

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur  
Département : Métallurgie et génie des  
matériaux

Domaine : Science et technologie

Filière : Métallurgie

Spécialité : Génie Métallurgique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Etude Du Processus d'élaboration des semi-produits dans  
l'aciérie électrique**

Présenté par : *GHEBGHOUB Badreddine*

Encadrant : *BOUCIF Djamel . Grade Docteur Université Badji Mokhtar Annaba*

### Jury de Soutenance :

BOUDEBANE Said	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Président
BOUCIF Djamel	Docteur	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
SNANI Louafi	Docteur	Badji Mokhtar Annaba	Examineur
BOUDEBANE Azzeddine	Docteur	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

## Remerciements

*Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et la foi pour parvenir à ce petit travail. En second lieu je remercie mes parents qui, sans eux, je n'aurais jamais été arrivé jusque là.  
A toi papa et à toi maman.*

*Je tiens aussi à remercier le professeur BOUCIF Djamel, en sa qualité de directeur de mémoire, il s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire,*

*Je remercie aussi tous mes enseignants du cycle master du département de la métallurgie et génie des matériaux avec qui j'ai appris tant de choses.*

*Enfin, je remercie mes frères et ma sœur et tous mes amis et mes collègues.*

## DÉDICACE

À MON PÈRE.

À MA MÈRE QUI M'A ENCOURAGÉ TOUT LE LONG DE LA  
FORMATION.

À MES FRÈRES, À MES AMIS, À TOUTE MA FAMILLE.

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS.

## Sommaire

<b>Chapitre I : Métallurgie générale.</b> .....	<b>1</b>
<b>Introduction.</b> .....	<b>2</b>
<b>Diagramme Fer-Carbone.</b> .....	<b>2</b>
<b>Propriétés de l'acier.</b> .....	<b>3</b>
<b>Une grande variété de produits sidérurgiques.</b> .....	<b>5</b>
<b>La fabrication de l'acier.</b> .....	<b>5</b>
<b>Les Grandes étapes de la fabrication de l'acier.</b> .....	<b>5</b>
<b>Les produits.</b> .....	<b>7</b>
<b>Les semi-produits.</b> .....	<b>7</b>
<b>La transformation.</b> .....	<b>8</b>
<b>Les produits finis.</b> .....	<b>8</b>
<b>Elaboration de l'acier.</b> .....	<b>10</b>
<b>Processus d'élaboration de l'acier.</b> .....//	<b>11</b>
<b>Composition chimique de l'acier.</b> .....	<b>12</b>
<b>Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier.</b> .....	<b>12</b>
<b>Influence des éléments chimiques constants.</b> .....	<b>12</b>
<b>a) Le carbone.</b> .....	<b>12</b>
<b>b) Le silicium.</b> .....	<b>13</b>
<b>c) Le manganèse.</b> .....	<b>13</b>
<b>d) Le phosphore.</b> .....	<b>13</b>
<b>e) Le soufre.</b> .....	<b>14</b>
<b>f) Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène.</b> .....	<b>14</b>
<b>Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier.</b> .....	<b>14</b>
<b>a) Eléments gamagènes (Ni, Mn).</b> .....	<b>14</b>
<b>b) Eléments alphagènes.</b> .....	<b>15</b>
<b>Chapitre II : Les fours électriques utilisés pour l'élaboration des aciers.</b> .....	<b>17</b>
<b>Généralités.</b> .....	<b>18</b>
<b>Les fours électriques utilisés pour l'élaboration des aciers.</b> .....	<b>20</b>
<b>Types de fours électriques.</b> .....	<b>20</b>
<b>Fours à résistance.</b> .....	<b>20</b>
<b>Fours à induction.</b> .....	<b>22</b>
<b>Fours à arc.</b> .....	<b>24</b>
<b>Four à arc électrique.</b> .....	<b>26</b>
<b>Définition.</b> .....	<b>26</b>
<b>Principe du procédés.</b> .....	<b>27</b>
<b>Opération.</b> .....	<b>28</b>
<b>Les principaux éléments constitutifs du four électrique.</b> .....	<b>30</b>
<b>Schéma du four à arc électrique.</b> .....	<b>32</b>
<b>Classification des fours à arc.</b> .....	<b>32</b>
<b>Avantages et inconvénients du four à arc.</b> .....	<b>33</b>
<b>L'arc électrique.</b> .....	<b>33</b>
<b>Composition du four à arc.</b> .....	<b>34</b>
<b>Description de l'équipement du four à arc électrique.</b> .....	<b>34</b>
<b>Equipement mécanique du four à arc électrique.</b> .....	<b>35</b>
<b>Equipement électrique du four à arc électrique.</b> .....	<b>47</b>
<b>Réfractaires du four à arc électrique.</b> .....	<b>50</b>
<b>Réfractaires pour la fabrication d'acier.</b> .....	<b>50</b>
<b>Réactions dans le four.</b> .....	<b>58</b>

<b>Les périodes d'élaboration dans le four à arc électrique.....</b>	<b>59</b>
<b>Principales matières premières du four électrique.....</b>	<b>59</b>
<b>Entretien du four.....</b>	<b>59</b>
<b>Chargement du four.....</b>	<b>59</b>
<b>La fusion.....</b>	<b>62</b>
<b>Période d'oxydation.....</b>	<b>62</b>
<b>Période d'oxydation des éléments.....</b>	<b>62</b>
Oxydation des éléments.....	63
Oxydation du carbone.....	63
Oxydation du Phosphore.....	65
Elimination du manganèse et du silicium.....	66
<b>Période de désoxydation.....</b>	<b>66</b>
La désulfuration.....	66
La désoxydation.....	67
<b>La coulée de l'acier.....</b>	<b>69</b>
La coulée en lingotières.....	69
La coulée en chute.....	70
La coulée en source.....	71
La coulée continue.....	71
Présentation de la coulée continue.....	71
Schéma de principe d'une machine de coulée continue.....	72
Brève description d'une machine traditionnelle.....	72
<b>Chapitre III : Calcul du bilan de matières avec période oxydante complète.....</b>	<b>75</b>
<b>Calcul du bilan de matières avec période oxydante complète.....</b>	<b>76</b>
<b>Composition, destination, exigences aux propriétés mécanique</b>	
<b>et particularités de la technologie de la production de l'acier de nuance 110F.....</b>	<b>77</b>
<b>Calcul du lit de fusion.....</b>	<b>78</b>
Période de fusion et d'oxydation.....	78
Période réductrice.....	84
Mise à la nuance.....	85
<b>Bilan thermique.....</b>	<b>89</b>
<b>Conclusion et recommandations.....</b>	<b>94</b>
<b>Chapitre IV : Partie Pratique.....</b>	<b>95</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>134</b>

## Liste des Figures

<b>Figure I.1</b> Diagramme Fer-Carbone.....	<b>2</b>
<b>Figure I.2:</b> La chaine de fabrication pour une filière fonte.....	<b>6</b>
<b>Figure I.3 :</b> Une installation de coulée continue produisant des billettes.....	<b>7</b>
<b>Figure I.4:</b> Les demi-produits : bloom, billette et brame.....	<b>8</b>
<b>Figure I.5 :</b> Laminage à chaud d'un profilé en I, Source : <i>ARBED, Luxembourg</i> .....	<b>8</b>
<b>Figure I.6 :</b> Les produits finis issus du laminage.....	<b>9</b>
<b>Figure I.7.</b> Schéma de la métallurgie primaire.....	<b>10</b>
<b>Figure I.8 :</b> Influence du carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier et sur le nombre de phases présentes dans l'acier.....	<b>13</b>
<b>Figure II.1 :</b> Diagramme d'un four à chambre de résistance indirecte à la chaleur de type batch: (1) éléments chauffants, (2) revêtement réfractaire, (3) isolation thermique, (4) plaque réfractaire.....	<b>21</b>
<b>Figure II.2 :</b> Schéma du four à refusion sous laitier électroconducteur.....	<b>21</b>
<b>Figure II.3 :</b> Schéma d'un four à résistance directe à la chaleur: (1) l'article à chauffer, (2) le transformateur de descente, (3) et (4) les contacts; (P) puissance.....	<b>22</b>
<b>Figure II.4 :</b> Chauffage d'un métal par induction.....	<b>23</b>
<b>Figure II.5 :</b> Four à induction à canal.....	<b>23</b>
<b>Figure II.6 :</b> Four à arc électrique.....	<b>26</b>
<b>Figure II.7 :</b> Coupe schématique des fours Héroult et Girod.....	<b>27</b>
<b>Figure II.8 :</b> Schéma du bilan de matière (procédé avec deux scories) pour la production de 1000kg d'acier.....	<b>27</b>
<b>Figure II.9 :</b> Diagramme de fusion d'un four à arc (exemple).....	<b>31</b>
<b>Figure II.10 :</b> Schéma du four à arc électrique.....	<b>32</b>
<b>Figure II.11 :</b> Panier de ferrailles et benne preneuse typique.....	<b>35</b>
<b>Figure II.13 :</b> Dispositif d'ouverture du panier à ferrailles.....	<b>36</b>
<b>Figure II.14 :</b> Schéma représentatif du Wagon à ferrailles.....	<b>36</b>
<b>Figure II.15 :</b> Simulation d'un four à arc électrique et plateforme de basculement.....	<b>37</b>
<b>Figure II.16 :</b> Vue isométrique des coquilles supérieure et inférieure du four à arc électrique.....	<b>38</b>
<b>Figure II.17 :</b> Coque supérieure et inférieure du four à arc électrique.....	<b>39</b>
<b>Figure II.18 :</b> Vue de côté supérieur de la coque.....	<b>39</b>
<b>Figure II.18 :</b> Coque inférieure du four à arc électrique.....	<b>40</b>
<b>Figure II.19 :</b> Coque supérieure, distribution de panneaux à refroidissement par eau.....	<b>40</b>

<b>Figure II.20</b> : Vue isométrique de la coque inférieure du four à arc électrique.....	<b>41</b>
<b>Figure II.21</b> : Vue de dessus de la coque inférieure du four à arc électrique.....	<b>41</b>
<b>Figure II.22</b> : Parties refroidies du four à arc électrique. a) Panneaux faisant la partie supérieure de la coquille, b) toiture et c) conduit de dégagement de gaz.....	<b>42</b>
<b>Figure II.23</b> : Mécanisme de porte EBT.....	<b>43</b>
<b>Figure II.24</b> : Exemple de trou de coulée EBT.....	<b>44</b>
<b>Figure II.25</b> : Vue isométrique du toit du four à arc électrique.....	<b>45</b>
<b>Figure II.26</b> : Vue supérieure du toit du four à arc électrique.....	<b>45</b>
<b>Figure II.27</b> : Section transversale du toit du four à arc électrique.....	<b>46</b>
<b>Figure II.28</b> : Système de levage du toit.....	<b>47</b>
<b>Figure II.48</b> : Les électrodes en graphite de four à arc électrique.....	<b>48</b>
<b>Figure II.50</b> : Bras d'électrodes conductrices.....	<b>49</b>
<b>Figure II.51</b> : Vue supérieure des bras d'électrodes.....	<b>49</b>
<b>Figure II.52</b> : Profil réfractaire d'un four à arc électrique.....	<b>57</b>
<b>Figure II.53</b> : Mécanisme fondamental et réactions chimiques.....	<b>58</b>
<b>Figure II.54</b> : Préparation du godet à ferraille typique.....	<b>60</b>
<b>Figure II.55</b> : Représentation du godet de chargement.....	<b>61</b>
<b>Figure II.56</b> : Chargement du four à arc électrique.....	<b>62</b>
<b>Figure II.57</b> : Réactions survenant lors de la fusion.....	<b>64</b>
<b>Figure II.58</b> : Déphosphoration de l'acier.....	<b>66</b>
<b>Figure II.59</b> : courbes d'équilibre théorique et réel entre le C et O <sub>2</sub> .....	<b>67</b>
<b>Figure II.60</b> : représentation de la coulée de l'acier.....	<b>69</b>
<b>Figure II.61</b> : La coulée en lingotière.....	<b>70</b>
<b>Figure II.62</b> : La coulée en chute.....	<b>70</b>
<b>Figure II.63</b> : La coulée en source.....	<b>71</b>
<b>Figure II.64</b> : Schéma d'une machine de coulée continue.....	<b>72</b>
<b>Figure II.65</b> : les différents types de construction du système de coulée continue.....	<b>74</b>
<b>Figure III.1</b> : La dépendance du coefficient de partage.....	<b>80</b>
<b>Figure III.2</b> : Influence de la basicité du laitier sur le coefficient de partage du soufre lors de la période oxydante.....	<b>82</b>
<b>Figure IV.1</b> : la coulée en source CES.....	<b>106</b>
<b>Figure IV.2</b> : dispositif de la coulée en source.....	<b>107</b>
<b>Figure IV.3</b> : schéma descriptif concernant le contrôle de qualité du lingot.....	<b>108</b>
<b>Figure IV.4</b> : image réelle d'unité de tube sans soudure (TSS).....	<b>119</b>
<b>Figure IV.5</b> : parc a lingots.....	<b>120</b>
<b>Figure IV.6</b> : table enfournement.....	<b>120</b>

<b>Figure IV.7</b> : enfournement du lingot.....	<b>121</b>
<b>Figure IV.8</b> : défournement du lingot.....	<b>122</b>
<b>Figure IV.8</b> : machine presse à percer.....	<b>122</b>
<b>Figure IV.9</b> : enfournement de l'ébauche au four plateau.....	<b>123</b>
<b>Figure IV.10</b> : laminoir oblique L O.....	<b>124</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Pourcentage des éléments essentiels tels que Fe, C, et O <sub>2</sub> avant affinage, avant et après l'opération de désoxydation.....	<b>12</b>
<b>Tableau I.2 :</b> Influence des principaux éléments d'alliage sur les différentes propriétés de l'acier.....	<b>16</b>
<b>Tableau II.1.</b> Les effets de la combustion.....	<b>63</b>
<b>Tableau III.1.</b> Composition chimique de la nuance 110F.....	<b>76</b>
<b>Tableau III.2.</b> Composition chimique des matières fondantes et réfractaire.....	<b>76</b>
<b>Tableau III.3.</b> Composition chimique de la charge métallique ferroalliages et coke.....	<b>77</b>
<b>Tableau III.4.</b> la composition chimique de la charge adoptée.....	<b>79</b>
<b>Tableau III.5.</b> Quantité d'oxygène nécessaire pour l'oxydation du silicium, manganèse et phosphore.....	<b>83</b>
<b>Tableau III.6.</b> La composition chimique de départ et celle pour l'obtention de l'acier 110F..	<b>85</b>
<b>Tableau III.7.</b> Chaleur apportée par les matières premières.....	<b>89</b>
<b>Tableau III.8.</b> Détermination de l'énergie électrique.....	<b>93</b>
<b>Tableau IV.1 :</b> code de défaut sur lingots.....	<b>109</b>
<b>Tableau IV.2 :</b> défaut d'ACE pendant les 5 dernières années.....	<b>110</b>
<b>Tableau IV.3 :</b> Nuances d'aciers élaborées dans l'aciérie électriques pour TSS.....	<b>112</b>
<b>Tableau IV.4 :</b> Criques d'Accrochage.....	<b>113</b>
<b>Tableau IV.5 :</b> Criques de coulée.....	<b>114</b>
<b>Tableau IV.6 :</b> Incrustations et croûtes.....	<b>115</b>
<b>Tableau IV.7 :</b> Double peau.....	<b>116</b>
<b>Tableau IV.8 :</b> Reprise de coulée.....	<b>117</b>
<b>Tableau IV.9 :</b> Soufflures.....	<b>118</b>
<b>Tableau IV.10 :</b> réclamation au niveau du TSS pour quelques coulées.....	<b>130</b>



## Liste des graphes

- Grphe 01** : le taux de rebut global par catégorie de nuance d'acier.....111
- Grphe 02** : l'influence de la section sur l'apparition des défauts au niveau ACE.....111
- Grphe 03** : Le taux de défaut de paille extérieure au niveau du tube (Tube sans soudure) pendant une période de 3 mois (Janvier, février et Mars) de l'année 2017.....131
- Grphe 04** : courbe d'équilibre réelle et théorique entre le carbone et l'oxygène.....133

# Chapitre I

## Métallurgie générale

# Métallurgie générale

## I- Introduction

L'acier est le matériau de prédilection de l'architecture durable, créative et technique. Il cumule de multiples avantages pour la construction neuve, la rénovation ou l'évolution. Il peut être utilisé sur toutes les formes, toutes les dimensions qui sont permises, en plus, les constructions en acier sont modulables, faciles à entretenir, à réhabiliter et sont évolutives. L'acier, on peut le qualifier d'élément évolutif.

Les aciers sont également caractérisés par leur composition chimique qui n'intervient pas directement en résistance des matériaux mais qui joue un rôle important notamment en matière de soudabilité et aussi dans son comportement à la corrosion des ouvrages métalliques.

Les produits en acier utilisés en construction métallique présentent deux types des caractéristiques qui interviennent dans les calculs de résistance des matériaux, qui sont d'une part des caractéristiques mécaniques intrinsèques, fonction de la nuance de l'acier et d'autre part des caractéristiques géométriques et d'inertie propres au produit et qui dépendent de ses dimensions et de sa géométrie. [23]

## II- diagramme fer-carbone :

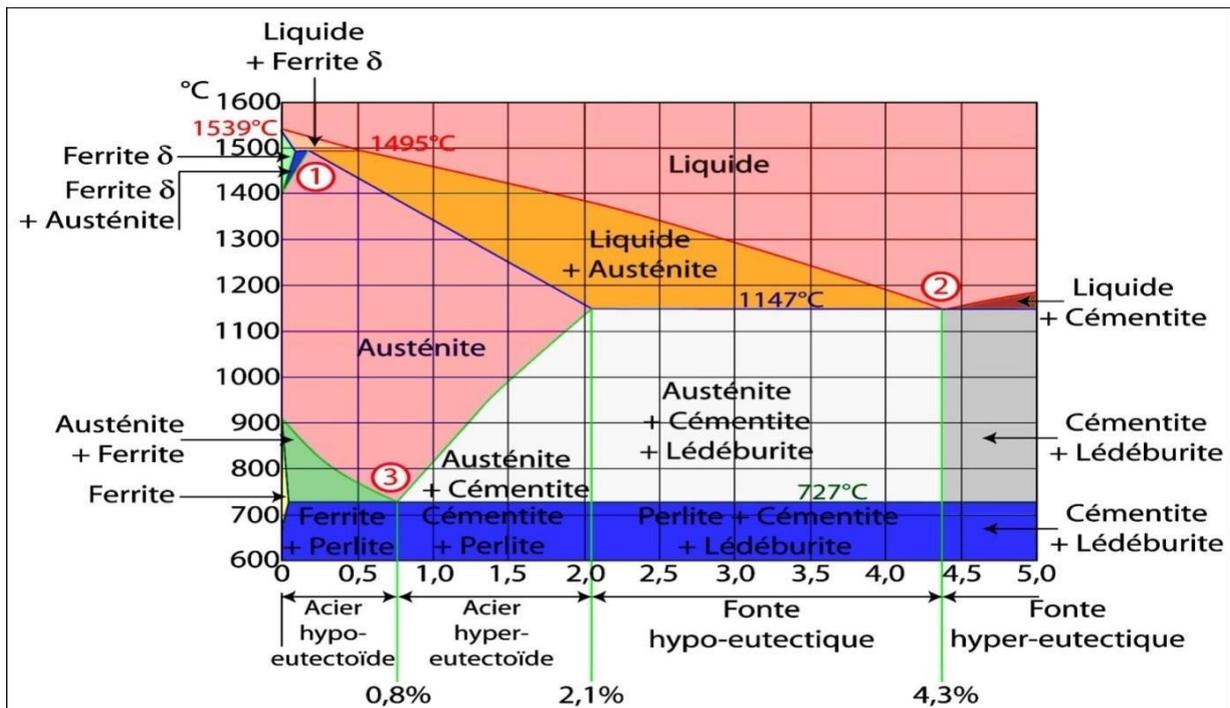


Figure I.1 Diagramme Fer-Carbone.

La microstructure d'un acier est déterminée par la composition chimique et le traitement thermomécanique appliqué pendant le processus de fabrication ou pendant les traitements thermiques post-production.

Selon la microstructure et la teneur en carbone de l'acier, on distingue trois phases : Hypoeutectoïdes, eutectoïdes, hypereutectoïdes est représenté à la **figure ...**

En premier lieu les aciers hypoeutectoïdes qui contiennent jusqu'à 0,77 % de carbone et sont malléables, Puis les aciers eutectoïdes à 0,77 % de carbone, Enfin les aciers hypereutectoïdes supérieurs à 0,77 % de carbone.

Et d'après ces 3 phases on classe les aciers comme suit :

- aciers extra doux :  $\%C < 0,15 \%$  ;
- aciers doux :  $0,15 \% < \%C < 0,2 \%$  ;
- aciers demi-doux :  $0,2 \% < \%C < 0,3 \%$  ;
- aciers demi durs :  $0,3 \% < \%C < 0,4 \%$  ;
- aciers durs :  $0,4 \% < \%C < 0,6 \%$  ;
- aciers extra durs :  $0,6 \% < \%C$ .

La microstructure d'un acier dépend aussi du traitement thermique qui lui confère des phases. On distingue trois : inférieure à 912 °C, de 912 à 1394 °C et supérieure à 1394 °C. [24]

### III- Propriétés de l'acier

Par la grande diversité de ses caractéristiques, à chaque emploi peut correspondre un acier. Qui sont masse volumique, module d'élasticité longitudinal, coefficient de Poisson, coefficient de dilatation, conductivité thermique et résistivité électrique .

Les propriétés d'un acier varient énormément en fonction de sa composition chimique et du traitement thermomécanique appliqué pendant le processus de fabrication. Ces deux caractéristiques déterminent sa microstructure et les traitements de surface interviennent également dans ses propriétés

Les différentes caractéristiques mécaniques et propriétés d'emploi sont :

**a) Résistance statique** : capacité à maintenir l'intégrité notamment en ce qui concerne les risques de rupture face aux sollicitations mécaniques. On examine dans certains cas les données en tenant compte de la température et/ou de la vitesse de déformation. Les valeurs de référence établies grâce à un essai de traction sont :

- Re (limite d'élasticité) qui détermine la limite au-delà de laquelle apparaissent des déformations plastiques,
- Rm (résistance à la traction) qui caractérise bien la force maximale que peut supporter un élément de structure soumis à une traction pure. [24]

**b) Ductilité** : la capacité à supporter une déformation. On suit, toujours à travers de l'essai de traction, les valeurs sont les suivantes :

- A (allongement après rupture),
- Z (coefficient de striction reflétant par exemple les possibilités de formage à froid du métal),
- Ag allongement réparti (observé sur l'éprouvette avant le début de la striction et

correspondant à la force équivalente à la résistance à la traction). Cette dernière valeur permet d'apprécier la sécurité en service.

Eventuellement, on utilise  $R_m/R_e$  comme indice de la capacité de déformation plastique de l'acier.

▪ En outre le coefficient d'anisotropie plastique et le coefficient d'écrouissage sont particulièrement pris en compte pour l'emboutissage notamment des tôles pour automobiles.[24]

**o) Dureté:** la mesure de la résistance à la déformation d'un matériau.

Différents essais existent en fonction de la forme du pénétrateur et de la référence permettant d'estimer la facilité d'enfoncement comme le diamètre de l'empreinte d'une bille dans les essais Brinell.

Cette caractéristique fait l'objet de spécifications seulement pour un petit nombre de produits (certains fers blancs, les aciers à outils, quelques aciers résistant à l'abrasion par exemple) ainsi que pour certains états de livraison pour traitements thermiques (état adouci).

La simplicité et la rapidité de la mesure favorisent son utilisation pour des contrôles intermédiaires lors du procès ou pour obtenir des indications indirectes sur les propriétés de traction d'un produit (voir NF EN ISO 18265 sur la conversion des valeurs de dureté).

Elle est utilisée également pour caractériser l'aptitude à la trempe (essai Jominy) ou pour évaluer le comportement au soudage. On utilise aussi cette mesure pour certains suivis comme la stabilité structurale en service (vieillessement thermique ou fluage). [24]

**d) Ténacité ou résilience:** capacité à résister à l'amorçage ou à la propagation de fissures.

Elle est évaluée en particulier lors des essais de rupture en flexion par choc. Il s'agit on autres de caractériser l'acier par rapport à sa résistance à la rupture fragile. On peut évaluer également la rupture fragile par la valeur du facteur d'intensité de contrainte critique K<sub>IC</sub>. D'autres essais existent comme entre autres les essais Batelle ou Robertson.

On différencie les « ruptures ductiles » et les « ruptures fragiles » en faisant intervenir parfois le faciès des ruptures (clivage et inter -granulaire pour un faciès macroscopique fragile, ductile ou à cupules). Les aciers présentent généralement avec la température une transition de ténacité ductile -fragile. Les ruptures dans la zone de transition sont mixtes et l'on définit un taux de cristallinité (pourcentage de la cassure d'aspect fragile).

On vérifie en plus l'aptitude au pliage par l'absence de fissures lors d'une opération de pliage avec un rayon et pour un angle donnés.

Ces caractéristiques mécaniques permettent de dimensionner une construction ou un appareil à partir de critères de résistance à la déformation et à la rupture. [24]

**e) Endurance :** résistance d'une pièce à des sollicitations répétées et d'une amplitude inférieure à la limite d'élasticité (fatigue)

Traditionnellement, la courbe de base utilisée pour refléter cette caractéristique est la courbe de Wöhler, on peut alors évoquer la limite d'endurance correspondant à l'asymptote de la courbe.

Une autre mesure correspond à la résistance au fluage : comportement sous charge constante

à une certaine température.

La notion de fatigue sera prise en compte par exemple pour les aciers de construction mécanique notamment pour l'automobile ou pour les aciers utilisés dans la construction de structures (bâtiments, ponts) et dans les appareils soumis à pression en particulier dans le nucléaire.

Les aciers spéciaux résistant au fluage sont utilisés principalement dans le domaine de l'énergie (rotors, turbines) et de la pétrochimie (appareils sous pression).

On s'intéresse également, en particulier dans le cas des tôles minces pour emboutissage, à la notion de vieillissement (évolution des caractéristiques avec le temps notamment après écrouissage avec la diffusion du carbone ou de l'azote libre). Pour les aciers spéciaux, on surveille la fragilisation possible des aciers (évolution de la température de transition fragile - ductile ou abaissement de ductilité ou de résistance). [24]

Le choix d'un acier est toujours mené en prenant en compte les conditions du milieu où il est utilisé. Ainsi par rapport à l'emploi et la résistance à la corrosion, on pourra s'orienter sur le choix d'aciers revêtus, d'aciers auto-patinables ou enfin des aciers inoxydables. On citera également la nécessité de résistance par rapport aux phénomènes de fragilisation par l'hydrogène spécialement en présence d'H<sub>2</sub>S et d'oxydation à chaud.

Les caractéristiques mécaniques de l'acier qui font l'objet de garanties dans les normes de produit ou qui attestent la conformité d'une fabrication sont déterminées suivant des processus normalisés : les essais.

Les résultats que fournissent les essais sur acier ne sont pas des indications absolues, mais constituent une échelle de valeurs comparatives étroitement liées aux conditions d'exécution de ses essais.

#### **IV- Une grande variété des produits sidérurgiques**

Les produits sidérurgiques sont définis par leur forme et leurs dimensions, telles qu'elles résultent du processus de fabrication, mais aussi par la nuance et la qualité de l'acier dont ils sont constitués. Compte tenu des utilisations très diverses de l'acier, il existe actuellement une très grande variété de produits sidérurgiques. Pour des raisons économiques, le nombre de combinaisons de produits fabriqués et de nuances n'est pas illimité et les utilisateurs sont orientés par des normes vers un ensemble de produits bien définis et susceptibles de répondre à la quasi-totalité des besoins. [25]

#### **V- La fabrication de l'acier**

Si l'on se place du point de vue de la chronologie historique, on peut dire que la production industrielle de l'acier est relativement récente puisqu'elle remonte à une centaine d'années environ. [25]

##### **V-1. Les grandes étapes**

La fabrication des aciers se décompose schématiquement en 6 étapes regroupées en trois parties : la préparation des matières premières, le travail dans l'aciérie et la transformation au laminoir.

La production d'acier liquide, avant coulée, va se faire à partir des hauts fourneaux et de la fonte liquide à 1400°C. Pour réaliser cette fonte, il est nécessaire de préparer les matières premières dans une usine constituée d'une cokerie et d'une usine d'agglomération. La filière fonte est essentiellement mise en œuvre dans ce qu'on appelle les usines intégrées.

La figure... représente de façon schématique, la chaîne complète de cette filière depuis l'usine d'agglomération où sont préparées les matières premières jusqu'aux produits finis. [25]

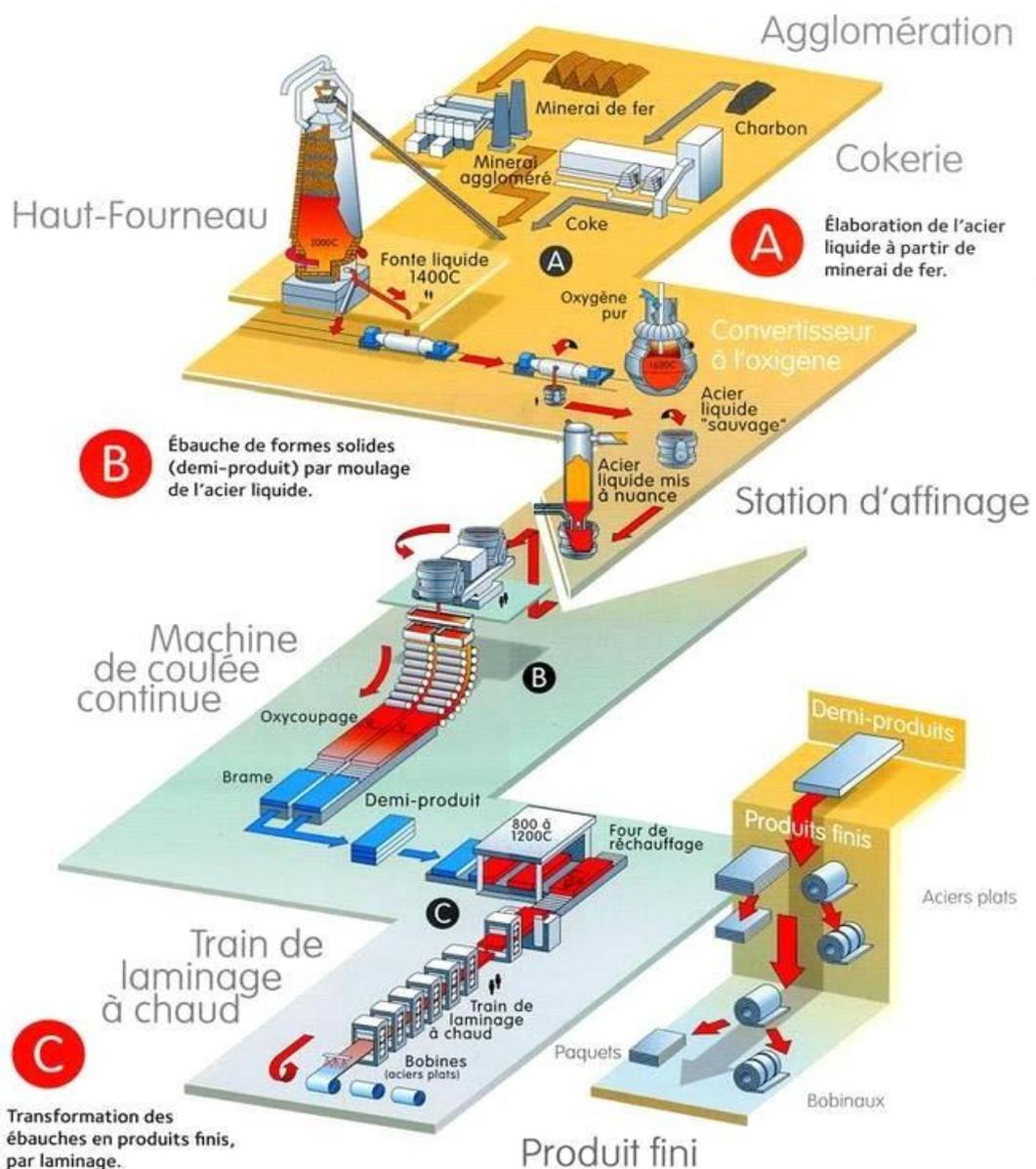


Figure I.2: La chaîne de fabrication pour une filière fonte. [25]

## V-2. Les produits sidérurgiques

Les produits finis livrés par la sidérurgie sont souvent directement mis à la disposition des utilisateurs, certains d'entre eux peuvent cependant nécessiter une « première transformation » avant d'être mis en œuvre.

Ses opérations complémentaires, considérées conventionnellement comme ne faisant pas

partie de la sidérurgie, modifient la géométrie ou les dimensions des produits livrés par la sidérurgie pour en faire des produits spécifiques comme les tubes sans soudure ou tubes soudés, produits tréfilés, profilés formés à froid, produits étirés ou laminés à froid. []

### V-3. Coulée continue

La coulée continue, procédé innovant des années 60-70, a presque remplacé le précédent.

Avantageux puisqu'il évite une étape de la fabrication, il laisse l'usage de la technique traditionnelle à des marchés à l'unité, à de petites séries et à certains aciers.

Les demi-produits sont obtenus directement, sans coulage préalable dans des lingots. L'acier est coulé en continue dans une lingotière en cuivre, de section carrée ou rectangulaire, selon la forme du produit à fabriquer.

Le métal se solidifie pendant son passage dans la lingotière, et le lingot est oxycoupé pour sa mise à longueur pour les besoins futurs de fabrication.

Cette technique évolue vers la fabrication directe de produits finis.



**Figure I.3** : Une installation de coulée continue produisant des billettes. [25]

#### V-3-1. Les produits

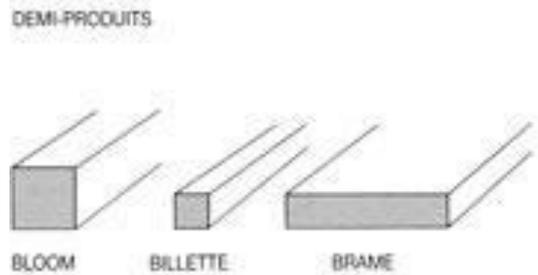
Dans ce procédé, on obtient des produits semi -finis qui sont les ébauches de produits plats et de produits longs.

#### V-3-2. Les semi-produits

Les brames sont les ébauches des produits plats.

Ils ont une section transversale rectangulaire et une largeur allant jusqu'à 2 mètres et de 20 à 30 cm d'épaisseur.

Les blooms et billettes sont les ébauches des produits longs. Ils ont des sections carrées. Jusqu'à 155 mm de côté se sont des billettes et au -delà de 155 ce sont les blooms (**figure I.4**). [25]



**Figure I.4:** Les demi-produits : bloom, billette et brame. [25]

#### V-4. La transformation

Le laminage en fin de fabrication permet de donner des formes aux brames, blooms et billettes. Cela consiste à transformer les pièces de métal par une force à la fois mécanique et thermique de manière à ce que l'acier soit ramolli (entre 800 et 1200°C) voir la figure I.8.

Les demi-produits sont étirés et écrasés par phases successives. La pièce de métal est entraînée entre des cylindres qui tournent en sens inverse dont l'écartement est plus petit que l'épaisseur de la pièce initiale. L'opération est recommencée jusqu'à obtenir les formes définitives et les dimensions souhaitées.

Après le laminage à chaud, certains produits, comme les tôles, peuvent être ensuite laminés à froid. Le laminage à froid permet de réduire encore l'épaisseur et d'obtenir une meilleure finition de surface des produits. [25]



**Figure I.5 :** Laminage à chaud d'un profilé en I, Source : *ARBED, Luxembourg*. [25]

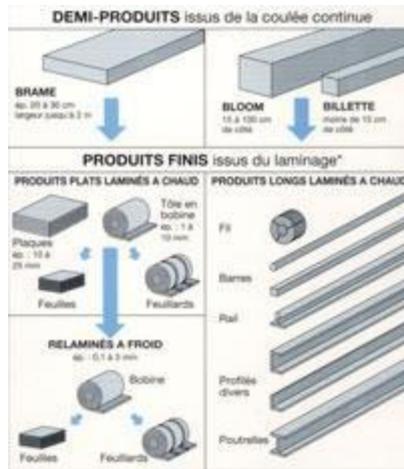
#### V-5. Les produits finis

On distingue 2 familles d'où seront extraits encore divers produits.

**V-5-1. Les plats:** Laminés des brames, les plats sont des plaques dont l'épaisseur est variable de 0,1 à 10 mm. L'application majeure dans le bâtiment est représentée par le bardage.

