

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Badji Mokhtar –Annaba-



جامعة باجي مختار – عنابة-

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
Département de Métallurgie et Génie des Matériaux

## MEMOIRE DE MAGISTERE

OPTION : Mise en forme des métaux

### Thème

**Contribution à la diminution des criques  
de rives qui apparaissent dans les brames  
d'acier en coulée continue.**

**Directeur de mémoire:**

**Dr. LEMMOUI Abdennacer**

**présenté par :**

**Mr. HAMLAOUI katib.**

### Devant le jury

**Président :**

**Rapporteur :**

**Membres :**

**Pr. Chabour. Salem**

**Dr. Lemmoui. Abdennacer**

**Dr.Zaaf.Mouhamed**

**Dr.Benchikha .Taher.**

**Dr .Snani . Louafi.**

**Année : 2015**

# Dédicace

*Je dédie ce travail à :*

- *Ma chère mère que je tiens à lui dire que j'aime beaucoup,*
- *Mon père qui est le symbole de mon existence, merci beaucoup.*
- *Tous mes frères, leurs femmes, et leurs enfants*
- *Ma sœur, son mari et ses enfants. Aux familles Hamlaoui et Marzouk.*
- *Mes amis : Nabil Rabei et sa famille, Adel hellal, Khair-Eddine Boudib, Messadi ismail, Boufafa mustapha kamel, Fares et Khaled (21), Mohamed Mahfoud (21).*
- *Mes amis de promotion de magistère (2012/2015).*
- *Sans oublier Amina. G et Lamia secrétaire (département).*

**HAMLAOUI KATIB**

## ***Remerciements :***

Tout d'abord je remercie ALLAH, tout puissant qui m'a orienté vers la réussite ainsi que mes parents.

Je transmets ma gratitude et ma reconnaissance au président et aux membres de jury.

Je remercie mon encadreur Dr. LEMMOUI Abdennacer pour son aide et ses conseils précieux tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi que le groupe d'atelier ACO<sub>1</sub> d'Arcelor Mittal Annaba surtout Mr. HAFERSSASSE Raouf.

Sans oublier tous les enseignants du département de métallurgie et génie matériaux de l'Université Badji Mokhtar – Annaba.

A ceux, qui m'ont aidé et encouragé qu'ils trouvent ici un témoignage de reconnaissance. .

## Table des matières

Résumés (français, arabe et anglais).

Introduction générale..... 1

### Chapitre I : Partie bibliographique

I. Revue bibliographique.....3

II. Généralité sur les aciers.....4

II.1. Définition.....4

II.2. Les différentes phases de l'acier.....5

II.3. Différentes familles d'aciers.....9

II.3.1. Aciers non alliés à usage général.....9

II.3.2. Aciers spéciaux.....9

II.3.3. Aciers inoxydables.....9

II.3.4. Autres aciers alliés.....9

III. Elaboration e l'acier.....10

III.1. Principes généraux.....10

III.1.1.Chimie de processus primaires.....12

III.2. Processus primaire.....14

III.2.1. Désulfuration en poche.....14

III.2.2.filière fonte (Acier à oxygène).....14

III.2.2.1 Principe d'opération.....15

III.2.3. filière électrique (Acier électrique).....16

III.2.3.1. Principe d'opération.....16

III.3. Processus secondaire.....16

III.3.1. Station d'affinage.....17

IV. Coulée de l'acier.....18

IV.1. Coulées en lingotières.....19

IV.2. La coulée continue.....20

IV.3. Produits issu de la coulée continue.....26

IV.5. Les défauts de la coulée continue des brames.....29

IV.6. Aspects fondamentaux de la coulée continue.....33

Conclusion.....39

## Chapitre II : Partie technologique

<b>I. Le groupe Arcelor Mittal</b> .....	<b>40</b>
<b>I.1. Présentation de l'entreprise</b> .....	<b>40</b>
<b>I.2. Organisation D'Arcelor Mittal Annaba</b> .....	<b>42</b>
<b>I.1.3. Gamme des produits</b> .....	<b>43</b>
<b>I.2. Aciérie à Oxygène N°1 (Brames)</b> .....	<b>43</b>
<b>I.3. Atelier de la coulée continue</b> .....	<b>45</b>
<b>I.3.1. Machine de la coulée continue en courbe</b> .....	<b>45</b>
<b>I.3.2. Machine de la coulée continue en coupe</b> .....	<b>46</b>
<b>I.3.3. Carte technologique de la machine de la coulée continue</b> .....	<b>47</b>
<b>I.3.3.1. Description tout le processus d'obtention de la brame</b> .....	<b>48</b>
<b>I.4. Poudre de la coulée continue</b> .....	<b>56</b>
<b>I.4.1. Rôle de poudre de la coulée</b> .....	<b>56</b>
<b>I.4.2. Les principales caractéristiques d'une poudre de graissage</b> .....	<b>57</b>
<b>I.4.3. Les paramètres du procédé de coulée continue</b> .....	<b>58</b>
<b>I.4.4. La poudre utilisée à Arcelor Mittal Annaba</b> .....	<b>60</b>
<b>II. Généralités sur les défauts de brames existants à Arcelor Mittal Annaba</b> .....	<b>61</b>
<b>II.1. Introduction</b> .....	<b>61</b>
<b>II.1.1. Criques internes</b> .....	<b>61</b>
<b>II.1.2. Criques superficiels</b> .....	<b>62</b>
<b>II.1.3. Présentation schématique des principaux des principaux défauts apparus sur les brames coulées en continu</b> .....	<b>63</b>
<b>II.2. Nomenclature des défauts</b> .....	<b>64</b>
<b>III. Définition du problème posé</b> .....	<b>68</b>
<b>III.1.2. Aperçu sur les défauts de crique de rives des brames en acier A9</b> .....	<b>69</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>70</b>

### Chapitre III : Partie expérimentale et modélisation thermomécanique

<b>I.1. Partie expérimentale</b> .....	<b>71</b>
<b>I.1.1. Statistique sur les défauts crique de rive</b> .....	<b>71</b>
<b>I.1.2. Qualité de l'acier</b> .....	<b>72</b>
<b>I.1.2.1. Compositions chimique</b> .....	<b>72</b>
<b>I.1.2.2. L'analyse chimique de la coulée au niveau de l'ACO<sub>1</sub></b> .....	<b>72</b>
<b>I.1.2.3. L'analyse chimique après solidification de la brame</b> .....	<b>72</b>
<b>I.1.3. La poudre de coulée utilisée à Arcelor Mittal Annaba</b> .....	<b>72</b>
<b>I.1.3.1. Composition chimique</b> .....	<b>73</b>
<b>I.1.3.2. La viscosité de la poudre</b> .....	<b>73</b>
<b>I.1.4. La vitesse de coulée</b> .....	<b>74</b>
<b>I.1.5. Débit de refroidissement secondaire</b> .....	<b>75</b>
<b>I.1.6. Essai micrographique</b> .....	<b>76</b>
<b>II. Modélisation thermomécanique de refroidissement secondaire de la coulée continue des brames en acier à nuance A9</b> .....	<b>77</b>
<b>II.1. Quelques données au cours coulée continue de la brame</b> .....	<b>77</b>
<b>II.2. Modèle thermomécanique</b> .....	<b>79</b>
<b>II.2.1. Modèle thermique</b> .....	<b>79</b>
<b>II.2.1.1. Equation de base</b> .....	<b>80</b>
<b>II.2.1.2. Conditions initiales et aux limites</b> .....	<b>82</b>
<b>II.2.1.3. Détermination des paramètres du modèle</b> .....	<b>82</b>
<b>II.2.2. Modèle mécanique</b> .....	<b>84</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>90</b>

## Chapitre IV : Résultats et Interprétation

<b>I.1.Résultats expérimentaux</b> .....	<b>91</b>
a).La poudre de la coulée.....	<b>91</b>
b) La vitesse de coulée.....	<b>91</b>
c) Le refroidissement secondaire des brames.....	<b>92</b>
<b>II.Résultats thermiques</b> .....	<b>93</b>
II.1. Evolution de la température en fonction temps de coulée.....	<b>93</b>
II.2. Température suivant la direction OZ.....	<b>94</b>
II.3. Température suivant la direction OY.....	<b>94</b>
<b>III. Interprétation des résultats</b> .....	<b>95</b>
III.1.Résultats expérimentaux.....	<b>95</b>
a).La poudre de la coulée.....	<b>95</b>
b) La vitesse de coulée.....	<b>95</b>
c) Le refroidissement secondaire des brames.....	<b>95</b>
III.2. Résultats thermiques.....	<b>96</b>
a) Evolution de la température en fonction temps de coulée.....	<b>96</b>
b) Température suivant la direction OZ.....	<b>96</b>
c) Température suivant la direction OY.....	<b>96</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>97</b>
<b>Conclusion générale et recommandations</b> .....	<b>98</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>99</b>
<b>Annexes.</b>	

## **Résumé :**

En coulée continue, la qualité des produits et la productivité de l'installation sont fortement dépendantes du réglage du refroidissement secondaire adopté.

Le problème de recherche concerne l'ACO1 (aciérie à oxygène numéro1) localisée à Arcelor-Mittal/Annaba. Il concerne les brames présentant des défauts de criques de rives.

La rupture à chaud, ou crique à chaud est un défaut majeur en solidification, qui conduit au rebut de nombreuses pièces dans différents procédés industriels tels que la solidification en lingotière, la coulée continue de brames.

Les défauts les plus répandus au niveau de la coulée continue (Arcelor-Mittal - Annaba) sont les criques de rives : Elles sont petites et fines, sur les coins, longueur environ 50 mm, profondeur 1 à 2 mm. Elles sont à cheval sur la face et sur la rive.

L'élaboration d'un modèle thermomécanique permettant de prédire les profils de température sur les différentes faces de la brame en fonction de son passage d'une zone de refroidissement à une autre de la machine de coulée continue et notamment sur les bords.

Cette étude confirme la nécessité de considérer les défauts de criques de rives vis-à-vis de leur présence au niveau des brames lesquelles sont laminées à chaud ; le produit final étant une bobine qui doit être saine.

## ملخص:

عملية الصب المستمر، جودة المنتج والإنتاجية للمصنع تعتمد اعتمادا كبيرا على وضع التبريد الثانوي المعتمدة مشكلة البحث تتعلق بمصنع للصلب الأكسجين رقم 1 التي تقع في أرسيلور ميتال / عنابة. وهو يغطي الألواح مع عيوب حافة الشقوق.

الكسر الساخن، أو الكراك الساخن هو عيب رئيسي في التصلب، الأمر الذي يؤدي إلى التخلص من العديد من الأجزاء في العمليات الصناعية المختلفة مثل التصلب في القالب، والصب المستمر من ألواح التي يتطلب تكيفها بالتبريد الثانوي لكل نوع من صب السائل.

العيوب الأكثر شيوعا في مستوى الصب المستمر أرسيلور ميتال / عنابة هي ضفاف الجداول: وهي صغيرة ورقيقة، على الزوايا، طول 50 ملم، 1-2 مم العمق.

تطوير نموذج الميكانيكية الحرارية للتنبؤ ملامح درجة الحرارة على وجوه مختلفة من لوح بوصفها وظيفة من مرور منطقة التبريد إلى آخر من آلة الصب المستمر وعلى وجه الخصوص عند الحواف.

تؤكد هذه الدراسة على ضرورة النظر في عيوب على حافة الألواح وجها لوجه وجودهم في ألواح الدرفلة على الساخن. المنتج النهائي كونه صفيحة وهي أن تكون صحية.

**Summary:**

Continuous casting, product quality and productivity of the plant are highly dependent on the setting of secondary cooling adopted.

The research problem concerns the ACO1 (oxygen steel plant number 1) located at Arcelor-Mittal / Annaba. It covers the slabs with defects of edge cracks.

The melt fracture, or hot crack is a major flaw in solidification, which leads to disposal of many parts in various industrial processes such as the solidification in the mold, the continuous casting of slabs.

The most common defects in continuous casting level Arcelor Mittal / Annaba are the banks of creeks: They are small and thin, on the corners, length 50 mm, 1-2 mm depth. They are riding on the face and on the shore.

The development of a thermomechanical model to predict the temperature profiles on the various faces of the slab as a function of the passage of a cooling zone to another of the continuous casting machine and in particular at the edges.

This study confirms the need to consider the coves of defects cracks vis-à-vis their presence in slabs, which are hot-rolled; the final product being a reel, which is to be healthy.

## Introduction générale

---

Dans l'industrie sidérurgique, la coulée continue est le procédé qui se situe entre l'élaboration de l'acier et le laminage. Ce procédé a pris, depuis 30 ans, une place de plus en plus importante dans la filière de production en raison des avantages par rapport à la technique traditionnelle de coulée en lingots : économie d'énergie et de main d'œuvre, meilleur rendement et amélioration de la qualité du produit.

Présentation du procédé de coulée continue d'aciers:

L'acier en fusion contenu dans une poche est coulé dans une lingotière sans fond maintenue à basse température par un système de refroidissement (à l'eau).

L'acier liquide, au contact avec la lingotière, se solidifie et une peau solide commence ainsi à se former. On parle de refroidissement primaire. Sous la lingotière sont disposés des rouleaux extracteurs qui font avancer le produit dans la machine à vitesse constante. Entre ces rouleaux, un deuxième système de refroidissement est constitué de jets d'eau (on parle alors de refroidissement secondaire).

Au fur et à mesure que le produit progresse dans la machine, l'épaisseur de la couche solidifiée augmente et inversement l'acier liquide tend à disparaître pour obtenir finalement un produit complètement solidifié en fin de procédé. Au cours de ce refroidissement, l'acier passe par trois états : liquide, pâteux et solide.

En fin de procédé, une fois sa solidification terminée, le produit est découpé en tronçons et envoyé vers un parc de stockage ou plus directement vers un four avant d'être laminé.

## Introduction générale

---

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du contrôle de la qualité des brames en acier A9 coulées en continu.

En effet, au cours de l'obtention de la brame, à la sortie de la lingotière jusqu'à la zone d'oxycoupage, apparaît un défaut de criques de rives qui a des incidences néfastes sur le produit fini qui est, dans notre cas, la brame.

Le contrôle à chaud des produits coulés en continu a une importance primordiale en raison de la nécessité de faire leur tri au niveau de la chaîne de la production, de mieux contrôler le processus de solidification .

L'objectif de ce travail consiste à la détermination des facteurs qui favorisent l'apparition ce défaut.

**I. Revue bibliographique :**

La rupture à chaud, ou crique à chaud est un défaut majeur en solidification, qui conduit au rebut de nombreuses pièces dans différents procédés industriels tels que la solidification en lingotière, la coulée continue de brames, le soudage, les procédés de refusions d'électrodes. Elle correspond à l'ouverture de criques en fond de zone pâteuse, c'est-à-dire dans les régions à haute fraction de solide (typiquement 0.9 et au-delà), lorsque ces régions sont soumises à des déformations favorisant la mise en traction des films liquides résiduels.

L'ouverture de ces criques donne lieu soit à des filets ségrévés, par appel de liquide fortement chargé en éléments d'alliage, soit carrément à des fissures au sein du produit solidifié lorsque la pression interstitielle de liquide est insuffisante pour compenser leur ouverture.

Le phénomène est complexe car les origines de ces déformations sont multiples et le plus souvent combinées. En ce qui concerne les aciers, la fissuration à chaud résulte de diverses origines.

## II. Généralité sur les aciers :

**II.1. Définition :** 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. [1]

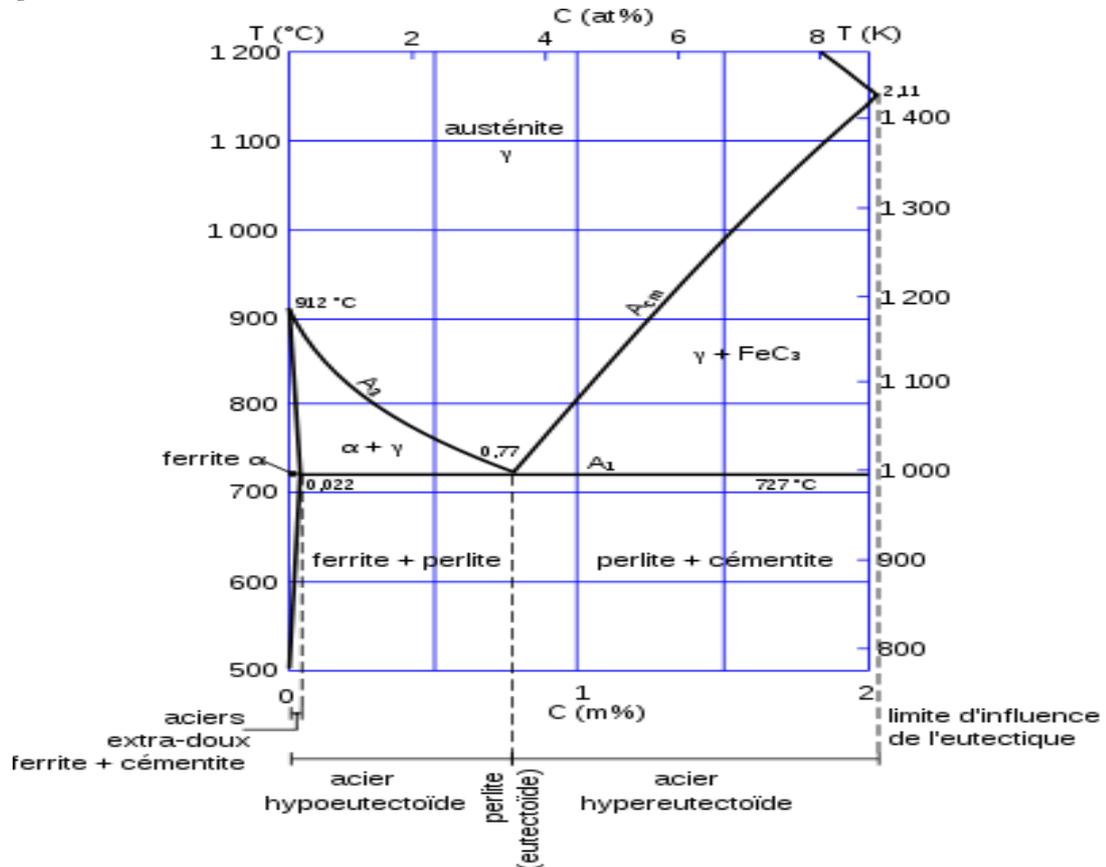


Figure 1 : Diagramme fer - carbone partie des aciers.[2]

Selon le diagramme fer-carbone, à l'état solide, c.-à-d. au-dessous de palier eutectoïde à température égale 727°C.[ 2]

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent :

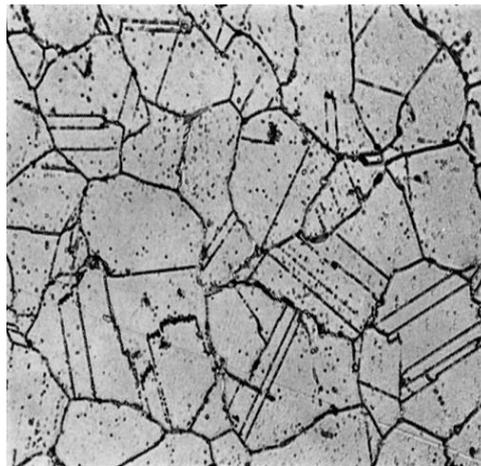
- **Les aciers hypoeutectoïdes :** (de 0,008 à 0,77 % de carbone) qui sont les plus moins durs.
- **Les aciers eutectoïdes** (0,77 % de carbone).
- **Les aciers hypereutectoïdes** (de 0,77 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs. [2]

## II.2. Les différentes phases de l'acier :

Austénite, bainite, cémentite, ferrite, martensite et perlite.

