulée suivante.
- 9° Coulée de l'acier après les additions nécessitées par l'analyse finale recherchée.

La moyenne des poids de coulée varie de 120 à 125 tonnes d'acier.

Acier à oxygène

L'acier obtenu ne contient pratiquement pas d'azote dissous, il est très pur en soufre et en phosphore.

Ses qualités permettent de l'utiliser dans les domaines jusqu'ici réservés à l'acier « Martin ».

Légendes Fig. 1-9

CHARGE 1^{re} phase

- 1. Une partie du laitier de la coulée précédente
- 2. La fonte
- 3. La moitié de la charge des ferrailles
- 4. La chaux
- 5. Lance à oxygène
- 6. Circulation de l'eau de refroidissement pour la lance et la hotte

CHARGE 2^e phase

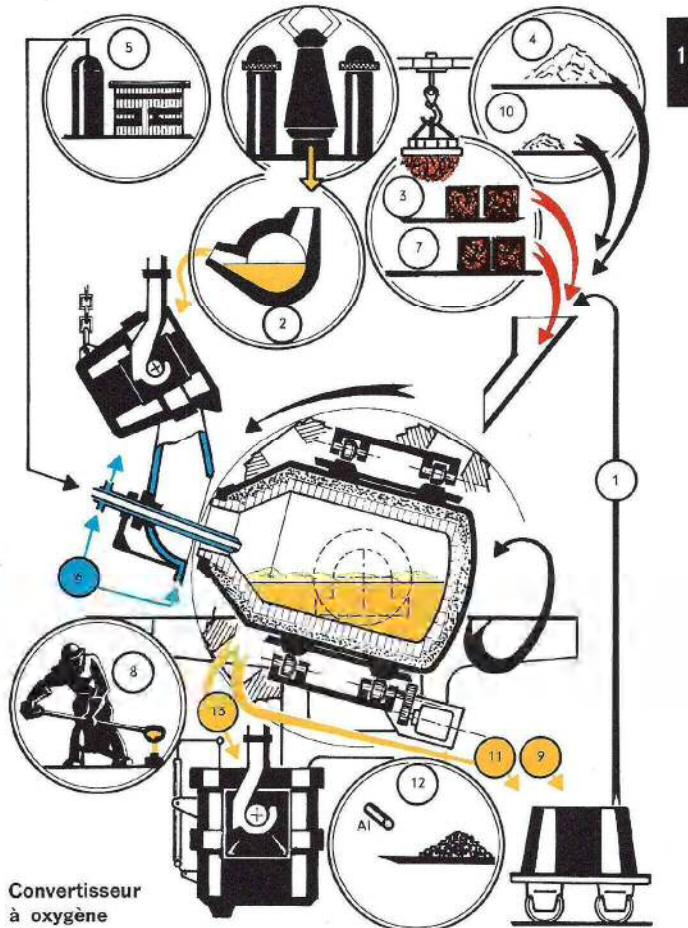
- 7. Le reste des ferrailles
- 8. Prise de l'éprouvette
- 9. Premier décarburage

CHARGE 3^e phase

- 10. Chaux
- 11. Deuxième décarburage. Le laitier servira pour la première phase de la charge à la coulée suivante
- 12. Les additions

PRODUIT

- 13. Coulée de l'acier à oxygène



Convertisseur à oxygène KALDO

Fig. 1-9

1. 6. Aciers Martin

Four MARTIN (fig. 1-10)

Principe

1° Fusion des aciers de récupération et modification du pourcentage de carbone par addition soit de la fonte pour l'augmenter, soit de l'oxyde de fer pour le diminuer. (Principe de dilution.)

2° Oxydation du carbone de la fonte par l'oxygène de l'oxyde de fer (minerais).

3° Le principe le plus courant emploie à la fois la dilution et l'oxydation. Dans les trois cas on ajoute de la chaux qui facilite la formation de laitiers fusibles et l'évacuation des impuretés.

Four

Le four Martin proprement dit comprend :

- a) **La sole** : sorte de cuvette rectangulaire, légèrement creuse, dont le fond est incliné vers le trou de coulée. La construction, faite de briques réfractaires en silice ou en dolomie, est montée sur poutrelles pour permettre le refroidissement de la surface inférieure.
- b) **Le laboratoire** : espace compris entre la sole et la voûte. Des portes placées sur la face avant du four permettent le chargement. L'une d'elles est disposée pour permettre l'évacuation des scories et le décarburage du four.
- c) **La voûte** : du type suspendu, légèrement convexe, constituée par des briques en chrome-magnésie armées intérieurement et munies de languettes de suspension.

d) **Récupérateurs** : la sole est placée entre deux récupérateurs de chaleur permettant le préchauffage de l'air (1200°) envoyé dans le laboratoire. Ils travaillent alternativement pour permettre le chauffage des récupérateurs avec les fumées qui sortent du laboratoire.

L'inversion de la marche de l'air s'opère de manière semi-automatique d'après le temps et la différence de température dans les récupérateurs.

e) **Les brûleurs** : pour le chauffage des fours Martin, on emploie comme combustibles : des gaz, de l'oxygène, du fuel-oil pulvérisé par l'air comprimé. Les éjecteurs de gaz, du fuel et d'oxygène sont logés dans une enveloppe commune, refroidie par eau. Le fondeur a la possibilité de régler, à partir du pupitre de commande, l'inclinaison des brûleurs et la longueur de leurs flammes.

La capacité très variable peut dépasser 200 tonnes d'acier.

Conduite des opérations

1° **Chargement du four**. On commence par introduire les paquets de ferraille au moyen de pelles mécaniques (60 à 80%). On introduit ensuite de la chaux + la fonte liquide au moyen de poches spéciales.