Ces produits sont disponibles en : bobines de 60 à 200 cm de large et jusqu'à 3 mm d'épaisseur, feuilles de largeur comprise entre 80 et 210 cm, feuillards inférieur à 60 cm de largeur et de 0,3 à 15 mm d'épaisseur, plaques de largeur comprise entre 15 et 125 cm avec une épaisseur supérieure e à 30 en allant jusqu'à 170 mm.

**V-5-2. Les longs :** Laminés des blooms et billettes, les produits longs sont les rails, profilés de construction, barres et fils. Dans le bâtiment, les fils ont un diamètre de 5 à 46 mm, les barres une section ronde de 12,5 à 60 mm de diamètre ou carrée sont donné à la figure I.9.[25]



**Figure I.6 :** Les produits finis issus du laminage [25]

## VI- Élaboration de l'acier

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

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

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



**Figure I.7.** Schéma de la métallurgie primaire

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  $\text{CaCO}_3$  ou  $\text{CaO}$  ou  $\text{CaF}_2$  utilisé pour l'affinage électrolytique.

La ferraille, le calcaire, les ferro-alliages et  $\text{CaF}_2$  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 ( $1250^\circ\text{C}$ ) 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 ( $1600^\circ\text{C}$ ), 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.

### **VI-1. Processus d'élaboration de l'acier**

Le principe de l'élaboration de l'acier est l'oxydation des éléments accompagnant le fer, tels que le carbone, le silicium, le phosphore, la manganèse etc. jusqu'à la teneur désirée dans l'acier, ainsi que l'élimination des différents oxydes du métal liquide. Ces éléments sont éliminés soit sous forme de scorie ou de gaz. Donc le métal liquide est toujours en contact avec la scorie formée et la phase du gaz. Les réactions chimiques se passent entre ces trois systèmes auxquels on peut ajouter un quatrième système qui est le garnissage du fer. L'acier liquide-scorie-phase de gaz est une condition idéale facilitant le transfert et la transformation de la matière.

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  $AG^\circ$  (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 ( $\text{O}_2$ ) 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  $\text{O}_2$  avant affinage, avant et après l'opération de désoxydation.

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

## VI-2. Composition chimique de l'acier

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

## VII- 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 leurs propriétés. La présence de ces inclusions s'explique :

- Soit par la difficulté de l'élimination de certaines d'entre elles lors de l'élaboration (S,P).
- 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.

### VII-1. Influence des éléments chimiques constants

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

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

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

#### a) Le carbone

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

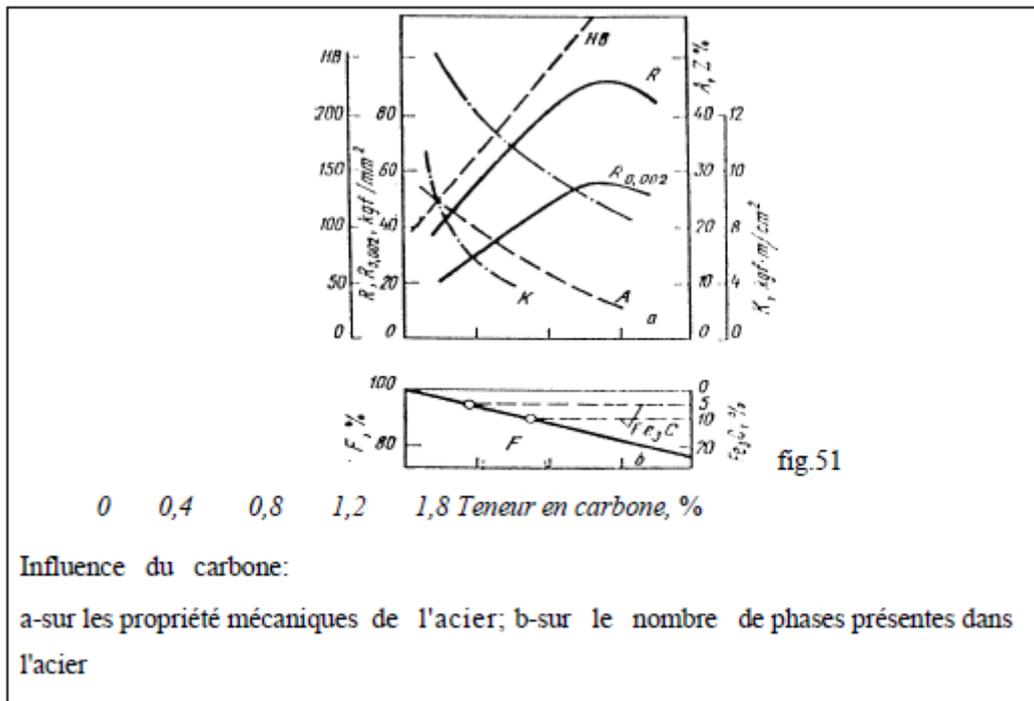


fig.51

**Figure I.8 :** Influence du carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier et sur le nombre de phases présentes dans l'acier.

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

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

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

### b) Le silicium

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

### c) Le manganèse

Le manganèse existe en solution dans la ferrite sous forme de  $\text{MnS}$  et surtout sous forme de carbure  $\text{Mn}_3\text{C}$  associé à la cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Sa teneur dans l'acier varie de 0,2 à 0,8% la présence du manganèse dans l'acier est très souhaitée, car d'une part il augmente la dureté de l'acier et sa trempabilité et d'autre part il joue le rôle d'antidote du soufre, car le soufre est moins nocif dans la mesure où il se trouve sous forme de  $\text{MnS}$  et non sous forme de  $\text{FeS}$  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 ségrégeant 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<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxydes) et Fe<sub>4</sub>N (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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> dans l'acier.

### **VIII- Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier**

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

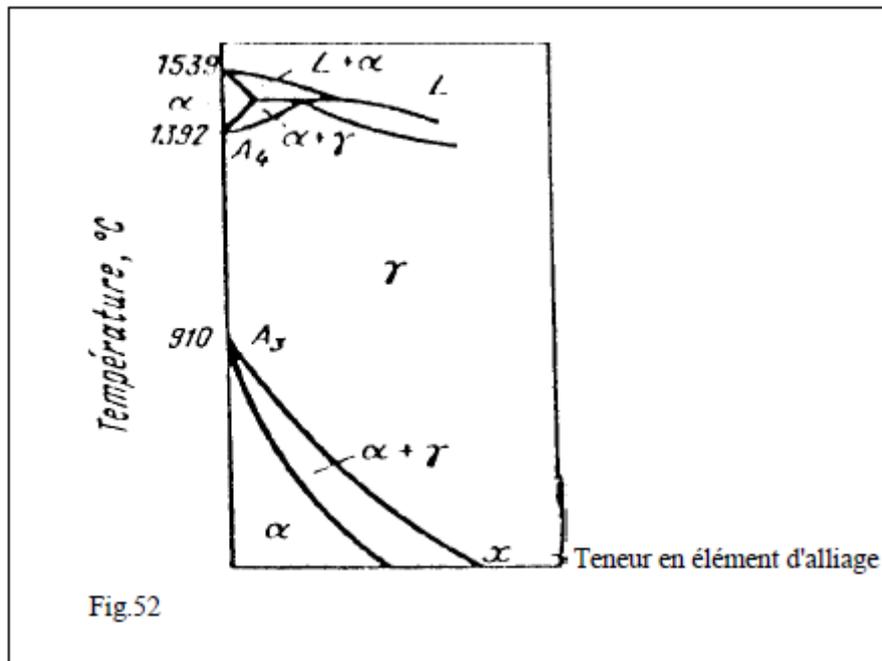
- a) A la formation des solutions solides dans le fer.
- b) A la dissolution de ces éléments dans la cémentite en remplaçant dans son réseau les atomes de fer ou à la formation des carbures particuliers.
- c) A la production (lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée) des composés intermétalliques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

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

Leur dissolution dans le fer influe fortement sur les positions des points A<sub>1</sub> (1392°C) et A<sub>3</sub> (910°C) qui déterminent le domaine des températures d'existence du fer ex et y. L'action exercée par les éléments d'alliages sur les variétés allotropiques du fer permet de les classer en deux groupes :

### a) Eléments gamagènes (Ni, Mn)

Ces éléments abaissent le point A3 et élèvent le point A4 ce qui donne une extension du domaine de la phase  $\gamma$  et une réduction du domaine de la phase  $\alpha$ . La figure 52 montre que l'addition de ces éléments fait monter le point A4 jusqu'à la ligne du solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage le point A3 descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation

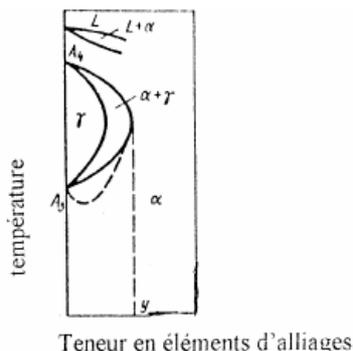


Et les alliages de ce type sont dit austénitiques. Les alliages qui ne subissent que partiellement la transformation  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$  s'appelle semi-austénitiques.

### b) Eléments alphagènes

Ce sont les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si...ces éléments abaissent le point A4 et élèvent le point A3.

Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliages, les lignes de transformation A3 et A4 se rencontrent et le domaine de la phase  $\gamma$ , se trouve complètement fermé, c'est à dire il y a extension du domaine de la phase  $\alpha$  (ferritique) et un rétrécissement du domaine  $\gamma$  (austénitique). Les alliages de ce type sont dits " ferritique ". Lorsque la transformation  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$  ne se produit que partiellement, les alliages s'appellent semi-ferritique.



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

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

Tableau I.2 : Influence des principaux éléments d'alliage sur les différentes propriétés de l'acier.

# **Chapitre II:**

## **Les fours électriques utilisés pour l'élaboration des aciers**

## Les fours électriques utilisés pour l'élaboration des aciers

### Généralités

Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, en 1851, la production mondiale de fer est de 60.000 t/an.

Il s'agit alors bien de fer, obtenu à l'état pâteux car à l'époque on ne sait pas encore atteindre les hautes températures nécessaires à la fusion de l'acier. La seconde moitié de ce XIX<sup>ème</sup> siècle va se révéler décisive pour la sidérurgie, avec quatre grandes inventions d'une immense portée pour le développement de cette industrie et, par là même, de l'économie mondiale. Ces inventions s'échelonnent sur plusieurs décennies [1]:

- 1856 : Bessemer en Grande-Bretagne obtient pour la première fois de l'acier liquide en insufflant de l'air à travers un bain de fonte.

- 1865 : Martin en France et simultanément Siemens en Allemagne produit de l'acier liquide en refondant des ferrailles dans un four à sole, avec une flamme de gaz de gazogène dont la haute température nécessaire est atteinte grâce au préchauffage de l'air de combustion.

- 1878 : Thomas en Grande-Bretagne réussit à affiner les fontes à haute teneur en phosphore en utilisant un revêtement en dolomie à la place du revêtement en silice du procédé Bessemer, et en ajoutant de la chaux.

- 1900 : Héroult en France réalise pour la première fois la production d'acier dans un four électrique à arc.

Avant la seconde guerre mondiale, le four électrique par la lenteur même de l'opération, était réservé à l'élaboration d'aciers spéciaux. Les progrès réalisés pendant la guerre, en taille et puissance des unités, permirent dès 1950, au four électrique de rivaliser avec le four Martin pour l'élaboration d'aciers au carbone à partir de ferrailles, avec la construction d'aciéries de 500.000 à 1 000.000 t/an.

Parallèlement, le four électrique de plus petite taille se développait dans les mini aciéries (mini-mills) américaines, puis italiennes, et surtout après que l'apparition de la coulée continue ait permis d'abandonner la coulée en petits lingots, dispendieuse et cause de défauts. À partir du début des années 60, une série d'améliorations allaient faire du four électrique un outil hautement performant [1,2] :

□ Utilisation maximale de la puissance active des transformateurs (facteur de puissance  $\approx 0,7$ ) améliorant le rendement thermique et la productivité.

□ Apparition en 1970 des fours UHP (Ultra High Power) avec des puissances spécifiques de 500 kVa/t [3].

□ Innovation par Daido Steel des parois métalliques refroidies à l'eau à la place du réfractaire, permettant d'augmenter fortement la puissance spécifique.

□ Conjointement, emploi de lances à oxygène, de brûleurs fuel-oxygène, d'injections de poudre, d'électrodes de qualité améliorée, utilisation de trous de coulée excentrés... permettant d'augmenter les performances et de diminuer la consommation d'électricité.

Par contre, les technologies de préchauffage des ferrailles par les fumées du four n'ont pas fait l'unanimité, et l'acuité des problèmes de captage et de dépoussiérage des fumées s'est fortement accrue avec l'augmentation des performances des fours (et des exigences d'environnement). Les performances élevées du **four électrique à arc** (passé de 4 coulées par jour avant guerre à plus de 25 coulées par jour en 1990), pour un investissement relativement modeste, et les disponibilités en ferrailles expliquent la place prépondérante prise par cet outil dans la sidérurgie moderne en 1989 : 27 % dans le monde,

32 % hors URSS, pays de l'Europe de l'Est et Chine. Il est intéressant de constater que le four électrique moderne n'est pas tellement différent dans ses principes de celui inventé au début du siècle par Héroult. Des essais de four électrique à enfournement continu de ferrailles et

coulée continue ou semi- continue de l'acier liquide ont été réalisés à la fin des années 60 et dans les années 70 par l'IRSID (Institut de Recherche de la Sidérurgie Française) et le NRIM au Japon [4] mais n'ont pas été suivis, à l'époque, d'application industrielle.

Nous avons constaté qu'au cours de ces dernières années l'implantation de complexe industriel de plus en plus nombreux du point de vue puissance installée et en particulier la sidérurgie, se sont vue équipé de fours (UHP) dont le but consiste à convertir les ferrailles ou d'autres charges métalliques en acier liquide dans un temps minimal, avec le plus haut taux d'apport d'énergie possible et une réduction au minimum des périodes hors tension, a donné un nouvel procédé électrique qui devient de plus compétitif aux autres procédés tel que ceux à oxygène. L'adaptation de l'alimentation continu et les progrès effectués dans la réduction des minerai (utilisation des produits pré-réduits) ont donné au four électrique à arc des avantages ; tel que pour certains des investissements, initiaux et le coût opérationnel sont plus bas que pour le procédé haute fourneaux «méthode d'oxygène».

Cependant, le raccordement des fours à arcs au réseau électrique ne cesse de poser des problèmes aux électriciens. Le fonctionnement surtout intermittent, la nature non linéaire de l'arc provoquent des perturbations sur le réseau, ces perturbations varient selon le genre, la taille du four et la nature et les dimensions du produit enfourné. Donc il est nécessaire d'étudier cet élément, important à la sidérurgie, surtout coté minimisation ces inconvénients qui sont essentiellement les perturbations, engendrées pendant son fonctionnement.

## 1- Les fours électriques utilisés pour l'élaboration des aciers

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

### 1-1. Types de fours électriques

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

#### 1-1-1. Fours à résistance

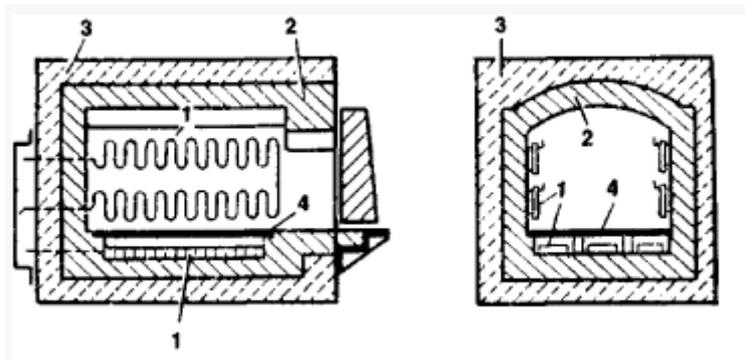
(Également four de résistance électrique), four électrique dans lequel la chaleur est générée par des conducteurs qui offrent une résistance au passage d'un courant à travers eux. Les fours à résistance sont largement utilisés dans le traitement thermique, pour le chauffage avant la formation de la pression, et pour les matériaux secs ou fondus.

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.

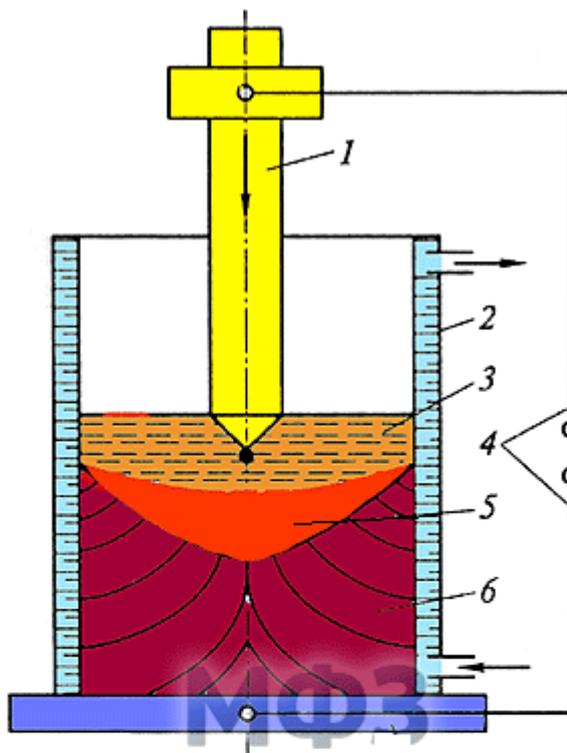
Les fours de résistance sont largement utilisés en raison de leurs nombreux avantages. Toute température pouvant atteindre 3000°C peut être obtenue dans la chambre de four. Les articles peuvent être chauffés uniformément soit en localisant de façon appropriée les éléments chauffants le long des murs de la chambre de four, soit par la circulation forcée de l'atmosphère de la fournaise. Le contrôle automatique de la puissance et, par conséquent, des conditions de température dans un tel four est facile à mettre en œuvre. Les fours de résistance sont facilement mécanisés et automatisés, ce qui permet d'alléger le travail du personnel et de faciliter l'intégration de ces fours dans les lignes de transfert automatiques. De plus, elles sont compactes. Ces fours offrent un environnement sûr pour divers processus. Un four de résistance peut être bien scellé, auquel cas le chauffage est effectué dans le vide, ou il peut contenir soit un milieu gazeux qui empêche l'oxydation, soit une atmosphère spéciale pour le durcissement des caisses chimiques, par exemple pour la carburation ou la nitrification.

La plupart des fours de résistance sont de type indirect. Dans les fours à résistance indirecte à la chaleur, l'énergie électrique est convertie en chaleur lorsqu'un courant traverse les éléments chauffants. La chaleur est transmise aux articles à chauffer par rayonnement, convection ou conduction. Un tel four consiste en une chambre de travail constituée d'une doublure composée d'une couche de brique de feu qui supporte à la fois les articles à chauffer et les éléments de chauffage et qui est isolée d'une enveloppe métallique par une couche d'isolation thermique (figure 1). Les pièces et mécanismes qui fonctionnent dans la chambre,

ainsi que les éléments chauffants, sont constitués d'aciers résistants à la chaleur, d'aciers réfractaires ou d'autres matériaux réfractaires.



**Figure II.1 :** Diagramme d'un four à chambre de résistance indirecte à la chaleur de type batch: (1) éléments chauffants, (2) revêtement réfractaire, (3) isolation thermique, (4) plaque réfractaire. [11]



- 1- Electrode consommable
- 2- Lingotière refroidie à l'eau
- 3- Laitier
- 4- circuit électrique
- 5- Métal liquide
- 6- Métal solide

### Schéma du four à refusion sous laitier électroconducteur

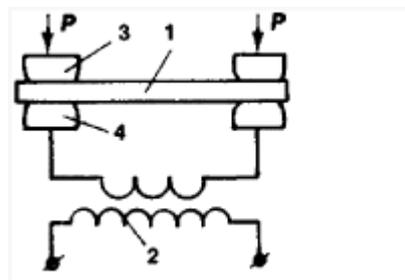
**Figure II.2 :** Schéma du four à refusion sous laitier électroconducteur.

Les fours continus sont utilisés pour chauffer de grandes quantités de pièces identiques. Dans de tels fourneaux, les objets se déplacent continuellement d'un bout à l'autre. Par rapport à d'autres types de fours, la production de fours continus est plus élevée, le chauffage des articles est plus uniforme et la consommation d'énergie est plus faible. En règle générale, ces fours sont hautement mécanisés.

Dans les fours à résistance continue de type lot et dans les fours à température de travail pouvant atteindre 700°C, la circulation forcée des gaz de four est largement utilisée. Les gaz sont circulés par des ventilateurs ou des soufflantes qui sont soit installés dans le four, soit situés, avec les éléments de chauffage, à l'extérieur du four dans des chauffe-électricité.

Les fours de résistance à la chaleur indirecte utilisés pour fondre les métaux fusibles (plomb, bibitte, alliages d'aluminium ou de manganèse, par exemple) sont construits soit comme des fours creusés avec un creuset métallique et une chauffe extérieure, soit comme des fours de réverbération avec un bain et, au-dessus du bain, comme des éléments chauffants dans le toit.

Les fours de résistance en laboratoire comprennent de petits fours à tuyaux, des fours à mufler et des fours à chambre, ainsi que des thermostats (chambres à température constante) et des fours à séchage. [11]



**Figure II.3 :** Schéma d'un four à résistance directe à la chaleur: (1) l'article à chauffer, (2) le transformateur de descente, (3) et (4) les contacts; (P) puissance

### 1-1-2. 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.

Un four à induction est un four électrique fonctionnant grâce au phénomène de chauffage par induction de métal.

#### Principe

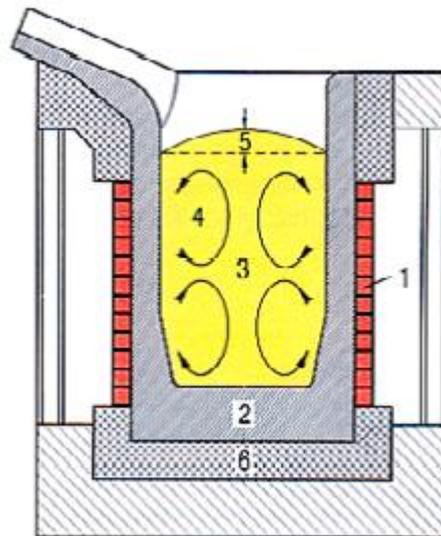
Ce type de four utilise le principe de l'induction électromagnétique. Selon ce principe physique, un champ magnétique produit dans le métal un courant électrique induit. Le métal se comporte alors comme une résistance et chauffe proportionnellement à la puissance du champ.

En effet ce mode de chauffage est basé sur le principe du transformateur. Il utilise les propriétés électromagnétiques de certains matériaux qui, lorsqu'ils sont soumis à un champ alternatif, laissent se développer des courants induits (courants de Foucault). C'est le corps à chauffer lui-même qui constitue le secondaire du transformateur.

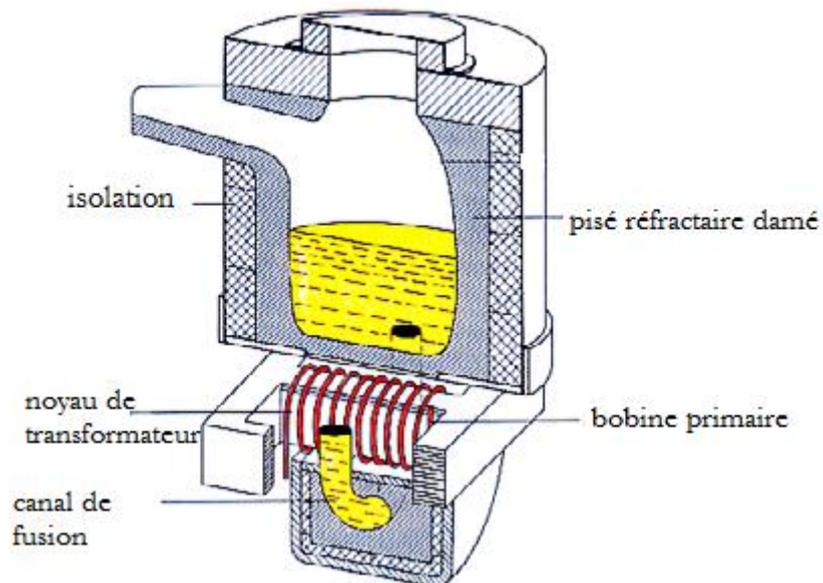


**Figure II.4 :** Chauffage d'un métal par induction [9]

- 1- inductance
- 2- pisé réfractaire damé
- 3- fondu (bain liquide)
- 4- direction du mouvement du bain
- 5- hauteur du bain
- 6- isolation



Four à induction à creuset



**Figure II.5 :** Four à induction à canal [12]

## Applications industrielles des fours à induction

L'avantage du four à induction est qu'il est propre, économe en énergie et permet de mieux contrôler la fusion des métaux. Les fonderies modernes utilisent ce type de four qui supprime les hauts fourneaux pour produire la fonte, car ces derniers émettent beaucoup de poussières et polluent beaucoup.

Vu ces avantages techniques, les fours à inductions ont trouvé plusieurs applications dans les industries. Ils sont retrouvés également sous plusieurs types.

- **Exemple du four à induction Kjellin**

Le four de type Kjellin est constitué par un récipient de forme annulaire, revêtu intérieurement de matériaux réfractaires et traversé par le noyau ferromagnétique d'un transformateur, dont l'enroulement primaire est connecté au générateur. Grâce à un courant d'intensité élevée (jusqu'à 30 000 ampères), la matière en fusion peut atteindre une température très élevée. La conception de ce type vise à donner à la boucle magnétique de fonte une taille minimale. Le but est d'assurer une résistance électrique élevée au passage du courant (améliorant ainsi l'efficacité) sans créer de contractions dans le fluide à l'interruption du passage du courant.[14]

### Avantages des fours à induction

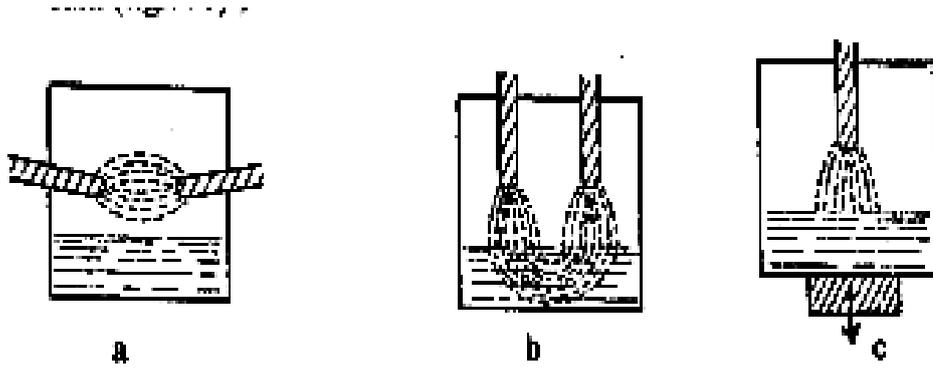
Le chauffage par induction offre certains avantages :

- Production directe de la chaleur dans la matière à chauffer ( c'est ce qui le différencie de tous les autres modes de chauffage.
- Taux de puissance élevé dû à cette caractéristique.
- Obtention de très hautes températures ( jusqu'aux environs de 3000°C).
- L'inertie thermique est faible puisqu'il n'y a que la matière à chauffer.
- La forme de la matière à chauffer est ramassée d'où une plus grande facilité de calorifugeage du four.
- Le réfractaire s'use moins vite car il est moins chaud.
- Fusion sous vide plus aisée et moins chère grâce à la forme compactée four.
- Les capacités de ces fours vont de quelques Kg à 25 Tonnes. [10]

### 1-1-3. 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 à arc électrique (Héroult), qui appartient au second type, est de beaucoup le plus employé. [14]

## 2- Four à arc électrique

Le four à arc d'aciérie est un outil de fusion destiné à fondre un métal primaire qui est, en général, de la ferraille, mais qui peut être de la fonte (solide ou liquide) ou encore des minerais pré-réduits. C'est au début du XXème siècle que sont apparus les premiers fours à arcs industriels. La fusion des ferrailles au four électrique a été rendue possible par l'invention du four à arc par le Français Paul Louis **Héroult** (1863-1914), la première application industrielle a eu lieu le 9 octobre 1900. Le procédé permet d'élaborer des aciers de qualité. Initialement, le four Héroult comportait deux électrodes reliées chacune à une borne d'une génératrice à courant continu ou alternatif. Assez rapidement, il a été équipé de trois électrodes reliées à un réseau triphasé. A cette époque, il existait un autre type de four à arc, aussi très répandu pour la fusion de l'acier ; le four de **Girode**, ce four comportait une seule électrode de voûte, reliée à une des bornes d'une génératrice, et plusieurs électrodes de sole en acier, reliées ensemble à l'autre borne. La capacité de ces fours était de l'ordre de quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes.

Depuis cette époque, bien que reposant sur les mêmes principes de base, les fours à arcs ont connus un développement important aussi bien du point de vue technologique que du point de vue capacité de production. En effet, la capacité des fours modernes avoisine les 200 tonnes avec une consommation énergétique comprise entre 400 et 500 kWh/t. Les grands fours industriels représentent une part importante de la consommation d'énergie électrique dans le domaine industriel. Selon certaines études prospectives, la filière électrique devrait continuer à croître pour couvrir, environ 50 % de la production d'acier dans le monde [5].

### Définition

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Les fours à arc sont utilisés presque exclusivement pour la fabrication d'acier à partir de ferraille de récupération où les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, ce dernier fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide.

Le four à arc est un équipement électrique très perturbateur à cause de l'instabilité de l'arc électrique. Les perturbations produites sont aléatoires et couvrent une bande de fréquence du continu jusqu'à quelques centaines de hertz. De plus, les phénomènes rayonnés (bruit, champs électromagnétiques), et le déséquilibre.



Figure II.6 : Four à arc électrique. [18]

Un **four à arc** est un type de four électrique utilisé en métallurgie. Il utilise l'énergie thermique de l'arc électrique établi entre une (ou plusieurs) électrode(s) de carbone et le métal pour obtenir une température suffisante à sa fusion.

De petite (environ une tonne) ou grande capacité (jusqu'à 400 t), il est principalement utilisé pour la production d'acier liquide (environ 35 % de la production mondiale) et aussi pour le recyclage des métaux (par exemple pour récupérer le zinc de poussières et déchets métallurgiques) (procédé appelé *Electric Arc Furnace Dust* (EAFD) par les anglo-saxons).

Coupe rotative d'un four électrique sidérurgique Des fours à arc miniatures sont utilisés dans certains laboratoires de recherche. Certains fours sont utilisés pour des réactions entre solides ou entre phases gazeuses. On le retrouve dans d'autres secteurs, comme celui de l'odontologie, avec des capacités de quelques dizaines de grammes.

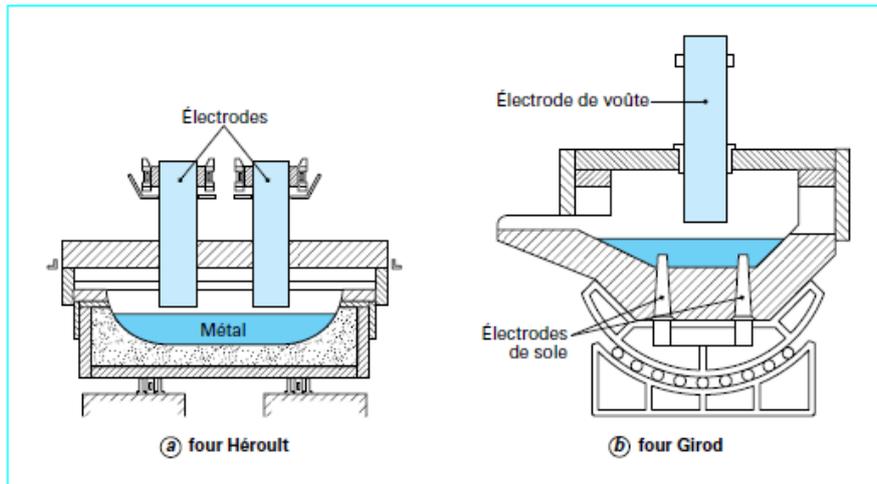


Figure II.7 : Coupe schématique des fours Héroult et Girod [13]

### Principe du procédé

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

Le garnissage des murs et de la sole sont à 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. [14]

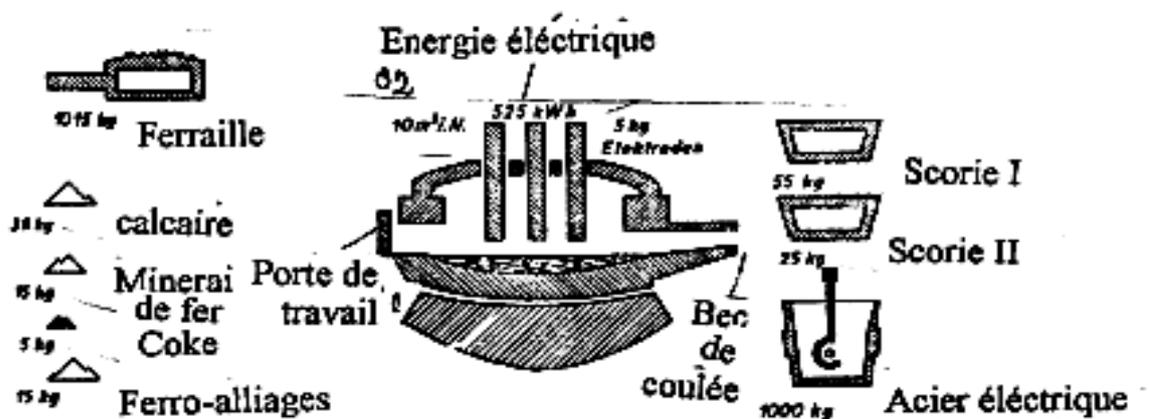


Figure II.8 : Schéma du bilan de matière (procédé avec deux scories) pour la production de 1000kg d'acier.

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. [15]

## **Opération**

Scrap métal est livré à une baie de ferraille, situé à côté du magasin de fusion. Scrap est généralement en deux grandes catégories: déchiquter ( Whitegoods , voitures et autres objets en acier de faible épaisseur similaire) et de la fonte lourde (grandes dalles et des poutres), ainsi que quelques fer de réduction directe (DRI) ou de la fonte pour l' équilibre chimique. Certains fours fondent presque 100% DRI.

La ferraille est chargée dans de grands seaux appelés paniers, avec des portes « clamshell » pour une base. On prend soin de la couche la ferraille dans le panier pour assurer un bon fonctionnement du four; à l'état fondu lourd est placé au-dessus d'une légère couche de protection moindre, au-dessus duquel est placé plus déchiquter. Ces couches doivent être présentes dans le four après la charge. Après le chargement, le panier peut passer à un morceau de pré-chauffage, qui utilise des fours effluents gazeux chauds pour chauffer la ferraille et de récupérer de l'énergie, ce qui augmente l'efficacité de l'installation.

Le panier de ferraille est ensuite transporté à l'atelier de fusion, le toit est basculé hors du four et le four est chargé de la ferraille du panier. La charge est l' une des opérations les plus dangereuses pour les opérateurs EAF. Beaucoup d' énergie potentielle est libérée par les tonnes de tomber en métal; tout métal liquide dans le four est souvent déplacé vers le haut et vers l' extérieur par les déchets solides et la graisse et de la poussière sur la ferraille est allumée si le four est chaud, conduisant à une éruption de boule de feu. Dans certains fours à double coque, la ferraille est chargée dans la seconde coque tandis que la première est en cours de fusion bas, et pré-chauffée avec le gaz hors de la coquille active. D' autres opérations sont ferraille charge-pré-chauffage en continu sur une bande transporteuse, qui se décharge alors la ferraille dans le four proprement dit , ou le chargement de la ferraille à partir d' un

arbre placé au-dessus du four, avec les effluents gazeux dirigés à travers l'arbre. D'autres fours peuvent être chargés avec du métal chaud (en fusion) à partir d'autres opérations.