### a) Austénite :

L'austénite (fer  $\gamma$ ) est une phase du fer, stable entre 910°C et 1394°C. Elle a une structure cristallographique cubique à faces centrées. Cette structure permet une grande solubilité du carbone (jusqu'à 2,1% massique à 1 147°C). L'austénite est amagnétique.[3]

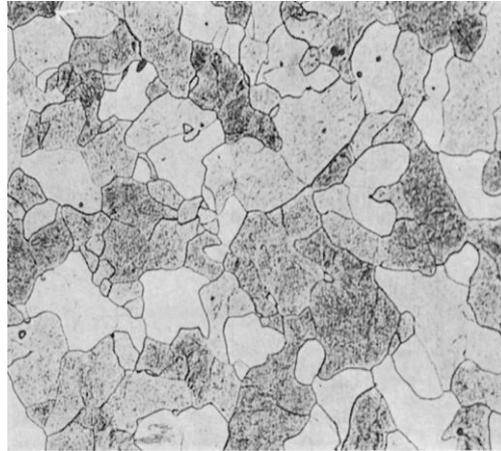


**Figure 2 : Structure austénitique.**  
Acier à 0,12 % C 1,5 % Mn - 1,5 % Si  
(Grossissement : 900) [5]

### b) Ferrite :

La ferrite (fer  $\alpha$ ) est une phase de l'acier, sous la forme d'une structure cubique centrée. Cette phase est observable lorsque la température est inférieure à 912 °C ou supérieure à 1394 °C si la teneur en carbone est très faible. [3]

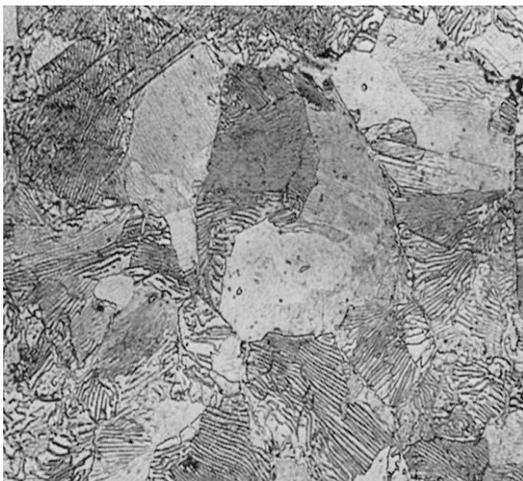
Le passage de la structure cubique à faces centrées (austénite) du fer à la structure cubique centrée (ferrite), lorsque la température descend en dessous de  $912^{\circ}\text{C}$ , résulte de l'apparition progressive du ferromagnétisme dans la structure cubique centré. [3]



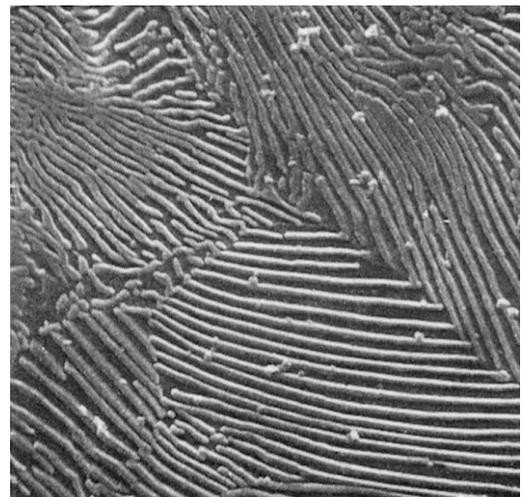
**Figure 3 : Structure ferritique.**  
**Grossissement : 180 [4]**

**c) Perlite :**

La perlite est un constituant biphasé de l'acier. C'est un agrégat formé de 89 % de ferrite et 11 % de cémentite. Sa structure est généralement formée de lamelles alternées de cémentite et de ferrite. La germination se fait aux joints de grain de la phase mère austénitique. [3]



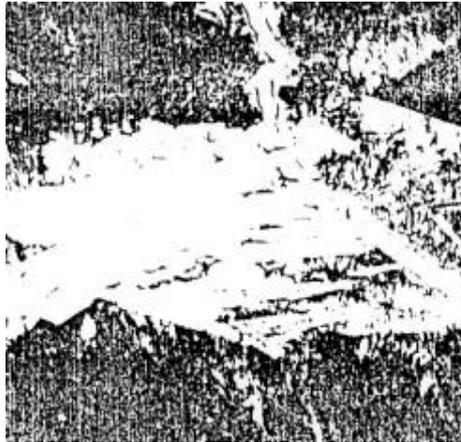
**Figure 4 : Structure perlitique.**  
**Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si**  
**Grossissement : 900 [4]**



**Figure 5 : Structure perlite lamellaire.**  
**Lamelles claires :  $\text{Fe}_3\text{C}$  et Fond sombre : ferrite**  
**Grossissement : 3 500 [4]**

**d) Cémentite :**

La cémentite (ou carbure de fer) est un composé chimique dont la formule est  $Fe_3C$  dont la structure est orthorhombique. Elle contient 6,67% de C. C'est un composé très dur (dureté Vickers  $HV=700$  à  $800$ ) mais très fragile  $A=0\%$ ,  $R_m=700N/mm^2$ . Elle forme avec la ferrite un constituant appelé perlite. [ 3]

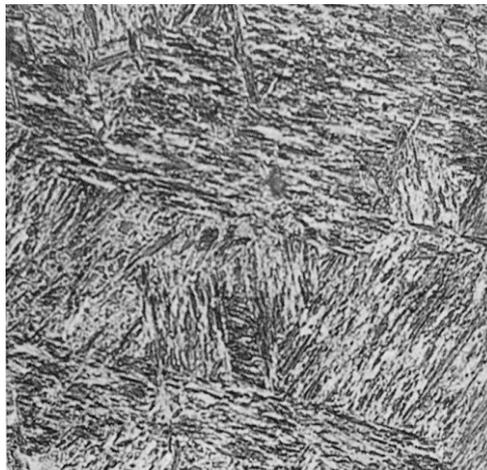


**Figure 6 : Structure cémentite.[4]**

**e) Martensite :**

La martensite (fer  $\alpha'$ ) est une phase métastable issue de la transformation sans diffusion de l'austénite en dessous d'une température martensitique.

C'est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le fer  $\alpha$ , de même composition que l'austénite initiale.[3]



**Figure 7 : Structure martensitique.  
Acier à 0,32 % C - 4,12 % Ni - 1,37 % Cr  
Grossissement : 900 [4]**

**f) Bainite :**

Cette phase se présente sous la forme d'un agrégat de plaquettes (ou lattes) de ferrite et de particules de cémentite. C'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite) mais possède une structure particulièrement fine, souvent en aiguilles, ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle est dure et assez facile à usiner. [3]

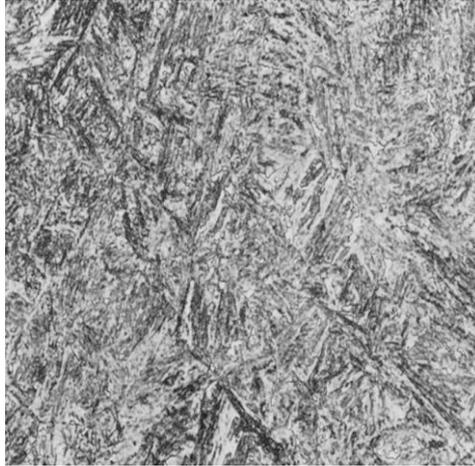
La bainite peut se présenter sous deux formes suivant la température à laquelle elle est formée :

**f.1) Bainite supérieure :** La bainite supérieure présente une structure sous forme de fines plaquettes de ferrite d'une épaisseur de 0,2 micromètres et d'une dizaine de micromètres de longueur qui croissent en paquets appelés lames. Dans chacune de ces lames, les plaquettes sont parallèles et ont la même orientation cristallographique, chacune ayant un plan bien défini. Une plaquette d'une lame est souvent appelée sous-unité de bainite.[ 3]



**Figure 8 : Structure bainite supérieure  
acier 0,5%C – 0,8%Mn  
(Transformation isotherme à 500°C). [4]**

**f.2) Bainite inférieure :** La bainite inférieure se forme juste au-dessus de  $M_s$ . Les lattes sont plus fines et les carbures sont dispersés dans les lattes. [ 3]



**Figure 9 : Structure Bainite inférieure.**  
Acier à 0,35 % C - 4,1 % Ni - 1,6 % Cr - 0,4 % Mo  
Grossissement : 900 [4]

**III. Elaboration e l'acier :****III.1. Principes généraux : [ 6]**

Afin d'optimiser le processus globale, l'élaboration de l'acier comprend deux étapes successives :

Une première étape conduit à l'obtention d'acier brut, encore appelé acier sauvage. Elle est pratiquée :

Soit en convertisseur, à partir de la fonte liquide dans les aciéries à l'oxygène.

Soit au four électrique, à partir de ferrailles dans les aciéries électriques.

Une deuxième étape a pour but d'affiner l'acier brut et d'atteindre la composition et la qualité finales désirées. Elle est pratiquée dans une station d'affinage. [6]

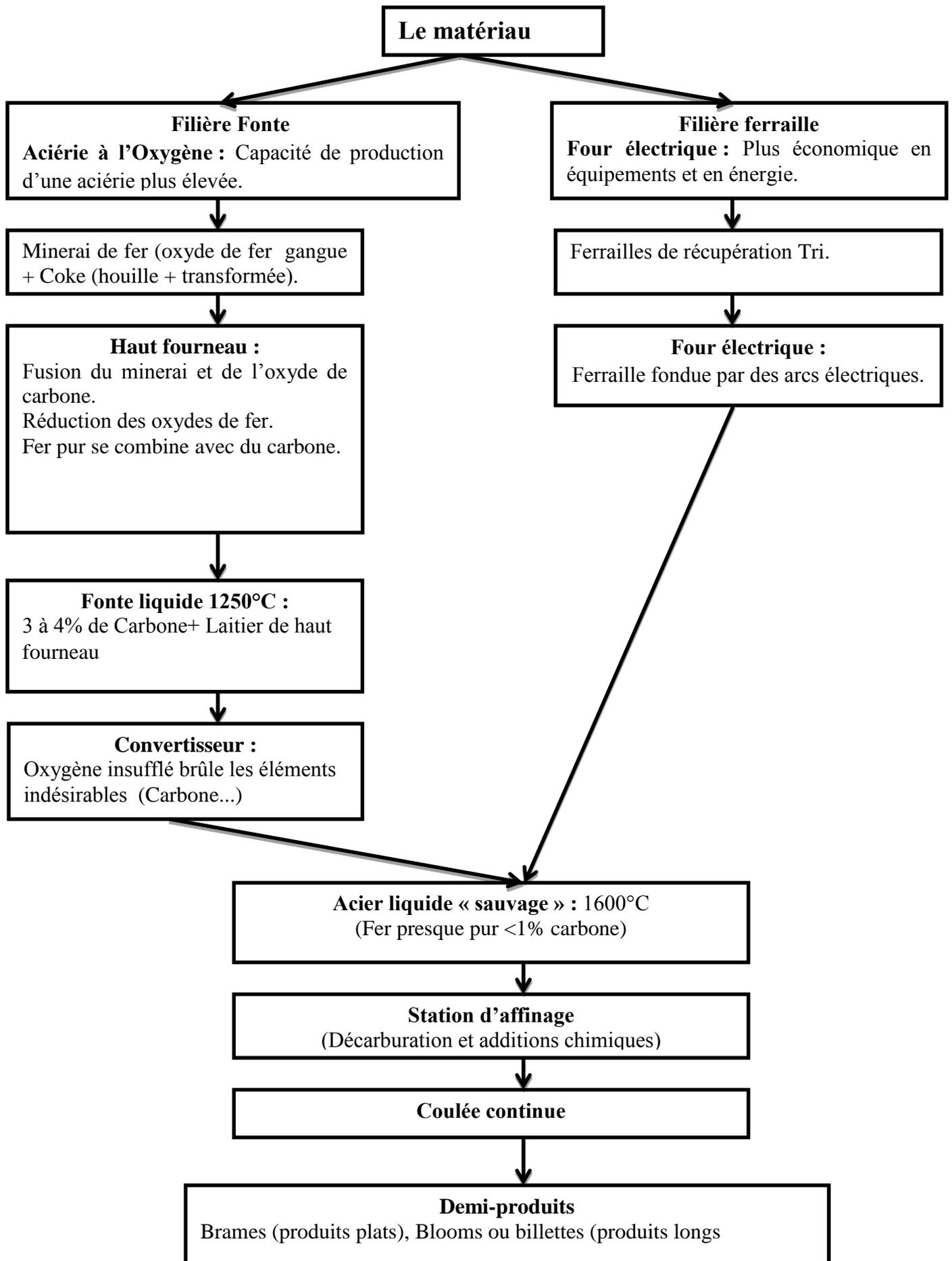
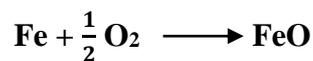
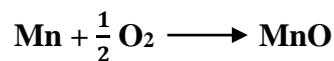
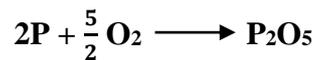
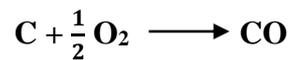
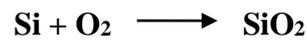


Figure 10 : Processus globale de l'élaboration de l'acier. [1]

**III.1.1. Chimie de processus primaires : [6]**

Le passage du bain liquide initial à l'acier final nécessite une diminution des teneurs de tous les éléments par oxydation partielle selon les réactions suivantes qui sont toutes exothermiques :



**a) Le carbone :** S'élimine sous forme gazeuse et turbulence créée, favorise l'élimination de l'hydrogène et de l'azote présenté dans le métal. [6]

**b) La silice (SiO<sub>2</sub>) :** formée se combine aux oxydes basiques MnO, FeO et à l'oxyde de calcium

( CaO) introduit en donnant une scorie qui monte à la surface du bain. [6]

**c) L'oxyde de phosphore :** est réductible par le carbone mais la présence de CaO permet la formation de phosphate de calcium moins réductible. Une bonne déphosphoration exige donc un milieu très oxydant et très basique. [6]

**d) Désoxydation :**

La désoxydation et l'opération qui affecte le plus profondément les qualités du métal (densité inclusionnaire, composition de métal, etc.) et donc ses caractéristiques de mise en œuvre (usinabilités, formabilité, résistance à la fatigue, à la rupture et à la corrosion, etc.). [6]

La désoxydation s'opère :

- Soit par traitement sous vide qui provoque le déplacement de l'équilibre global :



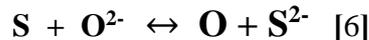
- Soit par l'introduction dans le métal liquide de désoxydants comme le silicium ou aluminium. [6]

Dans le premier cas, la désoxydation se fait se forme gazeuse. Et dans le second cas, elle donne naissance à des inclusions de types oxydes qui s'éliminent au moins partiellement en passant dans le laitier. [6]

#### e) Désulfuration :

La demande croissante d'aciers à très faible teneur en carbone en soufre (pouvant aller jusqu'à 0,001%) a conduit à parfaire l'opération de désulfuration. [6]

Elle met en œuvre des échanges entre le métal et un laitier basique. La réaction globale de désulfuration s'écrit :



Elle montre que, pour le laitier de capacité en sulfure déterminée, la désulfuration de l'acier est d'autant meilleure que la désoxydation de l'acier liquide est plus poussée. [6]

On peut également injecter du calcium pourrait dans l'acier liquide sous forme de siliciure. L'action du calcium pourrait être due au fort brassage provoqué par sa vaporisation. Le calcium permet également de contrôler la morphologie des inclusions de sulfures présentes dans le produit final. [6]

### III.2. Processus primaire :

#### III.2.1. Désulfuration en poche :

A la sortie du haut fourneau, la fonte subit une première désulfuration par la chaux, le carbure de calcium ou magnésium introduits dans la poche – tonneau qui sert à son transfert. Bien que les oxydes de calcium et de magnésium soient plus stables que les sulfures correspondants. Les teneurs en soufre peuvent atteindre 0,01 à 0,02 %. La scorie est éliminée par un décrassage soigné afin d'éviter au soufre d'être réincorporé dans le métal dans l'étape suivante. [6]

#### III.2.2.filière fonte (Acier à oxygène) :

Il est obtenu à partir de la fonte liquide dans un convertisseur. Le passage de la fonte à l'acier s'effectue grâce à l'insufflation d'oxygène pur pour éliminer l'excédent de carbone et d'impuretés par brûlage. Ci-contre le schéma de principe de l'élaboration. [7]



Figure 11 : Convertisseur à oxygène. [8]

### III.2.2.1. Principe d'opération :

La transformation de la fonte en acier, appelée conversion, se déroule dans un réacteur dans lequel est insufflé de l'oxygène pur à température 1600°C. Le volume du convertisseur (figure 11) est 7 à 12 fois supérieur au volume de métal car au cours de l'élaboration on génère une «émulsion» fer, carbone, oxygène qui remplit tout le convertisseur (cela permet aussi de confiner les éventuelles projections de métal lors du traitement). [3]

- Différents types d'injections sont pratiqués :
  - Soufflage par le haut grâce à des lances refroidies à l'eau (procédé LD) ;
  - Soufflage par le bas par l'intermédiaire de tuyères comprenant deux tubes coaxiaux (Procédé LWS) ;
  - Soufflage mixte (procédé LBE, LET, K-BOP...).
  - L'injection d'oxygène permet d'éliminer le carbone, le silicium, le manganèse, le phosphore et le soufre se trouvant initialement dans la fonte par formation d'oxydes du type CO, SiO<sub>2</sub>, MnO. [3]

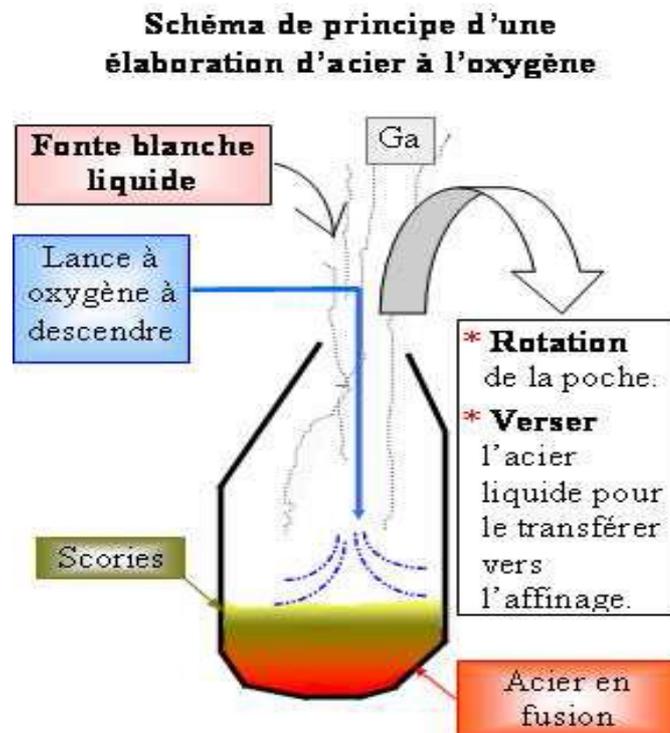


Figure 12 : Principe de l'élaboration à oxygène. [7]

### III.2.3. filière électrique (Acier électrique) :

Il est surtout obtenu à partir de ferrailles refondues dans un four électrique. La fusion est obtenue par des arcs électriques. L'opération comporte trois phases : fusion, oxydation, décarburage du bain ; puis coulée de l'acier. [7]

#### III.2.3.1. Principe d'opération :

Les électrodes produisent des arcs électriques à l'intérieur du four, ce qui engendre la fusion de la matière. Récupération du laitier et des résidus.