2° **Fusion et affinage**. Quand le chargement est terminé, on donne le vent et les brûleurs sont réglés. L'affinage se poursuit en même temps que la fusion en procédant de temps en temps à des additions de minerais. Comme dans l'affinage au convertisseur, le Si et le Mn s'oxydent les premiers, et finalement le carbone. Le phosphore passe dans les scories.

3° Essais: on prélève des échantillons de métal quand on juge l'affinage suffisant.

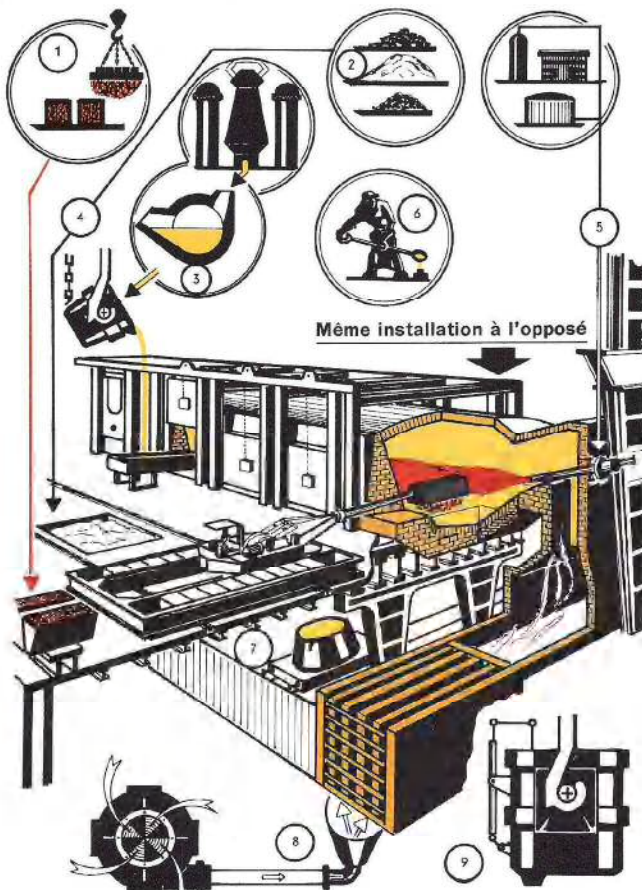
4° Addition finale: on dégrasse soigneusement le bain en enlevant la scorie et on procède aux additions finales, ferro-alliages.

L'opération est très longue, plusieurs heures, mais elle permet d'obtenir des aciers mieux dosés.

1

Légendes fig. 1-10

CHARGE	1. Les paquets de ferraille 2. La chaux 3. La fonte
ADDITIONS	4. Minerais Ferro-alliages
DÉTAILS	5. Un des deux brûleurs travaillant alternativement Gaz, oxygène, fuel-oil 8. Vent chauffé par les récupérateurs travaillant alternativement
CONTRÔLE	6. Prise d'éprouvette
PRODUIT	7. Les scories 9. Acier Martin



1

Four Martin

Fig. 1-10

1. 7. Electrosidérurgie Acier électrique

1. 7. 1. Four à arc (Caractéristiques)

L'arc électrique

Le plus important parmi les procédés de fabrication d'acier à l'aide de l'énergie électrique comme source de chaleur est le procédé du four à arc électrique.

L'aciériste se sert, au lieu d'une flamme, d'un arc électrique produit entre d'énormes électrodes de graphite et le contenu du four.

Haute température

Grâce à la température élevée de l'arc électrique (3500° C) on peut atteindre de hautes températures de fusion et dépasser 1800° C.

Elle favorise également la dissolution de matières et d'alliage à fusion difficile.

Élimination du soufre et du phosphore

La haute température de fusion permet la formation de scories très liquides fortement basiques, grâce auxquelles on obtient une élimination particulièrement bonne du soufre et du phosphore.

Abaissement du taux en oxygène (réduction).

La teneur en oxygène du bain peut être abaissée à un taux minimum car on peut utiliser des laitiers carburés. Non intervention de l'atmosphère du four.

Le laboratoire du four électrique est pratiquement clos. L'atmosphère au-dessus du bain peut être oxydante au

début; mais pour peu que l'on prenne soin d'éviter tout tirage, l'atmosphère ne se renouvelle pas, les gaz oxydants sont remplacés progressivement par les gaz réducteurs ou neutres qui se dégagent du bain.

Pas d'oxydation des éléments d'alliage.

L'atmosphère est donc neutre et les réactions s'effectuent uniquement entre le métal et les additions.

On peut fondre les éléments oxydables (Cr, W, Ni, Mo) sans craindre de perte par oxydation.

En résumé: élimination poussée du phosphore, du soufre et de l'oxygène.

On arrive aux teneurs limites suivantes: P 0,01% S 0,008% O 0,003%

ACIERS ÉLECTRIQUES

Aciers au carbone
Aciers alliés
Aciers rapides
Aciers inoxydables
Aciers réfractaires

Aciers électriques

Four Héroult

(Four à arc électrique et sole non conductrice) Fig. 1-11

Le principe Héroult, selon lequel la formation d'un arc électrique entre les électrodes et passant par la charge, s'est imposé par rapport à d'autres systèmes.

Principe: par oxydation du carbone de la fonte au moyen d'un oxyde de fer (minéral).

Par mélange et fusion de ferrailles et de fonte.

Par mélange et fusion des matériaux nécessaires à l'obtention du produit désiré: acier et métaux d'addition.

Four

Le four a la forme d'une poche en acier revêtu intérieurement d'un garnissage réfractaire.

La voûte est amovible et son garnissage siliceux doit résister aux très hautes températures.

Elle comporte des alvéoles laissant traverser trois électrodes de graphite. Les électrodes sont montées sur potence de hauteur réglable.

Toute la construction est montée sur un chemin de roulement en arc de cercle facilitant le basculement du four pour la coulée de l'acier ou du laitier.