Après le chargement, le toit est basculé en arrière sur le four et la fusion commence. Les électrodes sont abaissées sur la ferraille, est frappé d'un arc et les électrodes sont ensuite mis à l'alésage dans la couche de moindre dans la partie supérieure du four. Des tensions plus basses sont choisies pour cette première partie de l'opération pour protéger le toit et les murs de la chaleur et des dommages excessifs des arcs. Une fois que les électrodes ont atteint la masse fondue lourde à la base du four et les arcs sont protégés par les déchets, la tension peut être augmentée et les électrodes légèrement surélevé, ce qui allonge les arcs et augmenter la puissance de la masse fondue. Cela permet à un bain de fusion pour former plus rapidement, en réduisant les temps de coulée à robinet. L'oxygène est soufflé dans les déchets, la combustion ou la coupe de l'acier, et de la chaleur chimique supplémentaire est fournie par des brûleurs oxygène-combustible monté au mur. Les deux processus accélèrent la fusion de la ferraille. Buses supersoniques permettent jets d'oxygène de pénétrer dans le moussage des scories et d'atteindre le bain de liquide.

Une part importante de la production d'acier est la formation de laitier qui flotte sur la surface de l'acier fondu. Le laitier est généralement constitué de métal des oxydes, et agit en tant que destination pour les impuretés oxydées, comme une couverture thermique (arrêt de la perte de chaleur excessive) et en aidant à réduire l'érosion du réfractaire doublure. Pour un four de base réfractaires, qui comprend la plupart des aciers au carbone fours productrices, les agents de formation de laitier habituels sont l'oxyde de calcium (CaO, sous la forme de brûlé chaux) et d'oxyde de magnésium (MgO, sous forme de dolomite et de la magnésite). Ces agents sont soit des scories chargées de la ferraille, ou soufflé dans le four au cours de la fusion. Un autre composant important de laitier EAF est l'oxyde de fer en acier à brûler avec l'oxygène injecté. Plus tard dans la chaleur, le carbone (sous forme de coke ou charbon) est injecté dans cette couche de laitier, à faire réagir avec l'oxyde de fer pour former du fer métallique et du monoxyde de carbone gazeux, ce qui provoque alors le laitier de mousse, ce qui permet une plus grande efficacité thermique, et une meilleure stabilité à l'arc et l'efficacité électrique. La couverture de laitier couvre aussi les arcs, ce qui empêche d'endommager le toit du four et des parois latérales de la chaleur rayonnante.

Une fois les déchets a complètement fondu et un bain plat est atteint, un autre seau de ferraille peut être chargée dans le four et fondu, bien que le développement EAF se dirige vers des conceptions une seule accusation. Après la deuxième charge est complètement fondu, les opérations de raffinage ont lieu pour vérifier et corriger la composition chimique de l'acier et la fonte Surchauffe supérieure à sa température de congélation en vue de taraudage. Plus de formateurs de laitier sont introduits et plus d'oxygène est insufflé dans le bain, la combustion des impuretés telles que le silicium, le soufre, le phosphore, l'aluminium, le manganèse et le calcium, et l'élimination de leurs oxydes dans le laitier. L'élimination du carbone a lieu après que ces éléments ont brûlé en premier, car ils ont une plus grande affinité pour l'oxygène. Les métaux qui ont une affinité plus faible pour l'oxygène que le fer, tels que le nickel et le cuivre, ne peuvent pas être éliminés par oxydation et doit être contrôlée par la chimie de la ferraille seule, tels que l'introduction du fer par réduction directe et la fonte brute mentionnée plus haut. Un laitier moussant est maintenue tout au long, et déborde souvent le four à verser de la porte du laitier dans le puits de scories. Échantillonnage de la température et de l'échantillonnage chimique ont lieu par des lances automatiques. Peuvent être mesurés automatiquement par l'intermédiaire d'oxygène et de carbone des sondes spéciales qui plongent dans l'acier, mais aussi pour tous les autres éléments, un « chill » échantillon d'un petit échantillon solidifié de l'acier est analysé sur un arc d'émission de spectromètre.

Une fois la température et de la chimie sont corrects, l'acier est prélevée sur une poche de coulée dans préchauffé par basculement du four. Pour les fours d'acier ordinaire au carbone,

dès que le laitier est détectée pendant la coulée du four est rapidement inclinée vers l'arrière vers le côté de décrassage, en minimisant le report de laitier dans la poche de coulée. Pour certaines nuances d'aciers spéciaux, y compris l'acier inoxydable, le laitier est coulé dans la poche et, à traiter au four poche, afin de récupérer des éléments d'alliage. Pendant tapotant quelques ajouts en alliage sont introduits dans le courant de métal, et plus de chaux est ajouté au-dessus de la poche pour commencer la construction d'une nouvelle couche de laitier. Souvent, quelques tonnes d'acier liquide et le laitier est laissé dans le four afin de former un « talon chaud », ce qui contribue à préchauffer la prochaine charge de la ferraille et d'accélérer son effondrement. Pendant et après avoir tapé, le four est « tourné autour »: la porte du laitier est nettoyé de laitier solidifiée, les réfractaires visibles sont inspectés et composants refroidis à l'eau vérifier les fuites, et les électrodes sont inspectées pour les dommages ou rallongés par l'ajout de nouveaux segments ; le trou de coulée est rempli de sable à la fin des écoutes. Pour un 90 tonnes, four moyenne puissance, le processus prend habituellement environ 60-70 minutes de la coulée d'une chaleur à la mise sur écoute de l'autre (le temps tap-to-tap). Le four est complètement vidé de l'acier et du laitier sur une base régulière afin qu'une inspection des Réfractaires peut être faite et les grandes réparations effectuées si nécessaire. Comme les Réfractaires sont souvent fabriqués à partir calcinés carbonates, ils sont extrêmement sensibles à l'hydratation de l'eau, de sorte que toute fuite suspectées de composants refroidis à l'eau sont traités très au sérieux, au - delà de la préoccupation immédiate des éventuelles explosions de vapeur. Une usure excessive réfractaire peut conduire à des poussées, où le métal liquide et le laitier pénètrent dans la coquille réfractaire et four et échappent dans les zones environnantes.

### **Les principaux éléments constitutifs du four électrique**

Un four à arc est principalement constitué de :

- l'alimentation électrique ;
- l'enceinte du four proprement dite capable de contenir d'abord des ferrailles à fondre, de densité relativement faible (donc nécessité d'un grand volume disponible), puis de l'acier liquide porté à des températures de 1 600 à 1 700 °C (donc nécessité d'un revêtement intérieur de cuve à l'aide de réfractaires), notamment au fond de cuve (sole réfractaire) ;
- les installations annexes, telles que le système d'aspiration et traitement des fumées et le système d'additions.

- L'élaboration de l'acier dans un four à arc se déroule en trois phases:

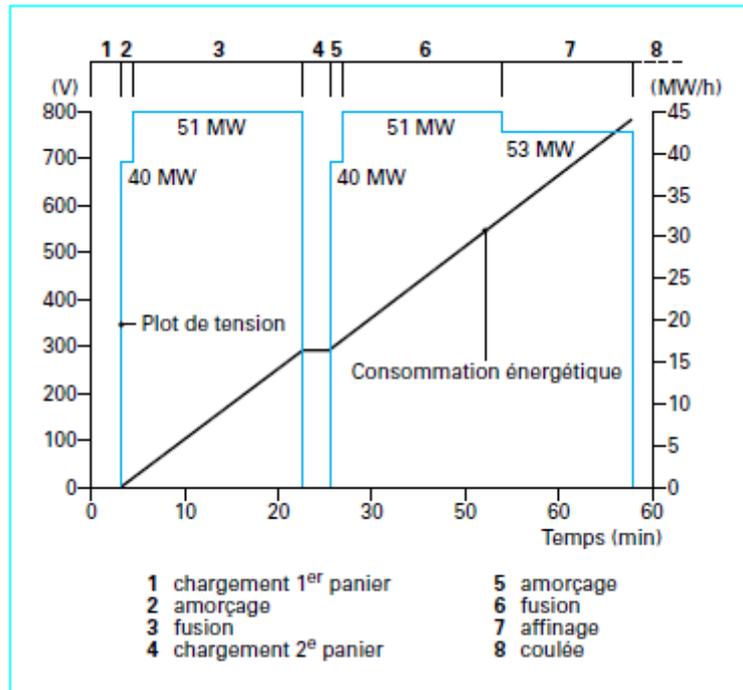
**1. L'amorçage** : c'est la première période de la fusion pendant laquelle les électrodes creusent leurs puits à travers la ferraille froide. La puissance électrique et la tension d'arc ne sont généralement pas maximales par souci de stabilité électrique de l'arc.

Dans cette première période, on cherche surtout une vitesse de descente des électrodes rapide, de façon à augmenter la distance arc-voûte et donc à limiter le rayonnement thermique sur la voûte.

**2. La fusion** : dans cette phase, la charge est fondue par rayonnement direct de l'arc sur les ferrailles, ou par échanges de chaleur (rayonnement, conduction) du bain avec les ferrailles. Au début de cette phase, l'arc électrique étant complètement entouré par la charge, il n'y a pas de risques de dégradation pour les réfractaires.

La puissance et la tension d'arc sont pratiquement à leur niveau maximal. Au fur et à mesure de l'avancement de la fusion, les ferrailles situées entre les arcs et les parois sont fondues ou s'affalent dans le bain. Progressivement, les parois du four sont exposées au rayonnement de l'arc et la puissance est alors réduite si ce rayonnement devient trop intense.

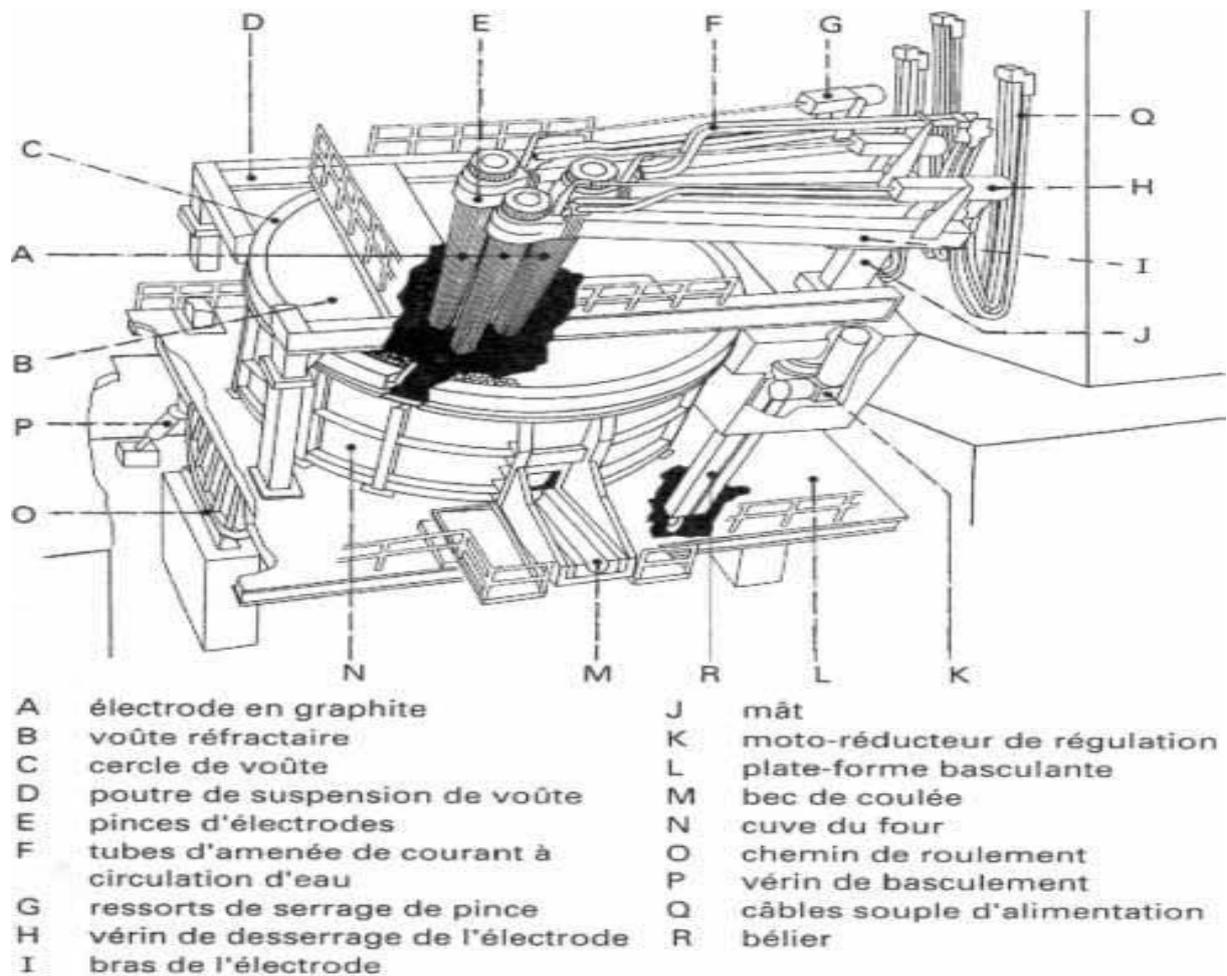
**3. L'affinage** : durant l'affinage sont effectuées la montée en température de l'acier jusqu'à la température de coulée ainsi que les différentes opérations métallurgiques. Dans cette dernière phase, la puissance et la tension d'arc sont abaissées à un niveau compatible avec l'usure des réfractaires des parois latérales. [13]



**Figure II.9** : Diagramme de fusion d'un four à arc (exemple). [13]

Traditionnellement, les **aciéries** électriques sont équipées de deux fours à arc :  
 — un four pour la **fusion des ferrailles** ;  
 — un four pour l'**affinage en poche**.

## Schéma du four à arc électrique



Le four représenté est à bélière (§ 3.11).

**Figure II.10** : Schéma du four à arc électrique.

## Classification des fours à arc

### Four à arc d'après leur nature d'arc

**1. Four à arc libre** : Dans le four à arc libre, ou à arc indirecte, l'arc est maintenu entre les électrodes

Disposées horizontalement sur la charge (dans lesquels la chaleur est produite par le passage de l'arc directement entre les électrodes). Il est généralement utilisé pour la fusion de la fonte ou l'acier.

### 2. Four à arc sur résistance

Le four à arc sur résistance, ou à arc submergé est utilisé à la fabrication des ferroalliages, ou à la réduction de certains minerais. Dans ce genre de four les électrodes sont plongées dans la charge.

### 3. Four à arc sur charge

Dans ce four l'arc est maintenu entre les électrodes et la charge. Ce type de four est presque exclusivement utilisé à la fabrication de l'acier à partir de la ferraille ou autres charges métalliques. L'alimentation de ces types de fours peut être continue ou alternative, monophasé,

Biphasé ou triphasés. Généralement les fours de grande puissance sont triphasés.

## Four à arc d'après leur nature d'alimentation

**1. Four alimenté en courant alternatif :** Le four électrique de fusion type Héroult est triphasé. Il est constitué essentiellement d'une cuve garnie de réfractaires, basculante pour la coulée et le dégraissage, et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen de trois électrodes verticales en Graphite.

**2. Four alimenté en courant continu** Du point de vue descriptif, le four à courant continu est semblable au four à courant alternatif. Il s'en distingue toutefois par son alimentation électrique et par présence d'une ou de plusieurs électrodes de sole.

### Avantages et inconvénients du four à arc

#### Avantages

Le four à arc présente un certain nombre de qualités que n'ont pas les autres

Procédés :

- Souplesse et précision du réglage de la température.
- Choix et constance de l'atmosphère dans le four.
- Facilité dans la conduite et l'exploitation.
- Facilité d'automatisation.
- Minimum d'effluents gazeux.
- Possibilité de travailler avec des parois froides.
- Températures élevées.
- Souplesse de conduite.
- Maîtrise indépendante de l'intensité et de la tension.
- Possibilité de travailler avec une voûte froide (arc submergé).
- Taille modulable.
- Grande rapidité de fusion.

#### Inconvénients

- Consommation d'électrodes.
- Vaporisation en surface (arc rayonnant).
- Erosion des réfractaires.
- Initier la fusion lorsque le bain n'est pas conducteur à froid.
- Influence de la résistivité du bain (arc submergé). [18]

### 2-1. Arc électrique

#### Définition

L'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre deux électrodes dans un milieu ionisé (air ou gaz particulier), il est caractérisé par une tension basse et un fort courant. Un arc électrique peut être obtenu entre deux électrodes de charbons soumises à une différence de potentiel convenable. Lorsque l'arc jaillit entre les électrodes, la différence de potentiel entre celle-ci devient faible : L'ionisation intense de l'espace inter-électrodes a rendu cet espace brutalement très conducteur alors qu'il était isolant (ou presque) avant l'amorçage (Une fois ionisé, le gaz crée un canal conducteur qui entraîne un arc continue tant que la différence de potentiel reste suffisante). [18]

En théorie, la position de l'arc électrique est stable (principe de l'énergie minimale). Toute fois, nous verrons par la suite que cette caractéristique reste discutable.

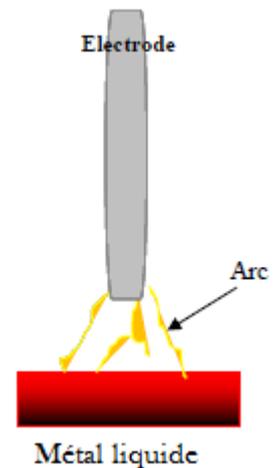
L'écoulement du courant dans la matière ionisée émet un rayonnement de lumière dont le spectre est caractéristique de la nature du gaz, et à un degré moindre, de celle des électrodes.

Cette ionisation et l'écoulement d'un courant électrique qui s'en suit engendrent également des bruits dus à l'expansion brutale du gaz suite à son échauffement tout aussi brutal (propriété également exploitée dans diverses applications). [9]

### Propriétés

L'arc électrique, dont la forme caractéristique est au mouvement de l'air ascendant est dit arc voltaïque. Il est lumineux, instable et dégage de la chaleur. On peut en premier approximation assimiler un arc électrique à une résistance variable. Alors que, si «  $I$  » le courant de l'arc, la tension s'exprime, par la relation usuelle.

$$U_a = R_a \cdot I \quad [6,7]$$



### 2-2. Composition du four à arc

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Il existe plusieurs types de fours à arcs, le type le plus utilisé est le four dit de **Héroult** (ou encore four à arc sur charge), du nom de l'inventeur de ce procédé à la fin du XIX<sup>em</sup> siècle. Dans ce type de four, l'arc s'établit entre les électrodes (raccordées au réseau de puissance) et la charge à chauffer.

Le four à arc se compose d'une cuve garnie réfractaire et l'énergie nécessaire est fournie par des arcs électriques jaillissant entre des électrodes en graphites et la charge [8]

Les principaux éléments constitutifs du four électrique sont :

- L'alimentation électrique.
- L'enceinte du four proprement dite capable de contenir d'abord des ferrailles fondre, de densité relativement faible (donc nécessité d'un grand volume disponible), puis l'acier liquide porte à des températures de 1600 à 1700°C (donc nécessité d'un revêtement intérieur du cuve à l'aide de réfractaires), notamment au fond de cuve (Sole réfractaire).
- Les installations annexes, telle que le système d'aspiration et traitement des fumés et les systèmes d'additions. [5]

### 2-3. Description de l'équipement du four à arc électrique

Les équipements du four à arc électriques consistent essentiellement en :

- Panier de ferrailles;
- Wagon de ferrailles avec système de pesage;
- Plateforme basculante du four;
- Coque du four;
- Mécanisme de porte EBT;
- Toit;

- Bras d'électrodes conductrices;
- Circuit secondaire;
- Système de levage et de pivotement de toit/electrodes;

### Equipement mécanique du four à arc électrique

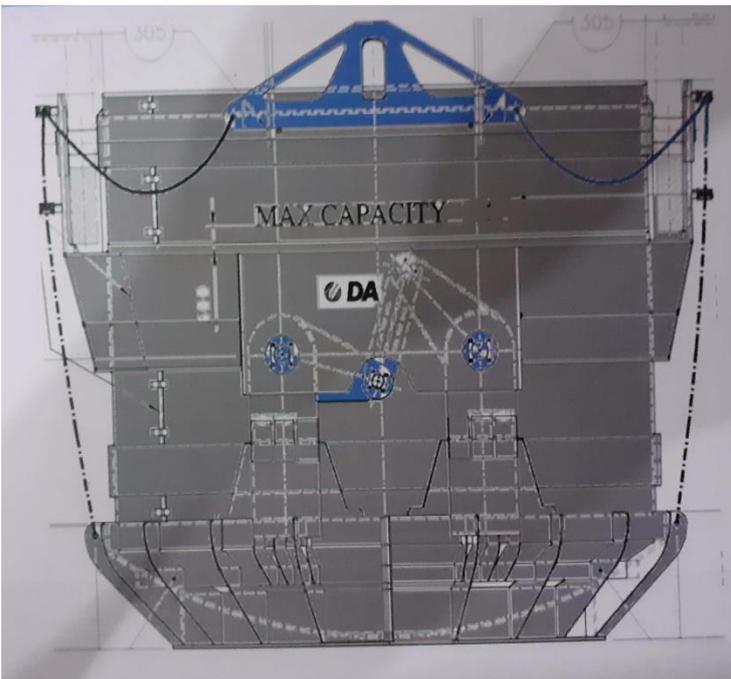
**Panier de ferrailles :** Les paniers de ferrailles sont utilisés pour le transfert entre le parc à ferrailles et l'aire de chargement du four à arc électrique.

Ils sont composés de tôles d'acier soudées et de sections renforcées, munies de deux colliers au bas permettant de charger la ferraille dans le four.

L'ouverture de la pince est réalisée par l'opérateur de la grue de chargement à l'aide du crochet auxiliaire.

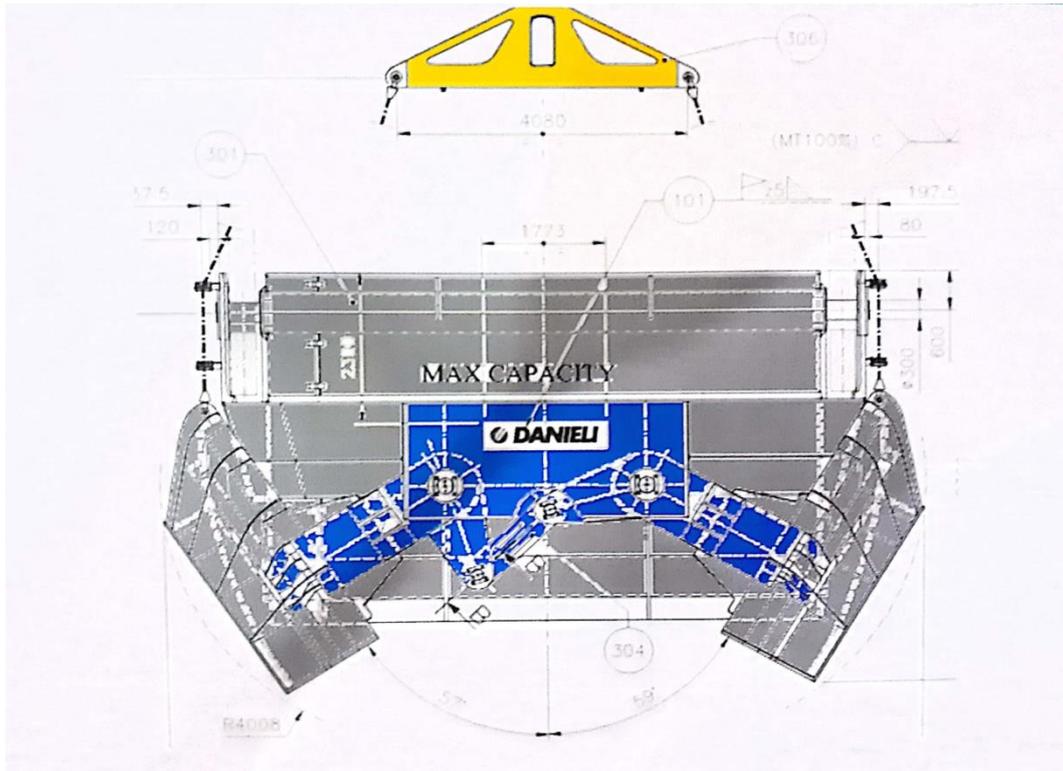


Pannier de Ferrailles



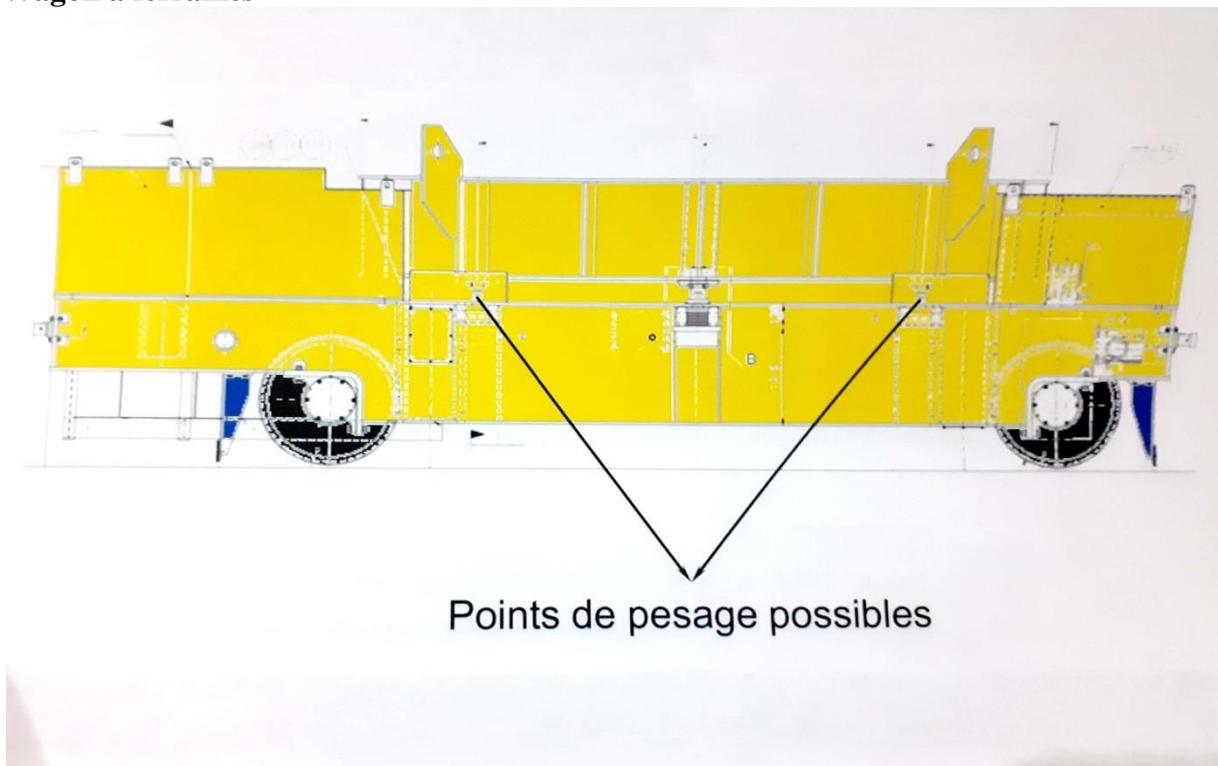
Benne preneuse à ferrailles typique

**Figure II.11 :** Panier de ferrailles et benne preneuse typique.



**Figure II.13 :** Dispositif d'ouverture du panier à ferrailles

### Wagon à ferrailles



**Figure II.14 :** Schéma représentatif du Wagon à ferrailles. [19]

### Plateforme basculante du four

La plateforme basculante est conçue pour supporter et incliner le four pour le taraudage (tapping) et le décrassage. Elle consiste essentiellement en un cadre structurel en caisson en acier fabriqué, qui supporte la coque supérieure et inférieure du four, le toit et la superstructure des électrodes.

Sa conception permet de remplacer la coque rapidement et facilement. La plateforme a deux bascules qui permettent l'inclinaison du four du côté de la coulée au côté des scories.

L'inclinaison est effectuée sur des bases du culbuteur avec des dents espacées le long du côté du berceau, qui correspondent aux supports du culbuteur. Les bases de culbuteur sont ancrées aux fondations en béton.

L'inclinaison du four est actionnée au moyen de deux vérins hydrauliques à double effet. La plateforme basculante est conçue pour que le four s'incline vers le côté de la coulée en cas de panne hydraulique.

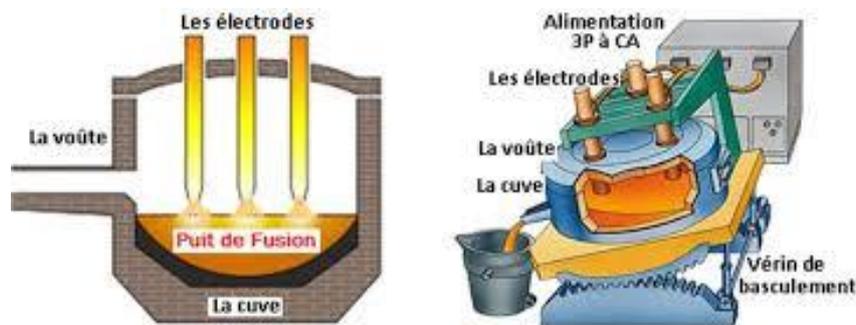


Figure II.15 : Simulation d'un four à arc électrique et plateforme de basculement [17]

## Coque du four

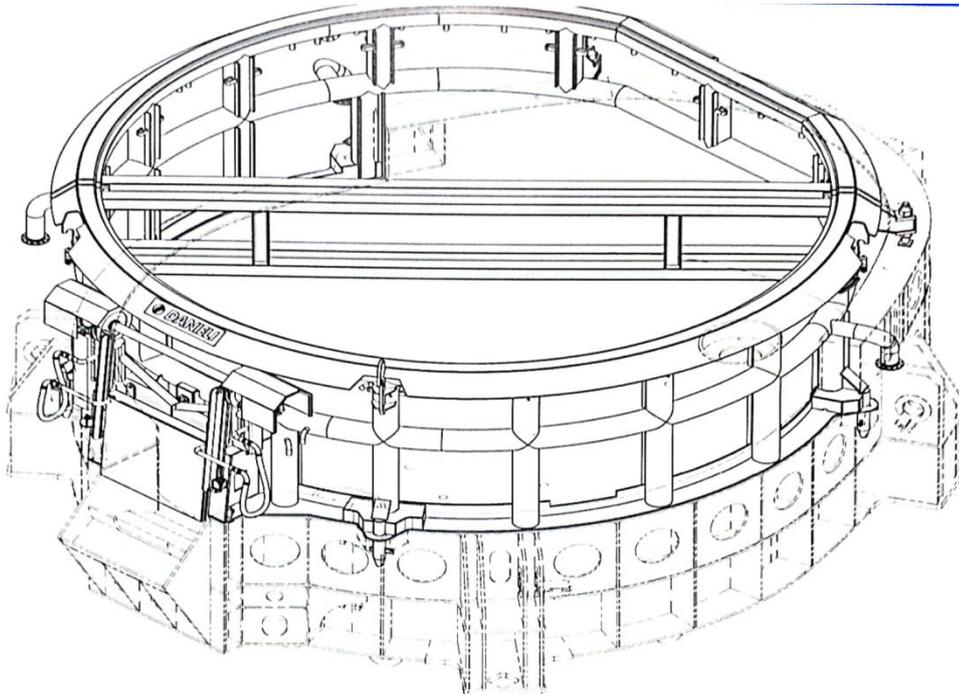
La coque du four est composée d'une partie inférieure et d'une partie supérieure. La coque inférieure est conçue pour un taraudage inférieur excentrique (EBT) avec une transition en douceur vers la section EBT. La coque inférieure repose sur la plateforme basculante au moyen de six supports ; six tourillons permettent de soulever cette partie du four, y compris le réfractaire, sur ou hors de la plateforme. Un soin particulier a été apporté pour fournir un accès facile au panneau de recouvrement EBT et à tous les points d'entretien courant.

Le cadre de coque supérieure est une structure en forme de tuyau, de type cage, contenant les panneaux refroidis par eau. Cette partie du four peut être levée au moyen de quatre tourillons.

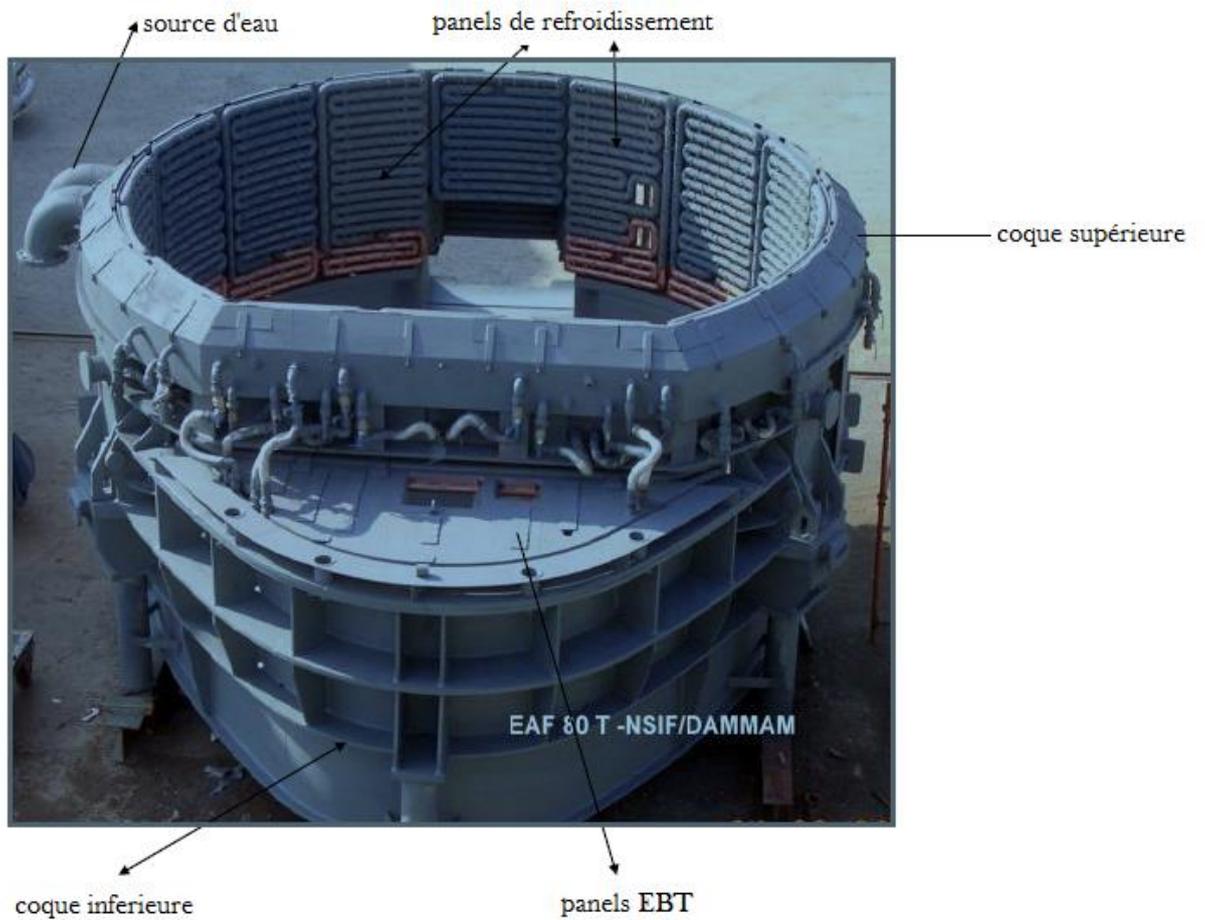
Les panneaux refroidis par eau sur les parois latérales sont conçus avec un tuyau en acier vertical, avec une plaque arrière et une plaque de conception espacées. Tous les retours sont en acier forgé. Les quatre rangées inférieures de tuyaux de panneau seront en tube de cuivre, ainsi que dans le panneau de section EBT.

Chaque panneau sera alimenté à partir de la coque par des tuyaux flexibles en acier inoxydable. Chaque entrée et sortie de panneau aura une vanne d'arrêt à bille. La sortie de chaque panneau disposera d'un puits pour le dispositif de mesure de la température.