A la sortie du four, on obtient de l'acier sauvage liquide qui est versé dans une poche pour être acheminé vers l'aciérie. [3]

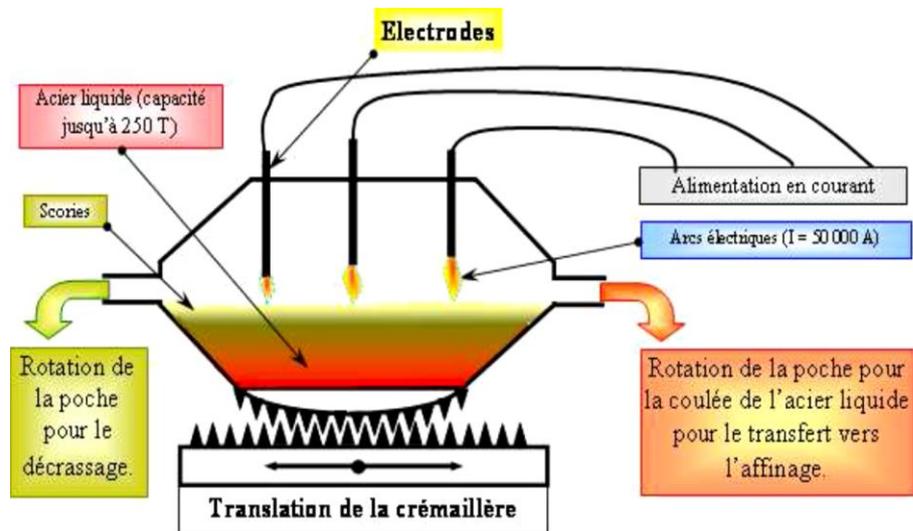


Figure 13 : Principe d'élaboration dans un four électrique.[7]

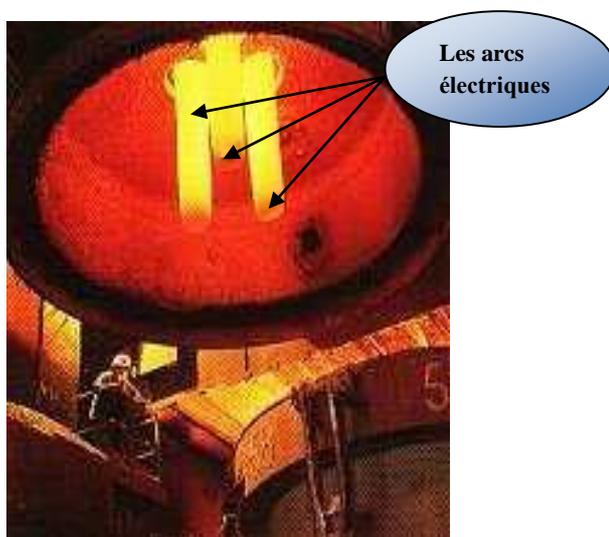


Figure 14 : Les arcs électriques. [7]



Figure 15 : Four électrique dans une aciérie.[11]

### III.3. Processus secondaire :

#### II.3.1. Station d'affinage :

Les opérations d'affinage (décarburation) et additions chimiques ont lieu dans un récipient sous vide. L'acier est mis en rotation entre poche et récipient à l'aide de l'argon. L'oxygène permet d'activer la décarburation et d'éliminer le carbone restant sous forme gazeuse (CO<sub>2</sub>). Lors de la mise à nuance, des composants chimiques sont ajoutés tels que le silicium, le nickel, le manganèse ou le chrome. [3]

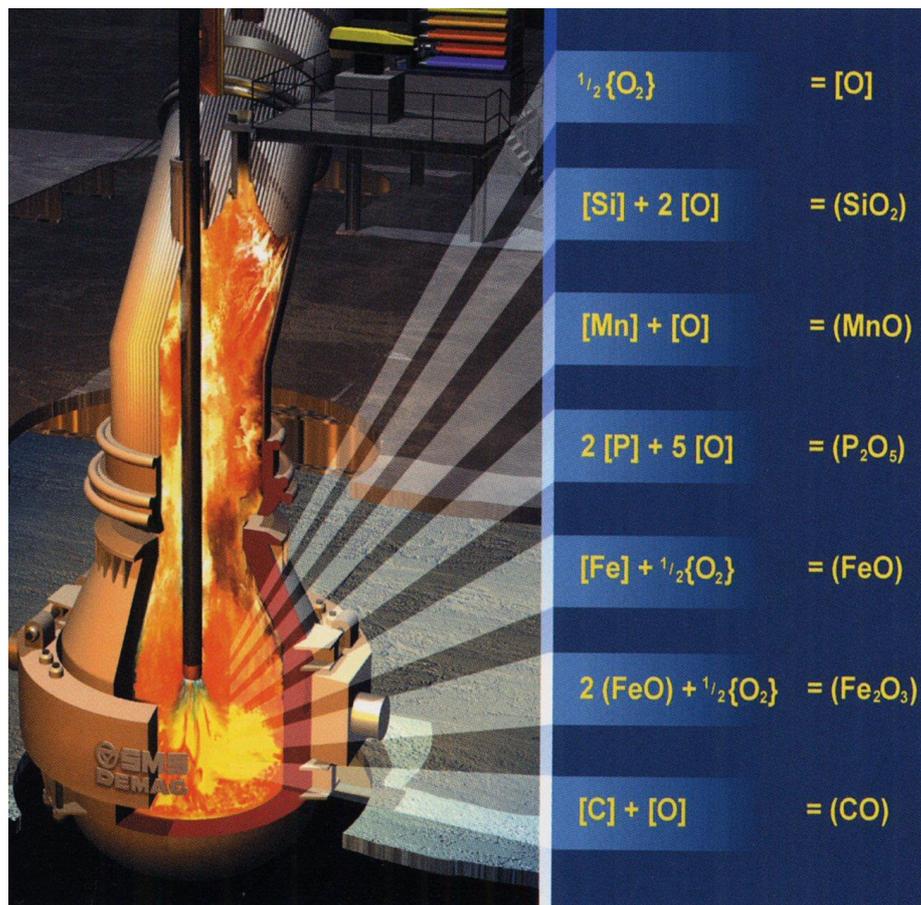


Figure 16 : Principe et réactions d'affinage. [8]

**IV. 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. [1]

Généralement l'acier à sa sortie du four ou du convertisseur est déversé dans une poche, le plus souvent on utilise les poches à quenouille, qui représente un réservoir conique en tôle épaisse revêtue intérieurement de briques réfractaires. La quenouille est destinée à soulever le tampon du siège (ouverture dans son fond par laquelle s'écoule l'acier de la poche). [1]

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. [1]

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. [1]

**IV.1. Coulée en lingotières :**

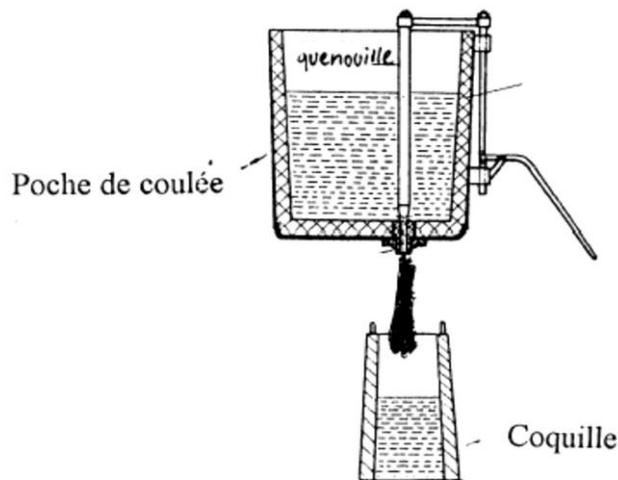
Les lingotières sont en fonte et peuvent avoir des formes et sections variables tels que carrée, rectangulaire, hexagonale etc. Le poids du lingot varie de 100 kg à 100 tonnes, mais les plus répandus sont les lingots de 6 à 8 tonnes. [1]

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. [1]

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

**a) La coulée en chute :**

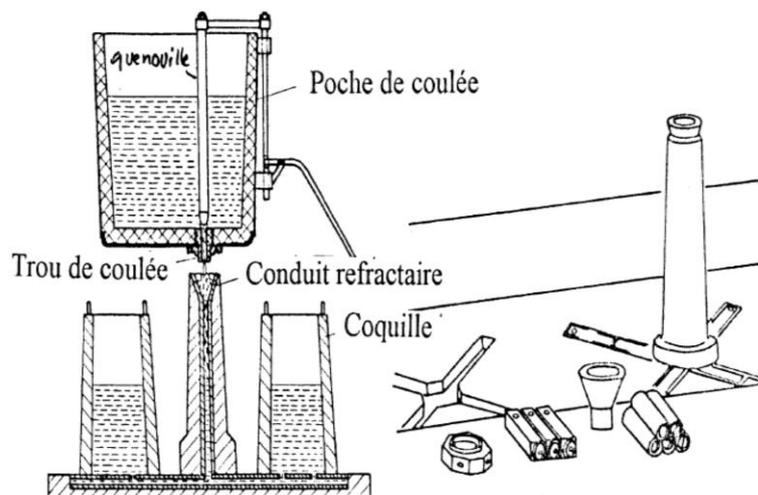
Le métal est directement versé dans la lingotière. Au début pour éviter les projections du métal sur les parois, l'acier est coulé lentement, une fois la couche amortissant le métal liquide est formée, on augmente la vitesse de coulée au maximum. A la fin lorsque le niveau du métal s'approche de la masselotte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



**Figure 17 : Principe de la coulée en chute. [1]**

**b) La coulée en source :**

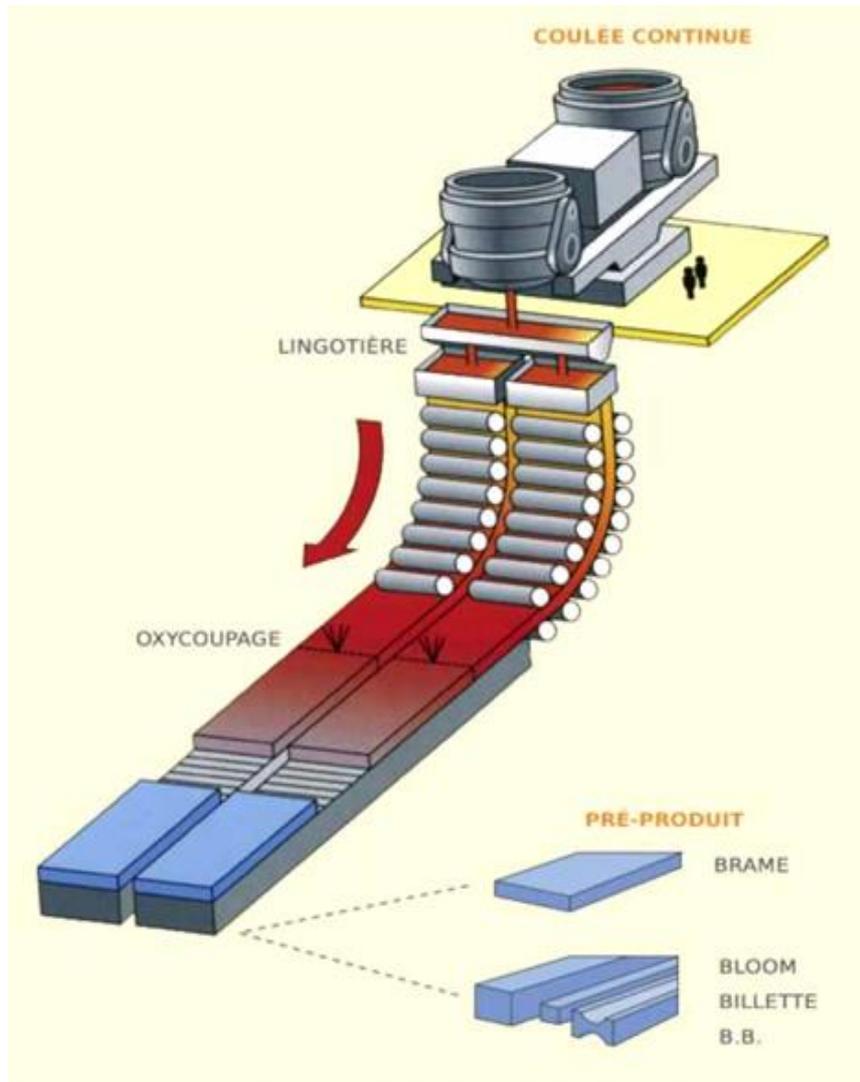
L'acier est versé dans un conduit vertical qui par l'intermédiaire d'un canal horizontal en matériaux réfractaires vient se raccorder aux moules principaux (lingotières). [1]



**Figure 18 : Principe de la coulée en source. [1]**

**IV.2. La coulée continue :**

La coulée continue est un procédé de solidification du métal en fusion. Il consiste à remplir de métal liquide dans une lingotière sans fond, puis à extraire lentement le produit du moule alors que celui-ci est, dans certains cas, encore liquide à cœur. L'extraction du produit solidifié est compensée par un apport de métal liquide chaud : le métal liquide entre d'un côté du moule pendant que de l'autre coté en sort un produit solide. [3]



**Figure 19 : Schéma du principe de la coulée continue. [3]**

**IV.2.1. Ligne de la coulée continue :** Une ligne de coulée continue comprend généralement :

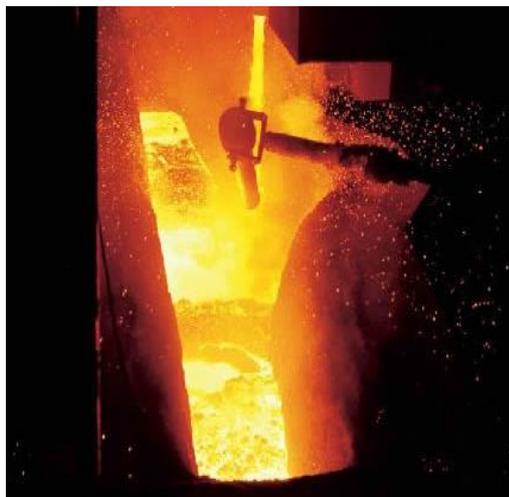
**a) La poche de coulée :**

La poche de coulée est de capacité variable, et peut contenir environ 150 tonnes de métal en fusion. Elle est montée sur une tourelle et du permet l'alimentation répartiteur. On donne une illustration de poche de coulée en figure (22). [10]



**Figure 20 : Poche de coulée alimentant un répartiteur. [8]**

**b) Le répartiteur :** Le répartiteur (ou régulateur de débit) permet d'envoyer l'acier liquide vers une ou plusieurs lingotière à un débit contrôlé, et sans interruption. Lors d'un changement de poche, il joue le rôle de réservoir-tampon de manière à assurer la continuité de l'alimentation de la (des) lingotière(s). On voit en figure (6) un répartiteur rempli d'acier liquide. [10]



**Figure 21 : Répartiteur. [10]**

**c) La busette :**

La busette est un long tube terminé par deux ou trois ouïes, situé entre le répartiteur et la lingotière. Sa partie inférieure est submergée dans l'acier liquide contenu dans la lingotière.

Elle permet l'injection d'acier liquide dans la lingotière en continu, en le protégeant du contact avec l'air pour éviter l'oxydation. Sa durée de vie est très courte, on la change environ toutes les cinq coulées. Son diamètre intérieur est typiquement 70mm. [10]

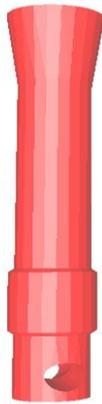


Figure 22 : Busette à fond conique. [10]

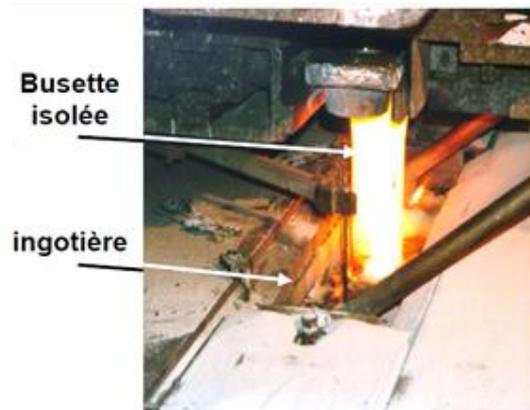


Figure 23 : Busette immergées isolées. [1]

**d) La lingotière :**

C'est dans la lingotière qu'a lieu le refroidissement primaire. C'est une sorte de moule sans fond en cuivre, maintenu à basse température par un système de refroidissement, en général hydraulique.