La charge s'effectue en une seule fois, la capacité des fours est très variable de 0,5 à 200 tonnes environ. Pour un four possédant une cuve de 7400 mm, il faut une puissance du transformateur de 50 000 - 68 000 kVA. Les tensions s'étagent en général entre 80 et 500 V.

Pour un grand four, la tension maximale en période de fusion peut atteindre 560 V.

Les diamètres des électrodes sont de 600 mm. La capacité maximum est de 180 tonnes.

Conduite des opérations

1° Chargement des matières. Le four est chargé à l'aide du panier, de riblons, de minerai oxydé et de chaux pour la formation du laitier.

2° Fusion et oxydation. Le phosphore passe au laitier et le fer s'oxyde après élimination complète du phosphore. Le bain est recouvert d'une scorie noire oxydée. La teneur en carbone du bain est alors basse.

Une prise d'éprouvette renseigne sur la fin de cette phase.

3° Décrassage complet. La déphosphoration étant terminée, le bain suffisamment chaud et le laitier suffisamment fluide, on arrête le courant et on décrasse soigneusement. Car il est nécessaire que pendant la période suivante, qui ne sera plus oxydante, le phosphore ne puisse pas repasser du laitier dans le métal.

4° Désoxydation et désulfuration. On rétablit le courant et l'on ajoute de la chaux et des fondants (spath-fluor, silice alumine) pour refaire un deuxième laitier.

La haute température réalisée permet la formation de carbure de calcium, excellent réducteur, qui se diffuse dans le laitier où il accélère la désoxydation et par la suite la désulfuration.

On ajoute également des déchets d'électrodes ou de l'antracite dont le rôle est de désoxyder le laitier.

Il est facile de reconnaître que le laitier est pauvre en oxyde: il devient blanc.

5° Additions finales. Après les essais technologiques sur les échantillons et l'analyse chimique de l'acier, on procède aux additions finales en ajoutant des ferro-alliages, ou les éléments alliés (Ni, Cr, W, Co, etc.) pour ajuster l'acier à la composition voulue.

6° La coulée. Le métal amené à la température et à la composition recherchée peut être coulé après le décrassage.

Légendes fig. 1-11.

- 1. La ferraille (riblons)
- 2. Le minerai
- 3. La chaux
- 4. Premier décrassage
- 5. La chaux
- 6. Les fondants
- 7. Prise de l'éprouvette
- 8. Les additions finales
- 9. Deuxième décrassage
- 10. La coulée de l'acier électrique
- 11. La lance
- 12. Piston hydraulique pour le basculement du four
- 13. La voûte amovible
- 14. Electrode
- 15. Panier de chargement avec le fond en lamelles

Four à arc électrique Héroult

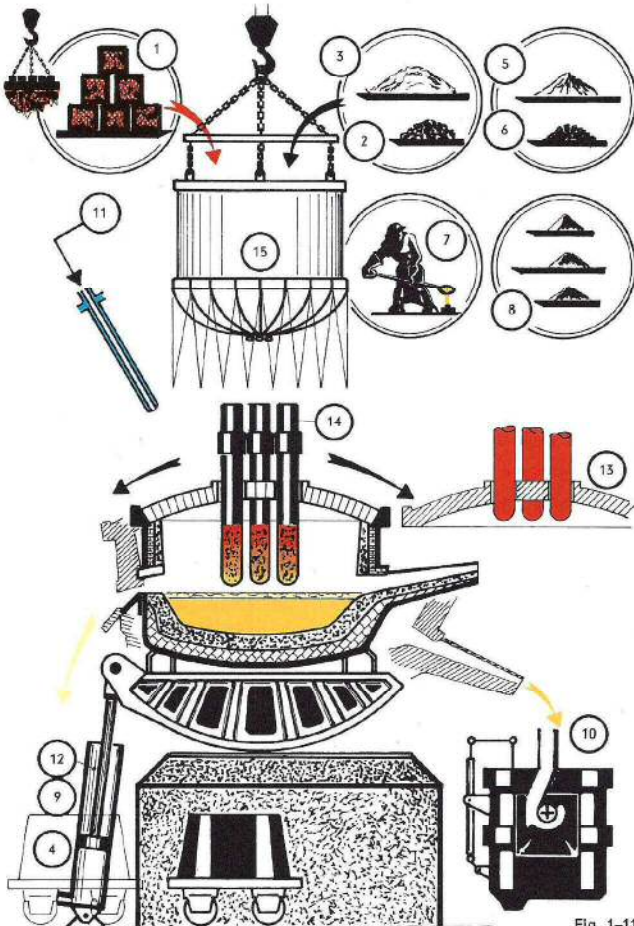


Fig. 1-11

UTILISATION DES INJECTIONS

Au four électrique à arc (fig. 1-12)

A. La déphosphoration: elle se fait par insufflation au moyen d'une lance émergée, refroidie à l'eau, d'un mélange de chaux et de spath en poudre véhiculé par l'oxygène pur.

Le débit de poudre et le débit d'oxygène, contrôlés automatiquement, apportent ainsi à l'intérieur du four les éléments nécessaires à la composition du laitier.

B. La recarburation: elle s'effectue par insufflation, au moyen d'une lance immergée, de poudre de graphite ou de coke véhiculée par l'air dans le bain d'acier recouvert ou non de laitier.

C. La désulfuration: elle s'effectue par insufflation de chaux et de magnésium véhiculés par l'azote ou l'argon, au moyen d'une lance immergée.

D. Les additions métalliques:

- 1. Produit de réduction
- 2. Ferro-alliages

Les additions s'effectuent ainsi par insufflation, véhiculées par air ou par azote, toujours au moyen d'une lance immergée.