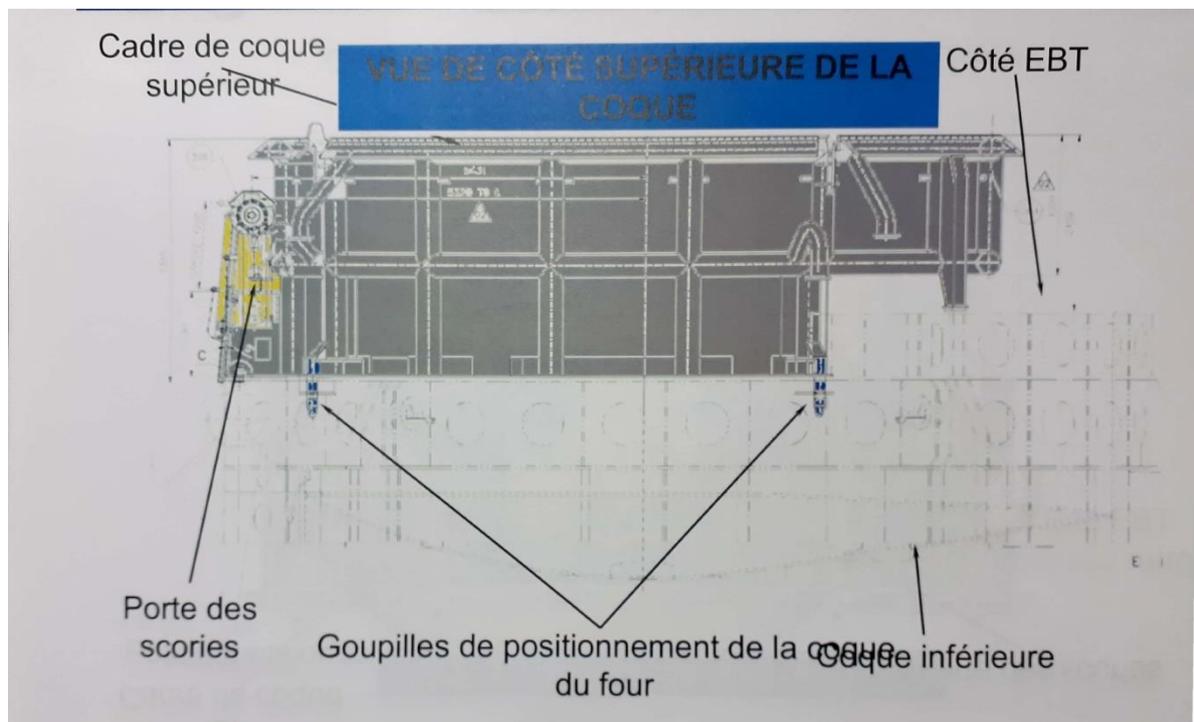
Un vérin hydraulique à simple effet refroidi à l'eau actionnera la porte des scories au moyen d'un mécanisme à chaîne/gerbes.



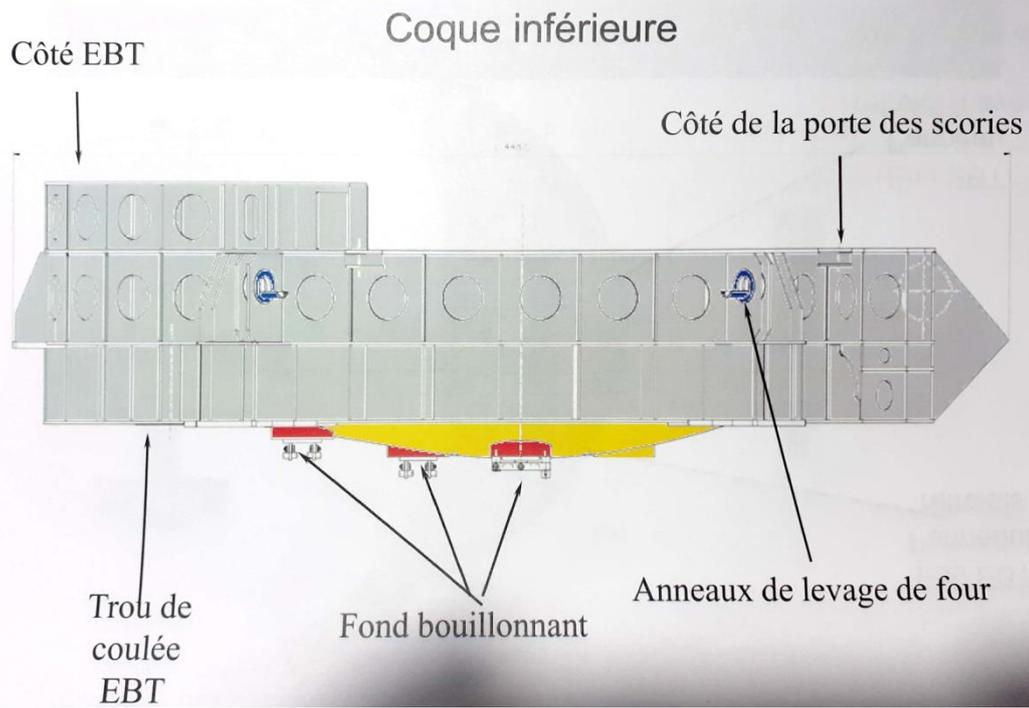
**Figure II.16** : Vue isométrique des coquilles supérieure et inférieure du four à arc électrique



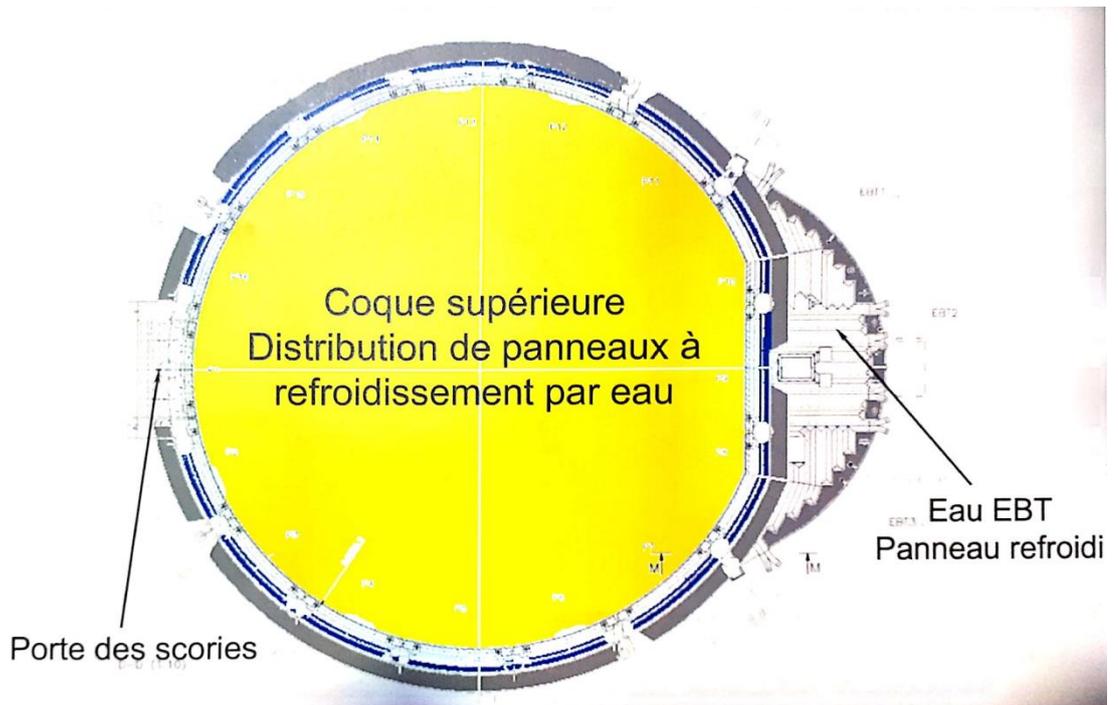
**Figure II.17 :** Coque supérieure et inférieure du four à arc électrique



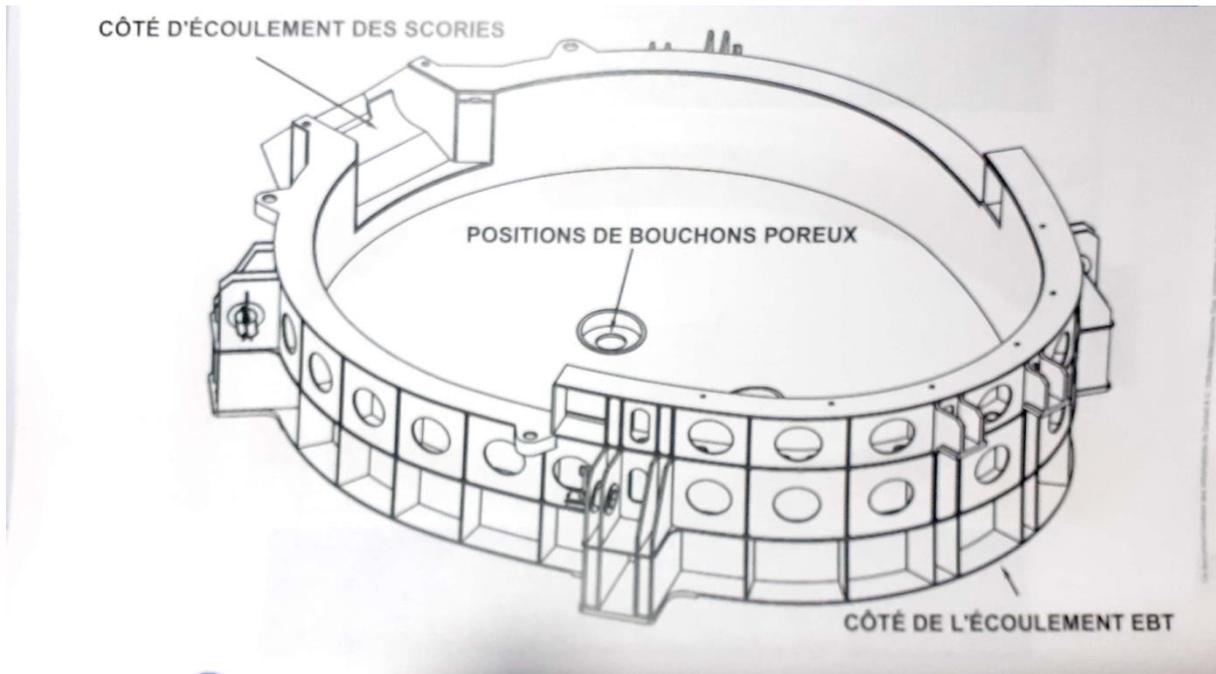
**Figure II.18 :** Vue de côté supérieur de la coque



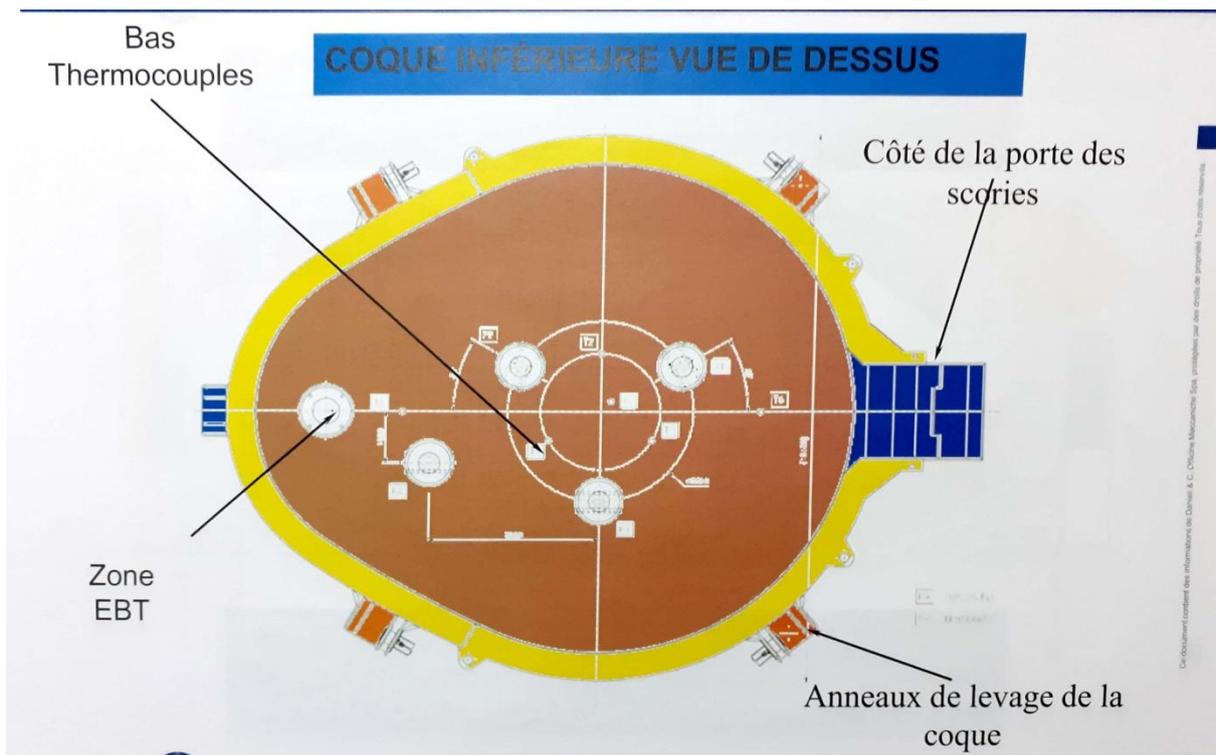
**Figure II.18 :** Coque inférieure du four à arc électrique



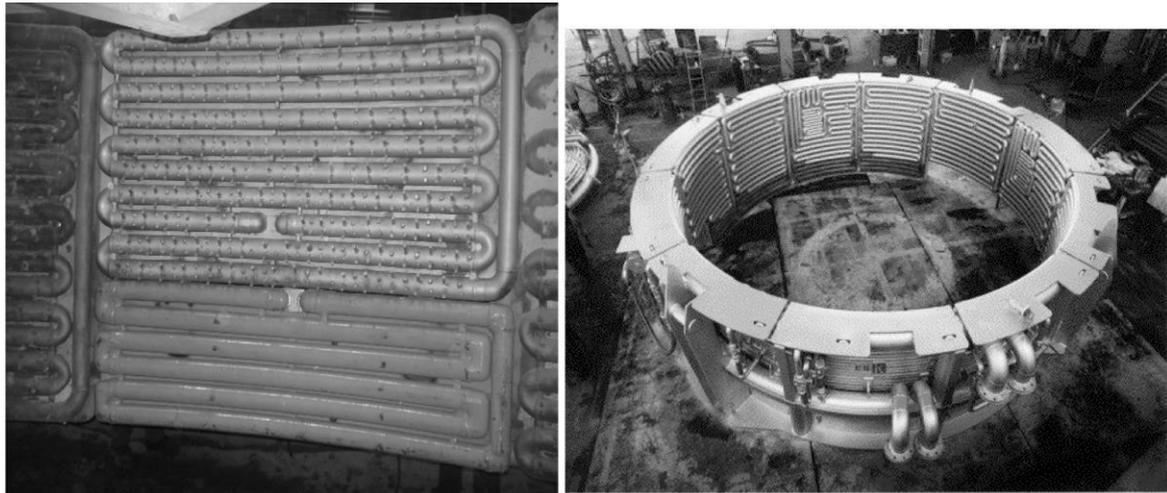
**Figure II.19 :** Coque supérieure, distribution de panneaux à refroidissement par eau



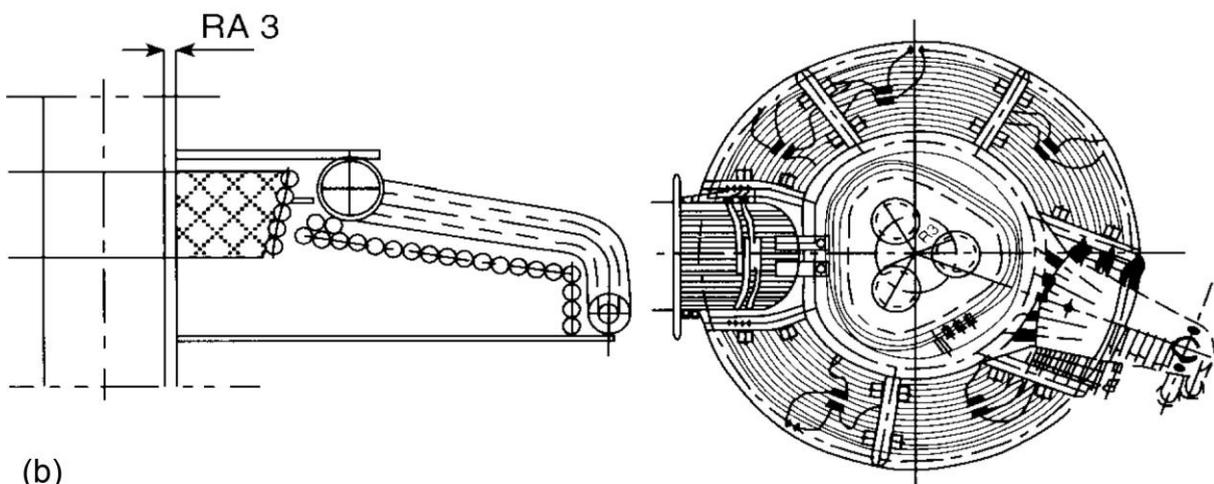
**Figure II.20 :** Vue isométrique de la coque inférieure du four à arc électrique



**Figure II.21 :** Vue de dessus de la coque inférieure du four à arc électrique [19]



(a)



(b)



(c)

**Figure II.22** : Parties refroidies du four à arc électrique. a) Panneaux faisant la partie supérieure de la coquille, b) toiture et c) conduit de dégagement de gaz.

## Mécanisme de porte EBT

Ce mécanisme permet l'ouverture et la fermeture de trou d'écoulement, est situé sous le fond de la coque et contribue à assurer un fonctionnement sans scorie lors du taraudage de l'acier liquide.

Pour faire fonctionner le système, un bras refroidi à l'eau fait tourner la porte aussi loin que possible afin de réduire l'effet de la chaleur émise par l'acier liquide. L'espace entre la brique d'extrémité du trou de coulée et la porte est d'environ 5 à 10 mm, ce qui garantit une fermeture efficace du trou de coulée.

Le mécanisme de rotation est installé sur le côté de la structure inférieure de la coque, protégé du rayonnement thermique à l'aide d'un boîtier en acier soudé, avec écran refroidi à l'eau.

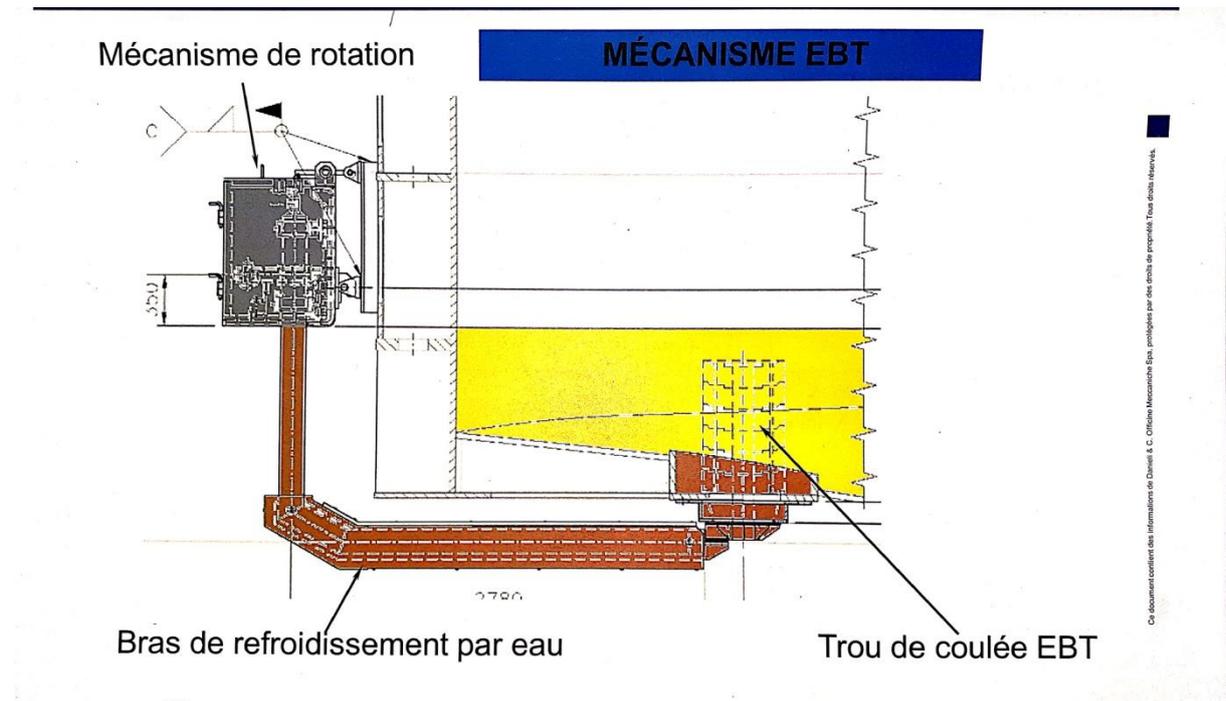


Figure II.23 : Mécanisme de porte EBT [19]



**Figure II.24 :** Exemple de trou de coulée EBT

### **Toit**

Le toit du four a une conception très rigide en raison de la connexion à bride avec la fourche de levage. Une cage refroidie à l'eau, constituée d'un tuyau inférieur et extérieur maintenus ensemble par une tuyauterie radiale, compose la structure du toit.

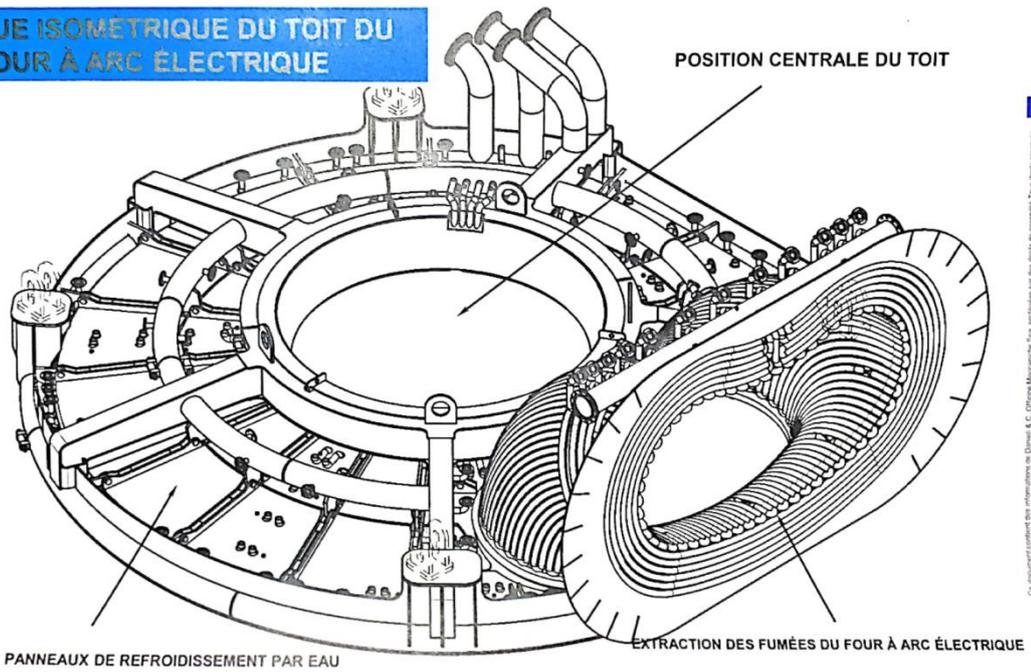
Une ouverture dans la partie centrale est prévue pour loger le toit réfractaire (delta) avec des trous pour les électrodes. Des ouvertures supplémentaires sont aménagées dans le toit, une pour le conduit d'aspiration des fumées, une pour les additifs et une pour le chargement des briquettes chaudes/froides.

Cette conception répond aux exigences de rigidité élevée tout en facilitant la maintenance des panneaux de toit, car en cas de défaillance limitée à un circuit de toit, un seul panneau doit être remplacé.

Le toit comprend également le coude refroidi par eau d'évacuation des fumés, servant d'interface avec le conduit de fumée mobile.

Le toit du four est relié à l'ensemble de levage au moyen d'une fourche de levage refroidie par eau, boulonnée au toit et constituée de tôles d'acier soudées.

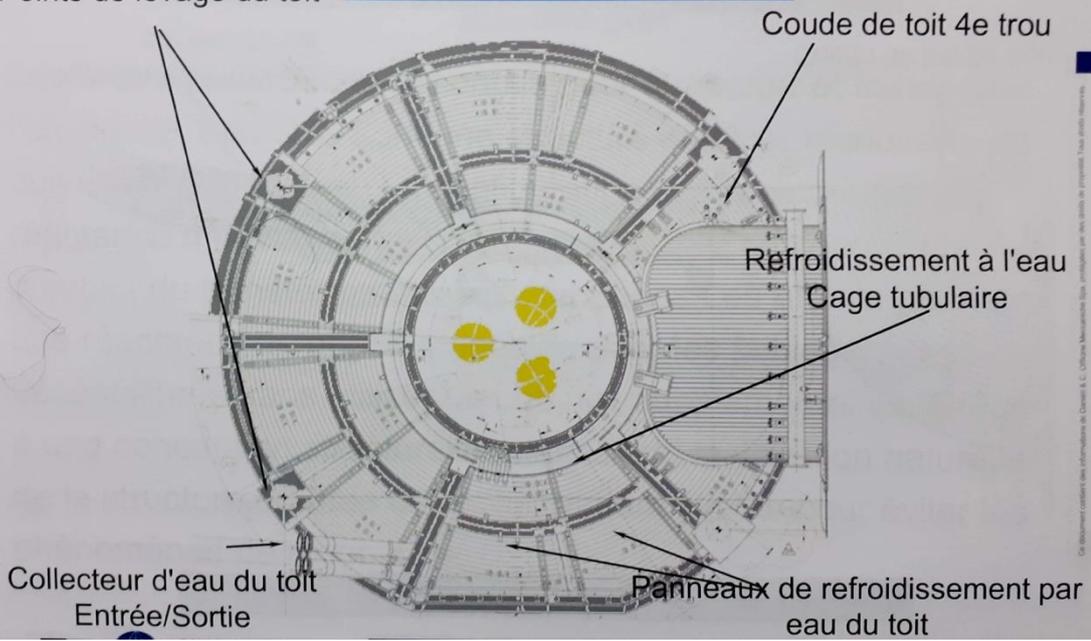
**VUE ISOMETRIQUE DU TOIT DU  
FOUR À ARC ÉLECTRIQUE**



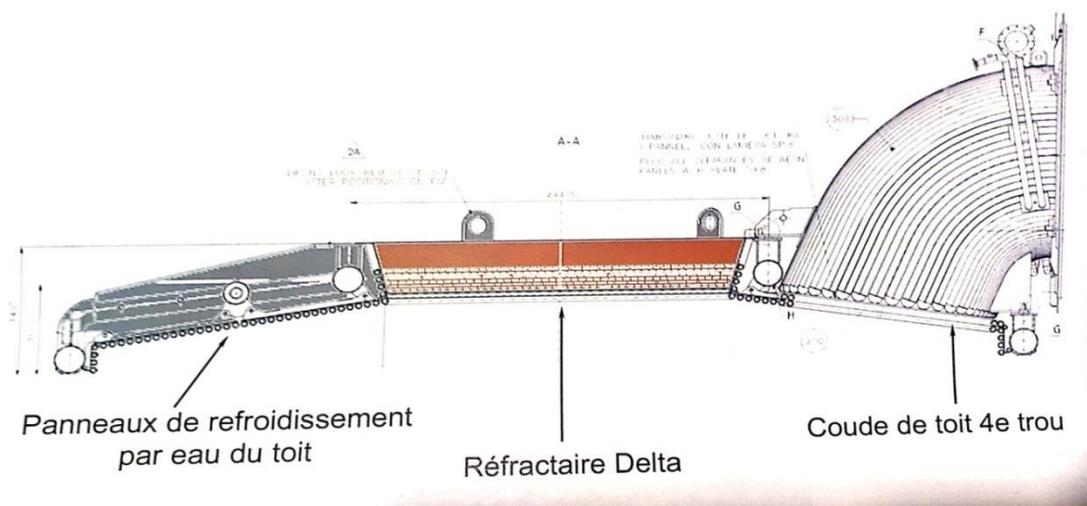
**Figure II.25 :** Vue isométrique du toit du four à arc électrique

Points de levage du toit

**VUE SUPÉRIEURE DU TOIT**



**Figure II.26 :** Vue supérieure du toit du four à arc électrique.



**Figure II.27** : Section transversale du toit du four à arc électrique.

### Système de levage et de pivotement d'électrodes sur le toit

Le système consiste en un cadre soudé sur le système pivotant portant deux bras de pont supportant le toit.

Le système pivotant a une section ronde constituée de tôles d'acier soudées.

Cette structure est montée sur une robuste butée à trois rangées reposant sur la plateforme du four, ce qui permet au toit du four et aux bras de tourner.

Un cylindre à double effet actionne la rotation.

Le support du cylindre de levage à électrodes est suspendu à la partie inférieure du système pivotant. Cette structure présente une conception compacte afin de réduire au maximum la distance possible entre les colonnes de levage et le centre de la coque du four, ce qui permet une longueur minimale des bras d'électrodes.

Chaque colonne d'électrodes comprend un montant vertical et une tête refroidie à l'eau. Un tube central de grand diamètre et de section épaisse constitue le montant vertical. Deux guides triangulaires en matériau à haute résistance sont soudés au tube dans des positions diamétralement opposées pour servir de guides aux roues coulissantes. La tête refroidie par eau est constituée de tôles d'acier fabriquées et soudées au sommet du montant vertical. La tête supporte le bras d'électrodes et est dotée d'orifices, pour les tirants de fixation du bras d'électrode, et de sièges usinés pour loger les plaques isolantes.

Les trous d'électrodes sont ovales afin de permettre le réglage des bras d'électrode.

Les roues de guidage des colonnes d'électrodes sont constituées de roues de guidage en acier forgé avec une surface de glissement durcie et sont montées à l'intérieur de la structure.

Pour chaque colonne, il y a quatre paires de roues, des ouvertures permettant un accès pour ajuster la position des roues afin d'aligner les positions de la colonne. Lorsque les colonnes de levage des électrodes sont en position haute, la pointe de l'électrode sera au-dessus du bord inférieur du toit du four.

Le levage du toit et le système de pivotement du toit et des électrodes sont pivotés à l'aide d'un cylindre hydraulique à double effet. L'angle de pivotement est contrôlé par un transducteur linéaire installé sur le vérin.

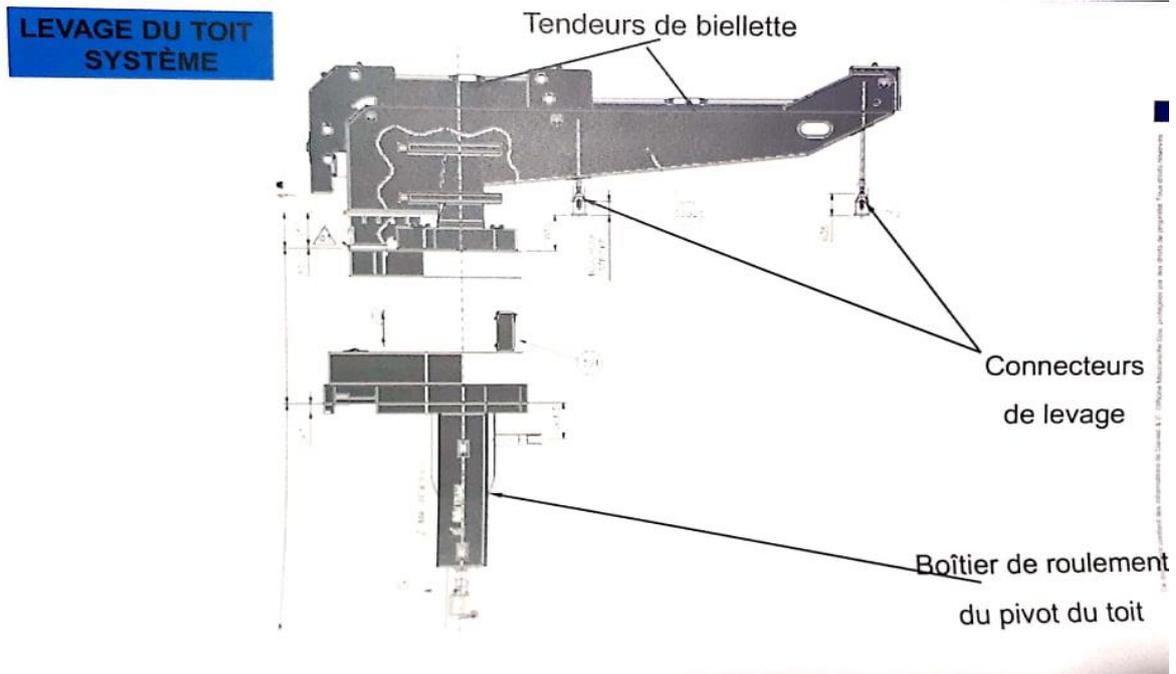


Figure II.28 : Système de levage du toit

### Equipement électrique du four à arc électrique

**Transformateur du four à arc électrique** Pour le cas le plus exigeant avec une charge de Ferraille/DRI (25% scrap/75%DRI), la puissance maximale moyenne a été calculée à 105,5 MW pour une puissance de 45,5 minutes, la puissance maximale au point de travail étant de 113,8 MW, le transformateur ayant besoin d'une puissance nominale approximative ( $\text{Cos } \varphi < 0,79$ ) sera :

$$S > 114 / \text{cos } \varphi = 146 \text{ MW}$$

La notation réelle dépend du point de travail sélectionné et de la capacité de court-circuit du réseau d'approvisionnement et du type d'équipement utilisé pour la compensation de l'alimentation réactive.

Le transformateur devrait être conçu avec une plus grande puissance.

La tension et la réactivité secondaires du transformateur sont choisies de façon à obtenir un facteur de puissance approprié en ce qui concerne la stabilité de l'arc et la longueur d'arc appropriée.

Paramètre	donnée	unité
Puissance active	114	MW
Tension secondaire du transformateur	1200	V
Point d'exploitation, courant secondaire	72	KA
Tension d'arc	500	V
Facteur de puissance	0,79	p.u

La puissance apparente du transformateur est définie par:  
 $S = 3 * U_{\text{sec}} * I_{\text{el}}$  [MVA]

Pour atteindre 114 MW avec un courant d'électrode de 72 KA, la tension secondaire devrait être de 1200 V, en fixant le courant maximal du transformateur pour ce courant de tension à 80 KA pour une marge de flexibilité opérationnelle de sorte que la puissance apparente maximale soit égale à :

$$S_{\max} = 156 \text{ MVA}$$

Ainsi, un transformateur de surcharge de 140 MVA +20% est sélectionné. [17]

### **Circuit secondaire**

Le circuit secondaire relie le transformateur aux câbles refroidis par eau et aux bras d'électrodes. Le système est constitué d'un omnibus en cuivre, conçu pour réduire au minimum l'asymétrie de réactance grâce à une conception de réactance à phase triangulée.

Les connexions au transformateur sont réalisées à l'aide de feuilles de cuivre flexible, afin de compenser les vibrations causées par des forces électromagnétiques.

Des câbles refroidis par eau relient les bras d'électrode du four au système secondaire du transformateur. Ils sont constitués d'un ensemble de câbles en cuivre disposés autour d'un caoutchouc.

Les extrémités de chaque câble sont équipées de bornes en cuivre pour la connexion au triangle du transformateur et aux bras d'électrodes. La borne de câble sur le bras d'électrode est constituée d'un joint pivotant spécial pour minimiser la torsion du câble et, par conséquent, prolonger sa durée de vie. La partie extérieure du câble est protégée par un manchon anti-usure et résistant à la chaleur.

### **Electrodes en graphite**

Les électrodes en graphite constituent la dernière partie du circuit secondaire du transformateur et ces dispositifs servent à conduire l'énergie électrique qui est convertie en chaleur pendant un arc électrique à l'intérieur du four à arc électrique.

Pendant la formation d'arc, la pointe de l'électrode atteindra 3000°C, soit la moitié de la température de la surface du soleil.

Les électrodes sont en graphite, car seul ce matériau peut supporter cette haute température.



**Figure II.48** : Les électrodes en graphite de four à arc électrique [19]

### **Bras d'électrodes conductrices**

Les bras d'électrodes sont conçus pour supporter et transporter l'électricité. Les bras sont une structure en acier recouverte de cuivre refroidie à l'eau. La configuration des bras permet une réactance minimale, en considérant le système secondaire complet du transformateur aux électrodes. Les bras supportent une réactance de phase triangulée pour les faibles déséquilibres sans utiliser de bobines supplémentaires. Grâce à une conception structurelle particulière, la vibration naturelle de la structure du bras est suffisamment élevée pour éviter les phénomènes de résonance.

La pince à électrode est constituée d'une plaque de contact en cuivre avec une surface de contact usinée et une bande de serrage en acier refroidi à l'eau. La bande de serrage est reliée à un arbre et fixée à la structure du bras avec un vérin hydraulique à simple effet.

Les bras latéraux sont 'pincés' pour minimiser le diamètre du cercle primitif des électrodes.