La figure (26) montre les différents éléments qui la composent : les caissons hydrauliques (Un pour chaque petite face, et un pour chaque grande face) et les moules en cuivre (petites faces, grandes faces). Les caissons hydrauliques servent à refroidir les moules en cuivre, qui eux-mêmes servent à solidifier l'acier en fusion provenant du répartiteur. [10]

Pour éviter que l'acier ne reste collé aux parois des moules en cuivre lorsqu'il se solidifie, la lingotière est animée d'un lent mouvement d'oscillation vertical. [10]

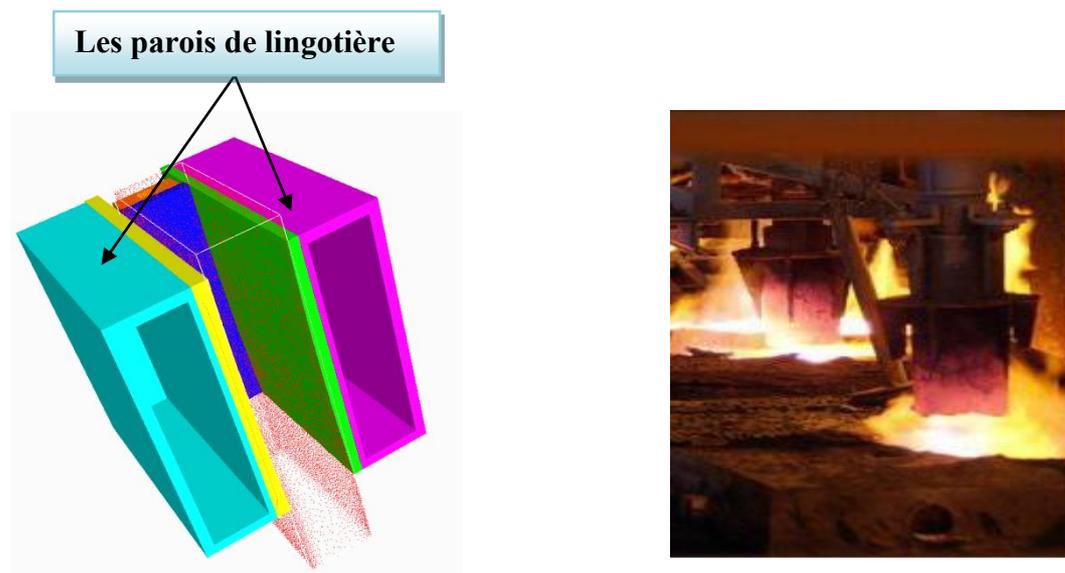


Figure 24 : Lingotière. [10]

**e) Le refroidissement secondaire :**

C'est dans cette partie de la machine qu'a lieu la solidification du produit. Elle est constituée de rouleaux (de soutien et de guidage), entre lesquels sont disposés des systèmes de jet d'eau aspergeant le produit pour assurer le refroidissement secondaire. [9]

La figure 28 montre une partie de la zone de refroidissement secondaire pour une machine permettant la coulée simultanée de deux brames. [9]



Figure 25 : Refroidissement secondaire simultané de deux brames. [10]

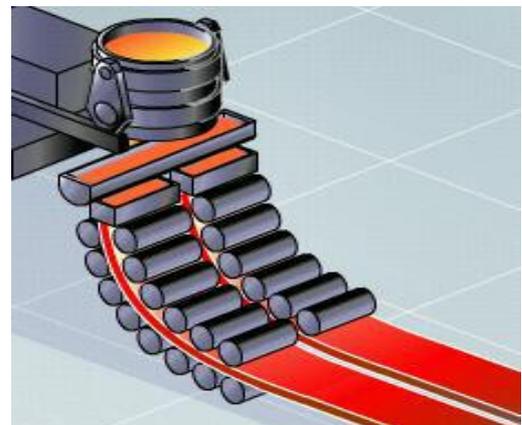
**f) Le mannequin :**

Le mannequin sert à amorcer le procédé : il sert de fond provisoire à la lingotière et permet de "tirer" le début du produit jusqu'à l'endroit où il sera découpé.[10]



**Figure 26 : Le mannequin.** [10]

**g) Les 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, exerce une pression constante et provoque l'entraînement de l'acier solidifié. [1]



**Figure 27 : Rouleaux d'extraction.** [12]

**h) Un système de cisailage (oxycoupage) :** Permettant de couper les brames 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. [1]



**Figure 28 : Exemple d'oxycoupage. [1]**

## IV.3. Produits issu de la coulée continue :

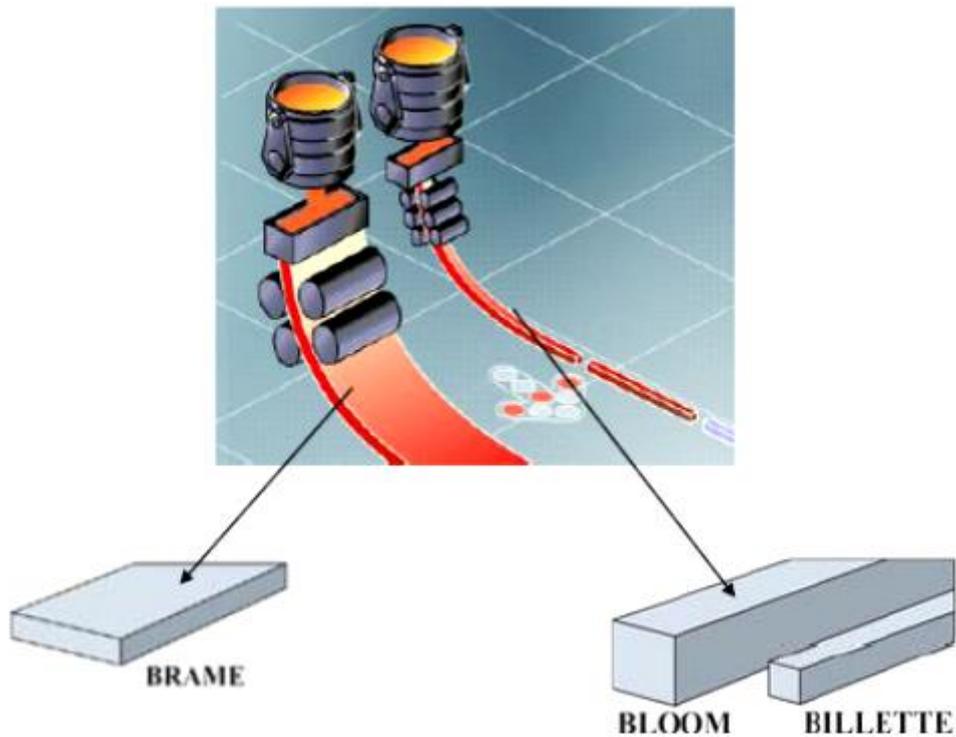


Figure 29 : Produits de la coulée continue. [12]

a) La brame :

Est un demi-produit sidérurgique. C'est la matière première utilisée pour la fabrication des tôles ou des plaques sur les trains de laminoirs. [13]

La brame, est une masse d'acier de forme parallélépipédique et de fortes dimensions : d'environ 700 à 2 500 mm de largeur, de 5 à 15 m de long et de 150 à 350 mm d'épaisseur. Son poids peut atteindre plusieurs dizaines de tonnes. [13]

Vers le milieu des années 1980, un développement de la coulée continue, avec la mise au point d'une lingotière de forme complexe, a permis l'apparition des brames minces, qui font de 25 à 80 mm d'épais. [13]

Les brames sont obtenues, soit directement à la coulée continue, soit après réduction d'un lingot dans un train de laminoirs dégrossisseur. Les trains de laminoirs dégrossisseurs disparaissent aujourd'hui au profit des coulées continues. [13]



**Figure 30 : Les brames. [13]**

**b)La billette :**

Est un demi-produit de l'industrie métallurgique, notamment de la sidérurgie. Son laminage ou extrusion permet d'obtenir des produits longs métalliques de faibles section (fil métalliques, barres, profilés...). [13]

La billette est une masse de métal ressemblant à une grande barre. Sa section est généralement carrée, parfois rectangulaire ou ronde, de dimension supérieure ou égale à 50 mm et inférieure ou égale à 120 mm. Les produits de section plus grande sont des blooms. Sa longueur varie de 5 à 12 m de long. [13]



**Figure 31 : Les billettes en acier. [13]**

**c) Un bloom :**

Est un demi-produit sidérurgique. C'est une barre d'acier de section carrée (exceptionnellement cylindrique ou rectangulaire) supérieure à un carré de 120 mm de côté (160 mm chez certains sidérurgistes, de 310 mm à 600 mm en section cylindrique chez ESB), de longueur variable, destinée à être engagée dans des trains de laminoirs. Cette barre est laminée pour obtenir des produits longs de section importante : poutrelles, rails...

Initialement coulé en lingot, puis laminé dans un blooming, l'acier produit prenait le nom de bloom. Aujourd'hui où les coulées continues sont généralisées, le cycle lingot/blooming a disparu et l'acier liquide est directement coulé en blooms. [13]

Après fabrication, le bloom est stocké en l'état ou relaminé dans la foulée sur un train continu à chaud.

Pour le laminage des fils machines, barres marchandes, profilés ou petites poutrelles, on parle de billettes, qui sont des barres de plus petite section. [13]

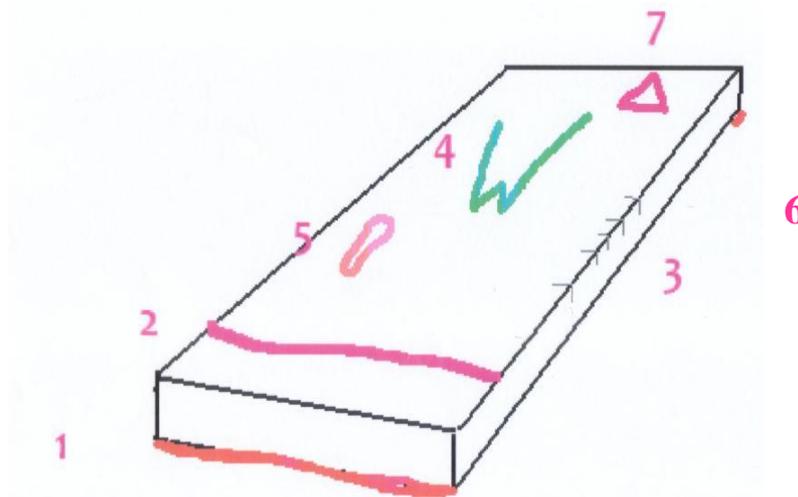


**Figure 33 : Les blooms. [13]**

#### IV.5. Les défauts de la coulée continue des brames : [15]

Les défauts que l'on peut rencontrer dans la coulée continue des brames sont :

1. Des bavures inférieures en largeur, aux extrémités, dues au mauvais réglage des brûleurs à la coulée continue.
2. Des reprises de coulées dues à un arrêt intempestif de la coulée continue.
3. Des criques de rives (très fines et difficiles à voir).
4. Des criques en long.
5. Des pailles.
6. Une surface très riche en inclusions.
7. Des traces de collage en lingotières.

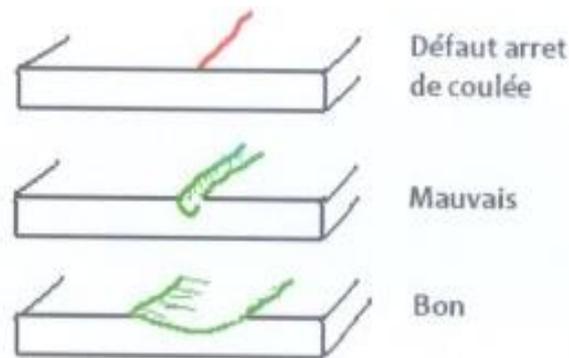


**Figure 34 : La distribution des défauts de la coulée continue sur la brame. [15]**

a) **Les bavures :** Comme à la sortie de la coulée continue on coupe à chaud. Le réglage de la flamme d'oxycoupage n'est pas facile. Aussi le passage un coup de chalumeau sur les bords de toutes les brames. Cette bavure ne risque donc pas de se retrouver sur la table du traine et être relaminée avec la pièce et donc de donner un défaut réimprimé dans la tôle. Le personnel de la coulée continue a trop tendance à assurer la coupe pour ne pas devoir arrêter la coulée et donc de négliger la qualité de la coupe. [15]

**b) Les reprises de coulée :** Sont très visibles. Elles forment une barre hétérogène (acier et scorie) légèrement incurvée tout en travers de la brame et perpendiculairement aux bords. Il faut nettoyer cette zone en profondeur car le défaut est profond. Il est rare de mener ce travail à bien car il faut en plus respecter un angle de sortie pas trop raide éviter les replis au laminage. [15]

Généralement la coulée continue a déjà déclassé cette zone et donc elle n'est pas affectée à une commande client. La coulée continue déclassé 100 cm. C'est ce que son bac à mitrilles accepte. Ce défaut est rare si la coulée continue est bien conduite. [15]



**Figure 35 : L'apparition des reprises de coulée sur la brame. [15]**

**c) Les criques de rives :** Elles sont petites et fines, sur les coins, longueur environ 50 mm, profondeur 1 à 2 mm. Elles sont à cheval sur la face et sur la rive. Elles sont assez difficiles à voir, il faut de l'expérience. Il faut donc nettoyer les bords au chalumeau. Ce défaut est très difficile à dominer du côté de la coulée continue. Certains aciers, certaines machines de coulée continue, ont cette propension d'en faire beaucoup. Elles sont évidemment très dangereuses pour les trains à bandes. [15]

Car ces derniers ne coupent pas en rives et donc on obtient après laminage des rives déchirées pour les tôles moyenne ;

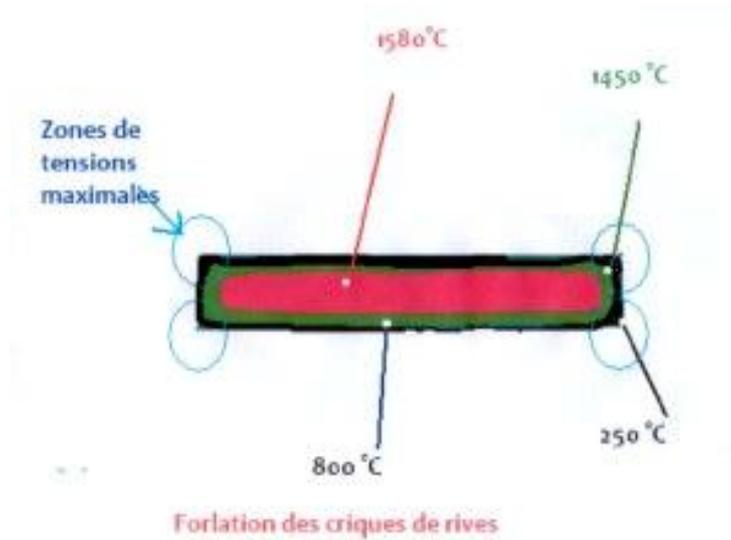


Figure 36 : Les différentes zones de formation des criques de rives. [15]

e) **Les criques en long** : Elles sont généralement très visibles. Assez grosses, soit souvent en forme de « M » d'une longueur d'environ 1000 mm et d'une profondeur de 5 à 10 mm. Elles doivent être totalement enlevées afin d'obtenir un produit sain, sans quoi la tôle sera à rebutée. [15]

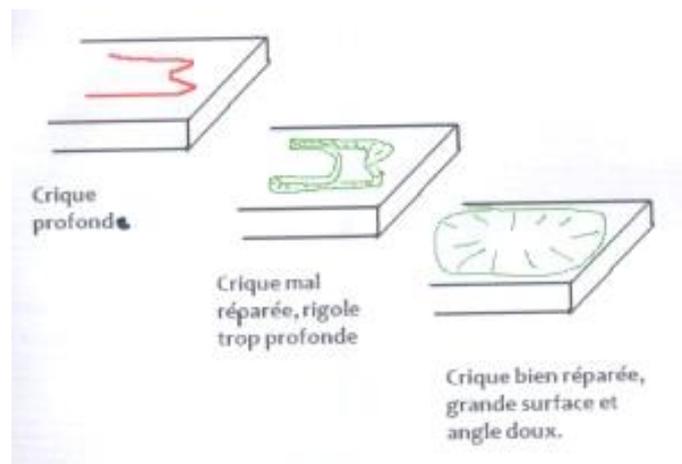


Figure 37 : L'apparition des criques en long sur brames. [15]

**f) les pailles :** En coulée continue, les pailles sont rares. Elles se distinguent des criques par le fait qu'elles ont un contour fermé. Généralement petites, de forme longue et étroite. Environ 50 mm de long. Elles doivent être parfaitement enlevées. Caus de rebus certain. [15]

**g) Une surface très riche en inclusions :** lors du test de surface, on passe le chalumeau en forme de croix sur la brame. On regarde la flamme. Si des lignes apparaissent dans l'acier fondu qui précède le chalumeau, c'est que l'acier est sale et donc plein d'inclusion non métalliques. Il faut laver toute la surface de la brame sur une petite épaisseur d'environ 5 mm. Evidemment la destinée de la tôle joue un rôle dans ce cas. Pour de grosses tôles de plus 100mm ce défaut est acceptable mais pour les fines l'utilisateur risque d'avoir des problèmes de soudure. [15]

**h) Les traces de collage en lingotières :** une reprise de coulée après une amorce de percée à la coulée continue, soit un début de collage. La brame à déclasser. Elle se présente sous forme d'une grosse paille triangulaire d'une grandeur variable mais généralement avec une longueur du côté du triangle d'environ 300mm.