Légendes fig. 1-13

- 1. Matières premières
- 2. Broyage
- 3. Brai
- 4. Tamis
- 5. Produits classés selon leur granulométrie
- 6. Trémie de brai
- 7. Pesage
- 8. Malaxeur (chauffé)
- 9. Refroidisseur
- 10. Filage
- 11. Refroidissement
- 12. Cuisson
- 13. Graphitation
- Usinage**
- 14. Nipple
- Electrode Söderberg**
- 15. Enveloppe de tôle mince
- 16. La pâte
 - I. Pâte crue
 - II. Pâte en cours de cuisson par rayonnement et par effet Joule
 - III. Pâte cuite, l'enveloppe de tôle fond
- 17. Voûte du four électrique
- 18. Electrode

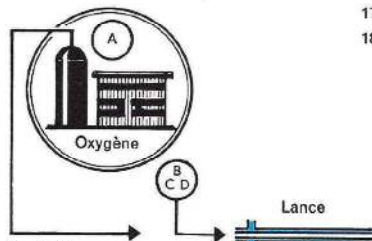


Fig. 1-12

Fabrication des électrodes

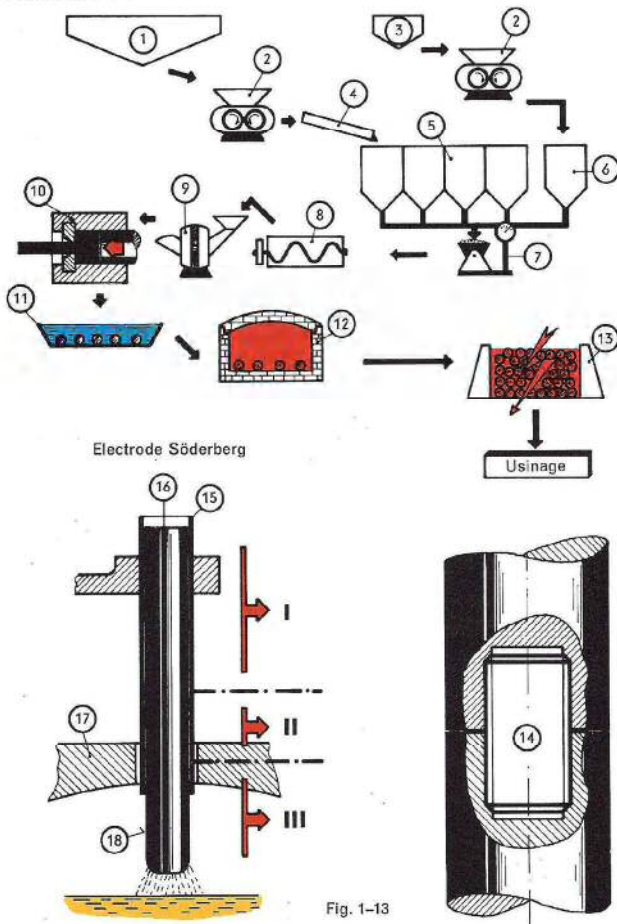


Fig. 1-13

Conduite des opérations:

1^o La charge est constituée par des riblons sélectionnés, des alliages précis, des ferro-manganèses, des ferro-siliciums, etc...

2^o Fusion et affinage: les réactions d'affinage y sont limitées, bien que favorisées par un brassage du bain dû aux forces électromagnétiques.

Dans le four à induction à creuset, il n'est pas possible de travailler avec de la scorie liquide, étant donné que la scorie est chauffée par le métal et ne peut atteindre les températures requises pour la liquéfaction des scories.

Par contre, il est possible de procéder à la désulfuration avec de la scorie sèche.

En raison de l'absence du graphite des électrodes, il n'y a pas de carburation du bain.

L'affinage à l'oxygène ne peut être pratiqué qu'avec certaines restrictions à cause de l'usure excessive du creuset.

3^o Prise de l'éprouvette.

4^o Additions finales.

Après le décarassage, dès que le bain est suffisamment pur, on ajoute les quantités voulues des ferro-alliages.

5^o Coulée de l'acier électrique.

Aciers électriques

1. 7. 2. Le four à induction

(Fig.1-14)

Le four à induction, considéré pendant longtemps comme outil de luxe réservé aux fabrications de quantités minimales de métaux très spéciaux, est devenu aujourd'hui un outil de production de masse qui, tout en restant très loin des capacités évoquées dans les procédés précédents, a cessé d'être un « petit four ».

Sa capacité, limitée à quelques tonnes jusqu'en 1950, atteint maintenant pour l'acier environ 20 tonnes.

Avantages

Bon mélange de la charge fondue. Obtention d'alliages parfaits, suivant analyse.

Bonne régulation de la température en adaptant judicieusement l'amenée de puissance par réglage de la tension. Aucune surchauffe locale, d'où pertes au feu minimales, même lors de la fonte de copeaux.

Frais minimaux d'exploitation et d'entretien.

Principe

Mélange et fusion des matériaux nécessaires à l'obtention du produit désiré: acier et métaux d'addition.

Four

Le four à induction est constitué par un creuset cylindrique en matière réfractaire (acide, basique ou neutre) entouré d'un tuyau de cuivre à grand nombre de spires, servant de circuit primaire, par lequel on fait passer de l'eau de refroidissement et du courant

alternatif de quelques centaines à plusieurs dizaines de milliers de périodes par seconde.

Des courants de très forte intensité sont ainsi « induit » dans la masse métallique formant circuit secondaire — ferraille par exemple — placée dans le creuset à l'intérieur du champ magnétique et provoquant l'élévation de la température nécessaire à la fusion. Une enveloppe extérieure en tôle d'acier maintient le tout et comporte le dispositif de basculement du four pour la coulée de l'acier.