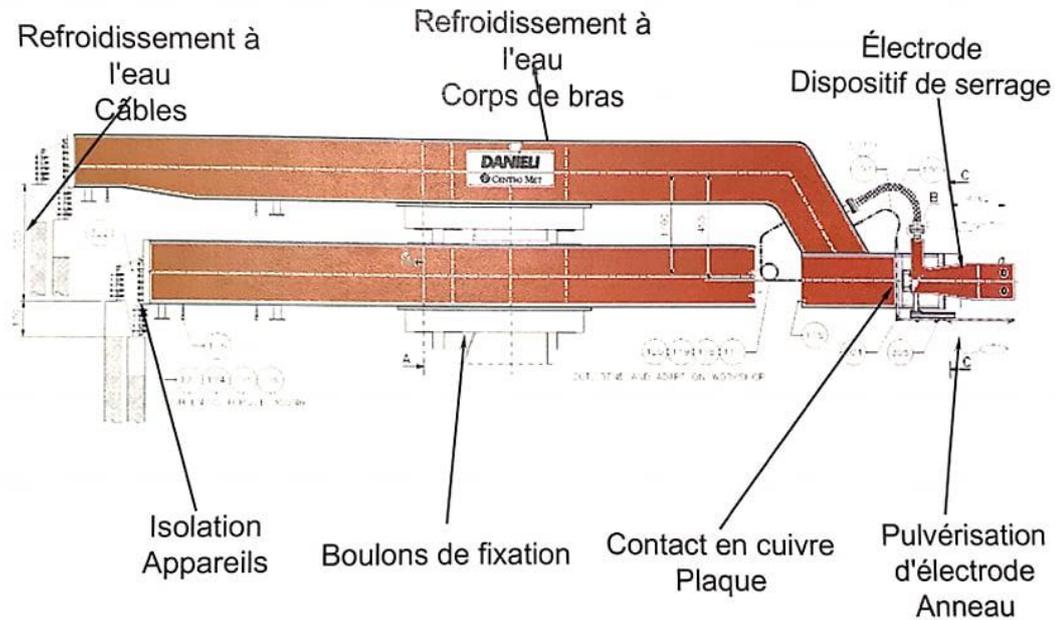


Figure II.50 : Bras d'électrodes conductrices.

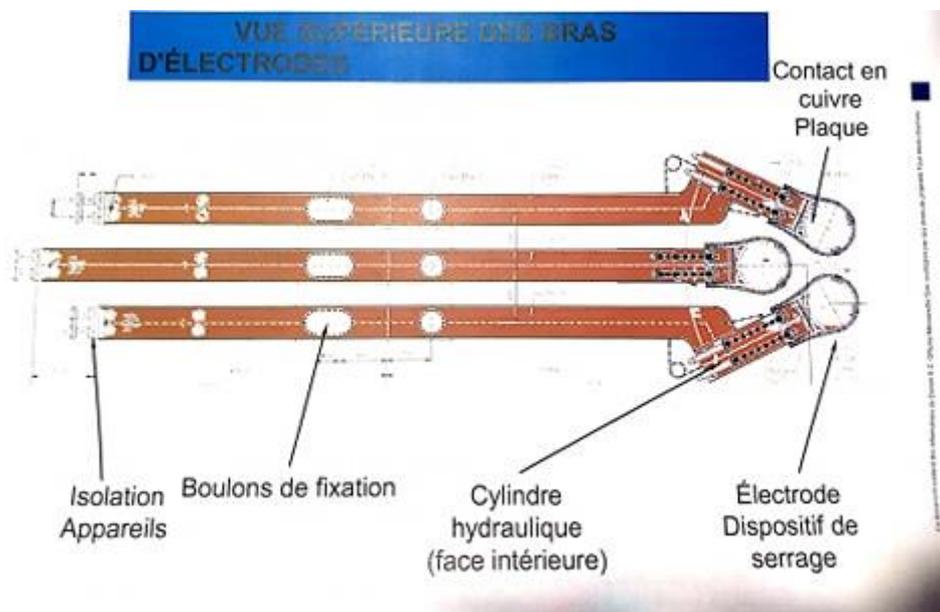


Figure II.51 : Vue supérieure des bras d'électrodes. [19]

## 2-4. Réfractaires du four à arc électrique EAF

Les réfractaires sont des matériaux qui résistent à une température élevée sans changement significatif des propriétés chimiques ou physiques. Les matériaux réfractaires sont très importants pour le fonctionnement de la FAE, car ils permettent de contenir l'acier liquide dans le foyer du four sans endommager la structure du four.

### 2-4-1. Réfractaires pour la fabrication d'acier

La fournaise électrique nécessite une variété de produits réfractaires. Les réfractaires en contact direct avec l'acier sont les plus importants. Aujourd'hui, les fours électriques et les EBT utilisent généralement des produits carbonés en magnésite ou en magnésite dans les zones de contact de l'acier. Les réfractaires spécialisés avec une bonne résistance aux chocs thermiques sont généralement utilisés dans le toit/delta, le trou de tapping, et le bec ou le coureur du four. Les descriptions suivantes donnent des recommandations réfractaires générales. [16]

**1. Sous-fonds** Les briques de magnésite ou de magnésite imprégnées de goudron sont généralement utilisées dans le sous-sol en raison d'une bonne résistance à l'acier et aux scories en cas de pénétration du foyer de travail. On s'attend à ce que ces réfractaires durent six mois, un an, voire plusieurs années, si le matériau du foyer inférieur est bien entretenu.

**2. Cœur** La plupart des conducteurs de four électrique préfèrent un foyer de magnésite monolithique facile à installer et à entretenir. Les matériaux de cœur monolithiques sont généralement des matériaux de MgO secs et vibrables qui développent la force en frittant en place pendant la combustion du fond. Ces matériaux de combustion comportent généralement des oxydes d'impureté, comme l'oxyde de fer, pour faciliter la frittage. D'autres opérateurs préfèrent tous les foyers en briques, où la construction initiale est entièrement en briques, et les matériaux monolithiques ne sont utilisés que pour réparer les trous dans le foyer en briques après une certaine période d'exploitation. Les modèles modernes de fond EAF comprennent souvent des éléments de brassage de gaz qui nécessitent des matériaux réfractaires poreux ou des tuyères par le biais de réfractaires denses pour livrer le gaz de remède à l'acier fondu. Ces gaz d'agitation peuvent causer l'érosion des réfractaires du foyer et nécessitent un entretien régulier.

**3. Baisse de la paroi latérale** La paroi latérale inférieure utilise généralement la même qualité de brique que la couche inférieure, la MgO élevée, la couche ordinaire ou la couche goudronnée. Ces briques constituent la base de la dalle et de la paroi supérieure et sont protégées par les rives du matériau du foyer. Ils sont remplacés avec le foyer monolithique.

**4. Barrage** La zone de décantation de la plupart des fours utilise de la brique de carbone de magnésite ou de la brique de magnésite imprégnée de goudron. La sélection réfractaire dans la ligne de pente doit être soigneusement coordonnée avec les produits chimiques attendus de la scorie. Les magasins d'acier au carbone génèrent des lamelles riches en citron vert, FeO-SiO<sub>2</sub>, avec un rapport calcaire/silice de 2:11, qui exigent des réfractaires de base. Dans les opérations en inox, on peut utiliser une brique chromée de magnésite à grains fusionnés plus neutre.

**5. Mur de face/points chauds** Au-dessus de la pente, la doublure réfractaire voit une éruption d'arc à haute température, un éclaboussage de scories, un écrasement de débris et une imbrication de flammes provenant de brûleurs ou de lances. La réfracturation, la résistance et la résistance aux chocs thermiques sont les paramètres essentiels des réfractaires latéraux de la fournaise électrique. Dans les fours avec panneaux refroidis à l'eau, la brique de carbone de

magnésite est le choix le plus fréquent, avec la brique de carbone de magnésite à grains fusionnés dans les points chauds.

**6. Toit et delta** Si le toit est refroidi à l'eau, un delta prédominant de matériaux chromés à haute teneur en alumine ou en alumine est un choix probable. On peut parfois obtenir une plus grande économie en brassant les ports d'électrode et en tirant sur un plastique d'alumine élevé dans le reste de la section delta. Les deltas de toits sont soumis à un choc thermique extrême pendant les balançoires de toit pour la charge. Les matériaux de base auraient une meilleure résistance à l'atmosphère de la fournaise, mais ne peuvent généralement pas supporter le cyclisme thermique. Pour les toits réfractaires complets, les anneaux annulaires en briques aluminées de 70 à 80 % composant environ les deux tiers du toit sont les plus courants; avec du plastique alumina ou du plastique chrome alumina élevé enroulé dans la section delta, de nouveau avec des anneaux d'alumine ou d'alumine chromée de haute pureté.

**7. Trou de goulot** Pour les fours électriques traditionnels à tamisage, la construction la plus courante consiste en un module de trou de tapping ou d'un bloc de trou avec un trou préforé. D'autres opérateurs soutireront des mélanges à haute alumine ou à tambours de base autour d'un tuyau d'acier pour former leur trou à tambour, tandis que d'autres fusionneront des mélanges à base de pistolet autour d'un tuyau d'acier pour le trou initial. Certains modèles de trous de cuisson dureront la vie de la campagne de four, tandis que d'autres opérateurs maintiennent régulièrement leur trou de tapisserie en tirant autour d'un tuyau métallique inséré. Pour les EBT, les formes denses de magnésite ou de magnésite en carbone forment le trou de bande vertical. Elles sont souvent encastrées dans des formes rectangulaires plus grandes pour former un trou de tapisserie permanent bien dans le nez de la fournaise. Encore une fois, certains trous d'EBT durent la durée de vie de la fournaise, tandis que d'autres opérateurs placent la fournaise à l'aide d'un mélange de broyage à résine ou effectuent des travaux d'entretien réguliers en installant de nouvelles formes de trous de tissu au besoin. Les trous EBT nécessitent un sable bien rempli entre les cuisses pour éviter que l'acier ne gèle dans le trou; ce sable est habituellement à base d'olivine, de magnésite ou de chromite.

**8. Défilement ou coureur** Le décapage ou le coureur des fours électriques conventionnels peuvent être des formes de brique, du plastique enroulé ou une grande forme de décantation préformée. En raison du choc thermique extrême sur ce coureur ou sur ce bec, les matériaux d'alumine élevés sont préférés. À l'occasion, on utilisera un système alumine combiné de base/haute performance pour maximiser les performances.

**9. Considérations réfractaires pour les fours à courant continu** Les fours électriques à courant continu ont des exigences réfractaires spéciales en raison du fait que l'électrode de retour est habituellement installée dans le fond du four (certains fours à courant continu utilisent un autre arrangement avec deux électrodes de graphite). Dans le cas d'un fond conducteur de courant, la doublure réfractaire au centre du fond du four agit comme l'anode. Une plaque de cuivre est habituellement raccordée sous le réfractaire conducteur et la barre de bus de cuivre de retour est raccordée à la plaque. Dans ce cas, les exigences spéciales pour le réfractaire sont la faible résistance électrique (de préférence <0,5 millimètre par mètre), la faible conductivité thermique et la forte résistance à l'usure.

Une configuration typique utilise une doublure de travail de 6 pouces d'épaisseur composée de mélanges de magnésite à liaison carbone contenant de 5 à 10 % en poids de carbone. Ces matériaux peuvent être installés à chaud ou à froid. Sous le revêtement de travail, une brique de carbone de magnésite à trois couches est installée. La teneur résiduelle en carbone des

briques varie de 10 à 14 % en poids. Grâce à un entretien régulier, cette configuration d'électrode inférieure a atteint une durée de vie inférieure pouvant atteindre 4000 chaleur.

La configuration des électrodes de retour à billettes utilise de un à quatre grands billettes en acier (de l'ordre de 10 pouces de diamètre) selon la taille du four. Les billettes sont encastrées dans le réfractaire du fond. Les billettes sont entourées d'une brique réfractaire de base. Le reste du foyer est entouré d'un mélange spécial de magnésie. Le mélange de bourrage de magnésie est utilisé pour maintenir la zone de brique autour de l'électrode. Cette configuration d'électrodes de retour a atteint plus de 1500 chaleur sur le fond du four.

Le type de broche de l'électrode de retour utilise plusieurs broches métalliques de 25 à 50 cm de diamètre pour fournir le chemin de retour du flux électrique. Ces goupilles pénètrent en fait le réfractaire jusqu'au fond du four où elles sont attachées à une plaque métallique. Le mélange à tambour de magnésie sèche est utilisé pour la totalité de la doublure du foyer. . Ce mélange est entrelacé entre les broches métalliques. On peut aussi utiliser de la brique de carbone de magnésie dans la zone autour de l'anode. Cela aide à améliorer la vie de fond de la fournaise, mais est plus coûteux. La durée de vie du fond varie de 2000 à 4000 chaleur selon les matériaux réfractaires utilisés.

L'électrode de retour des nageoires d'acier utilise des nageoires d'acier disposées en anneau dans le fond de la fournaise pour former plusieurs secteurs. Chaque secteur est constitué d'une plaque horizontale au sol et de plusieurs nageoires soudées en acier qui se propagent vers le haut à travers le réfractaire. Le mélange de magnésie sèche est utilisé entre les nageoires. Le foyer est également revêtu de ce matériau.

Les points importants à prendre en compte au cours de l'installation sont le zonage réfractaire, le contour du foyer, l'emplacement de la pente, la capacité d'acier du four, l'emplacement du trou, la taille et l'angle du trou, l'orientation du toit/du delta, les marges d'expansion, l'emplacement du port de brûlage, la construction de la porte de laitier, les éléments de fixation du fond et l'électrode de fond du four à courant continu.

## **2-4-2. Installation du revêtement du four électrique**

**1. Cœur du sous-fonds et du coeur monolithique** Le four doit être à niveau et la coquille doit être nettoyée de tous les débris avant de commencer. Il aide à localiser le centre exact de la fournaise et à poinçonner une marque dans le centre inférieur de la coquille. La construction préférée est la brique de magnésite rectangulaire posée à plat à l'aide d'un matériau granulaire de base comme remplissage pour fournir une surface plane contre la coque d'acier arrondie. Après avoir localisé les blocs de siège de la cheminée EBT, tous les éléments de fixation du fond et permettant l'électrode du fond de la fournaise en courant continu, le premier cours de la brique du dessous est posé sec, serré et NIVEAU, et un mortier de magnésite sec est balayé dans les joints de brique. Des matériaux de remplissage supplémentaires sont placés autour du périmètre de ce premier parcours et étalés. Le deuxième parcours est posé à un angle de 45° par rapport au premier parcours et le mortier de magnésite sec est de nouveau balayé dans les articulations. Ce processus est répété pour trois ou quatre cours plats. (Il y a un autre modèle de soudure, moins préférable, qui pose deux à quatre parcours plats qui suivent le contour courbe de la coque d'acier. Cela peut être utilisé dans les fours où la coque a un petit rayon sphérique et donne une épaisseur plus uniforme dans le matériau de la masse monolithique.) À l'altitude appropriée, les briques en forme de clé sont utilisées pour commencer le premier parcours du stade. Il est préférable de commencer par le plus grand anneau à un pouce de la coque et de travailler vers le centre. Pour fermer l'anneau, une brique clé est coupée sur une scie en brique aux dimensions exactes requises pour fermer l'anneau.

Si la forme de coupe est inférieure à une demi-brique, il faut utiliser deux formes de coupe. Le vide à la fin du parcours jusqu'à la coquille est rempli de matériaux granulaires de magnésite. Le prochain anneau de stade est installé de la même manière. Le contour du foyer de stade affiché sur le dessin doit être soigneusement suivi pour laisser suffisamment de place pour ajouter le matériau de corpulence monolithique à l'épaisseur appropriée.

Pour les fours EBT, il est encore plus important de suivre exactement le dessin du fond réfractaire. Il y a des anneaux partiels de brique dont les rayons varient dans la partie avant du four et qui doivent être maintenus à niveau. Une façon de faciliter cela est de forer un trou dans le cours plat supérieur de la brique du fond au centre exact du four et ensuite d'utiliser un balai avec un clou dessus qui s'étend de cette brique centrale comme un mandrin pour dessiner des cercles et des arcs pour les anneaux du stade et les anneaux partiels qui s'étendent dans le nez.

**2. Tous les cœurs de briques** Si un matériau de cornemuse monolithique n'est pas utilisé, le cours final ou les deux derniers cours dans le corbillard en briques sont posés dans une construction à l'écluse (à l'arête) ou au soldat (à l'extrémité). La construction d'un treuil ou d'un soldat donne beaucoup plus de contact entre briques et briques et minimise la tenue du foyer en service. Encore une fois, tous les cours dans le foyer et le stade sont secs et balayés de mortier de magnésite pour remplir les joints.

**3. Coulisses et cloisons** Une fois les anneaux du stade terminés, les briques en pente sont installées en suivant le même concept de fixation que celui utilisé pour les anneaux du stade. La dalle doit également être installée à plus d'un pouce de la coque d'acier pour permettre la dilatation thermique sans écraser ou bouger la brique. Les anneaux de brique ou les anneaux partiels doivent être maintenus dans le mur latéral et les points chauds jusqu'à ce que les panneaux refroidis à l'eau ou le haut du four soient atteints.

**4. Jambes de porte** Les embouteillages de porte sont une zone de conception critique pour le revêtement réfractaire. Plusieurs opérateurs utilisent simplement des formes de clés régulières dans des cours enclavés comme brouillage de porte, et ils ont une pratique réussie. D'autres opérateurs utilisent des formes spéciales d'embrayage de portes qui ont une surface plus grande pour mieux intercaler les parcours et un angle plus pointu qui ouvre la porte et élimine ou réduit les dommages réfractaires lorsqu'ils s'inclinent. D'autres types de confiture de porte comprennent des assemblages en brique ou en préfabriqué qui sont soudés ou boulonnés à la coque en acier. Celles-ci sont généralement installées en premier et la dalle et la brique latérale sont posées directement contre ces assemblages, avec des anneaux latéraux fixés à mi-chemin entre la porte et le trou de tapping.

**5. Trous** Les fours électriques à inclinaison conventionnelle utilisent généralement des formes de module de trou de tapping fixées avec une grue à l'altitude appropriée avant de brasser la pente et les parois latérales. Une autre solution consiste à laisser une ouverture dans les anneaux latéraux et ensuite badigeonner ou canon autour d'un tuyau d'acier formant le trou de tissu. Ce tuyau est ensuite fondu à la première chaleur. On peut aussi utiliser de la même façon des formes de trou réfractaire avec du matériel monolithique qui les maintient en place à l'altitude et à l'angle appropriés.

**6. Toits et deltas** Le toit de la chaudière électrique ou la section delta d'un toit refroidi à l'eau sont généralement installés dans une zone de reliure réfractaire, et un toit fini attend la reconstruction de la chaudière. Avec des toits refroidis à l'eau et des deltas préfabriqués, un

réfractaire en plastique ou en cascade est souvent placé autour du périmètre de la forme préétablie pour le verrouiller en place contre le toit refroidi à l'eau. Pour les toits réfractaires en briques, une forme de toit est requise (généralement en béton) qui crée la forme appropriée de la coupole pour le contour intérieur du toit. Les mandrins sont fixés pour les électrodes. Des toits de fours électriques à trois couches sont posés dans des anneaux concentriques contre l'anneau de toit pour les deux tiers extérieurs du toit. Souvent, des anneaux partiels de brique sont posés dans un motif de coin entre les électrodes. Des briques de bague en électro entourent chaque mandrin et sont maintenues en place avec des bandes d'acier. Une table ou un plastique est moulé ou mis en place dans la cavité entre les anneaux extérieurs et la brique de l'anneau d'électrode.

**7. Cœur monolithique** La plupart des conducteurs de four électrique utilisent un matériau de cœur monolithique. Il s'agit d'un produit de haute magnésite, auto-frittage qui est granulaire dans la nature. Après l'installation de tout bloc de siège de trou de courroie EBT, des éléments de fixation du fond et des formes d'électrodes de fond DC; la construction d'un foyer monolithique a commencé. Le matériau de combustion est prêt à être utilisé dans de grands sacs en vrac; une grue tient le sac en vrac en position au-dessus du soubassement en brique pendant que le sac est scindé et que le matériau est mis en place. Après deux ou trois sacs en vrac dans le four, plusieurs ouvriers utilisant des pelles ou des fourches à pas frappent à plusieurs reprises le matériau granulaire afin de retirer de l'air et de densifier le foyer réfractaire.

Comme le matériau le densifie, les ouvriers le compactent davantage avec des vibrateurs mécaniques ou simplement en marchant sur le foyer pour atteindre le contour approprié. D'autres sacs de tissu de masse sont ajoutés, aérés et densifiés jusqu'à ce que le contour final soit atteint (habituellement mesuré avec des chaînes ou un formulaire). Le nouveau corbillard hiverne en place pendant la chaleur initiale.

**8. Horaire d'échauffement** Sur un nouveau revêtement du four électrique doté d'un foyer monolithique entièrement neuf, les plaques d'acier ou les débris de lumière sont généralement abaissés par l'aimant dans le fond du four afin d'assurer la protection du matériau de cœur non fritté. Une fois cette ferraille amortissable en place, le premier seau est chargé et l'arc est heurté, en utilisant un long arc pour éviter de s'ennuyer dans le nouveau fond monolithique. Le fond est généralement fritté après la première chaleur, bien qu'il soit important d'inspecter le fond et les bancs pour déceler tout trou ou érosion dû à des matériaux non frittés laissant un vide dans la doublure. Étant donné que le nouveau revêtement de four électrique contient très peu d'humidité, aucune précaution particulière n'est requise pendant le chauffage initial, sauf l'utilisation d'un long arc pour éviter d'éroder le fond avant le frittage. Les revêtements réfractaires de la fournaise électrique sont maintenus par la canalisation, l'installation et l'application de patches en briques.

**9. Entretien des canons** L'entretien des canons consiste à mélanger l'eau avec un mélange de canon à base de magnésite et à vaporiser ce mélange sur le revêtement réfractaire. Le Gunning est utilisé pour maintenir les points chauds, l'érosion de la pente, les trous de tissu, la surface de la poitrine de la porte ou toute autre partie de la doublure qui subit une usure réfractaire sélective. Le matériel de cueillette est habituellement une mesure temporaire et devra être récupéré au même endroit dans les prochaines chaleurs. L'entretien des canons, bien que temporaire, offre une vie équilibrée en soirée le motif d'usure hautement sélectif dans la doublure du four électrique. En d'autres termes, l'usure réfractaire dans les fours à

courant alternatif est généralement plus grande dans la paroi latérale la plus proche de l'électrode de mât; et la canalisation de ce secteur maximise le rendement global de la garniture. La plupart des opérations d'entretien réfractaire par canon sont effectuées avec un pistolet à tambour pressurisé d'une capacité d'environ 900 à 1800 kg. Ce pistolet transporte du matériau sec par pneumatisme vers une buse de mélange d'eau, et la pression de l'air projette le mélange de canon humide sur la surface de la doublure. L'entraînement et la compétence de l'opérateur de tuyauterie sont un facteur de la qualité de l'épandage armé, et il y a une tendance à vider l'arme, ce qui peut augmenter les coûts réfractaires. On peut automatiser la mise à l'air en utilisant un dispositif mécanique de canon à lancer central qui tire du matériel de canon de façon circulaire tout en étant suspendu d'une grue. Cette canalisation mécanique est plus rapide et plus facile pour les gens, mais elle gaspille souvent des matières en les plaçant là où elles ne sont pas nécessaires.

Les mélanges à armure de base varient de 40 à 95 % de MgO en qualité. Les opérations à haute température et les fours à haute puissance utilisent généralement des mélanges d'armes à feu à teneur élevée en MgO; tandis que les opérations à température modérée utilisent des mélanges à faible teneur en MgO. Les producteurs d'acier au carbone utilisent entre 1,4 et 7,5 kg de mélange d'armes à feu par tonne d'acier.

**10. Entretien de l'installation** L'entretien de l'installation est la technique utilisée pour corriger les trous dans le fond monolithique. Une version de frittage rapide de la matière grise du foyer, ou du produit d'origine, est utilisée pour la coloration. Le matériau sec est trempé ou déposé par grue, où qu'il y ait un trou ou un creux dans le fond monolithique; ou un parachute mécanique suspendu par grue transporte du matériel sur les berges inclinées du foyer. Il arrive que l'aimant soit utilisé pour mettre à niveau ce matériau de patch, qui ensuite sinters en place pendant la prochaine chaleur. Avec cette technique de coloration, les fonds monolithiques durent souvent de trois mois à un an ou plus.

**11. Épinglage des briques** Après plusieurs semaines de fonctionnement, l'entretien des canons devient moins efficace pour maintenir la garniture réfractaire. La plupart des opérateurs prendront alors le four à froid et creuseront entre 30 et 80 % du mur latéral et des points chauds. Les décombres sont ensuite retirés du four et les ouvriers installent de nouvelles briques dans toutes les zones des points chauds et de la paroi latérale qui ont été enlevés. Souvent, la même qualité réfractaire et la même épaisseur sont réinstallées que celles utilisées dans la doublure initiale. Par ailleurs, des garnitures de moindre qualité ou plus minces sont installées pendant cette mise à jour et la durée de vie de la doublure est légèrement inférieure à celle qui serait reçue d'une nouvelle doublure complète. Le timbre est complété par la canalisation d'un mélange de mitrailleuses MgO dans tous les vides et les fissures de la brique patchée.

Habituellement, lors d'un patch de brique, le trou est complètement remplacé ou réparé par un mélange de tambour ou de matériel de canon, si ce n'est remplacé par du travail de brique. La plupart des opérateurs de fours électriques élaboreront un calendrier régulier de mise en place de plaques de briques pour leur four électrique. Il peut s'agir d'un ou deux patches intermédiaires pour chaque tâche complète de paroi latérale. Ou encore, certains opérateurs ont utilisé le concept de l'application continue de patches, où certaines briques sont remplacées toutes les deux semaines, voire toutes les semaines, et la doublure complète n'est totalement remplacée qu'une ou deux fois par an. Ces décisions d'entretien et de correctifs sont habituellement dictées par la gravité des conditions d'exploitation ainsi que par la philosophie de maintenance économique de l'entreprise.

**12. Entretien réfractaire divers** Chaque EAF a des caractéristiques ou des conditions uniques qui nécessitent un entretien réfractaire spécifique. Les sections delta du toit doivent être remplacées en cas de panne ou selon un calendrier régulier. Les trous doivent être remplacés ou réparés lorsque l'heure du robinet est trop courte ou que le report du laitier commence. Les trous classiques de EAF sont habituellement remplacés par un mélange à armure MgO élevé tiré autour d'un tuyau d'acier, tandis que les trous de la EBT sont éliminés et un nouvel assemblage ou un tube à une pièce inséré par la grue d'en haut. Les éléments de fixation en bas et les électrodes en bas nécessitent des procédures d'entretien spécialisées qui varient selon la conception.

### **Philosophie opérationnelle**

La philosophie opérationnelle a souvent un impact important sur le rendement réfractaire. Si la production maximale est la philosophie d'exploitation clé, les décisions seront axées sur une production maximale et moins qu'un entretien réfractaire optimal ne puisse en résulter. Maximiser la production exige habituellement une garniture réfractaire initiale de haute qualité qui devrait durer longtemps sans entretien réfractaire important. Il y a un point de croisement où un manque d'entretien réduit en fait la productivité, de sorte que la philosophie de production maximale exige souvent un équilibre délicat sur la conception et l'entretien des garnitures réfractaires. La philosophie du coût minimum est également courante. Ici, la garniture réfractaire initiale est des marques génériques bon marché qui devraient durer longtemps grâce à l'application de correctifs ou à l'entretien par canon. Les revêtements minimaux ont généralement peu de zonage et utilisent souvent la même marque et la même épaisseur de doublure dans tout le four. Cette philosophie peut être efficace pour les opérations de faible intensité.

**1. Campagne prévisible** Cette philosophie exige généralement une période déterminée entre les reliures réfractaires ou les patchs. Dans ce scénario, l'opérateur de la fournaise électrique planifie la production complète pendant deux ou trois semaines, sachant que la doublure de la fournaise la rendra aussi longue. Ensuite, un patch ou une ligne de connexion est programmé et une autre campagne prévisible est lancée. Cette philosophie exige une coordination et une optimisation étroites de la conception réfractaire avec l'exploitation de l'atelier.

**2. Philosophie d'indisponibilité minimale** Ce scénario est semblable à la production maximale, mais sans le même zèle pour la production totale. Dans ce cas, le revêtement réfractaire doit assurer des opérations prévisibles avec très peu d'entretien, de sorte qu'une garniture initiale de haute qualité est habituellement requise. Il n'y a pas beaucoup de temps d'inactivité ou de maintenance avant le jour prévu de l'arrêt ou de l'arrêt. L'entretien prévisible est acceptable, mais il doit se faire sur une base régulière.

### **3. Considérations futures**

Les exigences en matière de réfractaires à la fournaise électrique ont considérablement changé au cours des dernières années et sont confrontées à des changements encore plus importants à mesure que la technologie et les processus de fusion électrique évoluent. L'utilisation croissante de succédanés de ferraille, de fer à réduction directe (DRI) et de fer briqué à chaud (HBI) exige des doublures de four modifiées. La post-combustion du monoxyde de carbone et l'utilisation croissante des brûleurs à oxycombustibles imposent toutes deux des exigences sur la performance réfractaire du four. Il faudra augmenter le refroidissement de l'eau dans les zones des embouteillages et des ouvertures du brûleur. Il y aura des pressions pour réduire la

consommation réfractaire de produits contenant du chrome et pour s'assurer que les réfractaires de tous les procédés de fabrication de l'acier sont recyclés.

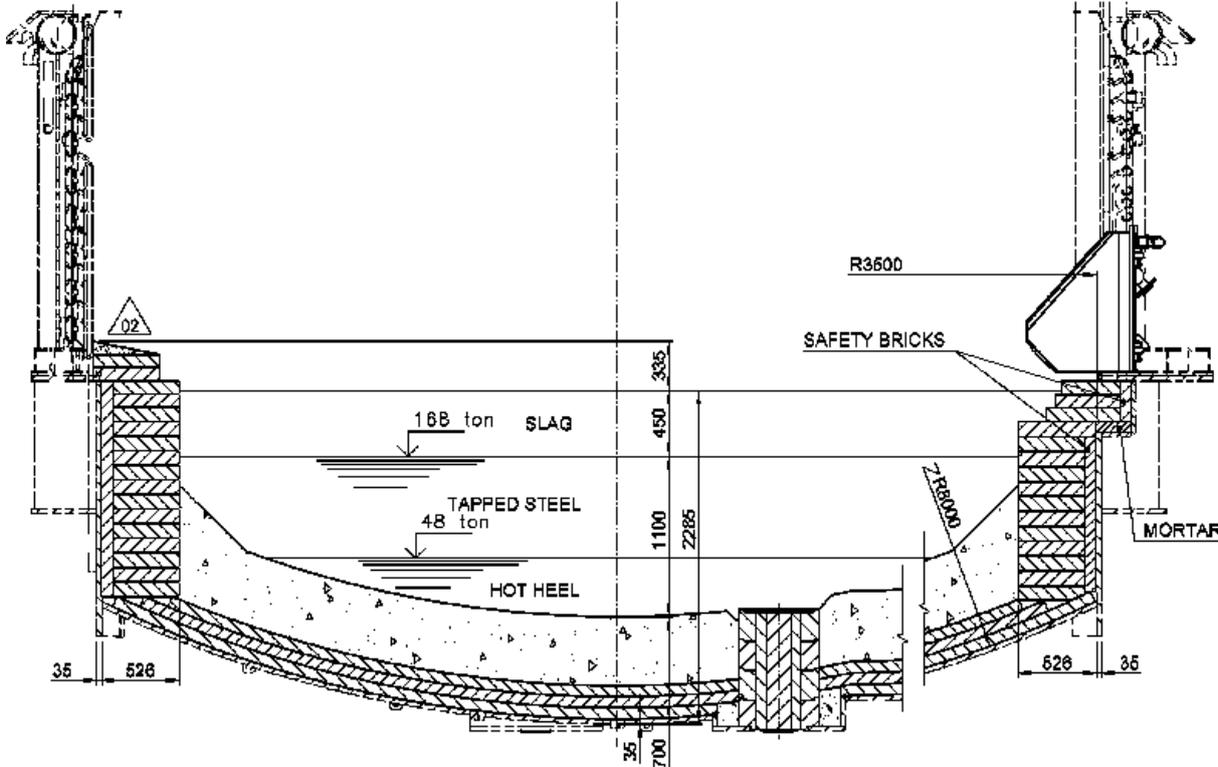


Figure II.52 : Profil réfractaire d'un four à arc électrique [15]

### 3. Réactions dans le four

La philosophie de l'injection d'oxygène se concentre sur la gestion efficace de l'énergie électrique et chimique, qui est poursuivie en combinant un contrôle dynamique efficace de l'arc électrique avec une injection équilibrée d'oxygène et de carbone (**figure 1**). Ce processus a été optimisé afin de réduire au minimum la consommation d'énergie électrique et d'augmenter la productivité de le FAE. Afin d'atteindre ces objectifs, les réactions qui se produisent dans le processus de fusion ont été soigneusement évaluées et analysées et diverses solutions ont été étudiées et développées pour optimiser ce processus. En examinant les mécanismes fondamentaux et les réactions chimiques qui se produisent à l'intérieur du four, nous avons conclu qu'il est possible d'augmenter la contribution des réactions exothermiques à l'intérieur du four en régulant directement l'oxygène et l'injection de carbone.

Le rendement métallique de la charge n'est pas affecté par la quantité d'oxygène injecté puisque l'oxyde de fer, produit dans le laitier, est maintenu sous contrôle par soufflage simultané en C au niveau du laitier.

Les mécanismes présentés sont utiles pour comprendre les équilibres d'énergie et de masse dans le four, ainsi que pour optimiser l'efficacité après combustion et contrôler les réactions elles-mêmes. [1]

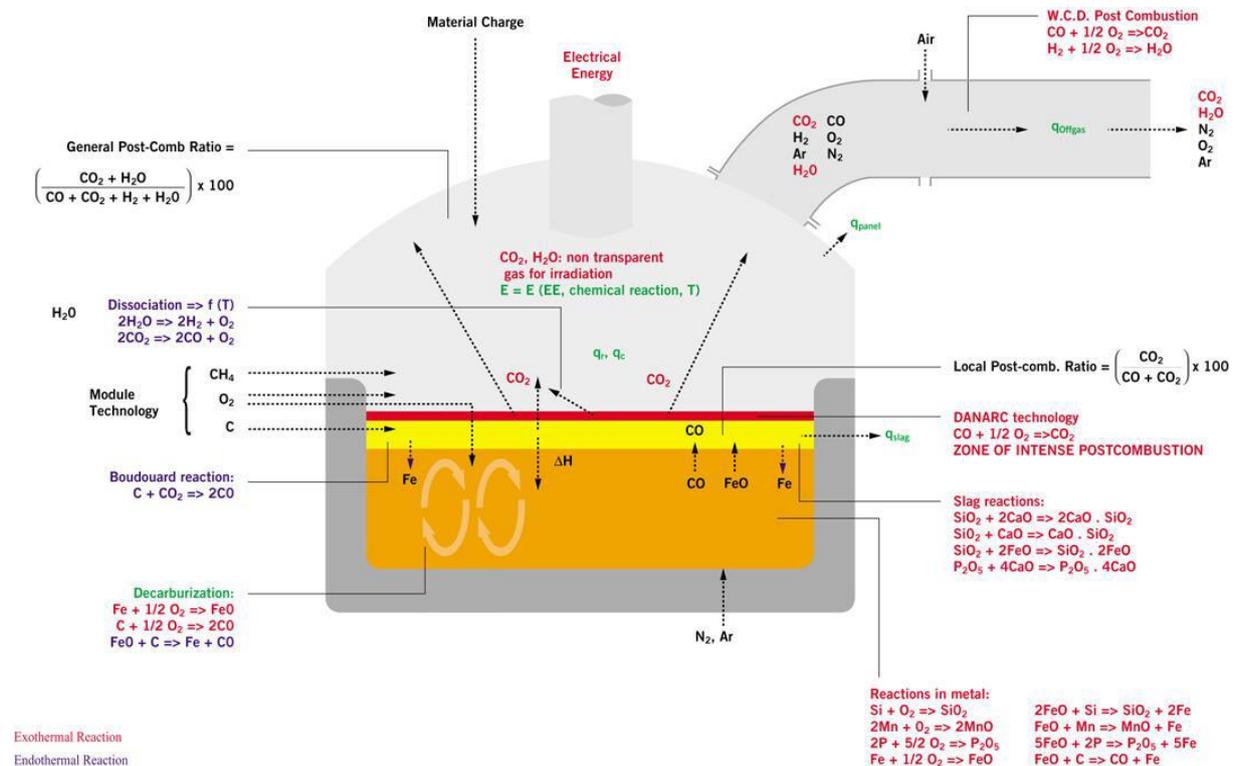


Figure II.53 : Mécanisme fondamental et réactions chimiques [17]

### 4- Les périodes d'élaboration dans le four à arc électrique

#### 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 fer raille 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  $\text{H}_2$ , dont il est difficile de l'éliminer pendant la période de désoxydation.