#### IV.6. Aspects fondamentaux de la coulée continue :

La coulée continue est avant tout un échange thermique : de grandes quantités de chaleur sont évacuées sur un temps court. Le procédé est limité par l'échange thermique entre la peau et ce qui l'entoure. Le refroidissement s'effectue en trois étapes :

- Refroidissement à l'eau de la lingotière de cuivre, le temps que le produit ait une peau solide assez résistante pour qu'elle puisse contenir l'acier sans trop se déformer (longueur  $\approx 1$  m) ;
- Refroidissement secondaire, par arrosage à l'eau (longueurs typiques  $\approx 5$  m) ;
- Refroidissement à l'air en fin de machine (longueurs typiques  $\approx 10$  m et plus). [14]

##### IV.6.1. Aspects hydrodynamiques :

Les mouvements d'acier liquide en répartiteur ou en lingotière, provoqués par l'arrivée de jets d'aciers dans des espaces confinés ou provoqués volontairement par brassage (gaz ou électromagnétique), véhiculent la surchauffe et les inclusions non métalliques. [14]

Ces mouvements sont orientés pour :

- Homogénéiser la température du liquide.
- Favoriser la flottation des inclusions non métalliques dont la densité est plus faible que l'acier.
- Aider à une meilleure répartition des ségrégations en agissant pendant la solidification.
- aider à évacuer la surchauffe de l'acier en augmentant le coefficient de convection au front de solidification. [14]

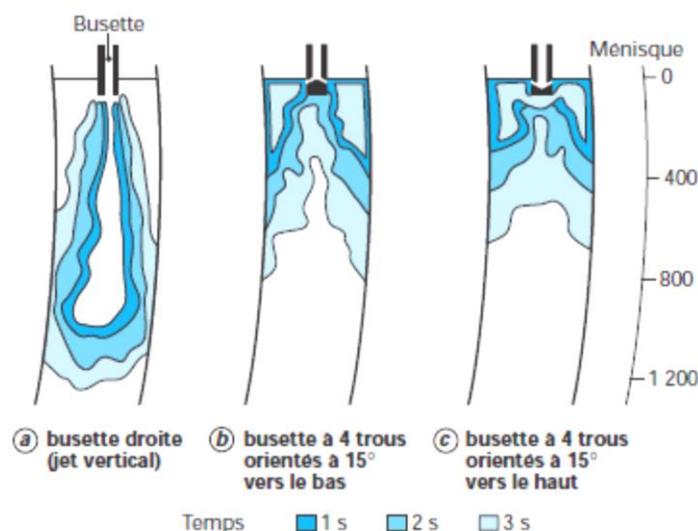


Figure 38 : Répartition du liquide en sortie de 3 types de busettes immergées. [14]

IV.6.2. Echanges thermiques :

Le procédé de coulée continue consiste à fabriquer, à partir d'acier liquide, un sac solide (passage en lingotière), à solidifier ce qu'il contient jusqu'à cœur (refroidissement secondaire eau et air) et à le refroidir jusqu'à une température fixée (refroidissement final). Cela, en dynamique. Chacun des éléments de la machine est caractérisé du point de vue thermique dans cet article. [14]

La maîtrise des transferts de chaleur dans la lingotière et en refroidissement secondaire est essentielle pour l'obtention de produits coulés sans défauts.

La figure 39 décrit les différentes résistances thermiques rencontrées par l'acier pendant sa solidification.

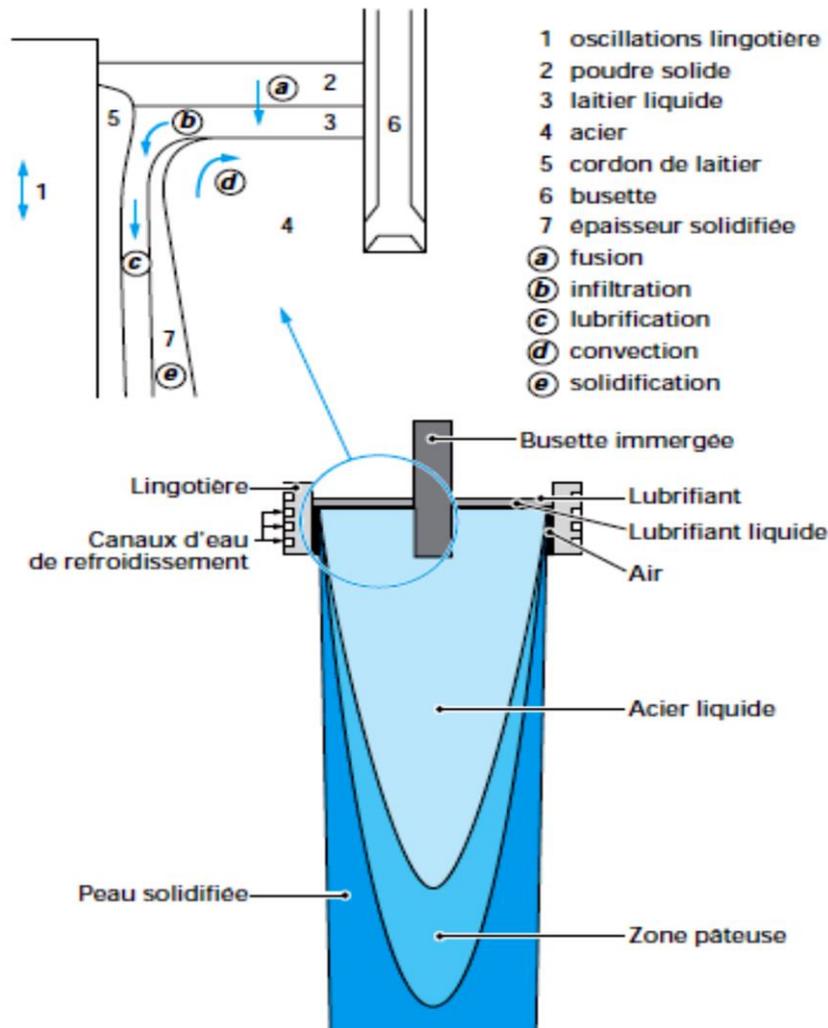


Figure 39 : Schéma d'un produit en cours de solidification en coulée continue. [14]

#### IV.6.2.1. Echanges thermiques en lingotière :

a) **Transfert entre l'acier liquide et la paroi déjà solide :** Dans la lingotière, le liquide échange de la chaleur avec la paroi solide par convection. [14]

b) **Conduction dans la paroi déjà solidifiée.**

c) **Conduction dans la couche de laitier :** Ce film visqueux est isolant. Il réduit les échanges de chaleur par rapport à une lubrification à l'huile.

e) **Conduction et rayonnement dans le film d'air entre solide et lingotière :** Ce film d'air n'est jamais souhaité. Il est le résultat du retrait thermique naturel. Une conicité des parois de la lingotière doit en principe le minimiser. [14]

f) **Conduction dans le cuivre de la lingotière :** La température de surface de la paroi de la lingotière au contact avec le laitier solidifié ou le dépôt carboné est de l'ordre de 250 à 350 °C sur la face chaude et de 30 °C sur la face froide refroidie par l'eau. [14]

g) **Transfert entre le cuivre et l'eau de refroidissement :** Le refroidissement de la paroi de cuivre de la lingotière est réalisé par circulation d'un film d'eau à une vitesse de 6 à 10 m/s à une pression de 10 bar dans une chemise d'eau de 3 à 5 mm d'épaisseur pour les billettes, dans un espace rainuré pour les produits plats. [14]

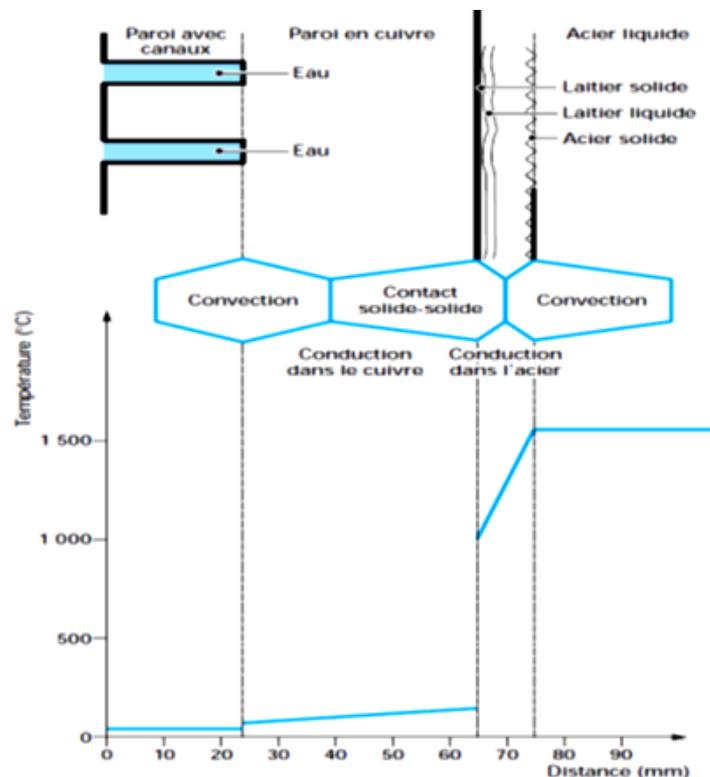


Figure 40 : Diverses résistances thermiques dans une lingotière. [14]

**IV.6.2.2. Echanges thermiques hors lingotière :**

Le transfert thermique hors lingotière, en zone de refroidissement secondaire et dans le bas de machine, se fait par le chemin suivant. [14]

**a) Conduction dans la peau solide :** La peau solide elle-même offre une résistance thermique non négligeable. [14]

**b) Convection entre l'eau et la peau solide :** Le métal solidifié sera refroidi par jets d'eau à pression donnée. L'augmentation de la pression d'eau de refroidissement secondaire augmente coefficient d'échange par convection, lui-même directement proportionnel au flux extrait. C'est un moyen utilisé pour augmenter la productivité d'une machine. [14]

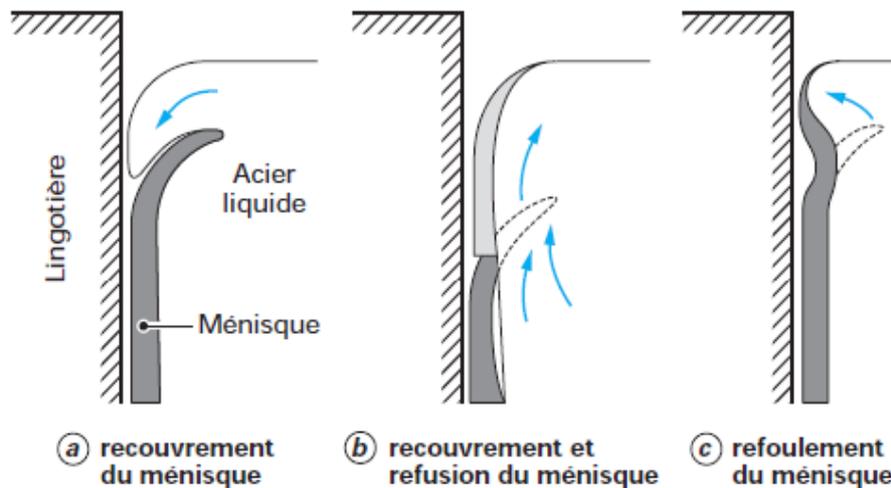
**c) Rayonnement :** Le mode de transfert par rayonnement prime dans le bas de la machine, au-dessous du refroidissement secondaire à l'eau mais à ce stade, on a peu d'action.

#### IV.7. Oscillation :

La lingotière est animée d'un mouvement de va et vient ascendant descendant pour éviter que l'acier ne colle sur la paroi. En effet, le collage provoque la déchirure de la peau, qui conduit le plus souvent à la percée.

Le mouvement d'oscillation de la lingotière est vertical, sinusoïdal le plus souvent. Il est défini par son amplitude, sa fréquence, la vitesse de déplacement pendant le cycle. Un lubrifiant (huile ou laitier-poudre de couverture) est interposé entre la lingotière de cuivre et l'acier en cours de solidification pour favoriser ce mouvement. Le mouvement est le plus souvent généré hydrauliquement. [14]

La peau solidifiée en garde des marques d'oscillation, à intervalles réguliers par un mécanisme de débordement périodique de liquide sur un ménisque solide illustré par la figure



**Figure 41 : Mécanisme de formation des marques d'oscillation par recouvrement périodique de ménisque. [14]**

Il faut ménager dans le cycle d'oscillation une période pendant laquelle la vitesse de descente de la lingotière est supérieure à la vitesse d'extraction du produit (temps de stripage négatif). Pendant ce temps, la croûte solidifiée est en compression et il est admis que cet effet est bénéfique en contribuant à réduire les risques de collage et à refermer d'éventuelles déchirures. [14]

**IV.8. Progression de la solidification :**

Sous l'influence du refroidissement en lingotière plus du refroidissement secondaire, la solidification progresse au fur et à mesure de la descente du produit dans la machine par l'avancée du front de solidification. [14]

La connaissance de l'épaisseur solidifiée à un niveau donné dans la machine est très importante car elle permet au constructeur de prendre ses dispositions pour éviter les percées et le gonflement. Pour l'ensemble de la machine, pour une tranche de produit donné,

$$e = K\sqrt{t} \dots\dots(1)$$

L'épaisseur solidifiée  $e$  est fonction du temps écoulé à partir du haut de machine  $t$  selon une loi parabolique :

Avec  $K$  : coefficient de solidification,

$t$  : temps de solidification.

L'ordre de grandeur de  $K$  est de 25 à 30 mm/min<sup>1/2</sup>

**IV.9. Thermomécanique :[14]**

En sortie de lingotière, la brame solidifiée est de 200 mm d'épaisseur. Elle a une température comprise entre 1000 °C en surface externe et la température du solidus en face interne, remplie d'acier liquide. Sur toute la machine, la surface du produit restera à température supérieure ou voisine de 1000 °C. Il subira, le cas échéant, un cintrage sur cœur liquide, un décintrage sur cœur solide ou liquide. [14]

À de telles températures, la brame solide a un comportement viscoplastique du type :

$$\sigma = k \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \dots\dots(2)$$

A la température élevée pas d'écrouissage la relation (2) devient :

$$\sigma = k \dot{\varepsilon}^m \dots\dots(3)$$

Avec

$\varepsilon$  : déformation,

$\dot{\varepsilon}$ : vitesse de déformation,

$n$  : coefficients d'écrouissage.

$m$  : coefficients de sensibilité à la vitesse de déformation.

### **Conclusion :**

Ce chapitre définit les processus globaux de l'obtention des aciers. Donne une revue exhaustive sur leur généralité, leur élaboration et leur coulée.

Les aspects fondamentaux de la coulée continue ont été largement abordés.

En coulée continue les brames ayant un bon suivi lors de leur fabrication sont des produits semi finis sains.

I. Le groupe Arcelor Mittal:

I.1. Présentation de l'entreprise:

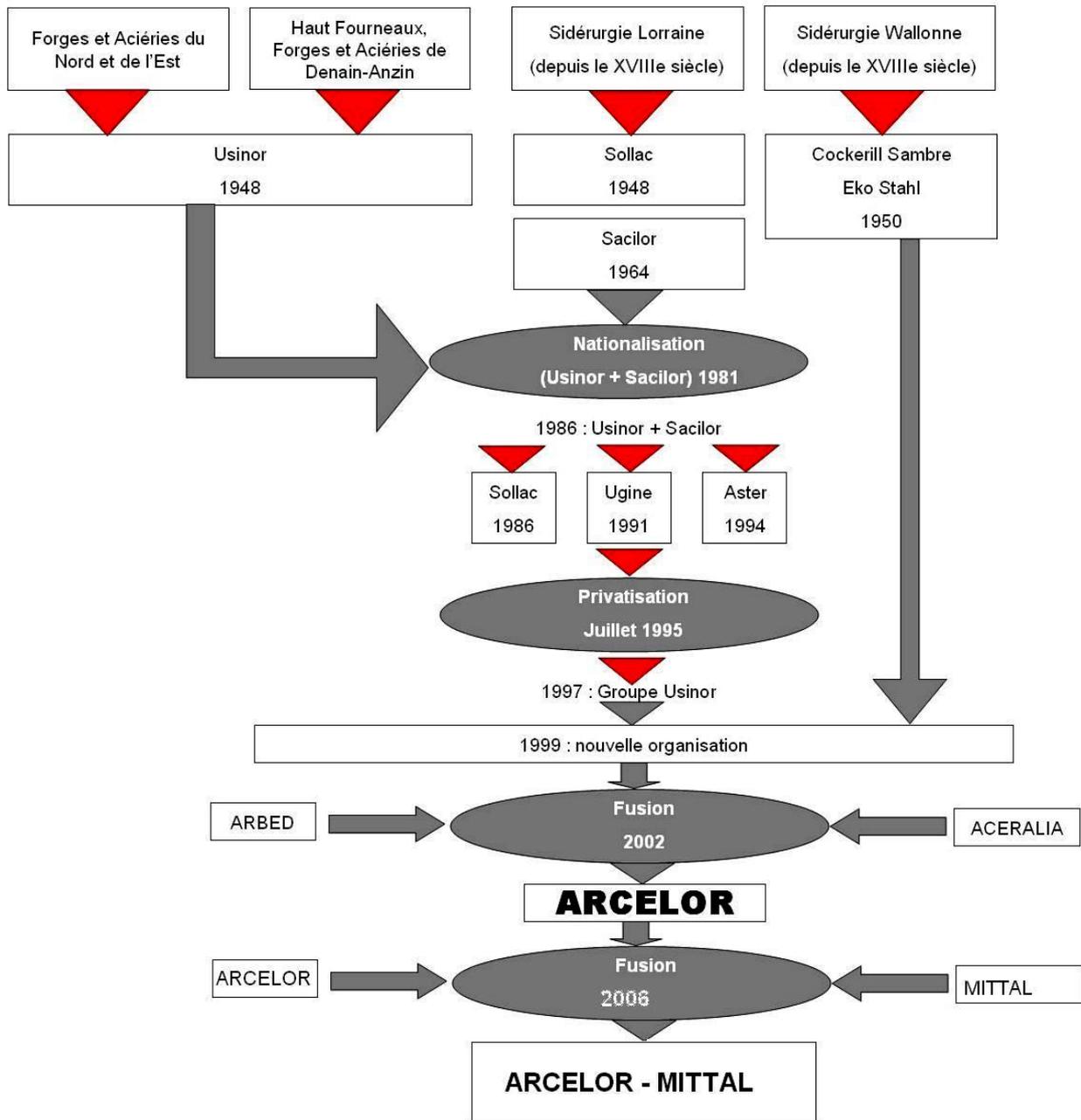


Figure 42 : Organigramme historique d'Arcelor Mittal [16]

1969 : haut fourneau 1, agglomération 1, tuberie avec soudure ;  
1972 : aciérie oxygène 1, laminoir à chaud ;  
1974 : laminoir à froid ;  
1975 : aciérie électrique ;  
1978 : tuberie sans soudure (\*\*), laminoir à fil ;  
1980 : cokerie, haut fourneau 2, agglomération 2, aciérie oxygène 2 ;  
2004 : laminoir rond à béton ;  
A l'arrêt depuis octobre 2009.