Légendes fig. 1-14

CHARGE	1. Riblons sélectionnés – Masse métallique formant circuit secondaire 2. Ferro-manganèse, ferro-silicium, etc. – Scorie sèche
CONTRÔLE	3. Prise de l'éprouvette
ADDITIONS	4. Ferro-alliages
PRODUIT	5. Acier électrique
DÉTAILS	6. Creuset 7. Tuyau de cuivre entourant le creuset d'un grand nombre de spires Circuit primaire – Eau de refroidissement 8. Source de courant 9. Axe de basculement 10. Piston hydraulique

Four à induction

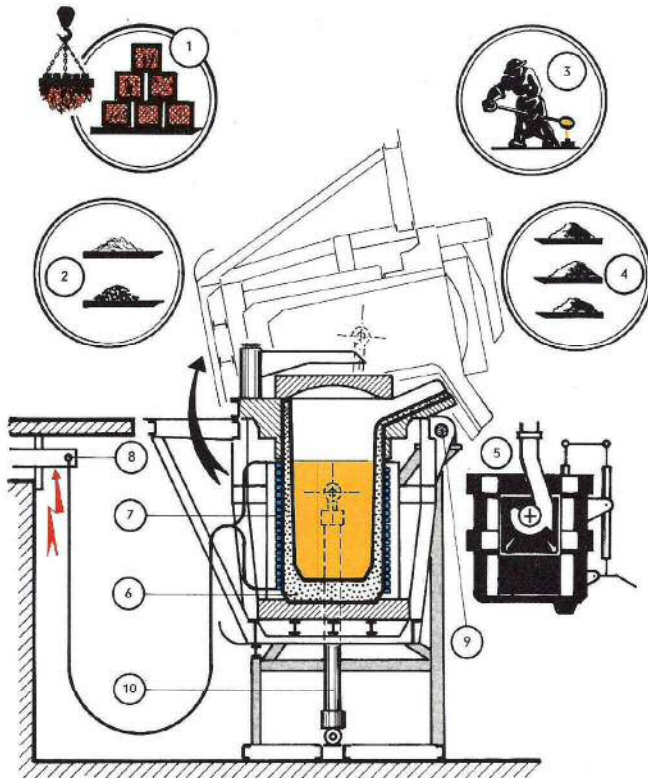


Fig. 1-14

1. 8. Application du vide en aciérie

Les recherches effectuées en laboratoire et en atelier ont montré l'influence néfaste des gaz en solution dans l'acier.

— L'hydrogène provoque: flocons et fissurations capillaires.

— L'azote: le vieillissement et les inclusions de nitrures.

— L'oxygène: les inclusions d'oxydes.

Par le traitement sous vide, on a la possibilité d'éliminer en partie ces gaz, ce qui entraîne une amélioration de la ductilité de l'acier (allongement et striction).

Ce traitement sous vide réservé pour les aciers spéciaux tend à devenir une pratique courante en aciérie.

La mise en œuvre de cette technique du vide a été faite suivant les processus suivants:

PREMIER PROCÉDÉ

Dégazage de la masse de métal (fig. 1-15)

Principe

Traitement sous vide du métal liquide en poche ou en lingotière après l'élaboration par les procédés classiques (le four Martin, les convertisseurs Thomas, Bessemer ou à oxygène, les fours électriques à arc ou à induction).

Conduite des opérations

Placer la poche de coulée dans une cuve à vide.

L'efficacité de ce traitement très simple est rapidement éliminée dans le cas de poches de grande profondeur, le dégazage de l'acier situé dans la partie inférieure de la poche est médiocre.

DEUXIÈME PROCÉDÉ

Traitement du jet d'acier au défilé (fig. 1-15)

Principe

(Bochumer Verein en Europe, F. J. Stockes aux Etats-Unis.)

Conduite des opérations

La poche venant du four d'élaboration n'est pas mise sous vide, mais on fait écouler le métal provenant de la poche principale dans une poche intermédiaire placée sur la cuve à vide.

De cette poche intermédiaire l'acier va s'écouler dans la cuve où sera placée une autre poche ou une lingotière.

C'est donc essentiellement le jet de métal qui est soumis au dégazage.

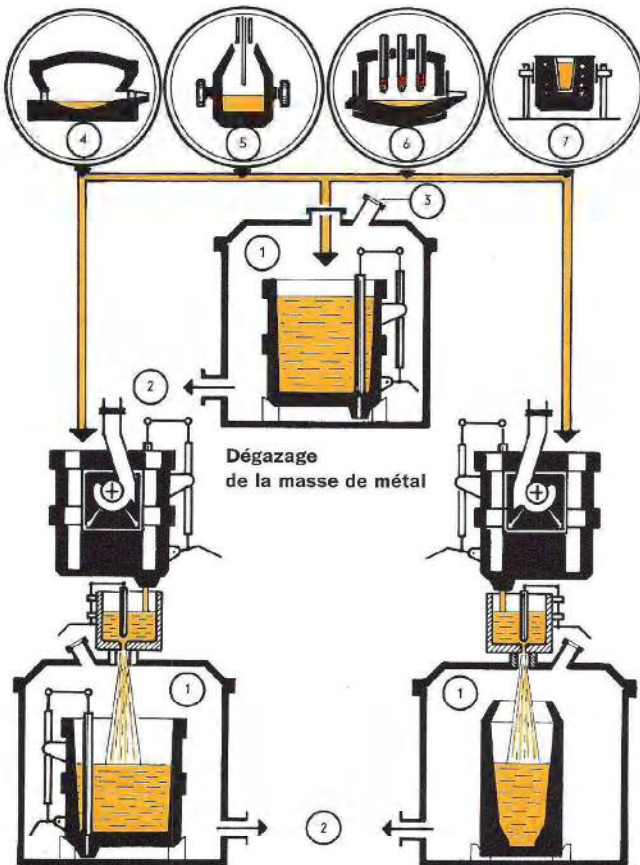
Les inconvénients sont:

Refroidissement de l'acier et, d'autre part, l'éclatement du jet, qui se produit en général lorsque celui-ci est brusquement soumis au vide, peut être préjudiciable à la coulée.

Certains profils de busettes mis au point par l'Irside ont porté remède à cet inconvénient.