**b. Fonte en gueuse :** Elle doit être pauvre en phosphore, sa proportion est de 8 % de la charge totale.

**c. Rebus des aciers :** Ils doivent être classés selon leur composition chimique et selon leur utilisation.

**d. Fondants :** Leur rôle a été déjà donné dans les procédés précédents. Comme fondants on utilise la castine et la chaux qui sont destinées pour former la scorie basique.

- La castine contenant plus de 97 % de  $\text{CaCO}_3$  et de faible quantité de soufre

- La chaux contenant plus de 90 % de  $\text{CaO}$  et de faible quantité de soufre et d'humidité.

**e. Le sable de quartz :** Il est utilisé comme fondant pour former la scorie acide et pour la fluidisation de la scorie basique ou encore utilisé pendant la période de désoxydation.

**f. La chamotte :** Ce sont des déchets de briques réfractaires et spath-fluor ( $\text{CaF}_2$ ), utilisé pour la fluidisation de la scorie.

**g. Le minerai de fer :** Il est employé comme oxydant, il doit contenir peu de soufre et de phosphore. Le plus employé est le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

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

- Chargés dans le four :

Fe-Mn (Mn : 76 à 80 %, Fe : 12 à 14 %)

Fe-Si (Si : 10 à 90 %)

Fe-Cr (Cr : 70 %)

Fe-Va (35 à 80 %)

Fe-Ti (35 à 50 %)

- Dosage de l'acier :

Si-Al (Si : 30 à 75 %, Al : 20 à 50 %)

Si-Ca (Si : 60 à 64 %, Ca : 34 à 36 %)

Fe-Si (Si : 10 à 90 %)

Fe-W (W : 80 %)

Fe-Mo (Mo : 60 %)

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

Une opération au four à arc électrique comporte des étapes de procédures nettement distinctes qui sont les suivantes :

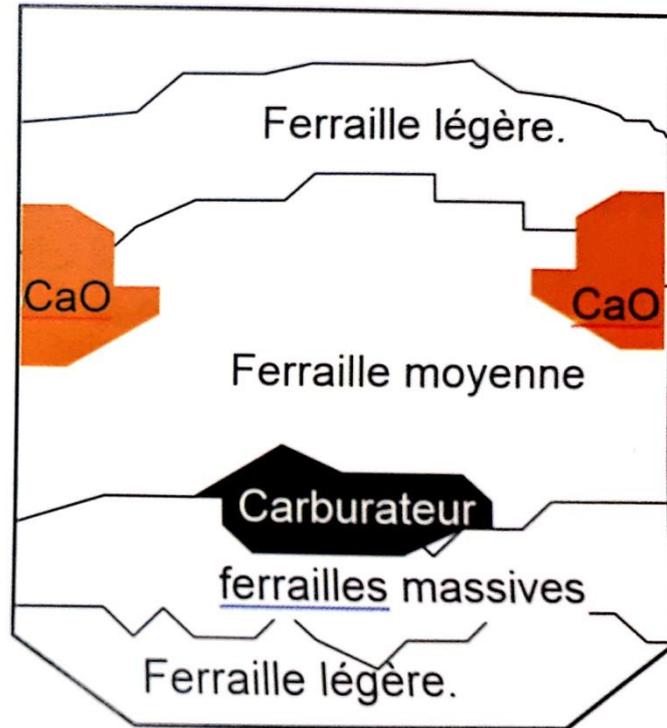
**Entretien du four :** Cette opération consiste à l'évacuation du reste du métal et de la scorie et la réparation des endroits érodés, sa durée est de 10 à 20 minutes.

**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 %).

Le four à arc est chargé au moyen d'un godet à ferraille équipé d'une coque de serrage, utilisant les crochets principaux et auxiliaires de la grue de chargement.

Le remplissage simple ne doit pas dépasser 90% de son volume pour éviter tout problème de fermeture du toit.



**Figure II.54 :** Préparation du godet à ferraille typique.

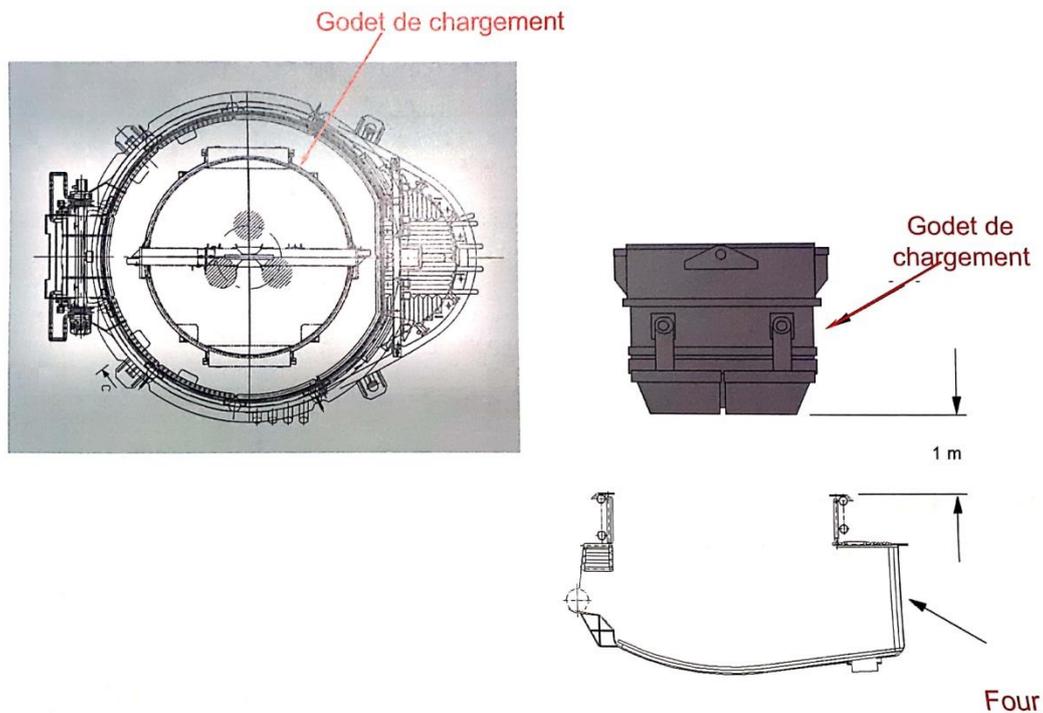
La plupart des fours électriques à arc sont chargés par le haut ; ceci est dû au fait que le four peut être chargé plus rapidement par le haut (70-80 tonnes de ferraille en 3 minutes ou moins) ; différents procédés existent aujourd'hui pour charger les fours en continu.

La conception du godet à ferraille pour le chargement est de type coque de serrage, fabriqué à partir de tôle d'acier de 25mm d'épaisseur, en forme de cylindre ouvert.

Le fond est construit en 2 sections égales en forme de coque de serrage pivotant à partir des côtés du godet.

Les objectifs principaux lors du chargement sont les suivants :

- Placer la charge dans le four dans le même ordre que celui dans lequel il a été chargé dans le godet de charge.
- Réduire le temps de mise hors tension en effectuant un chargement correct.
- Éviter les dommages au four et aux matériaux réfractaires.
- Réduire les retards causés par les morceaux d'acier qui sortent du four.
- Réduire la rupture d'électrodes suite à la chute de ferraille.
- Réduire les dommages causés par les arcs exposés sur les panneaux refroidis à l'eau.



**Figure II.55 :** Représentation du godet de chargement

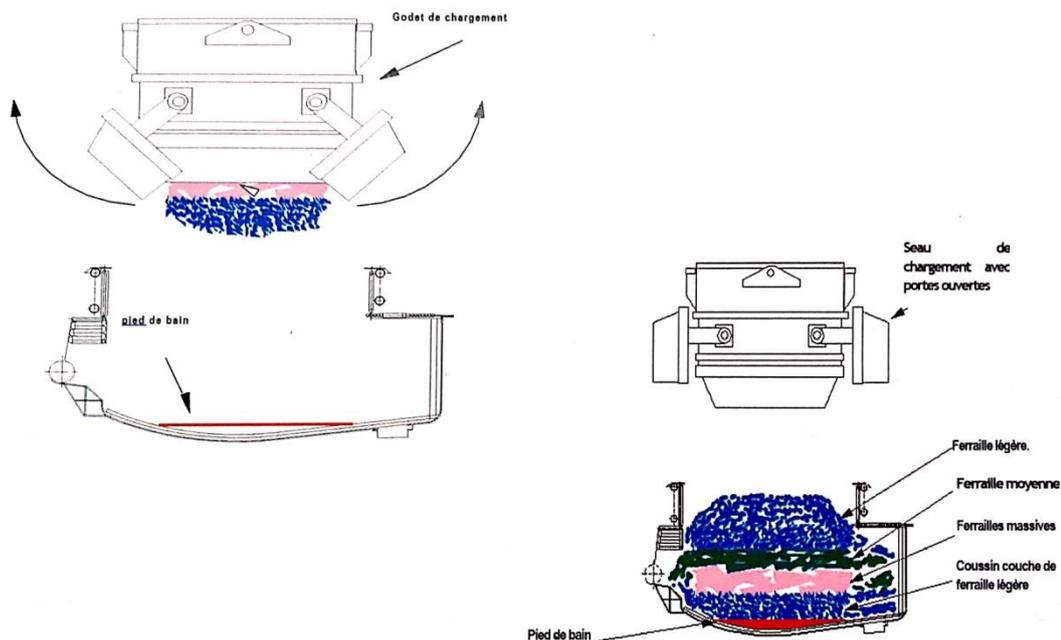
Une fois le four ouvert, on doit suivre les opérations suivantes :

- Placer le godet à ferraille au-dessus du four, en plein centre à un mètre du sommet de la coque supérieure, afin d'éviter que les panneaux refroidis à l'eau ne soient endommagés lorsque les pinces sont ouvertes.

La première étape de la production de tout heat est de choisir la qualité de l'acier à fabriquer. Le melter connaîtra à l'avance le calendrier de son quart. L'exploitant de la gare de ferraille préparera des seaux de ferraille en fonction des besoins de la fonderie. La préparation du godet de charge est une opération importante pour assurer une chimie de fusion adéquate, mais aussi pour assurer de bonnes conditions de fusion. La ferraille doit être mise en couches dans le compartiment selon la taille et la densité afin de favoriser la formation rapide d'un réservoir liquide d'acier dans le foyer tout en assurant la protection des parois latérales et du toit contre les rayonnements électriques à l'arc. La première étape de tout cycle du robinet au robinet est de "charger" le four après avoir soulevé des électrodes et d'ouvrir le four de toit, puis de charger la ferraille du seau puis de fermer le toit.

Le toit est descendu et les électrodes sont ensuite descendues pour heurter un arc sur la ferraille.

Nombre de seaux de rebuts nécessaires à la production d'une heat de l'acier dépend principalement du volume du four et de la densité des débris... La plupart des opérations visent 2 à 3 seaux de rebuts par chaleur. [19]



**Figure II.56 :** Chargement du four à arc électrique [19]

### Fusion

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

Une fois que la première charge est fondue jusqu'à certain degré, le DRI/HBI peut être alimenté en continu via le cinquième trou situé sur le toit du FAE, et l'alimentation en carbone et en chaux est assurée avec ces matériaux.

### Période d'oxydation

A la fin de la fusion, on ajoute les éléments oxydants par petites partitions tels que la chaux. Minerai de fer, on emploie parfois l'oxygène soufflé sous pression par les portes de travail afin d'accélérer le processus d'oxydation et de décarburation. Cette période existe seulement dans le cas du mode d'affinage par oxydation.

L'oxydation est destinée à abaisser la teneur des éléments non désirés, surtout le phosphore et le soufre et obtenir des températures du bain métallique dépassant la température de coulée. Un autre rôle, c'est le dégazage du métal lors de son bouillonnement. A la fin de cette période, on procède au décarbone du métal et même à sa recarbone s'il y a lieu. Sa durée est de 15 à 45 minutes.

### Période d'oxydation des éléments

La période d'oxydation d'un heat commence en fait par la formation précoce d'un réservoir de métal liquide sous les électrodes. Le degré d'oxydation du bain fondu est déterminé par:

- Caractéristiques chimiques et physiques de la charge (par exemple: la ferraille légère s'oxydera dans l'atmosphère de la fournaise dans une plus grande mesure que la ferraille lourde, le fer à repasser, la DRI, etc.);

- L'afflux d'air dans le four;
- Taux d'approvisionnement en oxygène (soufflage direct et/ou addition d'agents oxydants comme minerai de fer, échelle de l'usine).

La teneur en carbone dans la fonte doit toujours être ajustée pour permettre un bouillonnement actif qui stimule le métal, de sorte que la température et la composition chimique soient homogénéisées, que les niveaux d'azote et d'hydrogène soient minimisés et qu'une bonne interaction entre le laitier et le métal puisse se produire. L'injection d'oxygène et le mélange de scories et de métaux qui y est associé augmentent considérablement les taux de réaction. Au fur et à mesure que l'oxydation se poursuit, la température du bain augmente et le carbone bouille devient encore plus vigoureux. La fluidité accrue du bain d'acier aide à éliminer les macro-inclusions non métalliques dans le laitier.

Normalement, le bain d'acier est oxydé à un niveau de carbone suffisamment bas pour répondre aux spécifications de la qualité d'acier et permettre une bonne déphosphoration. Pour la plupart des qualités d'acier au carbone destinées à la production de bobines, ce niveau de carbone peut être fixé dans la fourchette 0,02-0,15 %. [5]

### Oxydation des éléments

Dans le tableau suivant, on rapporte la chaleur libérée par l'oxydation des principaux éléments.

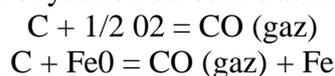
Reaction	Cal value (Kcal / Kg)	Cal Generated (Kcal / Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> )
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	2240	2420
$Si + O_2 = SiO_2$	7340	9180
$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO$	1760	8630
$2P + 5/2 O_2 = P_2O_5$	5950	6390
$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$	1150	5750
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$		4230
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$		5140
$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$		6072

**Tableau II.1.** Les effets de la combustion

### Oxydation du carbone

Au cours du processus de fabrication de l'acier au four électrique à arc, il faut fournir de l'oxygène gazeux pour la décarburation. Cela peut être fait en utilisant des lances à oxygène supersoniques à travers la paroi latérale du four, en maintenant la porte du laitier pratiquement fermée pendant cette étape de la fabrication de l'acier, réduisant ainsi la quantité d'air entrant dans le four de même que les pertes d'énergie avec les gaz dégagés.

La réaction de décarburation se produit par réaction directe avec l'oxygène et / ou par réaction avec le FeO se formant par oxydation du bain d'acier :



Dans le four électrique à arc, il est courant d'injecter de l'oxygène pour améliorer la décarburation, du carbone pour la formation de lait moussant et une combinaison des deux pour l'énergie chimique.

La relation entre le taux d'apport en oxygène et en carbone, ainsi que l'oxygène présent sous forme de FeO et le carbone déjà présent détermineront le changement de composition dans le temps ; de l'oxygène étant injecté principalement dans le métal, des conditions très oxydantes favorables à la décarburation sont créées ; de même, l'injection de carbone dans le laitier crée des conditions favorables à la réduction de FeO avec le carbone.

L'injection d'oxygène dans le bain d'acier crée une zone de réaction très turbulente dans laquelle le carbone du métal en vrac peut réagir avec l'oxygène ou le FeO.

À mesure que la teneur en carbone du métal en vrac diminue I avec le temps, l'excès d'oxygène et de FeO augmente ; actuellement, du carbone est injecté dans le laitier de FEA. Principalement pour faire mousser le laitier, permettre le fonctionnement à arc long et contrôler la teneur en FeO par réduction, c'est-à-dire



La réduction de FeO par le carbone injecté se produit principalement dans la masse du laitier.

L'équilibre entre l'excès d'oxygène formant le FeO et l'injection de carbone réduisant le FeO détermine l'évolution globale de la teneur en FeO du laitier par rapport à la teneur en carbone du métal. À ce stade, il convient de diminuer l'injection d'oxygène ou d'augmenter l'injection de carbone. De manière continue ou par étapes, afin de maintenir un niveau constant de FeO.

Une diminution importante de la formation de mousse dans le laitier et une augmentation des opérations bruyantes sont couramment observées vers la fin de la période de raffinage, juste avant la coulée. Il ressort de la description des progrès de la décarburation du métal que le volume de CO se formant dans le métal diminue. La diminution du dégagement de gaz entraînera à elle seule une réduction de la hauteur de la mousse et la possible perte de la couverture de l'arc. Si cet effet est associé à l'augmentation de la température et de la teneur en FeO, la fluidité du laitier augmentera (la viscosité diminuera), entraînant une perte de moussage vers la fin de l'étape de raffinage.

Le carbone injecté est donc important pour contrôler le % de FeO et pour compléter le dégagement de CO du bain afin de maintenir l'action moussante. Si l'injection de carbone ne suffit pas à maintenir la formation de mousse, l'injection de magnésite (MgO) peut améliorer la formation de mousse en augmentant la viscosité du laitier.

Une autre alternative au contrôle de la teneur en FeO du laitier consiste à injecter du carbone dans le laitier. Cette injection est pratiquement limitée par les quantités pouvant être injectées (équipement et coût) et par la réaction effective du carbone injecté dans le laitier.

Le paramètre important n'est pas la quantité de carbone injectée dans le four, mais la quantité de réaction avec le FeO dans le laitier.

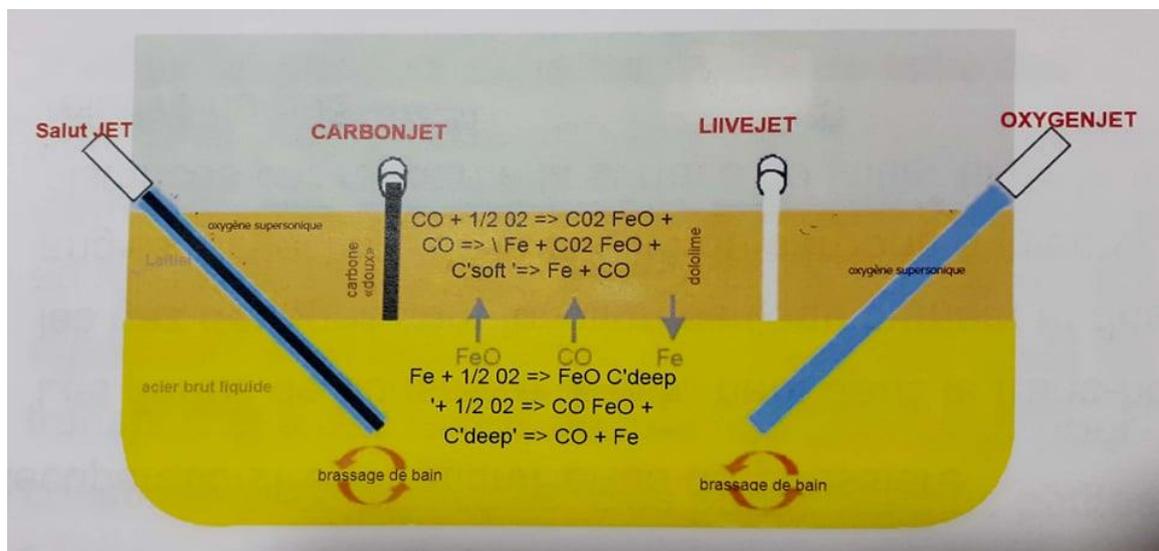


Figure II.57 : Réactions survenant lors de la fusion [19]

**L'oxydation du carbone est un processus hétérogène composé de plusieurs étapes :** (si on néglige l'étape secondaire qui est l'apport de l'oxygène à partir de l'atmosphère du four et on commence par l'étude de l'interaction entre le métal et le laitier, dans ce cas le processus est divisé comme :

1. Diffusion convective de FeO à travers la couche de laitier en direction de l'interface laitier-métal,
2. Passage de l'oxygène (accompagné du fer) dans le métal à travers l'interface laitier-métal,
3. Diffusion convective de l'oxygène vers l'endroit où devrait évoluer la réaction chimique,
4. Réaction chimique entre l'oxygène et le carbone.
5. Germination d'une nouvelle phase gazeuse (bulles de CO formées par la réaction),
6. Montée des bulles de CO à partir du métal vers l'atmosphère du four. [17]

### Oxydation du phosphore

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

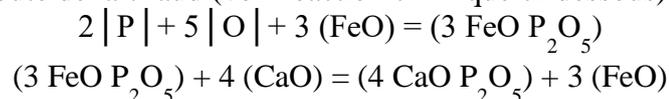
L'enlèvement du phosphore est régi par la basicité de la scorie et sa teneur en oxyde de fer puisque le penta-oxyde de phosphore résultant de la réaction entre le phosphore et l'oxyde de fer est fixé dans la scorie par la chaux libre comme phosphate de calcium. L'élimination du phosphore est favorisée par les basses températures et la fonte devrait être réalisée de telle manière qu'une grande partie du phosphore soit enlevée au début du processus avant qu'il ne revienne ensuite au bain d'acier à température plus élevée.

Cela peut être réalisé lorsque le laitier de base en mousse peut être épuisé du four, ce qui élimine une partie importante du phosphore du système de scories-métaux.

Dans les fours à arc électrique où des niveaux élevés d'alimentation électrique sont appliqués, la présence de scories de mousse est nécessaire pour protéger l'arc, de sorte que la rétention des scories pendant le processus est favorisée autant que possible. L'élimination du phosphore est assurée par une bonne basicité du laitier et par une injection d'oxygène.

La teneur en phosphore à l'échelle inférieure à 0,015 % devrait être facilement atteinte sur les chaleurs à haute teneur en carbone, tandis que des niveaux inférieurs (moins de 0,010 %) peuvent être atteints sur les chaleurs à faible teneur en carbone.

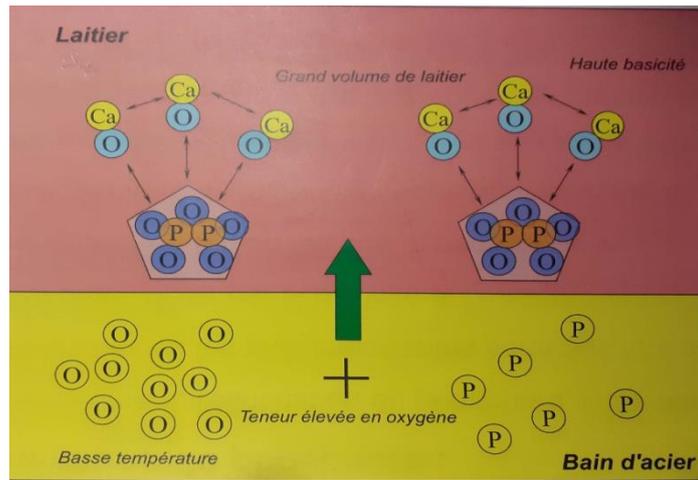
Une bonne déphosphoration avec FeO n'est pas possible car elle exige une grande quantité de FeO, pour cela on ajoute de la chaux (voir réaction chimique ci-dessous) :



Le CaO est une base forte pouvant décomposer le FeO de sa liaison avec le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et par la suite peut se lier solidement avec le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

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 par la réduction du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, par le carbone aux hautes températures. Cela signifie que la solubilité du phosphore dans le fer augmente avec la température.



**Figure II.58 : Déphosphoration de l'acier.[19]**

### Elimination du manganèse et du silicium

Le silicium brûle à l'état de silice  $\text{SiO}_2$ , cet anhydride qui correspond à un acide fort non isolé, se combine aux oxydes basiques présents  $\text{MnO}$  et  $\text{FeO}$ , (et  $\text{CaO}$ , 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  $\text{MnO}$ , oxyde basique qui se combine à l'anhydride silicique.

### Période de désoxydation

Durant cette période, s'effectue la désoxydation et le dosage du bain métallique. Le dosage commence par l'addition des recarburants (chutes d'électrodes, fonte en gueuse, coke, etc.) et des ferro-alliages. L'ordre d'enfournement de ces derniers dépend de l'affinité chimique des éléments par rapport à l'oxygène. Les éléments d'alliages possédant une grande affinité à l'oxygène sont enfournés à la fin de l'opération juste avant la coulée.

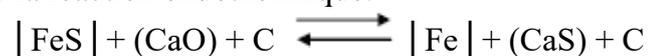
### La désulfuration

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

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



La désulfuration dépend essentiellement de la quantité de  $\text{CaO}$  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.



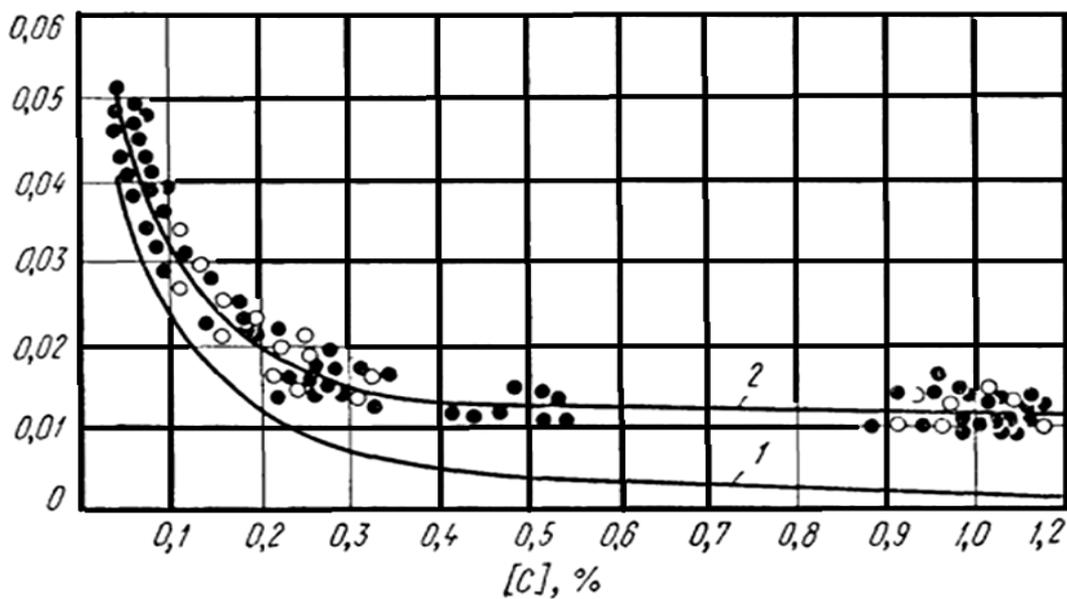
En général une désulfuration poussée nécessite une température élevée et un milieu basique et très réducteur. La désulfuration est difficile surtout dans le procédé Martin basique, car il y a formation de  $\text{SO}_2$  qui réagit avec le fer du bain métallique (sulfuration du bain).



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 minium en soufre. [19]

## La désoxydation

Lors de l'élaboration de l'acier dans les fours électriques, la concentration d'oxygène est toujours supérieure à celle d'équilibre avec le carbone.



Courbes d'équilibre théorique et réel entre le carbone et l'oxygène

Courbe n°1 - Equilibre théorique C-O

Courbe n°2 - Equilibre réel C-O

**Figure II.59** : courbes d'équilibre théorique et réel entre le C et  $\text{O}_2$ .

Ainsi, pendant la solidification de l'acier, la réaction de décarburation se maintient et s'intensifie à cause de la ségrégation de l'oxygène (faible solubilité dans le fer solide). Cela entraîne une formation de bulles gazeuses de CO (phénomène d'effervescence) qui provoque de grands défauts de porosité.

Dans le but d'éviter l'apparition de tels défauts graves, on additionne des éléments ayant une affinité chimique supérieure à celle du carbone et qui permettent de calmer complètement ou partiellement l'acier. De plus, ces métaux forment des oxydes plus stables que FeO et généralement insolubles dans l'acier.

La réaction de désoxydation de l'acier peut être exprimée par :



La désoxydation comprend trois étapes :

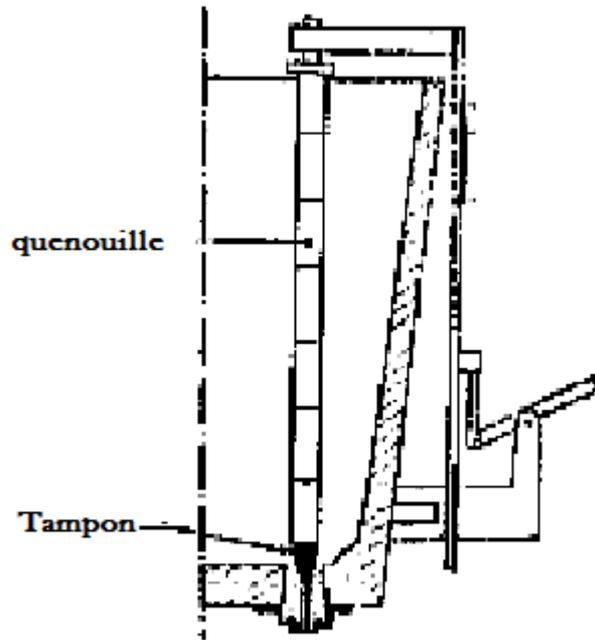
- a. Dissolution du produit de désoxydation (ferro-alliages) dans le bain métallique qui doit s'effectuer à des hautes températures si possibles.
- b. Réaction entre l'oxygène dissout dans le fer avec le produit de désoxydation ce qui conduit à une diminution de la teneur en oxygène.
- c. Formation de 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. [18]

## 5- 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 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).



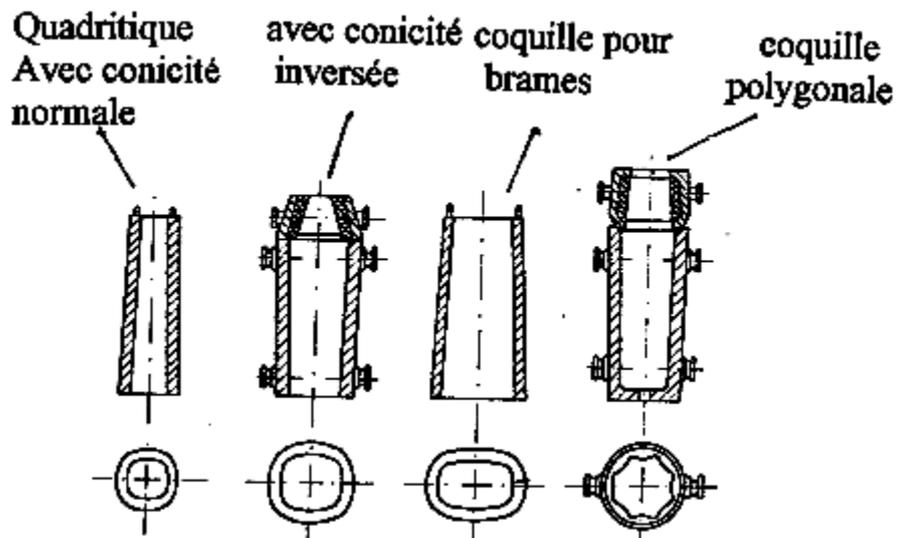
**Figure II.60** : représentation de la coulée de l'acier.

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. [21]

### 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.

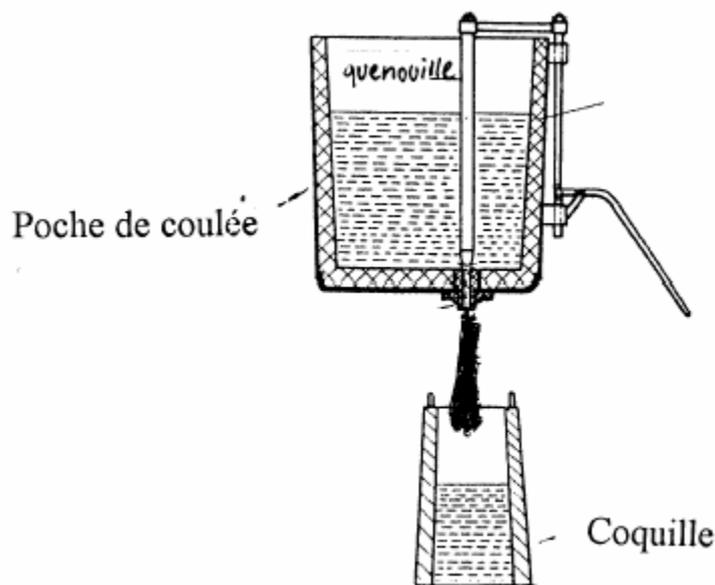


**Figure II.61 :** La coulée en lingotière.

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

### 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.



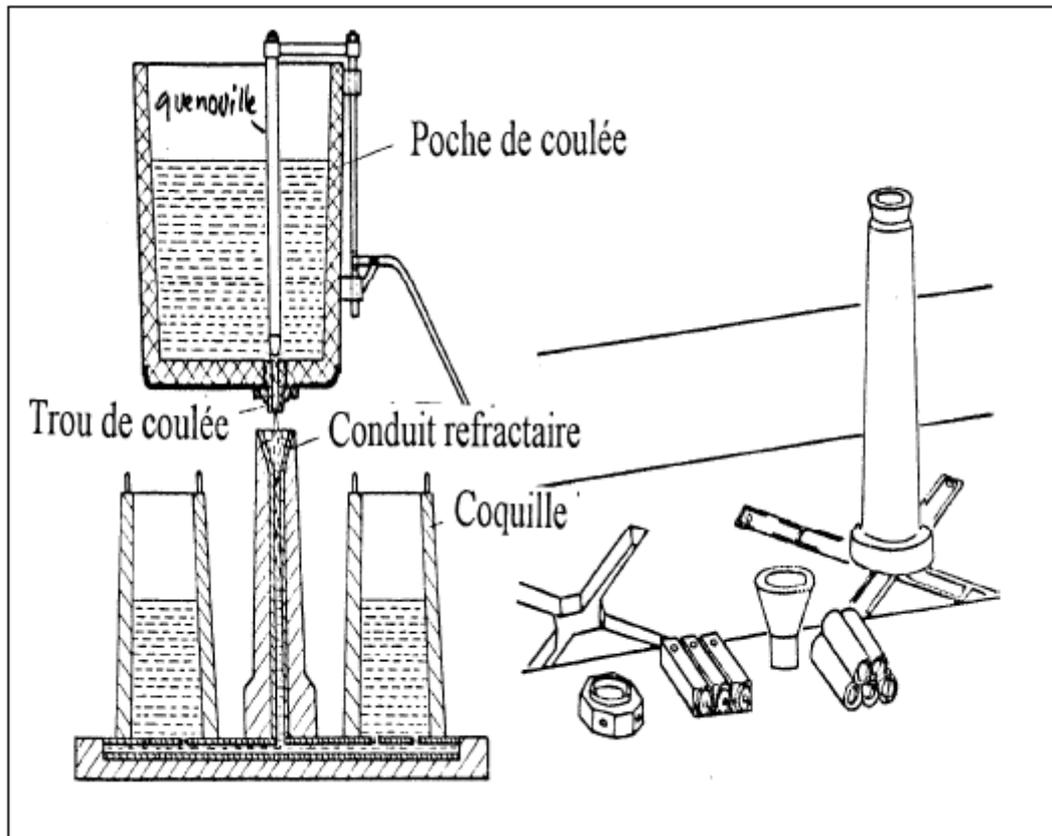
**Figure II.62 :** La coulée en chute.

Beaucoup de métaux présentent un déficit de volume après leur refroidissement (pour le fer est de  $8 \text{ } ^\wedge \text{ } 9\%$ ). Ce phénomène est appelé contraction est 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. [21]

### 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).



**Figure II.63 :** La coulée en source.

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. [22]

### La coulée continue

#### Présentation de la coulée continue :

Schématiquement, le procédé de coulée continue consiste essentiellement :

- À former de façon continue, dans une lingotière ouverte à ses deux extrémités et énergiquement refroidie, une carapace de métal solide assez résistante pour contenir le métal liquide ;
- À faire avancer cette carapace, qui est détachée de la lingotière grâce à la contraction du métal, et à achever la solidification de celui-ci par aspersion d'eau.

Les deux raisons majeures qui, dès l'origine, ont rendu ce procédé très attractif par rapport à la coulée classique en lingots sont :

- L'amélioration du rendement métallique de la coulée : en effet, la retassure, qui était à l'origine de forts chutages dans les lingots d'acier calmé, est éliminée du fait de l'alimentation en continu de la lingotière ;

- la possibilité de couler des produits de plus faible section, directement.