**I.1.1. Arcelor Mittal :**

Avec environ 320000 employés dans plus de 60 pays, et une présence industrielle dans 20 pays, Arcelor Mittal est le seul sidérurgiste véritablement mondial et leader incontestable de son industrie. [16]

Arcelor Mittal a démontré une stabilité financière exceptionnelle, avec un chiffre d'affaires de 105,2 milliards de dollars pour une production de 116 millions de tonnes d'acier brut.

Arcelor Mittal est non seulement un producteur d'acier, mais également un leader intégré dans l'extraction minière et les métaux, saisissant les opportunités tout au long de la chaîne de valeur : de l'exploitation minière à la distribution, la transformation et la commercialisation des produits finis... [16]

Arcelor Mittal est le seul producteur offrant et développant une gamme complète de produits et services acier, des produits de base aux produits à valeur ajoutée, des produits longs aux produits plats, des produits standards aux produits spécialisés, et de l'acier au carbone à l'acier inoxydable et alliages. [16]

**I.1.2. Arcelor Mittal Annaba :**

Arcelor Mittal Annaba, complexe sidérurgique intégré dont 30% des actions détenues par Sider et 70% par Arcelor Mittal.

Situé à 12 km d'Annaba ;

Superficie : 832 hectares.

Capacité de production nominale : 1.8 Million de tonnes de produits sidérurgiques.

Arcelor Mittal Annaba dispose de ses propres installations maritimes reliées au réseau ferroviaires pour le transport des matières premières et les expéditions des produits finis.

Arcelor Mittal Annaba dispose d'un réseau commercial à travers le pays de 12 points de vente. [16]

**I.2. Organisation D'Arcelor Mittal Annaba :**

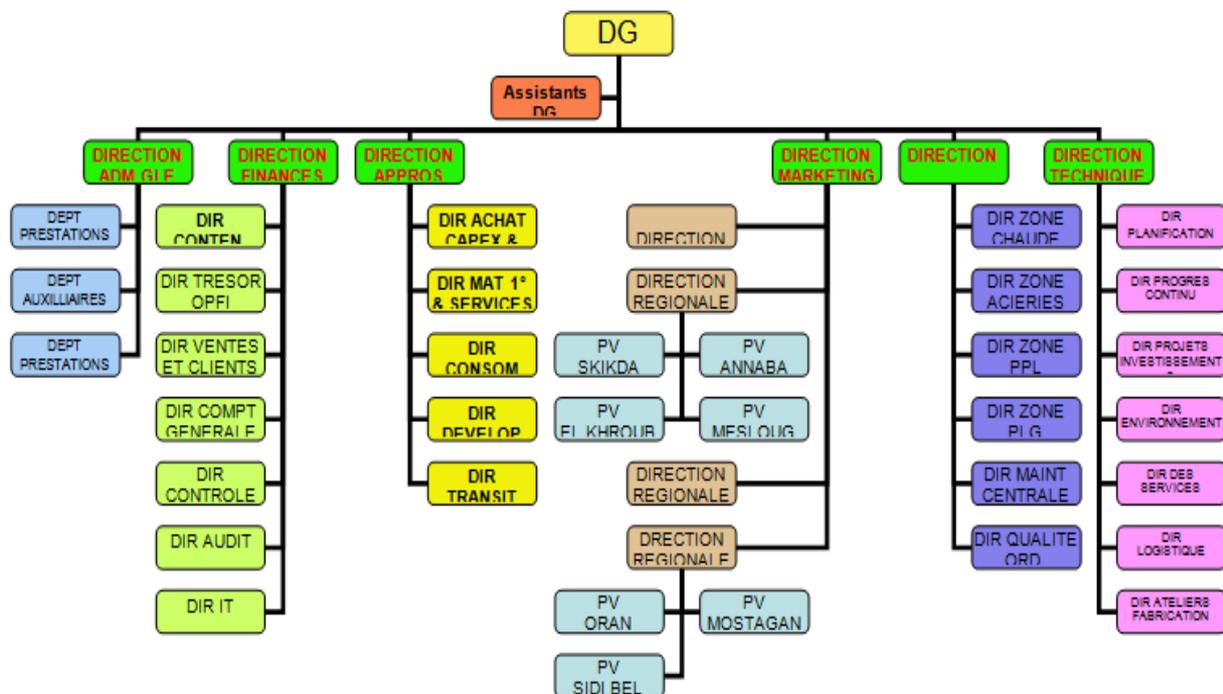


Figure 43 : Organisation d'Arcelor Mittal Annaba. [16]

**I.2.1. Gamme des produits :**

a) **Bobines et tôle laminée à chaud :** pour construction mécanique, chantiers navals et industrie de transformation (tube, bouteille, à gaz...etc.).

b) **Tôle fines et bobines laminées à froid :** pour industrie de transformation, électroménager, mobilier métallique ....etc.

c) **Tôle nervurées :** bardage pour unités industrielles, couvertures des bâtiments pour agronomie, l'industrie alimentaire, l'élevage...etc.

d)  **Tubes :** Tubes hydrauliques, et transport d'hydrocarbures, cuvelage de puits de pétrole, tubes de production, forage hydrocarbures ...etc.

e) **Fil machine et rond lisse :** Tréfilerie et treillis soudés, clous, construction, électrodes et fil cuivré pour soudage...etc.

f) **Rond à béton :** pour construction des bâtiments et travaux publics.

**I.2.2. Aciérie à Oxygène N°1 (Brames) :**

Construite en 1972, l'aciérie à oxygène n°1 (ACO<sub>1</sub>) transforme la fonte liquide provenant du haut fourneau, en acier à l'aide d'oxygène. L'acier est solidifié sous forme de produit appelé brame qui sera acheminé vers le laminoir à chaud pour être transformé en bobines.

La capacité maximale de l'ACO<sub>1</sub> est de 1037 KT/an de brames conformes. [16]

Les principales installations de l'ACO<sub>1</sub> sont :

Une zone d'élaboration de l'acier liquide dotée de trois convertisseurs d'une capacité de 90 t.

Deux stations de traitement des poches :

Une installation de dépoussiérage. Deux machines de lingotières courbes pour la production de brames de largeur 750 à 1300 mm et de 220 mm d'épaisseur.

Une installation de manutention et de traitement des brames. [16]



**Figure 44 : Produits d'ACO<sub>1</sub> sous forme des brames. [16]**

I.3. Atelier de la coulée continue :

I.3.1. Machine de la coulée continue en courbe :



**Figure 45 : Photo machine coulée continue utilisé en Arcelor Mittal Annaba.**

I.3.2. Machine de la coulée continue en coupe :

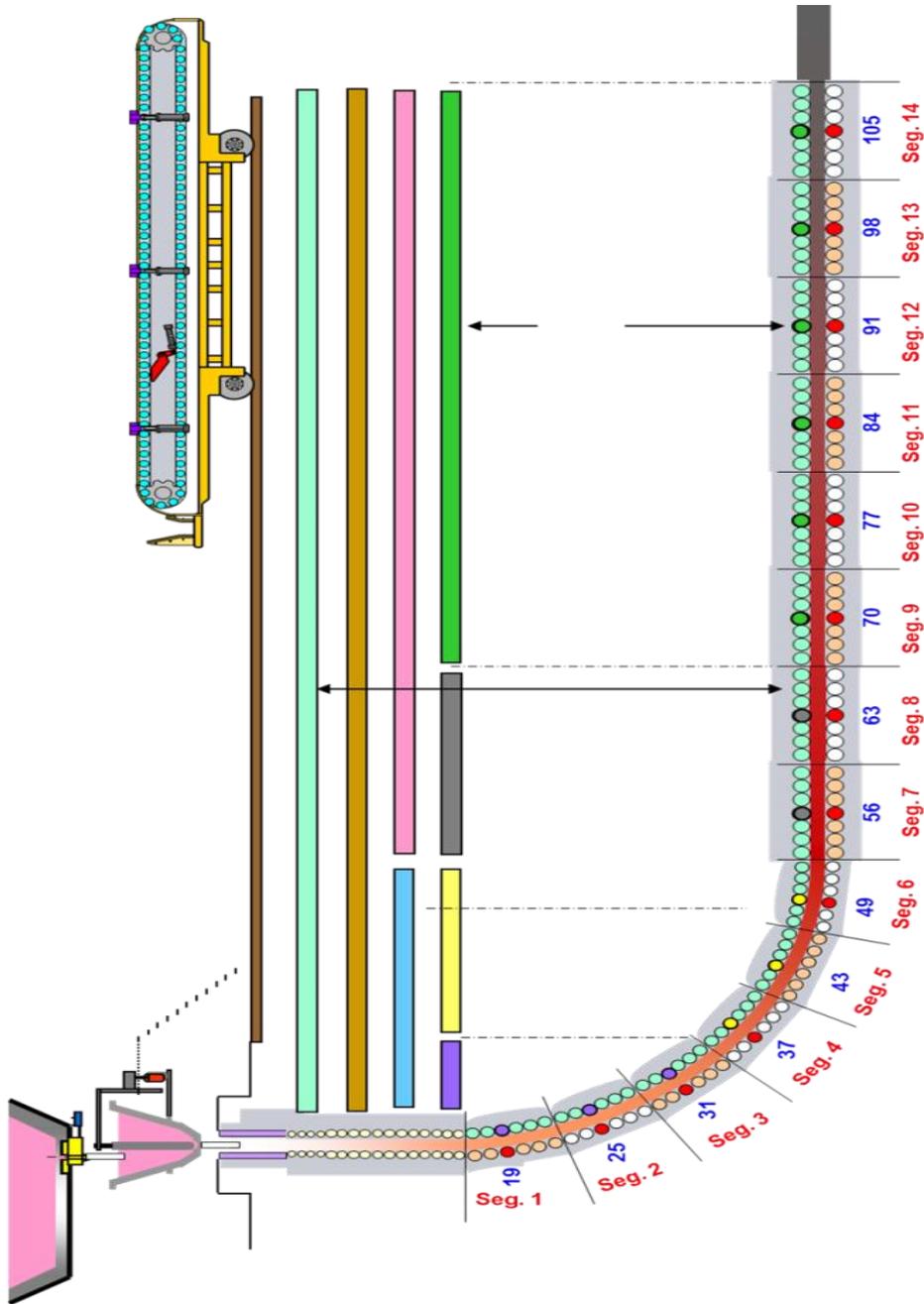


Figure 46 : Coupe d'une machine coulée continue utilisée en Arcelor Mittal Annaba. [17]

**I.3.3. Carte technologique de la machine de la coulée continue : [19]****I.3.3.1. Description tout le processus d'obtention de la brame :****I.3.3.1.1. Machine de la coulée continue de l'ACO1 :**

Type : machine courbée ;

Rayon de coulée : 10,5 m ;

Nombre de ligne : 1 ;

Gamme de vitesse rouleaux des cylindre de transport : 0,3 à 3,0 m /min ;

Vitesse de mannequin : 5,0 m/min ;

Types de poche : à quenouille.

**I.3.3.1.2. La poche à quenouille :**

a) **Le tundish** : Le tundish c'est un élément très important parce qu'il est l'intermédiaire entre la poche et la lingotière et il alimente la lingotière à l'aide d'une busette en graphite submergée. [19]

**Nb de tundish** : 20 tundish.

**Dimensions :**

Longueur = 4300 mm ;

Largeur = 1900 mm ;

Hauteur = 1200 mm.

**Type** : bac en acier a garnissage réfractaire.



**Figure 47 : Le tundish utilisé en Arcelor Mittal Annaba.**

**b) La lingotière :** C'est moule sans fond en cuivre qui est refroidie par aspersion d'eau et qui nous la forme de notre produit.

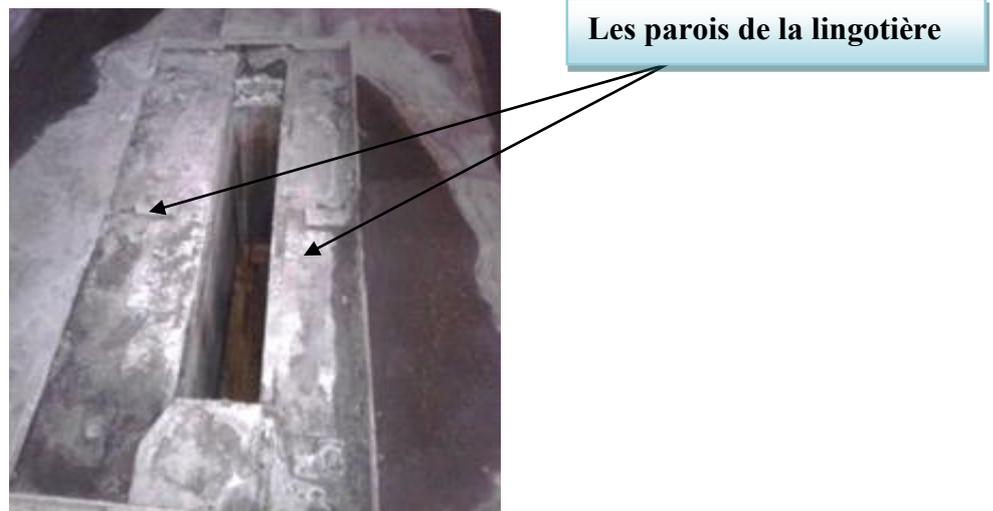
**b.1) Dimension de La lingotière :**

Largueur : 600 mm.

Longueur des plaques en cuivre : 700 mm ;

Epaisseur des plaques en cuivre : 600 mm ;

Poids d'une lingotière : 10500 kg. [17]



**Figure 48 : type de la lingotière utilisé en Arcelor Mittal Annaba.**

**b.2) Description :**

La lingotière utilisée en courbe, refroidie par eau et comporte des plaques de cuivre. Il s'agit d'une lingotière à passage continue conformément aux besoins de la coulée.

La lingotière est constituée de deux plaques frontales et deux plaques latérales en cuivre exempte d'oxygène, les plaques latérales usinées en fonction de rayon de coulée, les plaques en cuivre comportent des fentes verticales en vue d'un meilleur écoulement de la chaleur. Sur la face arrière, ces plaques en cuivre ont aussi des fentes horizontales. Cela augmente l'élasticité de la plaque. [19]

**c) Oscillateur :**

Le mécanisme d'oscillation est destiné à faire osciller la lingotière pendant la coulée, suivant un cycle sinusoïdal, pour éviter un collage du métal et assurer une extraction sans incident. [19]

**c.1) Caractéristiques de l'oscillateur :**

Amplitude : 25 mm maximum ;

Fréquence : 25 – 150 oscillateurs / min ;

Entrainement : Engrenage droite avec moteur coulée continue ;

Puissance d'entraînement : 20 kW. [19]

**c.2) Description :**

Plusieurs conceptions existent pour faire osciller la table sur laquelle est fixée la lingotière :

Système à excentrique (à bras long, à bras court), système à cames, etc. Dans tous les cas, il importe que la table et son système de leviers soient rigides et indéformables dans le but de limiter à moins de 0,2 mm les mouvements horizontaux et radiaux, afin d'éviter frottements et tensions superflus, générateurs de percées et de défauts. [19]

Le mécanisme d'oscillation doit toujours permettre un réglage, avant coulée, de l'amplitude et pendant la coulée, de la fréquence. Sur certaines machines, surtout de brames, la fréquence d'oscillation est asservie à la vitesse de coulée.

**d) Le mannequin :****d.1) Fonction**

Le mannequin a pour fonctions :

De pourvoir la lingotière d'un fond provisoire en début de coulée et de rendre l'extraction possible en figeant et en entraînant le premier métal ; d'amener le produit jusqu'à la cage d'extraction



**Figure 49 : Le mannequin de la machine coulée continué  
(Arcelor Mittal Annaba).**

**d.2) Description**

Le mannequin proprement dit est généralement composé de trois parties :

Le corps du mannequin dont la longueur est à peu près égale à la distance entre la lingotière et les premiers rouleaux d'extraction de la machine ; dans les machines verticales, le corps du mannequin est rigide ; dans les machines courbes, il est généralement constitué d'éléments articulés ou d'une tôle flexible renforcée, de façon à suivre la courbure de la machine ;

La tête du mannequin, fixée sur le corps, et qui comporte une pièce consommable ou non, permettant de fixer le premier métal figé ;

Le pied du mannequin où, pour certaines machines à brames et blooms, est fixé au câble du treuil du dispositif de stockage du mannequin. [19]

**e) Zones de refroidissement :****e.1) Refroidissement de la lingotière (refroidissement primaire) :****Caractéristique :**

Quantité totale d'eau : 6000 L/min (360 m<sup>3</sup>/h) ;

Qualité de l'eau : dureté total maximal 1° dH ;

Pression : Environ 5 kg/ cm<sup>2</sup> à l'entrée de la lingotière ;

Température : Entrée maximale 40 °C ( $\Delta t = 10 \text{ } ^\circ \text{C}$  max) ;

Perte d'eau : Environ 0,5 %.

**e.2) Refroidissement par aspersion (refroidissement secondaire) :**

**Quantité globale d'eau :** 3300 L / min (198 m<sup>3</sup>/h) :

3000 L/min pour refroidissement des brames ;

100 L/ min granulation de laitier ;

200 L/ min refroidissement externe des rouleaux ;

Qualité de l'eau : Impureté maximal 20 mg /L ;

Pression : environ 7 kg / cm<sup>2</sup> aux tuyères ;

Température : entrée maximal 40°C ( $\Delta t=30 \text{ } ^\circ \text{C}$ ) ;

Perte d'eau : maximal 10%.



**Figure 50 : Zone de refroidissement secondaire (Arcelor Mittal Annaba).**

**i) Equipement d'extraction (redresseur) :**

Nombre totale des rouleaux : 47 rouleaux.

**Section courbe :**

Longueur = 4260 mm ;

Nombre de rouleaux : 11 supérieurs. (3 entraînés) 11 inférieurs. (3 entraînés), 1 d'appui.



**Figure 51 : les rouleaux**

**Section rectiligne :**

Longueur = 6760 mm

Nombre de rouleaux :

12 supérieurs ;

12 inférieurs. (7 entraînés) ;

Gamme de vitesse : 120 – 1260 tr / min ;

Support de rouleaux : palier à rouleaux.

**j) Caractéristiques des rouleaux : Refroidissement interne. [19]**

Vitesse d'extraction : 0,25 à 2,5 m / min ;

**Section courbe :**

Paire 1, 3 et 5 : 380 mm ;

Rouleau d'appui : 700 mm ;

Autres : 440 mm ;

**Section rectiligne :**

Tous les rouleaux 400 mm

Matériau des rouleaux :

Résiste à la chaleur ;

Matériau : 13 Cr Mo 44 ;

Paliers : 4,5 m/min.