Légende fig. 1-15

1. Chambre à vide
2. Aspiration
3. Regard
4. Four Martin
5. Convertisseur à oxygène
6. Four électrique à arc
7. Four électrique à induction



Traitement du jet d'acier au défilé

Fig. 1-15

TROISIÈME PROCÉDÉ (fig. 1-16)

Traitement du prélèvement de métal contenu dans une poche

Principe

Circulation du métal sous vide.

Utilisation de la pression atmosphérique pour faire remonter une partie du métal dans un récipient sous vide placé au-dessus de la poche.

Appareil

Une chambre de dégazage avec à sa partie inférieure deux canalisations immergées dans la poche de coulée.

Conduite des opérations

Après avoir immergé les deux tubes dans le métal, la mise sous vide du récipient a pour effet de faire monter le niveau du métal dans les tubes et de le faire pénétrer dans le récipient où il se dégaze.

La circulation est obtenue par les deux principes suivants:

a) **Ruhrstahl-Heraeus (Europe)**. Par un flux de gaz neutre introduit dans un des canaux, ce qui accélère la remontée de l'acier.

b) **Thermoflow et F. J. Stockes (USA)**. Par deux pompes électromagnétiques exerçant respectivement sur le métal contenu dans chaque tube une force de sens contraire.

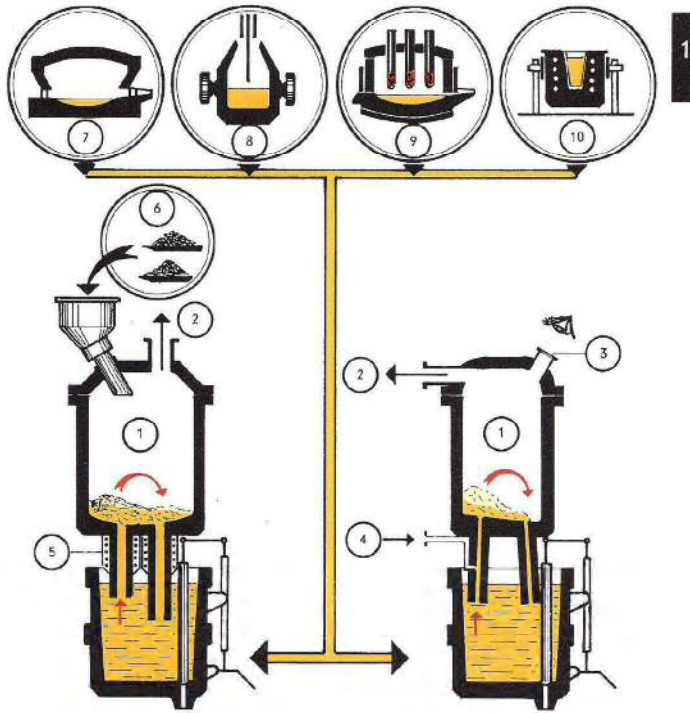
Le même dispositif assure le chauffage par induction de l'acier dans les tubes. Le débit de circulation est de 30 tonnes/min avec des tubes de 500 mm de diamètre intérieur pour une poche de 115 tonnes.

En résumé

Pour avoir un meilleur rendement au traitement sous vide, il faut éviter les pertes thermiques et avoir la possibilité d'effectuer des additions pour amener l'acier à la composition voulue.

Légendes fig. 1-16

1. Chambre à vide
2. Aspiration
3. Regard
4. Gaz neutre
5. Pompes électromagnétiques
6. Les additions pour la composition recherchée de l'acier
7. Four Martin
8. Convertisseur à oxygène
9. Four électrique à arc
10. Four électrique à induction



Thermoflow et F. J. Stockes (USA)

Ruhrstahl - Heraeus (Europe)

Traitement du prélèvement de métal contenu dans une poche

Fig. 1-16

Four à électrode consommable

(fig. 1-17)

Principe

Refondre sous vide une électrode (l'électrode consommable) constituée par le métal élaboré à l'analyse cherchée.

Cette électrode peut être préparée par un four à arc électrique ou dans un four à induction sous vide.

Appareil

Voir dessin fig. 1-17

Conduite des opérations

L'électrode à refondre est fixée à un support relié à une source de courant continu: **pôle négatif**.

Après avoir fait le vide, on amorce l'arc, entre le **pôle positif**, constitué par le fond du creuset en cuivre.

La fusion de l'électrode et la solidification du lingot produit se poursuivent progressivement jusqu'à la fin de l'opération.

Caractéristiques

Pas de risque de contamination par le garnissage du creuset (four à induction).

Le refroidissement rapide du lingot réduit la ségrégation.

Les inclusions ont tendance à se rassembler en tête du lingot par flottation.

L'ensemble de ces qualités a permis de réaliser des lingots très gros, 25 tonnes environ, en alliages très complexes et de rendre forgeables des qualités considérées inforgeables.

Four à induction sous vide

(fig. 1-17)

Principe

Elaboration et coulée sous vide du métal.

Appareil

Voir dessin fig. 1-17

Conduite des opérations (sous vide)