Adaptés aux laminoirs finisseurs, sans avoir à passer par un *blooming* ou un *slabbing*, ce qui représente un gros avantage. Par la suite, d'autres avantages sont apparus ou se sont affirmés: économie d'énergie, économie de main-d'œuvre, amélioration de la qualité (diminution de la ségrégation et meilleure homogénéité), Cycle de fabrication plus court et meilleures conditions de travail. [21]

### Schéma de principe d'une machine de coulée continue :

Il existe plusieurs types de machines traditionnelles, différentes quant à leur géométrie, mais fondamentalement composées des mêmes éléments fonctionnels essentiels. **La figure** représente une machine en forme de courbe pour la coulée continue, est valable pour les brames, billettes et blooms.

Le nombre de lignes d'une machine est généralement de 1 à 2 pour les brames, de 2 à 8 pour les billettes et de 2 à 6 pour les blooms. Dans une machine à plusieurs lignes, seuls la poche et le répartiteur à l'amont, et la manutention des produits à l'aval sont communs à toutes les lignes ; chaque ligne proprement dite est totalement indépendante. [9]

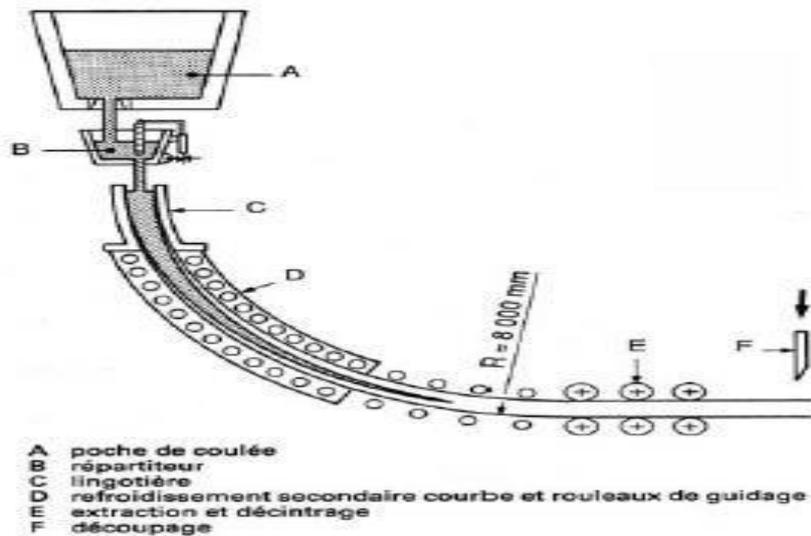


Figure II.64 : Schéma d'une machine de coulée continue. [20]

### Brève description d'une machine traditionnelle

L'ensemble d'une machine de coulée continue est constitué des organes principaux. La poche de coulée, contenant le métal liquide, est disposée sur un support de poche situé au sommet de la machine. Sous la poche se trouve un répartiteur destiné à recevoir le métal liquide et à le répartir de façon uniforme dans les différentes lignes de la machine. Chaque ligne est indépendante. En tête de la ligne se trouve la lingotière, refroidie à l'eau (refroidissement primaire) qui amorce la solidification et donne sa forme au produit ; la lingotière est animée d'un mouvement d'oscillation pour éviter le collage du métal à la lingotière. Le produit sortant de la lingotière se présente comme une enveloppe solidifiée, remplie d'acier liquide. Le produit est alors guidé et soutenu (zone de guidage) pendant que sa solidification est accélérée par arrosage d'eau (refroidissement secondaire). Dans cette zone peut avoir lieu un brassage électromagnétique du métal non solidifié, destiné à améliorer les conditions de la solidification. Plus bas se trouve le dispositif d'extraction chargé de faire avancer le produit et de le redresser (cas de la machine courbe). Le produit entièrement solidifié est découpé en tronçons de longueur voulue et évacué. Pour l'opération suivante, un

mannequin est introduit dans la machine, destiné à fournir un fond provisoire à la lingotière pour commencer une coulée. Certains éléments de la machine sont refroidis pour les protéger de la chaleur (refroidissement tertiaire). [20]

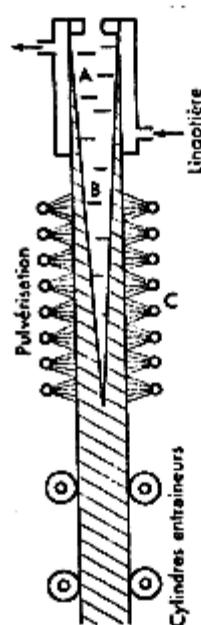
Les paragraphes suivants reprennent plus en détail les fonctions et la description des différents organes.

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. [22]

**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 :

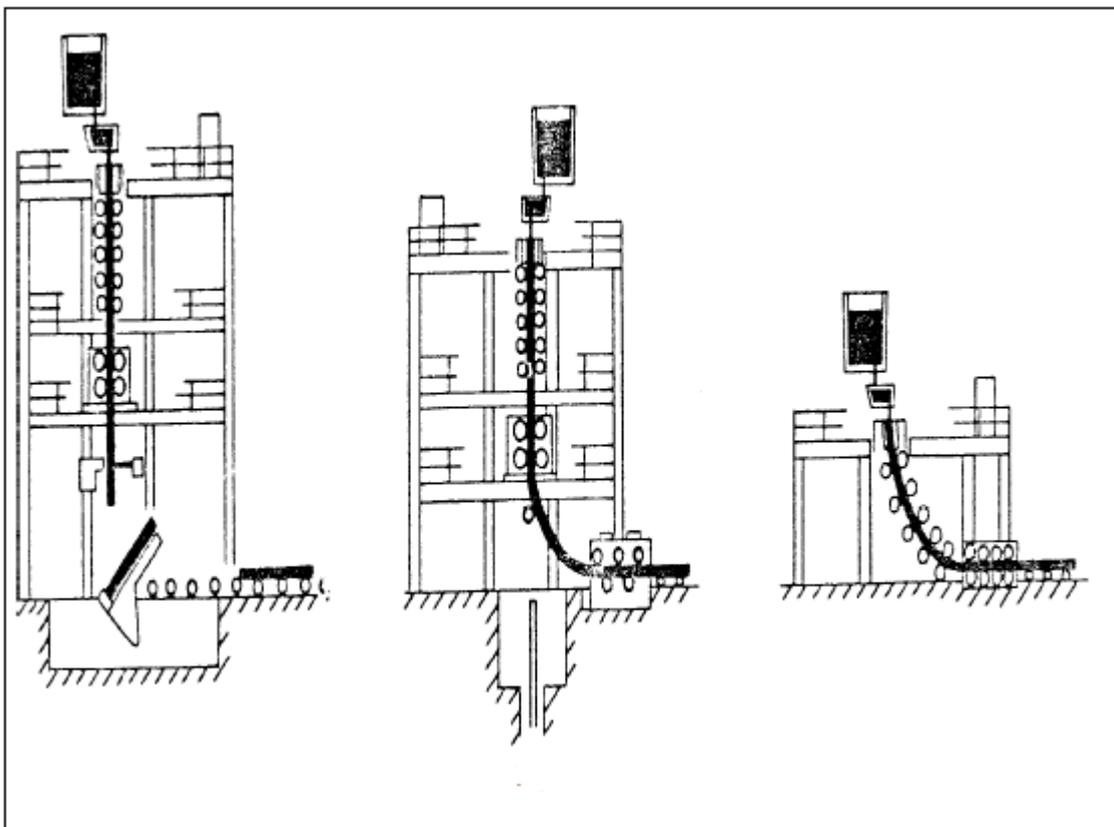
Section transversale (mm)	Vitesse d'extraction (m/min)
50 x 50	7-10
100 x 100	1,8-3,5
200 x 200	0,9-1,5
300x 300	0,5- 1,1
( 150-300) x (500-2000)	0,4- 1,1

### Un système de cisailage (oxycoupage)

Permettant de couper les lingots selon la longueur exigée. Pour des sections jusqu'à 250 cm<sup>2</sup> 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. [20]

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 II.65 :** nous montre les différents types de construction du système de coulée continue.



# **Chapitre III:**

**Calcul du bilan de  
matières avec période  
oxydante complète**

## Calcul du bilan de matières avec période oxydante complète

Le calcul se fait pour 100 Kg de charge métallique.

### ❖ Tableau: 01

Eléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Va	Al	Cu	Sn
%	0,31	1,15	0,15	≤	≤	≤	0,07	≤	≤	≤
	0,36	1,35	0,30	0,03 5	0,03 0	0,05	0,07	0,04	0,25 0	0,03 5
Moyenne %	0,33 5	1,25 0	0,22 5	–	–	–	0,05	–	–	–

**TAB N°01 :** Composition chimique de la nuance 110F.

### ❖ Tableau:02



**TAB N°02 :** Composition chimique des matières fondantes et réfractaire

Eléments	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Co <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	S	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Fondants</b>											
<b>Chaux</b>	82	3,30	2,50	1	96	–	0,10	0,20	0,20	0,10	–
<b>Minerai de Fer</b>	0,10	0,30	6,25	2,50	90	–	0,25	–	0,17	–	–
<b>Spath-fluor</b>	0,40	–	0,10	0,20	0,80	95	–	0,30	–	0,20	–
<b>Sable</b>	–	–	97	1	2	–	–	–	–	–	–
<b>Magnésie</b>	3,50	90,25	3,45	0,80	2	–	–	–	–	–	–
<b>Cendre d'électrode</b>	11,8	–	56,5	31,7	–	–	–	–	–	–	–
<b>Chamotte</b>	0,70	0,30	62	35	2	–	–	–	–	–	–
<b>Cendre de Coke</b>	5	1	48,7	25	20	–	0,30	–	–	–	–
<b>Chrome-Magnésie</b>	2	66	6,50	4	11,5	–	–	–	–	–	10

❖ **Tableau 3**

Eléments	C	Si	Mn	Cr	Al	P	S	Cend	Fe	Ca	Ti	Mv
Ferraille	0,40	0,30	0,36	0,035	–	0,05	0,05	–	98,80	–	–	–
Fonte solide	4,20	0,80	1,80	–	–	0,05	0,05	–	93,1	–	–	–
Fe-Mn(75%)	6	2	75	–	–	0,30	0,03	–	16,67	–	–	–
Fe-Si (75%)	0,12	75	0,40	–	2,50	0,04	0,03	–	21,91	–	–	–
Fe-Si (45%)	0,15	45	0,50	–	1	0,03	0,02	–	53,30	–	–	–
Si-Mn	1	20	66	–	–	0,08	0,05	–	12,87	–	–	–
Al	–	–	–	–	98	–	–	–	2	–	–	–
Fe-Cr	4	2	0,4	70	–	0,05	0,03	–	23,52	–	–	–
Coke	80	–	–	–	–	–	2	13	–	–	–	5
Si-Ca	–	70	–	–	–	–	–	–	–	25	–	–
Ti-Al	–	–	–	–	35	–	–	–	–	–	40	–

**TAB N°03 :** Composition chimique de la charge métallique ferroalliages et coke

**Composition, destination, exigences aux propriétés mécanique et particularités de la technologie de la production de l'acier de nuance 110F :**

- ✓ Nuance de l'acier 110F (composition chimique) :  
La composition chimique de l'acier 110F est représentée dans le tableau n°01
- ✓ Destination de l'acier 110F :  
L'acier de nuance 110F, est destiné pour la fabrication des tubes, (sans soudure) qui sera ensuite utilisé pour les hydrocarbures (pétroles, gaz naturel,...)
- ✓ Préparation du four :  
Le lit de fusion est préparé de telle façon que la concentration en carbone soit au minimum de 0,4% pour un bon travail du bain.  
Le laitier de la période de fusion est formé grâce à l'addition de chaux (25 Kg/t), de minerai de fer (10 Kg/t) et de spath-fluor (8 Kg/t) ou de chamotte (7 Kg/t). L'état final de la fusion est intensifié grâce au chauffage d'oxygène pour la fusion finale de morceaux de ferrailles à la périphérie et l'élévation de la température du métal. A la fin de la période de fusion, on décrasse de 70 à 80% du laitier et on forme un nouveau laitier en additionnant de la chaux (9,028 Kg/t) et du spath-fluor (0,058 Kg/t) et on étame la période oxydante.

L'oxydation du carbone se déroule grâce à l'addition de minerai de fer ou soufflage d'oxygène ou grâce à l'utilisation des deux. La vitesse d'oxydation est de 0,3 à 0,5 % de carbone par heure. Lors de l'ébullition du bain, on n'oxyde pas moins de 0,4% de carbone, le phosphore s'élimine jusqu'à une concentration inférieure à 0,015%, la concentration du manganèse et du carbone doivent être supérieures à 0,08 + 0,1%.

En même temps avec la formation de laitier de la période réductrice, à l'aide de (X Kg/t) de chaux, (X Kg/t) de spath-fluor, (X Kg/t) de chamotte, on additionne du ferro-manganèse pour atteindre la fourchette inférieure de la concentration de cet élément. On désoxyde (par précipitation) le métal en additionnant du Ferro-silicium en morceaux pour avoir 0,15% de silicium (sans pertes au feu).

La désoxydation par diffusion se fait à l'aide de mélange de poudre de coke (déchets d'électrodes), de Ferro-silicium et de chaux. On corrige la composition chimique et la température. A 20 - 40 minutes avant la coulée de l'acier avec une concentration du 0,25% de silicium, avec un laitier blanc, on procède à la désoxydation final à l'aide d'aluminium (environ 0,6%), par la suite on corrige la concentration en silicium.

Dans les mélanges déjà cités (mélanges de poudre), pour le traitement du laitier de coulée, on additionne 0,5 Kg/t de poudre d'aluminium et de spath-fluor si nécessaire.

La coulée de l'acier s'accompagne d'un traitement du métal en poche à l'aide de laitier synthétique très fluide, hautement basique (50+55% de CaO) et pas plus de 0,5% de FeO.

#### a- Calcul du lit de fusion :

##### Période de fusion et d'oxydation:

- o La composition de la charge est déterminée avant tout en partant de la concentration de carbone dans cette charge.

La concentration de carbone dans la charge [C]ch (et dans le métal avec la fusion) doit favoriser une oxydation lors de la période d'ébullition de pas moins de 0,4% de carbone ( $\Delta[C] = 0,5\%$ ) et doit-être égale à :

$[C]_{ch} + \Delta[C] + [C]_{fe} = \text{concentration du carbone après l'ébullition du métal.}$

Où : [C]fe - Concentration du carbone après l'ébullition du métal.

Pour compenser la carburation du métal à partir des électrodes la concentration du carbone, dans l'acier à la fin d'ébullition ([C]fe) doit-être de 0,03-0,05/ inférieur à la fourchette inférieure dans la nuance ([C]fi = carbone de la fourchette inférieure), mais au maximum de 0,1%.

Lors du calcul du lit de fusion (calcul de la concentration du carbone de départ), il faut tenir aussi compte des ferro-alliages riches en carbone qui peuvent apporter du carbone ([C]fa = 0,1% = carbone apporté par les ferro-alliages), dans ce cas :

$[C]_{fe} = 0,1\% = \text{carbone apporté par les ferro-alliages, dans ce cas :}$

$[C]_{fe} = [C]_{fi} - (0,03 + 0,05) - [C]_{fa}.$

$[C]_{fe} = 0,335 - 0,04 - 0,1 = 0,195 / = [C]_{fe}.$

Pour l'acier 110F et en tenant compte du fait qu'à la fin de la période oxydante, il reste dans l'acier 0,01% de manganèse avec l'addition de ferro-manganèse (à 75% de Mn) et du ferro-chrome (à 70% de Cr). Pour obtenir l'acier final  $(Mn)_{Moy-0,194} = 0,335 - 0,194 = 0,141\%$ . Pour 0,194 % de manganèse résiduel, on additionne :

$G_{Fe-Mn} = 98. (1,250 - 0,194) / (0,75. 0,85. 100) = 1,602 \text{ Kg.}$

Et  $(Cr)_{moy} - 0,02080 = 0,575 - 0,0208 = 0,5542\%$  en additionnant :

$G_{Fe-Cr} = 98.(0,575 - 0,008) / (0,7. 0,92. 100) = 0,863 \text{ Kg.}$

Les ferro-alliages apportent 0,1% de carbone.

Dans ce cas :

$[C]_{ch} = [C]_{fi} - (0,03 + 0,05) - [C]_{fa} + \Delta[C].$

$$= 0,310 - 0,04 - 0,1 + 0,5 = 0,660 \text{ Kg.}$$

La quantité de fonte nécessaire (X) dans la charge est déterminés par par l'équation suivante :

$$[C]_{ch} = [C]_{fonte} \cdot X/100 + [C]_{ferrailles} \cdot (100-X)/100.$$

$$\text{Donc : } 0,660 = 4,2 \cdot X/100 + 0,4(100-X)/100,$$

$$0,660 - 40 = 0,038 X \quad \Rightarrow X = 6,842 \text{ Kg.}$$

Donc la composition chimique de la charge adoptée sera présentée dans le tableau suivant :

Quantité adoptée	C	Si	Mn	Cr	P	S
Kg/%						
Ferrailles : <b>93,16</b>	0,773	0,28	0,335	0,0326	0,0466	0,0466
Fonte : <b>6,84</b>	0,287	0,055	0,123	-	0,0034	0,0034
<b>Total : 100</b>	0,660	0,335	0,458	0,0326	0,050	0,050

**TAB N°04**

La température de fusion du fer avec l'addition d'autres éléments diminue et elle peut être calculée selon :

$$T_f = 1539 - 90 \cdot C - 6,2Si - 1,7Mn - 1,8Cr - 2,9Ni - 1,7Mo - 1,3V - 1,7Ti \dots (C^\circ)$$

La température du métal avant la coulée de l'acier 110F est égal à :

$$T_c = T_f + \Delta T_m + \Delta T_p.$$

Ou :  $\Delta T_m$  : diminution de la température lors de la coulée et du maintien de l'acier dans la poche (30 – 50°C)

$\Delta T_p$  : dépend du revêtement de l'épaisseur des lingots leur masse et la nuance de l'acier, et varie de 80 à 110 °c.

Lors de la fusion de l'acier 110F, la température à la fin de fusion ( $T_1$ ) doit être égale à :

$$T_1 = 1539 - 90 \cdot C + (50+70^\circ c)$$

$$T_1 = 1539 + 90 \cdot 0,66 + 60^\circ c = 1539,6^\circ c.$$

A la fin de la période d'ébullition, elle est de : ( $T_2$ )

$$T_2 = T_c + (20 + 30^\circ c) = 1539 - (30 + 50^\circ c) + (80 + 110^\circ c) + (20 + 30^\circ c).$$

$$\text{En calculant } T_f = 1477 + 40 + 95 = 1612^\circ c.$$

Et finalement on aura :

$$T_2 = 1612 + 25 = 1637^\circ c.$$

b- La somme des concentrations d'oxyde de fer dans le laitier oxydant dépend en général de la concentration de carbone dans le métal, et peut être déterminée par l'équation :

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755\% [C]$$

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755/0,66 = 8,64\%.$$

Dans notre cas, la somme des oxydes (ou bien des concentrations des oxydes) de fer dans le laitier à la fin de la période de fusion (à  $[C]_{ch} = 0,66\%$ ) est égale à :

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755/0,66 = 8,64\%.$$

A la fin de la période d'ébullition elle sera :

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755\% [C]_{fe}.$$

On  $[C]_{fe}$  : est la concentration du carbone de fin d'ébullition.

$$\text{Donc : } \% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755\% 0,195 = 11,372\%.$$

c- Au moment de la fusion totale de la charge, le silicium s'oxyde totalement. En ce qui concerne le manganèse, à une concentration de 0,458% dans la charge, il s'oxyde de 60 à 70%. Sa concentration dans le métal, lors de la période de fusion est déterminée par la température du bain, et pour un chauffage normal du bain, la concentration du manganèse sera d'environ: (70% s'oxyde, qui est de 0,3206%).

d- L'un des buts les plus essentiels de la période d'oxydation est la déphosphoration du métal.

La dépendance du coefficient de partage du phosphore entre le métal et le laitier en fonction de la concentration des oxydes de fer dans le laitier et sa basicité à 600°C est la suivante :

Dépendance :

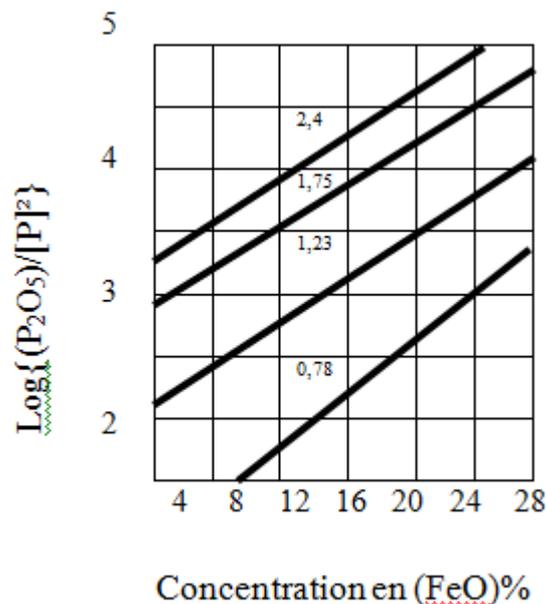


Figure III.1 : La dépendance du coefficient de partage

En fonction de la basicité du laitier et de la concentration des oxydes de fer dans ce dernier à 1600°C (les chiffres au dessus des courbes basicités du laitier).

Si la température du processus est différente de 1600°C, il faut corriger le valeur de :

$$\text{LogF} = \text{Log}\{(P_2O_5) / [P]^2\}.$$

A une température plus petite que 1600°C, sa valeur augmente de 0,05 pour 10°C et au contraire.

La valeur : F<sub>B</sub>, pour calculer la basicité 'B', est déterminée selon la formule :

$$B = 2,4 : \text{LogF} = 11,448 + 0,0642\% [C] - t/200.$$

$$B = 1,75 : \text{LogF} = 11,125 + 0,0629\% [C] - t/200.$$

$$B = 0,87 : \text{LogF} = 9,290 + 0,0795\% [C] - t/200.$$

$$B = 1,23 : \text{LogF} = 10,413 + 0,0657\% [C] - t/200.$$

Ou : t est la température du métal, (°c)

Pour la formation d'un laitier basique de la période de fusion, lors du chargement ou lors de la fusion, on additionne 2,5% de chaux, 0,7% de chamotte et 1% de minerai de fer. Ainsi le silicium de la charge, de la chaux, de la chamotte et du minerai de fer oxydé lors de la période de fusion, donne:

$$\text{SiO}_{2\text{tot}} = \text{SiO}_{2(\text{charge})} + \text{SiO}_{2(\text{chaux})} + \text{SiO}_{2(\text{chamotte})} + \text{SiO}_{2(\text{minerai de fer})} = 1,278 \text{ Kg.}$$

- A 20% de  $\text{SiO}_2$ , la quantité de laitier ( $U_1$ ) sera égale à :  
 $U_1 = \text{SiO}_{2(\text{totale})} \cdot 100/20 = 1,278 \cdot 100/20 = 6,39$ .
- La concentration résiduelle du phosphore dans le métal à la fin de la période de fusion  $[P]_1$  est déterminée par l'équation :  
 $[P]_1^2 + 229 \cdot [P]_1 / 2F_1 \cdot U_1 - 229 [P]_{\text{ch}} / 2F_1 \cdot U_1$  ;  
 Ou :  $[P]_{\text{ch}} = 0,05\%$  (phosphore de la charge)  
 En supposant que la basicité de la période d'oxydation :  
 $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 1,75$ , avec la somme des oxydes de fer  $\%(\text{FeO})$  est égale à 8,64/, selon la figure, on trouve :  
 $\text{Log}F = 3,23$  et en tenant compte de l'influence de la température, on trouve :  $\text{Log}F_1 = 3,42$  ;  
 d'où  $F_1 = 2632$ .  
 Donc on peut avoir :  
 $[P]_1^2 + 229 \cdot [P]_1 / 2 \cdot 2632 \cdot 6,39 = 229 \cdot 0,05 / 2 \cdot 2632 \cdot 6,39$ .  
 $[P]_1 = -229/33638 + ((229/33638)^2 + 229 \cdot 0,05/33638)^{1/2}$   
 $[P]_1 = 0,013\%$ .

- A la fin de la fusion, on élimine environ 95% du laitier. La quantité de phosphore restante dans le four est égale à :  

$P_{\text{oxydé}}$ .....	100%	
X .....	5%	Donc : X = 0,0185%

C'est-à-dire : la concentration résidu elle du phosphore dans le métal, lorsque la réduction est entamée, est égale à:  
 $[P]_{\text{résiduel}} = [P]_1 + [P]_{\text{restant}(5\%)} = 0,013 + 0,002 = 0,015\%$ .

- La quantité supplémentaire de l'acier ( $U_2$ ), nécessaire pour atteindre le degré exigé de phosphore du métal est déterminé par la formule :  
 $U_2 = 229 \cdot ([P]_1 - [P]_2) / F_2 \cdot [P]_2^2$ .  
 Si des exigences concernant une déphosphoration encor plus poussée ne sont pas posées, la période oxydante est stoppée à une concentration du phosphore dans le métal égale à 0,008%. On considère la basicité du deuxième laitier égale à 2,4, à la somme des oxydes de fer  $(\text{FeO})_2$  égale à 12% (d'après la figure), dans ce cas, selon la figure on aura :  
 $\text{Log}F = 3,85$ . Tenant compte de l'influence de la température on obtient :  
 $\text{Log}F_2 = 3,95$  d'où :  $F_2 = 8912$ .  
 Donc  $U_2$  sera :  
 $U_2 = 229 \cdot (0,015 - 0,008) / 8912 \cdot (0,008)^2 = 2,81 \text{ Kg,}(\%)$ .

- La quantité totale du laitier ( $U_0$ ) nécessaire pour une déphosphoration exigée est égale à :  
 $U_0 = U_1 + U_2 = 6,39 + 2,81 = 9,20 \text{ Kg.}$

e- En déterminant les régimes de déphosphoration du métal, il faut calculer la quantité de chaux nécessaire pour la formation du laitier oxydant.

La concentration de CaO dans le laitier de la période de fusion à 20% de  $\text{SiO}_2$  et  $(\text{CaO}) / (\text{SiO}_2) = 1,75$  doit-être égale à :  
 $\%(\text{CaO}) = \%(\text{SiO}_2) \cdot 1,75 = 35\%$ .

La quantité de chaux ( $Z_1$ ) utilisés dans ce cas (la chaux contient 92% de CaO) est déterminée par la formule :

$$U_1 \cdot 35/100 = Z_1 \cdot 92/100 ; Z_1 = U_1 \cdot 35/92 = 2,43 \text{ Kg.}$$

Dans le laitier de période oxydante à 20% de  $\text{SiO}_2$  et  $(\text{CaO}) / (\text{SiO}_2) = 2,4$ , on obtient :  $\%(\text{CaO}) = 20 \cdot 2,4 = 48\%$ .

En tenant compte de (CaO) dans le laitier restant après la période de fusion(5%), la quantité de chaux additionnée ( $Z_2$ ) pour la formation du deuxième laitier est égale à :  $U_2 \cdot 48/100 - U_2 \cdot 35/100 \cdot 5/100 = Z_2 \cdot 92/100$

Donc :  $0,48 U_2 - 0,0175 U_1 = 0,92 Z_2$ , d'où  $Z_2 = 1,24 \text{ Kg}/100 \text{ Kg}$  de charge.

- f- La masse principale du soufre éliminée, passe dans le métal vers le laitier. Si on néglige la possibilité d'élimination du soufre sous une forme gazeuse, dans ce cas les variations de la concentration du soufre dans le métal et dans le laitier, dans n'importe qu'elle période de fusion, peut être déterminée par l'équation :

$$S_d + S_d \cdot 0,01U = S_f + 0,01U \cdot S_f;$$

Ou :

$U$  : quantité de laitier dans le métal, % ;  $S_{dd}$  ;  $S_f$  ;  $S_{dd}$  ;  $S_{ff}$ , concentration de départ et finales du soufre dans le métal et le laitier, %.

Le coefficient de partage du soufre entre le métal et le laitier est égal à :

$$L = S_{ff} / S_f .$$

En remplaçant  $(S)_f$  par  $L_s \cdot S_f$  dans la formule précédente on obtient :

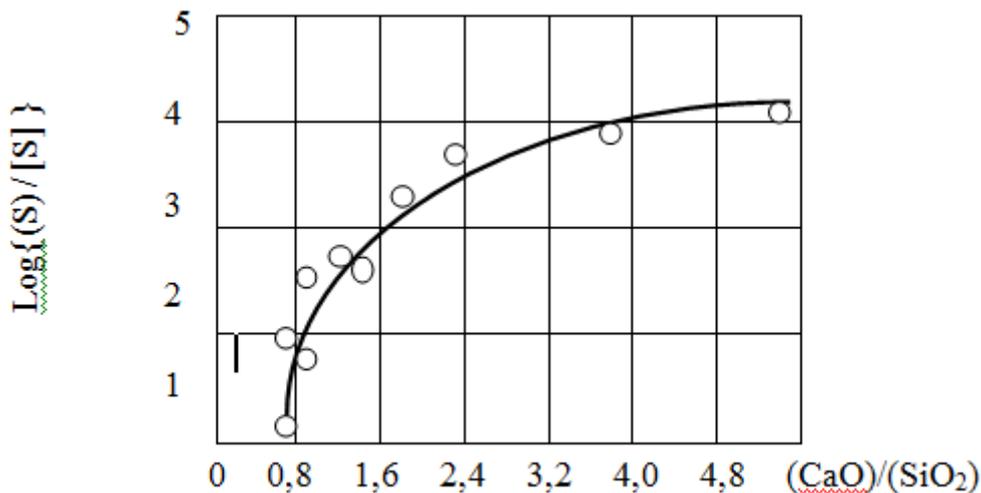
$$S_f = S_d + 0,01 \cdot U \cdot (S)_d / (1 + 0,01 \cdot U \cdot L_s)$$

En connaissant la basicité du laitier, la valeur de  $(L_s)$  peut être trouvée d'après la figure.

La concentration du soufre  $(S)_d$ , en tenant en considération le soufre contenu dans les fondant et le minerai de fer est égale à environ : 0,05%.

Comme :  $S_d = 0,05 \%$  ;  $U_1 = 6,39 \text{ Kg}$  ;  $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 1,75$ , donc :

$L_s = 2,75$  (est calculé d'après la figure suivante) :



**Figure III.2 ::** Influence de la basicité du laitier sur le coefficient de partage du soufre lors de la période oxydante.

La concentration du soufre dans le métal lors de la période de fusion est égale à :

$$S = (0,05 + 0,01 \cdot 6,39 \cdot 0,05) / (1 + 0,01 \cdot 6,39 \cdot 2,75)$$

$$= 0,0532 / 1,175725 = 0,045\% .$$

La quantité des oxydes est calculé, pour l'élimination des éléments, l'oxyde de carbone, la formation de laitier et la dissolution dans le métal. Pour simplifier les calculs on pose les conditions suivantes :

- L'oxydation de Si, Mn, P et des autres éléments dont la quantité principale est éliminée lors de la période de fusion, se déroule grâce à l'oxygène de l'air, l'oxygène technique utilisé pour l'intensification de la période de fusion.
- Le degré d'oxydation du laitier est obtenu grâce à l'utilisation du minerai de fer. L'oxydation du carbone est provoquée par le soufflage d'oxygène technique.

Le contenu et l'ordre du calcul, la quantité d'oxygène et du minerai de fer sont les suivants :

- Lors de la période de fusion, il s'oxyde 0,335 Kg de silicium et 0,308 Kg de manganèse et 0,042 Kg de phosphore.

Le calcul de la quantité nécessaire d'oxygène est présentée dans le tableau suivant :

Eléments	Quantités oxydés (Kg)	Réactions	Oxygène nécessaire (Kg)
Si	0,335	$\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$	0,383
Mn	0,308	$\text{Mn} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{MnO}$	0,090
P	0,042	$2\text{P} + \frac{5}{2}\text{O}_2 = \text{P}_2\text{O}_5$	0,054

**TAB N°05:** Quantité d'oxygène nécessaire pour l'oxydation du silicium, manganèse et phosphore.

D'après ce tableau, l'oxygène total est de 0,527 Kg = ( $O_{\text{tot}}$ ).

Le volume d'oxygène est de :

$$V = O_{\text{tot}} \cdot 22,4/32 \text{ (m}^3/\text{100 Kg de charge)}.$$

$$V = 0,527 \cdot 22,4/32 = 0,37 \text{ m}^3/\text{Kg de métal}.$$

En général, le débit d'oxygène insufflé utilisé après fusion de 80 à 90% de charge pour la fusion finale de cette dernière et l'augmentation de la température, est de 4 à 6 m<sup>3</sup>/t. Comme on le voit, cette quantité (même sans prendre en considération l'oxygène de l'air) est largement suffisante pour l'oxydation des éléments.

La quantité de minerai de fer, pour la formation du laitier de la période de fusion et oxydante, est calculée comme suit :

La quantité de fer dans le laitier oxydant pour la somme des oxydes de fer :

$$\Sigma(\text{FeO})_1 = 8,64\% \text{ et } \Sigma(\text{FeO})_2 = 12\% :$$

$$\Sigma(\text{FeO})_1 = U_1 \cdot (\text{FeO})_1 \cdot 56/70 \cdot 100/72$$

$$\Sigma(\text{FeO})_1 = 6,39 \cdot 8,64 \cdot 56/7200 = 0,43 \text{ Kg}.$$

$$\Sigma(\text{FeO})_2 = U_2 \cdot (\text{FeO})_2 \cdot 56/70 \cdot 100.$$

$$\Sigma(\text{FeO})_2 = 2,81 \cdot 12 \cdot 56/1200 = 0,26 \text{ Kg}.$$

Le rapport entre (FeO) et (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dans le laitier dépend de la basicité de ce dernier et de son potentiel d'oxydation selon [ ], à 35-45% CaO, 15-25% SiO<sub>2</sub> dans un laitier oxydant, Le rapport Fe / Fe est d'environ 0,3.

$$\text{D'ici } (\text{Fe})^{2+} = \Sigma(\text{Fe})/1,3 ; \text{Fe}^{3+} = \Sigma(\text{Fe}) - \text{Fe}^{2+},$$

La quantité de (FeO), (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dans le premier et deuxième laitier est de :

$$(\text{FeO})_1 = \Sigma(\text{Fe})_1 ; 72/1,3 \cdot 56 = 0,43 \cdot 72/1,3 \cdot 56 = 0,425 \text{ Kg}.$$

$$(\text{Fe}_2\text{O}_3)_1 = (\Sigma(\text{Fe})_1 - (\text{Fe})^{2+}_1) \cdot 160/112 = (0,43 - 0,331) \cdot 1,43 = 0,141 \text{ Kg}.$$

$$(\text{Fe})_{\text{FeO}} = (\text{FeO})_1 \cdot 56/M_{3\text{FeO}} + (\text{FeO})_2 \cdot 56/M_{3\text{FeO}}$$

$$= (0,425 + 0,236) \cdot 56/216 = 0,171 \text{ Kg.}$$

- a. Pendant le soufflage, la quantité de carbone qui s'oxyde est de 0,5%, donc la nécessité en oxygène sera :

On à la réaction :  $(\text{FeO}) + \text{C} = \text{Co} + \text{Fe}$

$$\text{O}_c = 0,5 \cdot 16/12 = 0,667 \text{ Kg}$$

Et le volume sera :

$$\text{V}_{\text{O}_c} = \text{O}_c \cdot 22,4/32 = 0,667 \cdot 22,4/32 = 0,467 \text{ m}^3.$$

Lors du processus d'oxydation du carbone, une quantité d'oxygène insufflée est dépensée pour l'oxydation du fer, une autre quantité est dissoute dans le bain. Ainsi le coefficient d'utilisation d'oxygène ( $\text{Mo}_2$ ) diminue continuellement ce qui amène à une augmentation du volume de l'oxygène à insuffler. La valeur moyenne ( $\text{Mo}_2$ ) dans un intervalle de concentration de carbone de départ  $[\text{C}]_d$  jusqu'à une concentration finale  $[\text{C}]_f$  est déterminée selon la formule :

$$\text{Mo}_2 = 1 - \frac{\sqrt{a}}{[\text{C}]_d - [\text{C}]_f} \left( \text{Arctg} \frac{[\text{C}]_d}{\sqrt{a}} - \text{Arctg} \frac{[\text{C}]_f}{\sqrt{a}} \right)$$

Où :  $a$  = coefficient dont la valeur se trouve dans les limites 0,008- 0,012% pour les alliages au carbone on choisie  $a = 0,010$ .

$$\text{Mo}_2 = 1 - \frac{0,010}{0,66-0,195} \left( \text{Arctg} \frac{0,66}{0,01} - \text{Arctg} \frac{0,195}{0,01} \right) = 0,930$$

Pour oxyder 0,5% de carbone, la quantité d'oxygène exigée lors du soufflage est égale à :

$$\text{O}_2 = \text{O}_c/\text{Mo}_2 = 0,667/0,93 = 0,717 \text{ Kg}/100 \text{ Kg.}$$

D'où le volume d'oxygène est de :

$$\text{V}_{\text{O}_2} = \text{O}_c/\text{Mo}_2 \cdot 22,4 = 0,717 \cdot 22,4/32 = 0,502 \text{ m}^3/100 \text{ Kg.}$$

Selon les données de  $[\text{Co}]$  : la relation entre  $[\text{O}]$  et  $[\text{C}]$  dans un bain effervésant (four électrique) à  $[\text{C}]$  0,05% est décrit par l'équation :

$$\% [\text{O}] = 0,0033/\% [\text{C}] - 0,00455 = (0,0033/0,335) - 0,00455$$

D'où :  $\% [\text{O}] = 0,0053$ .