**k) La table d'oxycoupage :**

Elle est automatique , équipée d'un chalumeau coupeur (à oxygène) ;son rôle est de couper la brame avec une longueur suivant l'utilisation recommandée. [20]



**Figure 52 : La table d'oxycoupage.**

### L) Dimension de brame :

Largueur 600 mm à 1350 mm ;

Epaisseur 150 mm à 250 mm ;

Poids de la charge 90t max ;

Longueur de tronçon max 7 m et la min 3,2 m. [18]



**Figure 53 : Les brames fabriquées à Arcelor Mittal / Annaba.**

**L.1) Manutention des brames :**

Le déplacement des brames se fait par la ligne rectiligne de la machine coulée continue qui comprend des rouleaux vers la zone de la pince électrique.



**Figure 54 : manutention des brames**

**L.2) La pince électrique :** Sert au levage et au déplacement des brames vers le parc de stockage.



**Figure 55: Pince électrique.**



**Figure 56 : Parc de stockage.**

#### I.4. Poudre de la coulée continue :

##### I.4.1. Rôle de poudre de la coulée :

Les rôles joués par le flux C.C se retrouve principalement sous 3 états :

- La poudre solide ;
- Le laitier liquide ;
- Le laitier resolidifié. [18]

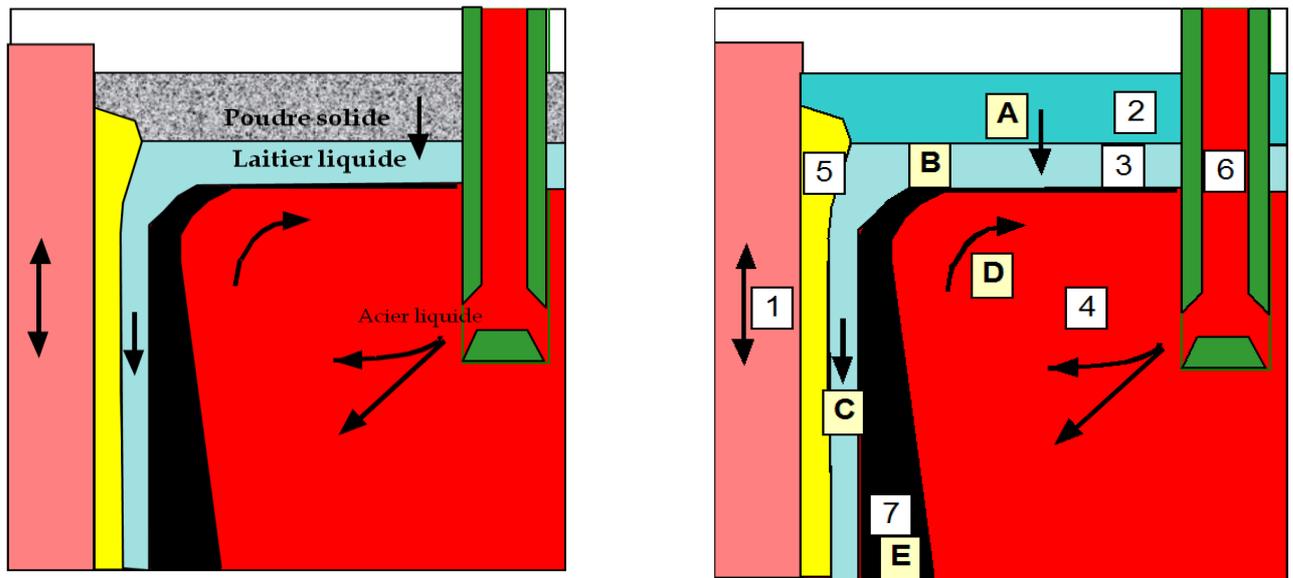


Figure 57 : Les rôles joués d'une poudre par le flux C.C. [34]

**A. Réserve de flux C.C. :** Isolation thermique, fusion ;

**B. Infiltration :** Isolation O<sub>2</sub>, absorption des inclusions ;

**C. Lubrification :** Echanges thermiques, forces de frottement;

**D. Hydrodynamique :** Entraînements de laitier ;

**E. Solidification du métal :** Echanges thermiques ;

**1. Lingotière et oscillation ;**

**2. Poudre solide ;**

**3. Laitier liquide ;**

**4. Acier liquide ;**

**5. Laitier solidifié ;**

**6. Busette immergée ;**

**7. Peau solidifiée.**

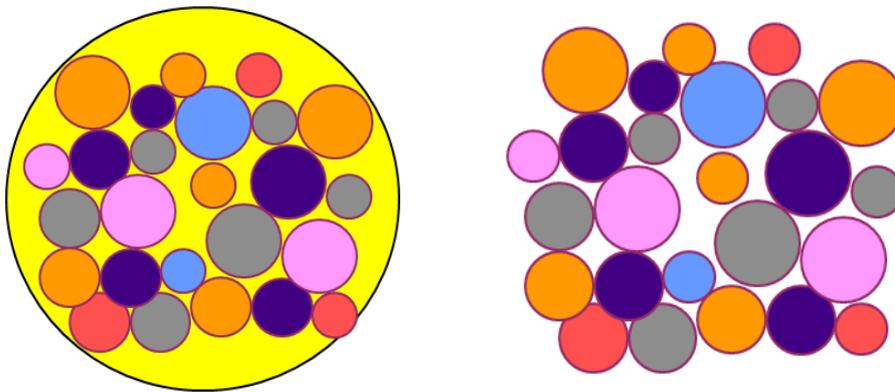
**I.4.2. Les principales caractéristiques d'une poudre de graissage :****I.4.2.1. Les différents types de poudres C.C :****a) Les mélanges pulvérulents :**

Faible granulométrie (< 100 µm) ;

Somme de poudres de compositions différentes.

**b) Les granulés (procédé d'atomisation) :**

Composé de granulés de composition quasi-identique [18] :

**c) Intérêts des granulés :****c.1) Mise en œuvre :**

Très bon étalement en surface du métal ;

Système d'alimentation automatique efficace.

**c.2) Conditions de travail :**

Pas de poussière.

**c.3) Propriétés du matériau :**

Très bonne homogénéité des grains ;

Meilleure répartition du carbone ;

Minimum de reprise en humidité ;

Bon pouvoir isolant.

**d) La formulation des poudres de graissage :**

Une base minéralogique : oxydes, silicates, aluminates, carbonates ;

Des fondants : Fluorures, borates, alcalins ;

Des carbones : coke, graphites ;

Des éléments d'addition spécifiques ;

Des liants. [18]

**e) Les caractéristiques principales des poudres :****e.1) La viscosité :**

Généralement calculée, Modèle Irsid ou Cirep ;

La référence est donnée à 1300 °C ;

Ajustée par la minéralogie et par les fondants.

**e.2) La vitesse de fusion :**

Permet de générer du laitier liquide en surface pour assurer l'isolation thermique.

Ce laitier liquide s'infiltré le long de la lingotière pour assurer la lubrification.

La vitesse de fusion doit être adaptée à chaque couple « Machine C.C. / Conditions de coulée ». [21]

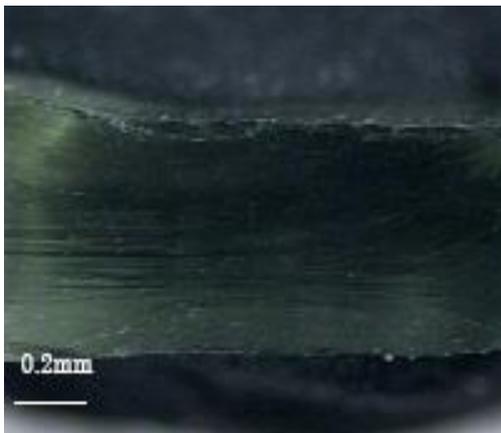
La vitesse de fusion est réglée par la teneur et la nature des carbones

**e.3) La cristallinité du laitier solidifié :**

Elle va réguler le transfert thermique horizontal en lingotière.

Elle va impacter les conditions de lubrification.

Elle est fortement dépendante de l'indice de basicité ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) et de la teneur en fluor.



**Figure 58 : La cristallisation de la poudre ( en coulée continue). [21]**

**I.4.3. Les paramètres du procédé de coulée continue :**

Il existe trois principaux paramètres qui déterminent le comportement de la poudre dans le moule :

**a) La température du ménisque :** les paramètres liés au ce facteur sont :

La température de l'acier ;

L'épaisseur de poudre sur le moule ;

**b) La poudre de coulée utilisée :** les paramètres liés au ce facteur sont :

La viscosité du flux ;

La teneur en carbone ;

Les propriétés de fusion de la poudre.

**c) La turbulence dans le moule :** les paramètres liés au ce facteur sont :

Le flux d'argon ;

Le design de la buse ;

La vitesse de coulée ;

La largeur du moule.

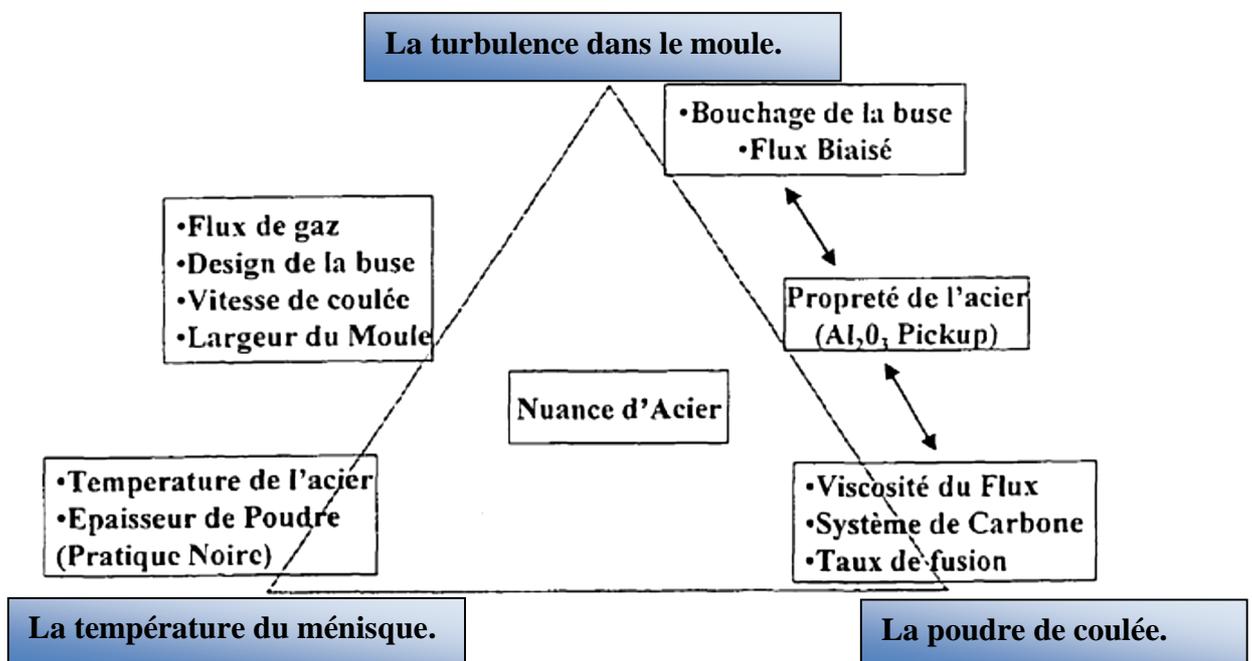


Figure 59 : Les principaux paramètres des poudres de coulée et leurs relations. [21]

**I.4.4. La poudre utilisée à Arcelor Mittal Annaba :**

**DAMET (Denain Anzin METallurgie) Melubir 9560 / MSA : [21]**

Ses caractéristiques principales :

C'est une poudre contient une part importante de cendres volantes.

Viscosité assez élevée ;

Vitesse de fusion faible ;

Poudre acide (vitreuse) .



**Figure 60 : photo de la poudre.**

**II. Généralités sur les défauts de brames existant en Arcelor Mittal Annaba :****II.1. Introduction :**

Il est bien connu que la non qualité coûte chère aux industries ;en effet ,les non – conformités sur produits sidérurgiques ont un impact néfaste sur l'économie de l'entreprise par ce qu'elles induisent comme déclassements et réclamations clients ,ceci se traduit par des coûts élevés de la non qualité .

L'unité ACO1 qui a un carnet de commandes important à l'export et l'import se verra dans l'obligation de répondre à des exigences de plus en plus sévères.

Les défauts sur brames de la coulée continue comptent parmi les causes les plus fréquentes de déclassement de ce produit ils peuvent être divers tels que :

Les défauts de forme (cambrage, gonflement etc.....)

Les défauts dimensionnels (longueur hors tolérance)

Les criques superficielles.

Les défauts dimensionnels ne sont pas toujours liés à des phénomènes métallurgiques tandis que les criques le sont :

**II.1.1. Criques internes :**

Les criques internes sont causées par de fortes contraintes de traction à l'intérieur de la croûte solidifiées lors de son refroidissement à travers la zone des hautes températures.

L'un des défauts internes le plus grave et le plus difficile à éviter est l'accumulation de macro inclusions sur l'intrados des produits.

### II.1.2. Criques superficiels :

Par rapport aux criques internes ; les criques superficielles sont plus graves en ce qui concerne la qualité du produit car elles sont en contact avec l'atmosphère extérieure de sorte que la surface des fissures s'oxyde.

Ce défaut de coulée continue peut donc subsister au cours de toutes les transformations ultérieures jusqu'au stade du produit final.

### II.1.3. Présentation schématique des principaux des principaux défauts apparus sur les brames coulées en continu :

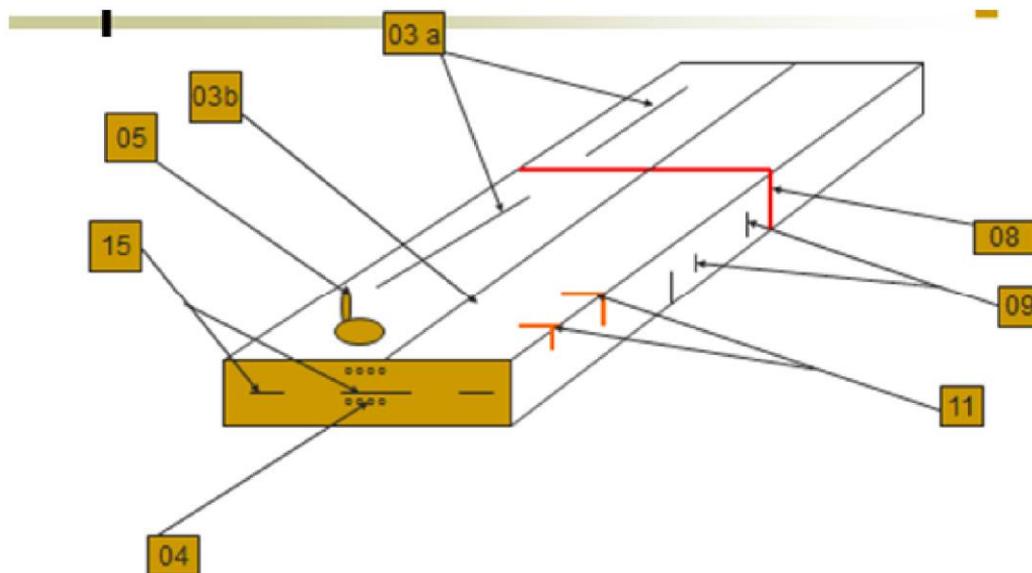


Figure 61 : Présentation schématique des principaux défauts apparus sur les brames coulées en continu

**II.2. Nomenclature des défauts :**

**D02** : cône de retrait ;

**D03** : crique longitudinale ;

**D03** : crique longitudinale de face ;

**D04** : soufflures ;

**D05** : incrustation de scorie ;

**D08** : ceinture ;

**D09** : crique transversal champs ;

**D11** : crique transversal angle (appelé crique de rive) ;

**D12** : cambrage ;

**D13** : mauvaise coupe ;

**D15** : crique de section ;

**D16** : hors longueur plus ;

**D17** : hors longueur moins.

**II.3. Criques transversales d'angle :****a) Aspect :**

Elles forment un angle de la grande face a la petite face localisées ou non en fond de la marque d'oscillation .elles atteignent parfois une profondeur jusqu'à 5 a 6 centimètres.

La crique transversale se situe aussi en fond d'oscillation remplie de laitier mal fondu, elle est apparente et plus localisée.

**b) Origine :**

Mauvais alignement lingotière et corset zéro ;

Oscillation, viscosité du laitier par rapport à la vitesse d'extraction ;

Refroidissement hétérogène.

**II.4. Ceinture (reprise de coulée)****a) Aspect :**

Discontinuité dans surface sur le pourtour de la brame (soudure).

**b) Origine :**

Interruption passagère de l'alimentation de la lingotière avec arrêt d'extraction, en cas d'arrêt prolonge ce défaut peut s'accompagner localement d'une double peu (exemple débouchage busette tundish, changement répartiteur).

**II.5. Soufflure (porosité) :****a) Aspect :**

Cavité cutanées ou sous cutanées sous forme de trous d'épingle en forme de larmes provenant de l'emprisonnement de gaz dans la périphérie du produit lors de la solidification.

**b) Origine :**

Causes inhérentes au métal ;

Défaut de calmage ;

Gaz dissous au cours de l'élaboration (H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) ;

Surchauffe très importante ;

Causes inhérentes à la coulée ;

Humidité des parois de la lingotière ;

Humidité de la poudre de graissage ;

Humidité des plaques du tundish ;

Oxydation du métal en cours de coulée (mauvaise protection du jet ou du ménisque) ;

Mauvaise qualité de l'huile de lubrification.

**II.6. Inclusions non métalliques :****a) Aspect :**

Nuage de petites faces ou points noirs pièges sur le front de solidification.

**b) Origine :**

Usure de réfractaire de répartiteur ou de la busette ;

Laitier du répartiteur ou de couverture en lingotière ;

Réoxydation du métal en cours de coulée.

**II.7. Ségrégation axiale :****a) Aspect :**

Se déroulent le plus souvent dans l'axe de la largeur de la brame et souvent dans une zone abaissée, ces criques peuvent s'étendre sur toute la largeur ou se décalent latéralement.

**b) Origine :**

Variation ou augmentation de la vitesse d'extraction ;

Température de coulée élevée ;

Refroidissement irrégulier de la lingotière ;

Lingotière usée.

**II.8. Criques longitudinales d'angle :****a) Aspect :**

Les criques se trouvent à proximité des arrêtes sur le côté large de la brame ;

Ces criques peuvent apparaître sur le côté étroite de la brame dans le sens de la largeur.