1. La charge est constituée d'acier dont la composition est connue et de ferro-manganèse, ferro-silicium.

2. L'acier est fondu et purifié.

3. Additions de ferro-alliages pour la composition recherchée.

4. Le four est basculé et la coulée est effectuée en lingotières.

En résumé

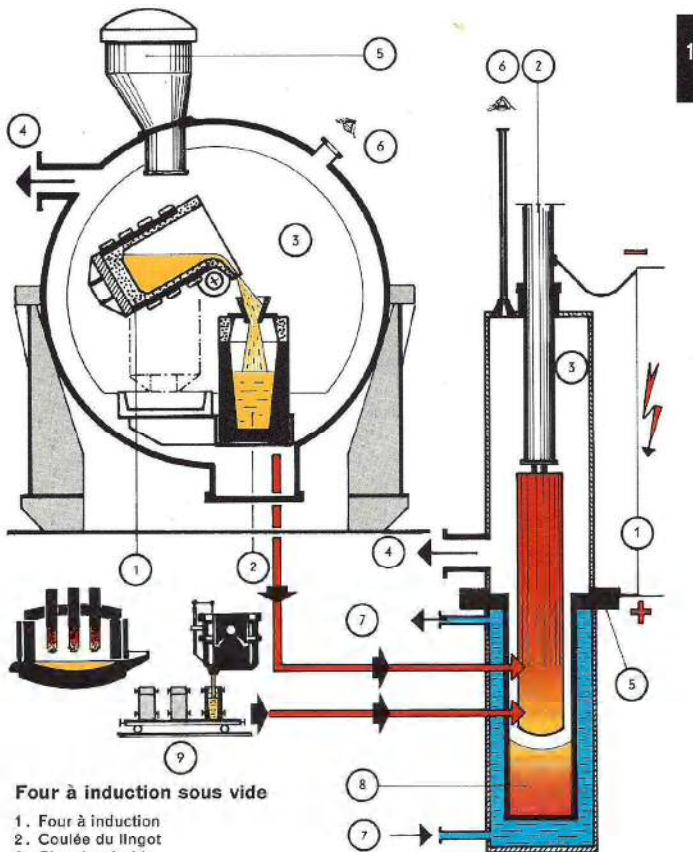
Cette méthode permet d'obtenir une grande précision d'analyse et une propreté micrographique.

Pas de perte par oxydation, ce qui permet la composition d'alliages nouveaux contenant des additions importantes de produits très oxydables, tels que titane et aluminium.

Four à électrode consommable

(fig. 1-17)

1. Arrivée de courant
2. Porte-électrode
3. Chambre à vide
4. Aspiration
5. Creuset en cuivre
6. Périscope
7. Arrivée et sortie de l'eau de refroidissement du creuset
8. Lingot (produit obtenu)
9. Electrode consommable



Four à induction sous vide

1. Four à induction
2. Coulée du lingot
3. Chambre à vide
4. Aspiration
5. Trémie pour le chargement et les additions
6. Regard

Four à électrode consommable

Fig. 1-17

1. 9. La coulée de l'acier

A. Coulée en source (fig. 1-18)

1. Poche de coulée en acier revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire.

2. Quenouille pour la fermeture.

3. Nourrice alimentant les lingotières par le bas. **Principe des vases communicants.**

4. Briques réfractaires percées d'un trou central formant canal. Ces dernières sont placées dans les rainures que comporte la plaque de bas en fonte.

5. Lingotière en fonte légèrement conique généralement ouverte en haut et en bas.

6. Lingotière avec masselotte.

B. Coulée directe ou en chute

7. Plaque de bas en fonte.

C. Coulée continue - Modèle « S »

8. Panier distributeur pour plusieurs lingotières.

9. Lingotière curviligne en cuivre avec refroidissement à eau pour obtenir des billettes, brames et blooms.

10. Chambre de réfrigération. Pulvérisation d'eau pour continuer le refroidissement.

11. Corset de guidage en arc de cercle.

12. Redresseuse.

13. Chalumeau oxycoupeur pour la coupe des barres.

Le chalumeau se déplace à la même vitesse d'évacuation de la barre pour obtenir une coupe droite.

La coulée continue supprime: lingot, four de réchauffement et le train de blooms.

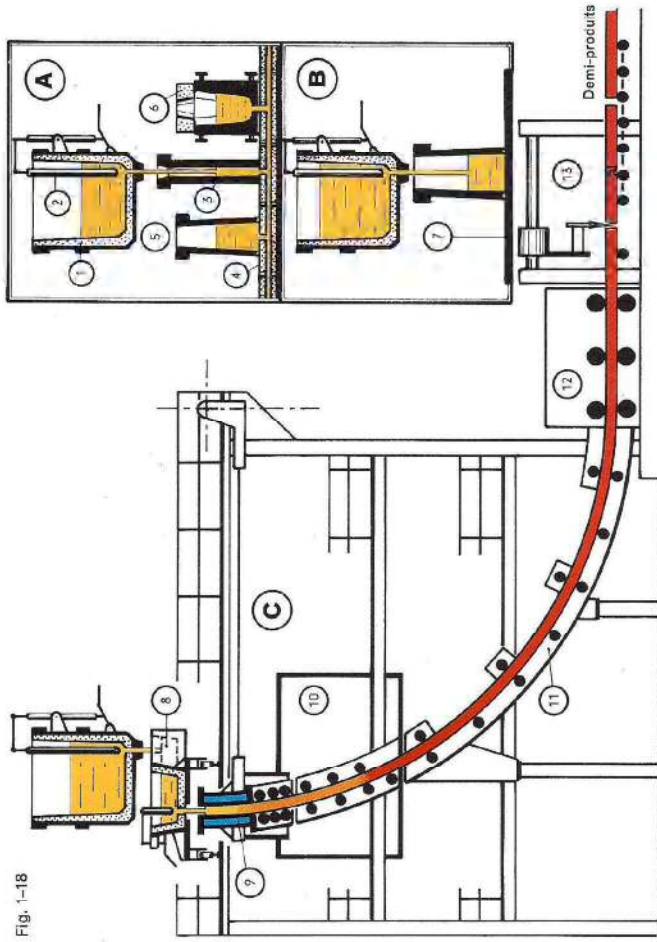
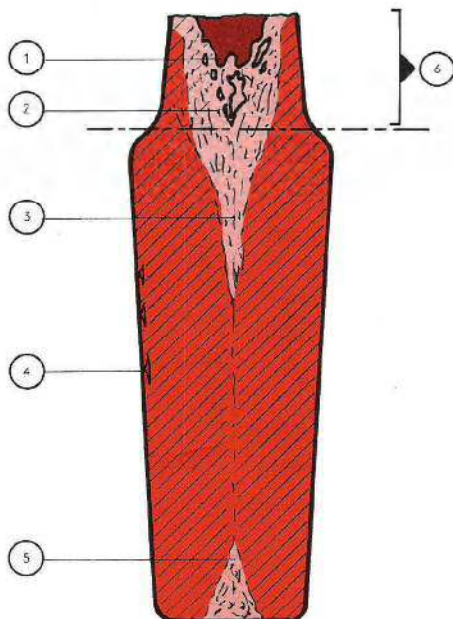