La quantité d'oxygène dissoute dans le métal, lors de la période oxydante (pour  $[\text{C}]_{\text{charge}} = 0,66\%$ ) et pour  $[\text{C}]_{\text{Fe}}$  (de fin d'ébullition) est égale à 0,195%) est égale à :

$$\Delta [\text{O}] = 0,0033/ [\text{C}]_{\text{Fe}} - 0,0033/ [\text{C}]_{\text{ch...}}(3,4,7)$$

$$\Delta [\text{O}] = 0,0033/ 0,195 - 0,0033/ 0,66 = 0,012\% \text{ Kg.}$$

La quantité d'oxygène insufflée pour l'oxydation du fer ( $\text{O}_{\text{Fe}}$ ) est égale à :

$$\text{O}_{\text{Fe}} = \text{O} - \text{O}_c - \Delta [\text{O}] = 0,717 - 0,667 - 0,012 = 0,038 \text{ Kg.}$$

Ainsi les pertes de fer lors du soufflage d'oxygène sont :

$$\text{Fe}_o = \text{O}_{\text{Fe}} \cdot 56/6 = 0,038 \cdot 56/16 = 0,133 \text{ Kg....}(3,48).$$

Lors de la période de fusion est d'oxydation, il ya des pertes d'éléments et de fer par oxydation, ainsi que des pertes de fer par évaporation (zone de l'arc, zone de soufflage d'oxygène) et des pertes mécanique du métal lors du décrassage. En partant des données pratiques, on peut admettre que 15% des pertes totales de fer passent dans le laitier décrassé et 85% de pertes s'évaporent dans la zone à haute température. Les pertes de métal lors du décrassage  $\text{Fe}_{(\text{Laitier})}$  sont généralement de 15%  $[\text{B}]$ , pour notre cas, on suppose qu'ils sont de 1%. Ainsi la quantité de métal à la fin de la période oxydante ( $\text{X}_1$ ) est égale à :

$$\text{X}_1 = 100 - \Sigma (\text{des éléments oxydés}) - (\text{Fe})_{\text{FeO}} - \text{Fe}_{\text{O}_2} - \text{Fe}_{\text{évaporé}} - \text{Fe}_{\text{Laitier}}(3,40)$$

$$\text{X}_1 = 100 - (0,335 + 0,308 + 0,042 + 0,5) - (0,171 + 0,133 + ((\text{Fe}/\text{FeO} + \text{FeO}_2) 85/15 + 1)) = 95,788 \text{ Kg.}$$

#### ❖ Période réductrice :

A la fin de la période oxydante, la quantité de métal ( $\text{X}_2$ ) et la quantité de ferro-alliage ( $\text{P}_{\text{fa}}$ ) peuvent être calculées d'après les équations :

$$\text{X}_2 = \text{X}_1 + \text{P}_{\text{fa}}(3,50) \text{ et}$$

$$\text{P}_{\text{fa}} = (\text{X}_2 \cdot [\% \text{E}_f] - \text{X}_1 \cdot [\% \text{E}]_d / [\% \text{E}]_{\text{fa}} \cdot \text{M}_E \dots(3,51)$$

Ou : % [E<sub>f</sub>] ; [E]<sub>d</sub> ; [%E]<sub>fa</sub> : les concentrations de l'élément d'alliage finale, de départ et dans les ferro-alliages :

M<sub>E</sub> : rs le rendement de l'élément ;

P<sub>fa</sub> : quantité de ferro-alliage additionnée, en (Kg).

La composition chimique de départ et celle pour l'obtention de l'acier 110F, sont représentées dans le tableau suivant :

Composition chimique	C	Si	Mn	Cr	P	S
A la fin de la période oxydante	0,195	-	0,15	-	0,008	0,045
Acier 110F obtenu	0,335	0,225	1,25	0,575	0,035	0,030

### TAB N°06

#### Mise à la nuance :

$$P_{Fe-Si(75)} = X_2 \cdot 0,27 / 75 \cdot 0,5 + X_2 \cdot Si_{(Nuance\ moyenne)} / 75 \dots (3,52)$$

$$P_{Fe-Mn(75)} = (X_2 \cdot Mn_{(Nuance\ moyenne)} - X_1 \cdot Mn_{(reste\ p,\ oxy)}) / 75 \dots (3,53)$$

$$P_{Fe-Cr(70)} = X_2 \cdot Cr_{(Nuance\ moyenne)} / 70 \dots (3,54)$$

$$P_{Fe-V(80)} = X_2 \cdot V_{(Nuance\ moyenne)} / 80 \dots (3,55)$$

En calculant, on trouve :

$$P_{Fe-Si(75)} = X_2 \cdot (0,27/37,5 + 0,225/75) = 0,0102 X_2 ;$$

$$P_{Fe-Mn(75)} = 0,0167 \cdot X_2 - 0,192 ;$$

$$P_{Fe-Cr(70)} = 0,0082 \cdot X_2 ;$$

$$P_{Fe-V(80)} = 0,0006 \cdot X_2.$$

Mais on a :  $X_2 + X_1 + P_{fa}$  ; donc :

$$X_2 = X_2 \cdot (0,0102 + 0,0167 + 0,0082 + 0,0006) - 0,192 + 95,788$$

$$D'où : X_2 = 0,0357 / (1 - 0,0357) = 99,13 \text{ Kg.}$$

Alors la quantités des ferro-alliages à additionner seront :

$$P_{Fe-Si(75)} = 0,714 + 0,297 = 1,011 \text{ Kg ;}$$

$$P_{Fe-Mn(75)} = 1,463 \text{ Kg ;}$$

$$P_{Fe-Cr(70)} = 0,813 \text{ Kg ;}$$

$$P_{Fe-V(80)} = 0,059 \text{ Kg.}$$

La quantité de laitier de la période réductrice (U<sub>3</sub>) est déterminée en fonction du degré de désulfuration du métal (%S = % [S]<sub>d</sub> - % [S]<sub>f</sub>). La formule pour calculer cette quantité est obtenue en utilisant l'équation

$$[S]_f = ([S]_f + 0,01 \cdot U_3 \cdot (S)_d) / (1 + 0,01 \cdot U_3 \cdot L_s) \dots (3,56).$$

Dans ce cas :

$$U_3 = 100 \cdot \Delta S[S] / [S]_f \cdot L_s - (S)_d \dots (3,57)$$

Le coefficient de partage du soufre obtenu grace au traitement par laitier blanc lors de la coulée de l'acier, est égal, selon les données à :  $L_s = (20 + 30) / (\%FeO)$ .

La valeur minimale (20) est valable pour les acier a bas carbone. Les valeurs superieurs à (30) sont valables pour les aciers à concentration moyennes en carbone.

Si on considere  $[S]_f = 0,015\%$  avec  $(S) = 0,05\%$ , dans ce cas  $L_s = 20 / 0,5 = 40$  ; en tenant compte du soufre apporté par les ferro-alliages. Dans ce cas  $\Delta[S] = S_{fo} + S_{fa} - 0,015$ .

Le soufre apporté par les ferro-alliages :

$S_{fa} = 1,011 \cdot 0,03/100 + 0,813 \cdot 0,03/100 + 0,059 \cdot 0,03/100 + 1,463 \cdot 0,03/100 = 0,001 \text{ Kg}$ .

Donc :  $\Delta[S] = 0,045 + 0,001 - 0,015 = 0,031\%$ .

Alors :  $U_3 = (100 \cdot 0,031) / (0,015 \cdot 40 - 0,05) = 5,64\%$ .

Pour l'obtention d'un laitier blanc très fluide, la somme des oxydes basiques (CaO + MgO) ne doivent pas dépasser 65%. La somme des composants fluidisant ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaF}_2$ ) ne doivent pas être inférieure à 30%.

Les quantités de spath-fluor, de chamotte et de chaux, pour la formation du laitier cité, sont les suivantes :

La quantité de spath-fluor nécessaire pour la formation de laitier blanc fluide est généralement égale à 2,5 Kg/t (ou 0,25 Kg/100Kg). Cette quantité de spath-fluor, apporte :  $0,25 \cdot 0,95 = 0,2375 \text{ Kg}$  de  $\text{CaF}_2$ .

Environ 40% de  $\text{CaF}_2$  réagit avec  $\text{SiO}_2$  selon la réaction :



Ainsi la quantité de ( $\text{SiO}_2$ ) qui réagit avec  $\text{CaF}_2$  est égale à :

$$0,2375 \cdot 0,4 \cdot 60 / 156 = 0,037 \text{ Kg}$$

La quantité de CaO formée après réaction de  $\text{CaF}_2$  avec  $\text{SiO}_2$  est égale à :  $0,2375 \cdot 0,4 \cdot 112 / 156 = 0,068 \text{ Kg}$ .

La quantité de  $\text{CaF}_2$  restante dans le laitier est égale à :

$$0,068 \cdot 0,6 = 0,1425 \text{ Kg}$$

Pour  $U_3 = 5,64 \text{ Kg} / 100 \text{ Kg}$ , le pourcentage de  $\text{CaF}_2$  dans le laitier est égale à :

$$0,1425 \cdot 100 / 5,64 = 2,53\%$$

- b. Pour déterminer la quantité de chaux exigée ( $Z_c$ ), on considère que la concentration de CaO dans le laitier est de 53%. Pour 92% de CaO dans la chaux, en tenant compte de CaO formée après la réaction de  $\text{CaF}_2$  avec  $\text{SiO}_2$ , ainsi que CaO apportée par les résidus du laitier de la période oxydante, ( $Z_c$ ) peut être calculée d'après l'équation :

$$(\text{CaO})_{\text{CaF}} + (\text{CaO} \text{ apporté par le laitier oxydant}) + 0,92 \cdot Z_c = 53 \cdot U_3 / 100 + 0,068 + (2,81 \cdot 5,48 / 100 \cdot 100) + 0,92 \cdot Z_c = 53 \cdot 5,64 / 100$$

D'où  $Z_c = 3,102 \text{ Kg}$ .

- c. La quantité de chamotte (X) est déterminée de telle façon à obtenir 20% de  $\text{SiO}_2$  dans le laitier. En tenant compte de  $\text{SiO}_2$  apporté par le laitier oxydant, par la chaux, par l'oxydation du ferro-silicium pour la désoxydation du métal et du laitier, de celle neutralisée par 40% de  $\text{CaF}_2$ , on calcule la quantité de déchets de chamotte nécessaire pour atteindre 20% de  $\text{SiO}_2$  dans le laitier :

$$(\text{SiO}_2)_{\text{résidu du laitier oxydant}} + (\text{SiO}_2)_{\text{Chaux}} + (\text{SiO}_2)_{\text{oxydation du Fe-Si}} + 0,62 \cdot X - (\text{SiO}_2)_{\text{SiF}_2} = 20 \cdot U_3 / 100 \dots\dots(3,59)$$

$$\text{Donc } (2,81 \cdot 5 \cdot 20 / 10000) + (3,102 \cdot 2,5 / 100) + (50,714 \cdot 75 \cdot 60 \cdot 50 / 280000) + 0,62 \cdot X - 0,037 = 20 \cdot 5,64 / 100 ;$$

$$0,62 \cdot X = 0,4856 ; \text{ d'où } : X = 0,78 \text{ Kg}$$

- d. Pour vérifier l'influence de la composition chimique du laitier sur la fluidité de ce dernier, il est obligatoire de déterminer la concentration de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans ce laitier.

L'oxyde de l'aluminium passe dans le laitier à partir de la chamotte, du spath-fluor et de la chaux. La poudre d'aluminium utilisée pour la désoxydation du laitier réducteur s'oxyde totalement et passe dans le laitier (0,05 Kg de poudre d'Al par 100 Kg). Une partie de l'aluminium en morceaux (0,06 Kg/ 100 Kg) est utilisée pour la désoxydation finale. La concentration résiduelle de l'aluminium dans un acier calmé est généralement de 0,02 à 0,03%. Ainsi la quantité de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans le laitier est égale à :

$$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{chamotte}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{spath-fluor}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{chaux}) + (0,05 + 0,06 - 0,03) \cdot 102 / 54 : \dots(3,60)$$

Il est égale à :

$$0,78 \cdot 35 / 100 + 0,25 \cdot 0,2 / 100 + 3,102 \cdot 1 / 100 + 0,15 ;$$

Elle est égale à : 0,455 Kg.

Le pourcentage de  $Al_2O_3$  dans le laitier ( $U_3$ ) est de :  
 $0,455 \cdot 100 / 5,64 = 8,1\%$ .

La somme des composants fluidisant est de :

$\%(SiO_2) + \%(Al_2O_3) + \%(CaF_2) > 30\% \dots\dots (3,61)$

$20 + 8,1 + 2,53 = 30,63\%$ .

On procède à la vérification et à la précision de la quantité de désoxydants pour l'obtention d'un acier calmé et d'un laitier bien désoxydé. La quantité d'oxygène apportée par le métal de la période oxydante est égale à :

$O_{fé(fin d'ébullition)} = 0,003\% [C]_{fé} + 0,00455 \dots\dots (3,62)$   
 $= 0,003 / 0,195 + 0,00455 = 0,02 \text{ Kg.}$

Selon les données expérimentales, les restes du laitier oxydant apportent  $0,03 + 0,15\%$  d'oxygène (on prend  $0,1\%$ ), les réfractaires détruits apportent environ  $0,035 + 0,07\%$  d' $O_2$ , l'air jusqu'à  $0,3\%$ .

Pour simplifier les calculs, on peut supposer que l'oxygène dissout dans le métal est apporté par les réfractaires, est neutralisé par le silicium et l'aluminium utilisés pour la désoxydation, les poudres des désoxydations (coke, Fe-Si, Al) doivent neutraliser l'oxygène apporté par les restes du laitier par les réfractaires et par l'air :

1. La désoxydation préliminaire par précipitation se passe en utilisant du ferro-silicium (75% de Si) de telle façon à avoir  $0,15\%$  de silicium. Le rendement du silicium étant de  $50\%$ , la quantité de silicium oxydée est égale à  $99,12 \cdot 0,15 / 100 \cdot 100$  elle est égale à  $0,074 \text{ Kg}$ . En ce qui concerne la désoxydation finale, on additionne  $0,6 \text{ Kg/t}$  d'aluminium.

Puisque sa concentration résiduelle doit être égale à  $0,03\%$  la quantité qui s'oxyde est égale à :  $0,06 - 0,03 = 0,03 \text{ Kg}$ .

Dans ce cas, le silicium et l'aluminium utilisés pour la désoxydation neutralisent :  
 $0,074 \cdot 32 / 28 + 0,03 \cdot 48 / 54 = 0,11 \text{ Kg d'oxygène.}$

Comme nous le remarquons, même en prenant en considération le fait que l'apport de l'oxygène (par le métal de la période oxydante et par les réfractaires) peut être sensiblement important, les quantités additionnées de silicium et d'aluminium pour la désoxydation sont plus que suffisantes pour la neutralisation de cet oxygène.

2. Pour la désoxydation par diffusion, on utilise :  
 $0,715 - 99,13 \cdot 0,15 / 100 \cdot 100 = 0,515 \text{ Kg.}$

Pour un rendement de silicium de  $50\%$ , on a :

$0,515 \cdot 75 \cdot 50 / 100 \cdot 100 = 0,193 \text{ Kg}$  (du silicium oxydé) cette quantité de silicium est  $0,05 \text{ Kg} / 100 \text{ Kg}$  de poudre d'Al neutralisent :  $0,193 \cdot 32 / 28 + 0,05 \cdot 45 / 54 = 0,265 \text{ Kg, (}\%) \text{ d'oxygène}$  apporté par les restes du laitier oxydant par les réfractaires et par l'air.

La quantité de cet oxygène est de :

$0,1 + 0,07 + 0,3 = 0,47\%$

3. Pour neutraliser :  $0,47 - 0,265 = 0,205 \text{ Kg d'oxygène}$ , on utilise de la poudre de coke (à  $80\%$  de carbone) de telle façon que  $20\%$  du carbone du coke soient assimilés par le métal :  
 $0,205 \cdot 12 \cdot 1000 / 16 \cdot 80 \cdot 80 = 0,240 \text{ Kg}$ , ce qui correspond à l'addition habituelle du coke lors du traitement sous laitier blanc ( $2 + 3 \text{ Kg/t}$ ).
4. Considèrent que la quantité de poudre de coke utilisée pour le traitement du laitier est égale à :  $3 \text{ Kg/t}$ . La quantité de coke pour carburer le métal est égale à :  $0,3 \cdot 20 / 100 = 0,06 \text{ Kg}$ . La quantité de carbone apportée par  $0,06 \text{ Kg}$  de coke est :  $0,06 \cdot 80 / 100 = 0,048 \text{ Kg}$



## 2.2. Bilan thermique

### 2.2.1. Entrée de chaleur :

Le calcul de ce bilan thermique, a pour but de déterminer la consommation en énergie électrique, au cours de l'élaboration d'un acier (110F) dans le four à arc électrique avec panneaux refroidis à l'eau.

#### 2.2.1.1. Chaleur apportée par les matières premières :

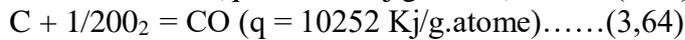
Afin d'avoir les débits en matières, les résultats obtenus sont multipliés par 800 pour obtenir une charge de 80 tonnes.

Enfournements	Quantités (Kg)	Température °C	Capacité calorifique (Kj/Kg°C)	Chaleur (Kj)
Ferrailles	74528	25	0,460	857072
Fonte	5472	25	0,50	68400
Fe-Si (75%)	808,8	25	0,745	15063,9
Fe-Mn (75%)	1979,2	25	0,678	33547,44
Fe-Cr (70%)	1340,8	25	0,565	18938,8
Fe-V (80%)	47,2	25	0,623	735,14
Aluminium	88,0	25	0,899	1977,8
Electrodes	560	450	1,506	379512
Coke	480	25	0,859	10308
Chaux	5417,6	25	0,728	98600,32
Spath-fluor	840	25	0,896	18816
Chamotte	560	25	0,920	12880
Minerai de fer	800	500	1,040	416000
Oxygène gazeux	1528,8	25	1,334	50985,48
Air	4552	25	0,962	109475,6
Total	99002,4			2092312,48

### 2.2.1.1. Chaleur apportée par les réactions exothermiques :

#### a- Oxydation du carbone :

30% de carbone s'oxydent sous forme de  $\text{CO}_2$  et 70% sous forme de  $\text{CO}$ . Dans les réactions sont les suivantes :



La quantité de carbone oxydé sous forme de  $\text{CO}_2$  est :  
 $0,465 \cdot 0,3 \cdot 800 = 111,6 \text{ Kg}$ .

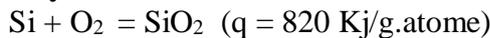
Celle sous forme de  $\text{CO}$  est de :

$$0,465 \cdot 0,7 \cdot 800 = 371,6 \text{ Kg}$$

Donc la quantité de chaleur totale dégagée sera :

$$111,6 \cdot 34080 + 371,6 \cdot 10252 = 7612971,2 \text{ Kj}$$

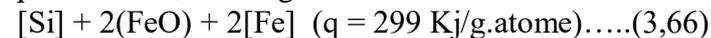
#### b- Oxydation du silicium



La chaleur dégagée est de :

$$820 \cdot 0,335 \cdot 800 \cdot 100/28 = 784857 \text{ Kj}$$

Pendant cette période, une certaine quantité de silicium s'oxyde par  $\text{FeO}$  du laitier en quantité de 0,0309 Kg. Ceci selon la réaction :



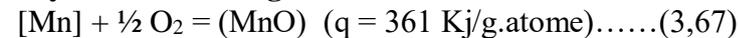
La chaleur dégagée sera :

$$0,309 \cdot 800 \cdot 299 \cdot 1000/28 = 263974 \text{ Kj}$$

Donc la chaleur dégagée par le silicium sera de :

$$784857 + 263974 = 1058931 \text{ Kj}$$

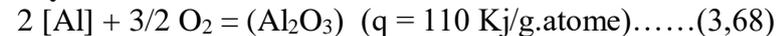
#### c- Oxydation du manganèse :



La chaleur dégagée sera :

$$0,308 \cdot 800 \cdot 361 \cdot 1000/55 = 1617280 \text{ Kj}$$

#### d- Oxydation de l'aluminium :



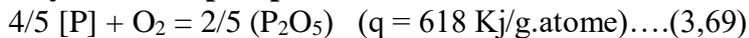
La quantité de l'aluminium oxydée est de :

$$0,322 \cdot 54/102 = 0,170 \text{ Kg}$$

La chaleur dégagée sera :

$$0,170 \cdot 800 \cdot 110 \cdot 1000/54 = 277037 \text{ Kj}$$

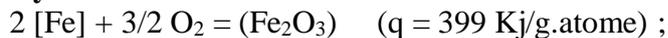
#### e- Oxydation du phosphore :



La chaleur dégagée sera :

$$0,042 \cdot 800 \cdot 618 \cdot 1000/31 = 669832 \text{ Kj}$$

#### f- Oxydation du fer :



La chaleur dégagée sera :

$$0,46 \cdot 800 \cdot 399 \cdot 1000/56 = 2451300 \text{ Kj}$$

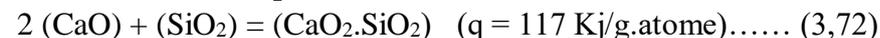
$$0,26 \cdot 800 \cdot 238 \cdot 1000/56 = 884000 \text{ Kj}$$

### 2.2.1.2. Chaleur des réactions de scorification :

#### - $\text{SiO}_2$ dans le laitier :

$$0,717 \cdot 800 = 573,6 \text{ Kg}$$

L'interaction de  $\text{SiO}_2$  avec  $\text{CaO}$  se fait selon la réaction :

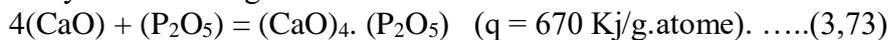


La chaleur qui s'en dégage est de :  
 $117. 1000. 573,6. 800/60 = 1118520 \text{ Kj}$ .

- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dans le laitier :

La quantité de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dans le laitier est de 0,0692 Kg/100Kg

L'oxyde de PO réagit avec CaO selon la réaction :



Donc la quantité de chaleur dégagée sera :

$$0,0962. 800. 670. 1000/142 = 363121 \text{ Kj}$$

- Le soufre :

Le soufre passe dans le laitier, lors de la période de désoxydation selon la réaction :



La chaleur dégagée est de :

$$0,0299. 800. 34,15. 1000/32 = 25527 \text{ Kj}$$

- L'aluminium :

Sa dissolution dans le métal donne une chaleur de : (q = 43 Kj/g.atome)

Donc la chaleur dégagée par la dissolution de 0,03 Kg est de :

$$0,03. 800. 43. 1000/27 = 38222 \text{ Kj}$$

Alors le total de la chaleur des réactions exothermiques est de :

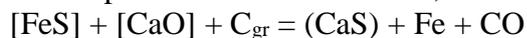
$$13829329 \text{ Kj} + 16116441 \text{ Kj}$$

## 2.2.2. Sortie de chaleur :

### 2.2.2.1. Absorption de chaleur par les réactions endothermique :

#### a. Désulfuration du métal :

Elle se produit selon laitier blanc, selon la réaction :



Pour éliminer 0,035 Kg de soufre du métal, il faut dépenser une chaleur de :

$$0,035. 800. 97,5. 1000/32 = 85312 \text{ Kj}$$

#### b. Chauffage et vaporisation de l'humidité :

Cette humidité est apportée par le minerai de fer par l'air. Le chauffage de la vapeur jusqu'à 1200°C demande : 43276 Kj.

La chaleur latente de vaporisation est égale à 40374 Kj.

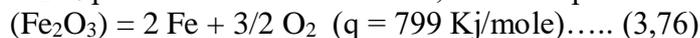
Pour le chauffage d'une mole d'eau jusqu'à 100°C, sa vaporisation et son chauffage jusqu'à 1200°C, il est nécessaire de dispenser : 91074 Kj/mole.

La chaleur indispensable à son chauffage sera de :

$$91074. 2202.800 = 891310 \text{ Kj}$$

#### c. La décomposition de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> :

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> provient du minerai de fer, sa décomposition se déroule d'après la réaction :



1 Kg de minerai de fer donne 0,63 Kg de fer, soit 0,9 Kg de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La chaleur nécessaire à sa décomposition est de :

$$799. 1000. 0,9. 800/160 = 3595500 \text{ Kj}$$

#### d. Dissolution du coke :

Le carbone du coke se dissout dans le métal en quantité de :

0,174 Kg et ceci en absorbant 22,6 Kj/g.atome.

La dissolution demande une énergie de :

$$22,6. 1000. 0,174. 800/12 = 262160 \text{ Kj}$$

Les réactions endothermique exigent en total une énergie de : 4834282 Kj.

#### 2.2.2.2. Chaleur du métal :

Le poids de la coulée est de  $98,599 \cdot 800 = 78879,2$  Kg.

Pour fondre la charge et porter sa température jusqu'à  $1635^{\circ}\text{C}$ , il faut fournir une énergie de :  $78879,2 \cdot (0,7 \cdot 1510 + 285 + 0,84 \cdot (1635 - 1510)) = 114138202$  Kj ;

Avec :  $0,7$  Kj/Kg $^{\circ}\text{C}$  – capacité calorifique de l'acier solide ;

$0,84$  Kj/Kg $^{\circ}\text{C}$  - capacité calorifique de l'acier liquide ;

$285/\text{Kh}^{\circ}\text{C}$  – chaleur latente de fusion de l'acier.

#### 2.2.2.3. Chaleur du laitier de fusion :

Après la fusion de charge, on dégrasse 95%,

Donc la quantité de laitier oxydé est de :

$6,39 \cdot 0,95 = 6,071$  Kg.

Donc la chaleur emportée par le laitier de fusion est de :

$6,071 \cdot 800 \cdot (1,17 \cdot 1500 + 209) = 9538755$  Kj.

Où :  $1,17$  : la capacité calorifique du laitier basique ;

$209/\text{Kg.atome}$  : chaleur latente de fusion du laitier.

#### 2.2.2.4. Chaleur du laitier oxydant :

La température du laitier oxydant est de  $1660^{\circ}\text{C}$ , sa capacité calorifique est de  $1,214$  Kj/Kg $^{\circ}\text{C}$ .

Il emporte une énergie de :

$6,071 \cdot 800 \cdot (1,214 \cdot 1660 + 209) = 10802689$  Kj.

#### 2.2.2.5. Chaleur du laitier blanc :

Le poids de ce laitier est de  $5,64 \cdot 800 = 4512$  Kg, sa température est de  $1630^{\circ}\text{C}$ , sa capacité calorifique est de  $1,215$  Kj/Kg $^{\circ}\text{C}$  et il emporte une chaleur de :

$4512 \cdot (1,2150 \cdot 1630 + 209) = 9878798$  Kj.

#### 2.2.2.6. Chaleur emportée par les gaz :

La quantité de CO et de CO<sub>2</sub> dégagée lors des périodes de fusion et de désoxydation sont respectivement :

$0,448 + 1,085 = 1,533$  Kg ; et

$0,704 + 2,409 = 3,113$  Kg.

Donc ils emportent une chaleur de :

$1,533 \cdot 800 \cdot 34,43 \cdot 1200/28 = 1809641$  Kj (pour CO).

$3,113 \cdot 800 \cdot 47,05 \cdot 1200/44 = 3195636$  Kj (pour CO<sub>2</sub>).

$34,43$  Kj/Kg $^{\circ}\text{C}$  : capacité calorifique de CO à  $1200^{\circ}\text{C}$ .

$47,05$  Kj/Kg $^{\circ}\text{C}$  : capacité calorifique de CO<sub>2</sub> à  $1200^{\circ}\text{C}$ .

La quantité de SiF<sub>4</sub> est de  $0,221 \cdot 800 = 176,96$  Kg ;

Celle de N<sub>2</sub> est de  $(4,58 + 1,72) \cdot 800 = 5044$  Kg.

Donc la chaleur de SiF<sub>4</sub> est de  $176,96 \cdot 110,08 \cdot 12000/104 = 224766$  Kj ; celle de N<sub>2</sub>, est de :  $5044 \cdot 34,13 \cdot 1200/28 = 7378750$  Kj.

Donc la chaleur totale emportée par les gaz est de :

$1809641 + 3195636 + 224766 + 7378750 = 12608793$  Kj.

#### 2.2.2.7. Chaleur emporté par FeO volatilisé :

Pour notre cas, les 100% de FeO volatilisé s'échappent avec les fumées :

Les quantités de fer oxydées sont de :

$0,43 + 0,26 = 0,69$  Kg ; donc  $0,69 \cdot 800 = 552$  Kg.

La température de FeO est de  $1300^{\circ}\text{C}$ , sa capacité calorifique est de  $52,82$  Kj/Kg $^{\circ}\text{C}$ , donc la chaleur emportée par les poussières est de :  $552 \cdot 52,82 \cdot 1300/72 = 526439$  Kj.

### 2.2.2.8. Pertes de chaleur avec l'eau refroidissante :

Les pertes de chaleur avec l'eau refroidissante sont déjà calculées dans le bilan thermique précédent, et elles sont de 156900000 Kj.

2.2.2.9. Pertes de chaleur par rayonnement à travers les portes ouvertes: (Elles sont de 1833825 Kj).

2.2.2.10. Pertes de chaleur par ouvert et voute ouverte pendant le chargement: (elles sont de 2048122 Kj).

2.2.2.11. Pertes de chaleur par les électrodes lors du chargement: (elles sont de 3079269 Kj).

### 2.2.3. Détermination de l'énergie électrique :

L'équation du bilan thermique est la suivante :

$$O_E + O_O + O_{MP} + O_{Fr} = O_A + O_L + O_{Fm} + O_{re} = \text{la somme des pertes} \dots (3,77)$$

$$O_E = (114138202 + 28320242 + 12135232 + 4834282 + 163861217) - (16116441 + 2092312,48 + 857072) = 304223349,5 \text{ Kj.}$$

#### Bilan thermique :

Entrées	Kj	%
1_ Energie électrique	304223349,5	94,10
2_ Ferrailles	857072	0,27
3_Matières premières	2092312,48	0,54
4_Réaction exothermiques	16116441	4,99
Total	323289175	100

Sorties	Kj	%
1_ Acier	114138202	35,31
2_ Laitier	28320242	8,760
3_ Réactions endothermique	4834282	1,50
4_ Fumées	12135232	3,75
5_ Somme des pertes	163861217	50,68
Total	323289175	100

Ainsi l'énergie électrique totale dépensée est de 304.223.349,5 Kj ou 84.741.880,08 KWh. Si on procède au préchauffage de la ferraille par le gaz naturel jusqu'à une température de 700°C, on économisera une quantité d'énergie électrique suivante :

La température de coulée est de 1635°C, donc :  
Pour chauffer l'acier jusqu'à 1635°C, il faut 84.741.880,08 KWh et pour chauffer l'acier à partir de 1635 – 700 = 935°C on économise :

1635°C → 100% d'énergie

700 → X% , d'ici :  $X = 935.100/1635 = 42,81\%$  soit  $84.741.880,08 \text{ KWh} \times 0,428 = 36269524,674 \text{ Kwh}$ .

A part cela, il existe d'autres moyens connus qui permettent d'économiser de l'énergie électrique, on citer entres autres :

- Un tri sélectif de la ferraille
- Le chargement de la ferraille en un seul panier par emballage
- Le déroulement du processus à un seul laitier
- Le préchauffage des ferroalliages
- Le soufflage d'oxygène gazeux
- Une température de coulée stricte
- 

### **Conclusions et recommandations**

- 1- La consommation totale calculée de l'énergie électrique est de 304.223.349,5 Kj ou 84.741.880,08 KWh
- 2- Le préchauffage de la ferraille par le gaz naturel permet d'économiser environ 43% de l'énergie électrique totale consommée soit 36269524,674 Kwh.

### **Recommandations**

Le préchauffage peut être effectué soit en dehors du four soit au sein du four en utilisant des brûleurs puissants à travers les portes de travail

- [1] B.Trentini ; « Aciéries. Évolution des procédés », Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7600, pp 1-11.
- [2] M. Nadif, C. Gatellier ; « Influence d'une addition de (Ca ou de Mg) sur la solubilité de l'oxygène et du soufre dans l'acier liquide (étude de laboratoire) ». Revue de Métallurgie. CIT 83, n° 5, Mai 1986, p. 377-394.
- [3] W.E. Schwabe, C.G. Robinson ; « Nouveaux développements dans l'UHP ». Conférence Internationale sur le four à arcs électrique en Aciéries Cannes, 7-9 Juin 1971.
- [4] P.V. Riboud, M. Olette ; « Mechanisms of some of the reactions involved in secondary refining. (Mécanismes de certaines réactions mises en oeuvre en métallurgie secondaire) ». 7<sup>em</sup> congrès international sur la métallurgie sous vide, Tokyo, 26-30 Novembre 1982. Proceedings, pp. 879-889.
- [5] P. Ayed, C. Ouvradou, J.Astier ; « Aciérie électrique » ; Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, M 7 700, pp.1-24.
- [6] S.Vacquité ; « Arc électrique.» Techniques de l'ingénieur, Traité Génie électrique D 2 870, pp. 3-95.
- [7] C.Gary ; « L'arc électrique et ses applications », Revue de Génie Electrique, 1983, vol. 4, pp. 5-264.
- [8] P. Meynaud ; « Qualité de la tension dans les réseaux électriques, creux de tension, flicker et harmoniques » ; Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 4 260, pp.1-25, 1990.
- [9] [www.wikipédia.fr](http://www.wikipédia.fr),
- [10] Les différents moyens de fusion  
(<http://tsaucray.free.fr/1%20metallurgie/11%20fusion/F21b.htm>)
- [11] Svenchanskii, A. D. *Elektricheskie promyshlennye pechi*, 2nd ed, part 1. Moscow, 1975.  
A. D. SVENCHANSKII
- [12] Technical basics and applications of induction furnaces Prof. Dr.-Ing. E. Baake / Institute of Electrotechnology, Leibniz University of Hannover.
- [13] **Fours à arc** par **Maurice KRATZ**, Techniques de l'ingénieur.
- [14] Métallurgie élaboration des métaux C.Chaussin G.Hilly, Edition Dunod Paris 1972
- [15] Metallgewinnung Eisen und Stahl Teil :11 1 und 2 Lehrbrief Dozent. Dr. Ing. Helmut Burghardt, Édition Bergokademie Freiberg 1974.
- [16] Eisenhuhenkunde Teil 1.Métallurgie der Roheisenerzeugung Dr.Inw.Winfried Wenzel, Édition Bergokademie freiberg 1972.

[17] **EAF -1- Operative Manual**, Danieli & C. Spa – Buttrio (UD) – ITALY, AQS (Algerian Qatari Steel) Algéria.

[18] Cour électrométallurgie de Pr D.Boucif.

[19] Centre de Formation Danielli

[20]- Matériaux I et II. N.Bouaoudja, Édition OPU 1992

[21]- Grundlagen der werkstoffwissenschaft 2.Lehrbrief Prof.Dr.F.Gunther, Edition Bergakademie Freiberg 1976

[22]- Werkstoffkunde Stahl und Eisen I Eckstein, Édition VEB deutscher verlag Leipzig 1971

[23] Bureau international du Travail (BIT), 1992: Evolution récente dans l'industrie du fer et de l'acier, Rapport I (Genève).

[24] BEAULIEU, PICARD, TREMBLAY, MASSICOTTE, GRONDIN, Calcul des charpentes d'acier tome I, cisc-icca Institut canadien de la construction en acier, 2003, 794-796 p.

[25] Métallographie et traitements thermiques des métaux. L.Lakhtine, édition Mir Moscou 1978.