Fig. 1-18

Défauts des lingots d'acier (fig. 1-19)

1. Retassure
2. Flocons
3. Ségrégation
4. Soufflures
5. Ségrégation en V
6. Partie chutée



Coupe d'un lingot

Fig. 1-19

1. 10. Les défauts des lingots

1. 10. 1. Retassure

Le passage de l'état liquide à l'état solide est accompagné d'une diminution de volume (retrait). Le refroidissement s'effectue à partir des parois et se développe perpendiculairement à celle-ci, donc la retassure se produit dans la partie qui se solidifie en dernier lieu.

Moyens de remédier

L'élimination par chute, qui consiste à enlever la partie du lingot contenant la retassure.

Pour diminuer l'importance de la chute, divers procédés sont utilisés:

- Localiser la retassure en disposant les lingotières, la grande base en haut.
- Par l'emploi d'une masselotte (moule en terre réfractaire) placée sur le haut de la lingotière pour maintenir à cet endroit le métal liquide assez longtemps.
- Soit par réchauffage de la partie supérieure du lingot.

1. 10. 2. Ségrégation

La ségrégation se produit par l'accumulation des impuretés dans la partie du lingot qui se solidifie la dernière. A noter que la ségrégation, qui est très accentuée au voisinage de la poche de retassure, se produit également dans toute la région voisine de l'axe du lingot, tout en diminuant à mesure que l'on approche du pied du lingot.

Moyen de remédier

La coulée continue entraîne la suppression de la ségrégation majeure.

1. 10. 3. Liquation

La liquation se traduit par un manque d'homogénéité dans un même lingot, c'est-à-dire que toutes les parties d'un lingot n'ont pas la même composition chimique. La partie qui se solidifie la dernière (le centre) contient plus de carbone, de silicium et de phosphore que la périphérie.

Moyen de remédier

La coulée continue.

1. 10. 4. Soufflures

Ce sont des poches dont les parois oxydées ne se ressoudent pas à chaud. Elles sont dues à la présence de gaz occlus dans le bain métallique persistant dans le lingot après la coulée et qui n'ont pu s'échapper au cours du refroidissement trop rapide.

Moyen de remédier

Pour réduire les soufflures au minimum, on introduit dans la poche de coulée de l'aluminium ($1/1000$ en poids de l'acier) ou du silicium, le dégagement gazeux cesse, on dit que l'acier est calmé.

1. 10. 5. Criques

Les criques sont des déchirures de la peau du lingot, elles sont causées par le retrait.

Moyen de remédier

On les supprime par un écroûtage.

1. 10. 6. Tapures

Déchirures internes causées par le retrait.

Moyens de remédier

En ralentissant le refroidissement de l'acier par une augmentation de l'épaisseur des parois de la lingotière. En coulant à une température moins élevée.

1. 10. 7. Flocons

Ils se traduisent par de faibles cavités produites par la présence de l'hydrogène dans la partie ségrégée du lingot. Ils sont surtout fréquents dans les aciers à teneur élevée en constituants spéciaux (Ni, Cr, Mo).

Moyen de remédier

Ils peuvent être éliminés par un refroidissement lent.

1. 10. 8. Gouttes froides

Elles prennent naissance lorsqu'on coule directement le métal dans les lingotières.

Des gouttelettes de métal jaillissent sur les parois de la lingotière, se solidifient et viennent se coller sur la peau du lingot.

Moyen de remédier

Lorsqu'on coule en chute, il faut régulariser le débit de l'acier, ce qui réduit la violence de l'impact du jet de coulée.

1. 11. Ferro-alliages

Composition : les ferro-alliages sont formés de fer, de carbone et d'un élément essentiel: Si, Mn, W ou Mo, etc., qui domine avec des teneurs pouvant atteindre 70 à 90%.

Utilisation : les ferro-alliages sont presque exclusivement utilisés comme additions finales dans la fabrication de l'acier, soit pour désoxyder et ajuster le bain, **ferro-manganèse**, **ferro-silicium**, soit pour introduire les éléments dans l'acier allié. **Cr, W, Mo**, etc.

Fabrication : les ferro-siliciums dont la teneur en Si est inférieure à 15% et les ferro-manganèses titrant moins de 25% de Mn, appelés **Spiegels**, sont fabriqués dans le haut fourneau.

Pour la grande majorité, le four électrique type Héroult sans voûte, ce qui facilite le chargement.

Principaux ferro-alliages :

1. **Ferro-manganèse**,
 - 25 à 85% de Mn
 - 0,05 à 6,5% de C

Un excès de silice dans la charge donne:

 - Silico-spiegel**, 10 à 12% de Si
 - 18 à 22% de Mn

Silico-manganèse,

 - 20 à 30% de Si
 - 50 à 70% de Mn
2. **Ferro-silicium**, 10 à 99% de Si
3. **Ferro-chrome**, 70% de Cr
- 0,03 à 12% de C
4. **Ferro-tungstène**, 80% de W
5. **Ferro-molybdène**,
 - 60% de Mo
6. **Ferro-vanadium**, 35 à 85% de V
7. **Ferro-titane**, 30 à 50% de Ti
- 8 à 12% de C
8. **Mangano-silico-aluminium**,
 - 18 à 22% de Si
 - 18 à 22% de Mn
 - 9 à 12% Al
9. **Silico-aluminium**,
 - 30 à 75% Si
 - 10 à 50% Al