**b) Origine :**

Existence d'un jeu important entre les plaques de la lingotière ;

La température élevée dans le tundish ;

Une grande vitesse d'extraction ;

Teneur en soufre supérieure à 0.035 % ;

Teneur en phosphore supérieure à 0.035 %.

**III. Définition du problème posé :**

Pour obtenir une belle surface des brames sur le refroidisseur, il faut les machines de coulée continues soient bien réglées mécaniquement, avec un arrosage correcte, une pression hydraulique adaptées, l'usage de produits approprier et une bonne inspection avant l'enfournement donc il faut que les brames enfournées aux fours du laminoir soient sans défauts de surface.

**III.1. Les défauts que l'on peut rencontrer :****III.1.1. Les criques de rives :**

Elles sont petites et fines sur les coins ,longueur environs 50mm ,profondeur de 1 à 2 mm, elles sont à cheval sur la face et sur la rive ,elles sont assez difficiles à voir , il faut de l'expérience ,il faut nettoyer les bords au chalumeau, ce défaut est très difficile à dominer du côté de la coulée continue ,certains aciers ,certaines coulées continues ont cette propension d'en faire beaucoup ,elles sont évidemment très dangereuses pour le train abonde ,car ces derniers ne coupent pas en rives, et donc on obtient après laminage des rives déchirées ,pour les tôles moyennes et grosses on dérive environ 50 mm ,le défaut est moins dramatique.

Les criques proviennent de la rupture partielle de la partie solidifiée de la rame et ce principalement dans les angles ,en fait cette partie d'acier veut se rétracter à cause du refroidissement demandé pour garantir la santé interne ,et la partie restée chaude ne veut pas se comprimer ,et donc la partie solide externe craque ,le défaut se situe sur les angles car en ce lieu que la température plus basse ,le rapport surface sur masse est plus important de plus cette zone de la rame est soumise à des tensions dues à l'extraction de la rame ,à l'entre distance des appuis des rouleaux de guidage (maintenus par des vérins hydrauliques ) ,et la distance entre les rouleaux (conception machine)et vitesse de traction .

Dans ce cas on pose une question quels sont les facteurs qui entrent jeux :

La dimension de la brame.

La qualité de l'acier (la ductilité à chaud) ;

La vitesse d'extraction de la machine ;

L'intensité de l'aspersion d'eau et sa régularité ;

La régularité des rouleaux de guidage d'extraction ;

### III.1.2. Aperçue sur les défauts crique de rives des brames en acier A09 :



**Figure 62 : crique de rive sur les brames  
(Côté droite)**



**Figure 63 : crique de rive sur les brames  
(Côté gauche)**



**Figure 64 : crique de rive sur les brames  
réparées par chalumeau.**



**Figure 65 : crique de rive profonde sur  
les brames réparées par chalumeau.**

**Conclusion :**

Au cours du stage pratique, effectué dans l'atelier ACO<sub>1</sub> (Arcelor Mittal Annaba), nous avons suivi la production de fabrication des brames pendant la coulée jusqu'à l'obtention du demi produit.

Définir certains défauts qui apparaissent sur la surface des brames en particulier les criques de rive car pour obtenir une belle surface des brames sur le refroidisseur, il faut que les machines de coulée continues soient bien réglées mécaniquement, avec un arrosage correcte, une pression hydraulique adaptées, un bon usage de produits appropriés et une bonne inspection avant l'enfournement .

Donc, il faut que les brames livrées au laminoir à chaud (LAC) soient saines dépourvues de défauts.

Au delà, nous avons fait dans le chapitre suivant une modélisation thermomécanique pour discuter l'origine des criques, les paramètres qui sont plus influents pour leur apparition .

## I.1. Partie expérimentale :

## Introduction :

Dans cette partie nous avons suivie les paramètres qui le plus influent sur la fabrication des brames telle que : dimensions des brames, qualités de brames, refroidissement secondaire et faire un essai micrographique pour avoir la profondeur des criques sur la surface de la brame

## I.1.1. Statistique sur les défauts de crique de rive :

Tableau 2 : Taux de déclassement par défaut année - 2014 :

Défauts	Nombre	Taux
Telescop	8	0,11%
Crique rive	28	0,48%
Ondulation	15	0,14%
Dechirure	9	0,09%
Calamine	2	0,02%
Total	62	0,84%

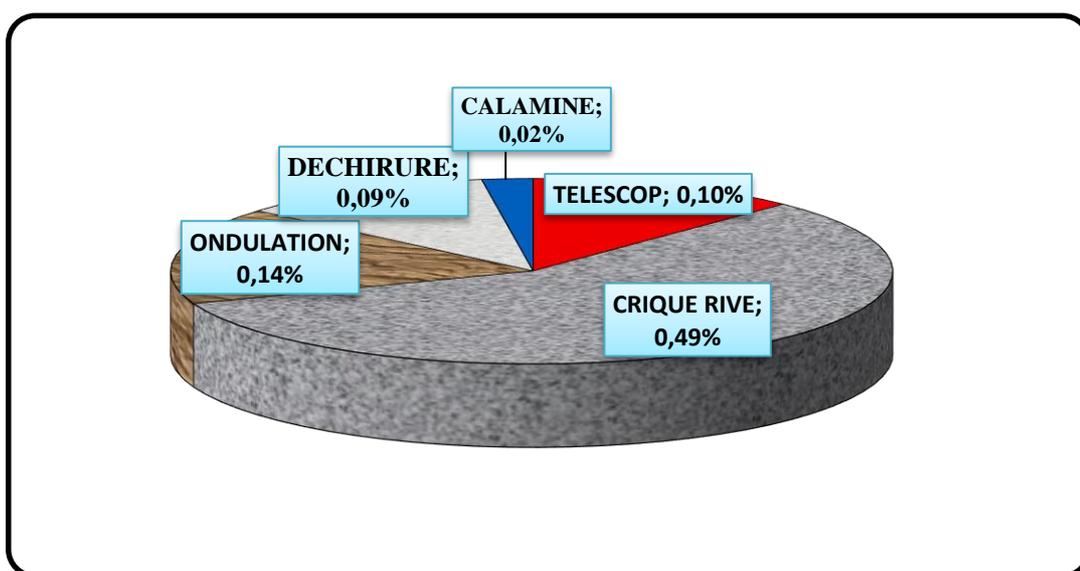


Figure 66 : Histogramme taux de déclassement des brames par défauts ( année 2014). [22]

**I.1.2. Qualité de l'acier :****I.1.2.1. Compositions chimique :****Tableau 4 : Fourchettes des aciers utilisées pour la coulée continue des brames en Arcelor Mittal – Annaba :**

Symbole	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Al%	Ni% max	Cr% max
A9	0,07÷0,11	0.03 max	0,25÷0,50	0.025 max	0.025max	0,020÷0,060	0	0

**I.1.2.2. L'analyse chimique de la coulée au niveau de l'ACO<sub>1</sub> :****Tableau 5 : composition de l'acier avant la coulée :**

Symbole	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Al%
A9	0,08	0,04	0,05	0.007	0.006	0,13

**I.1.2.3. L'analyse chimique après solidification de la brame :****Tableau 6 : composition de l'acier après la coulée :**

Symbole	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Al%
A9	0,09	0,04	0,15	0.01	0.009	0,13

**I.1.3. La poudre de coulée utilisée à Arcelor Mittal Annaba :**

La poudre de coulée utilisée est connue sous le nom :

**DAMET (Denain Anzin Metallurgie) : (MRLUBIR 9560 / MSA) : [23]**

**I.1.3.1. Composition chimique :**

**Tableau 7 : composition chimique de la poudre de la coulée :**

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	F	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C libre
La teneur en %	31,9	6,2	30,5	3,1	7,5	< 1,0	3,8	1,3	< 0,4	5,4

D'après la composition chimique précédente on peut calculer l'indice de basicité :

$$Bi = \frac{\% \text{ en CaO}}{\% \text{ en SiO}_2} = \frac{30,5}{31,9} = 0,96.$$

**1. Comportement de fusion :** deux comportements sont essentiels :

- **Vitesse de fusion :** 2,14 mg/s.
  - **Formation de goutte :** à la température 1135°C.
- 2. Masse volumique :** 0,79 kg/ dm<sup>3</sup>
- 3. La viscosité :** à la température 1300°C la viscosité est égale **3,84**.

**Remarque :** 1 Poise = 10<sup>-1</sup> Pa.sec

**I.1.3.2. La viscosité de poudre de la coulée**

**Tableau 8 : la viscosité en fonction de la température :**

Température en C°	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500
Viscosité en poise	51.07	30.87	19.38	12.59	8.43	5.80	4.09	2.95	2.18	1.63	1.25

## I.1.4. La vitesse de coulée :

Tableau 9 : Vitesse de coulée en fonction de la température de coulée :

Selon, la nuance de l'acier A 9, la section de la brame coulée est **1260 mm<sup>2</sup>**, la température de coulée est égale **1520 °C** et le tableau au-dessus la vitesse de coulée est égale **1,15 m/min**.

Température de coulée en °c	1520	1525	1551	1556
Vitesse de coulée en m/min	1,3	1,15	1	0,8

## I.1.5. Débit de refroidissement secondaire :

Tableau 10 : Débit de refroidissement en fonction de la vitesse de coulée :

Vitesse de coulée en m/min Débit d'eau en m <sup>3</sup> /h	0,70	0,80	0,90	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,30
Segment 0	147	168	189	210	221	231	241	252	273
Segment 1	102	117	131	146	153	160	168	175	189
Segment 2	406	464	522	580	609	638	667	696	754
Segment 3	175	200	225	250	263	275	288	300	325
Segment 4	224	256	288	320	336	352	368	384	416
Segment 5	182	208	234	260	273	286	299	312	338
Segment 6	273	312	351	390	410	429	449	468	507

Le tableau au-dessus montre le débit de refroidissement secondaire en fonction de la vitesse de coulée, dans ce cas on à la vitesse de coulée qui est égale 1,15 m/min. on prendre débit d'eau comme suit :

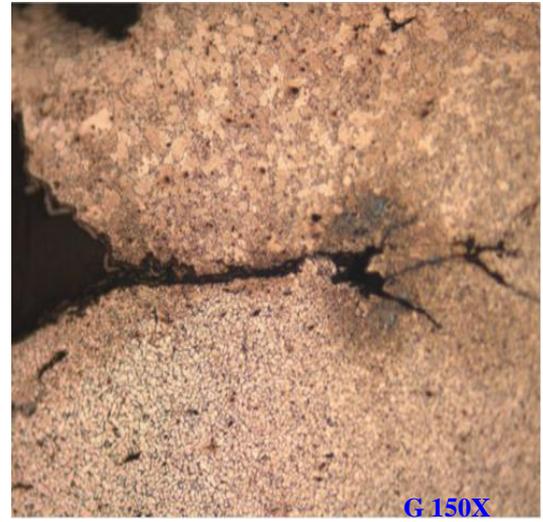
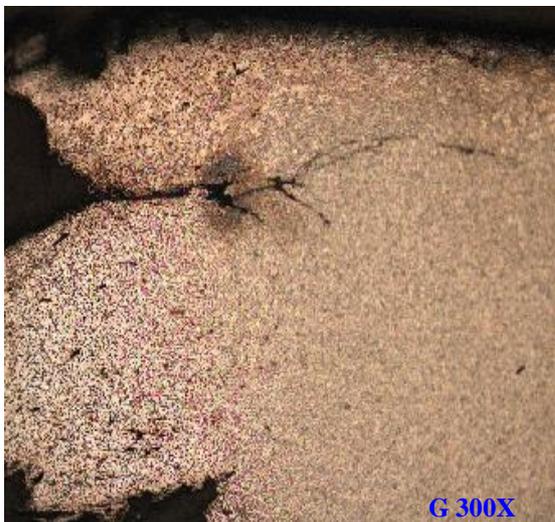
**Tableau 11 : Débit de refroidissement dans chaque zone :**

zone	Segment 0	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4	Segment 5	Segment 6
Débit d'eau en m <sup>3</sup> /h	241	168	667	288	368	299	449

**I.1.6. Essai micrographique :**

**Figure 67 a : Aspect micrographie des criques de rive sur les brames. (Observation sans attaque).**

Les figures 75a montre que l'apparition des criques sur la surface de la brame fabriqué.



**Figure 67 b : Aspect micrographie des criques de rive sur les brames. (Observation par attaque NITAL).**

Les figures 75b montre la profondeur des criques sur la brame fabriqué.

## II. Modélisation thermomécanique de refroidissement secondaire de la coulée continue des brames en acier (nuance A9) :

### Introduction :

En effet, du fait que notre modèle permet de prédire l'évolution de la température au cours de la coulée en fonction des paramètres de coulée,

### II.1. Données relevées au cours de la coulée continue de la brame :

Température de la coulée : **1520°C.**

Débit de refroidissement primaire : **360 m<sup>3</sup>/ h.**

Vitesse de la coulée : **1,15 m/min.**

Température de solidification : **1470 °C.**

Vitesse d'extraction : **1,5 m/min.**

Diamètre des rouleaux : **400 mm**

Distance de ménisque : **21,8 m.**

Rayon courbure : **10,5 m.**

Débit de refroidissement secondaire :

Segment 0 : **241 m<sup>3</sup>/ h.**

Segment 1 : **168 m<sup>3</sup>/ h.**

Segment 2 : **667 m<sup>3</sup>/ h.**

Segment 3 : **288 m<sup>3</sup>/ h.**

Segment 4 : **368 m<sup>3</sup>/ h.**

Segment 5 : **299 m<sup>3</sup>/ h.**

Segment 6 : **499 m<sup>3</sup>/ h.**

Température à la surface de la brame : **1000°C**.

Température au cœur de la brame : **1200°C**.

Température décintrage : **1069 °C**

Température ambiant : **25°C**.

Longueur de la brame : **7m**.

Épaisseur de la brame : **260 mm**.

La pression ferrostatique : **0,187 MPa**.

Coefficient d'échange thermique **H = 6 W/m<sup>2</sup>.k**

Pas entre rouleaux = **370 mm**.

Largeur de brame : **600 mm**

## II.2. modélisation thermomécanique :

En sortie de lingotière, la brame solidifiée est de **260 mm** d'épaisseur et de **7 m**.

Cette épaisseur  $e$  est en fonction du temps écoulé  $t$  à partir du haut de machine de coulée continue selon la loi :

$$e = k\sqrt{t}.$$

$e$  : épaisseur de la brame.

$k$  : coefficient de solidification.

$t$  : temps de solidification.

L'ordre de grandeur  $k = 25 \text{ à } 30 \text{ mm} / \text{min}^{1/2}$

### II.2.1. modèle thermique :

L'objectif de cette étude est de définir un modèle thermomécanique de refroidissement secondaire d'une brame d'acier (nuance **A9**). Permettant de prédire la distribution de la température sur les différentes faces est notamment sur les rives, Pour modéliser le problème de refroidissement d'une brame d'acier inoxydable, nous avons fait les hypothèses suivantes :

- Le transfert thermique dans la direction OX est supposé négligeable.
- Le refroidissement s'effectue de manière symétrique par rapport aux axes de la brame.

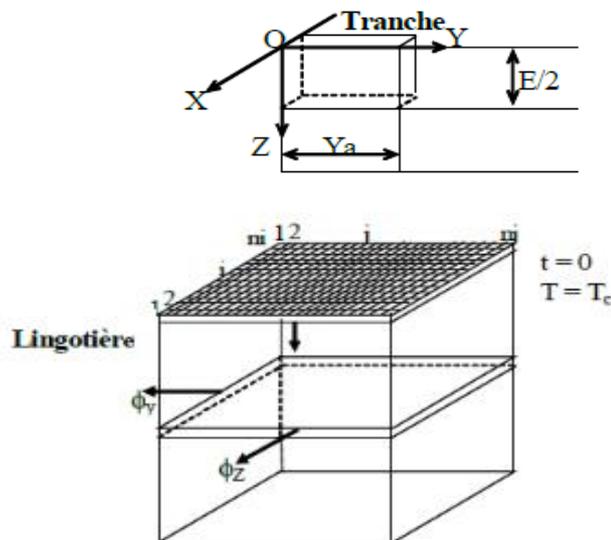


Figure 68 : Tranche de la brame

### II.2.1.1. Equation de base :

L'équation du champ de température dans la tranche d'acier considérée peut être définie par la relation de Fourier-Kirchoff :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda z \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda Y \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + Q \dots (4)$$

(Q), la chaleur dégagée lors de la solidification, peut se mettre sous la forme :

$$Q = \Delta H_f \rho \left( \frac{\partial f_s}{\partial t} \right) \dots (5)$$

$\Delta H_f$ , Chaleur de fusion, J/Kg.

La fraction d'acier solidifié, donnée par la relation :

$$f_s = 1 - \left( \frac{T - T_s}{T_1 - T_s} \right) \dots (6)$$

La conductivité thermique d'un acier peut se mettre sous la forme suivante :

$$\lambda = A + B T \dots (7)$$

A et B, constantes, W/m.°c et W/m.K<sup>2</sup>

En introduisant dans l'équation (4) la relation (5) dont le terme :

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \Rightarrow \quad Q = \Delta H_f \rho \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda z \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda Y \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \Delta H_f \rho \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta H_f \rho \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda z \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda Y \frac{\partial T}{\partial Y} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \left[ \rho C_p - \Delta H_f \rho \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda Y \frac{\partial T}{\partial Y} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \rho \left[ C_p - \Delta H_f \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \left[ C_p - \Delta H_f \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = \frac{\lambda}{\rho} \left[ \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \right]$$

On a  $\lambda = A + B T \dots (4)$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \left[ C_p - \Delta H_f \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = \frac{1}{\rho} (A + B T) \left[ \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \right]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \left[ C_p - \Delta H_f \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = \frac{1}{\rho} \left\{ A \left[ \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \right] + B T \left[ \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \left[ C_p - \Delta H_f \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = \frac{1}{\rho} \left\{ A \left[ \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \right] + B \left[ \left( \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial T^2}{\partial Y^2} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \left[ C_p - \Delta H_f \left( \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = \frac{1}{\rho} \left\{ A \left[ \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \right] + B T \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial Y} \right)^2 \right] \right\} \dots (8)$$

A l'instant  $t = 0$  la tranche se situe au niveau du ménisque et sa température est uniforme et égale, partout, à la température de coulée  $T_c$ .

Le flux thermique suivant l'axe  $OZ$  est nul par raison de symétrie au centre de la brame :

$$Z = \frac{E}{2} \Rightarrow 0 < Y < Y_a.$$

Et le flux thermique suivant l'axe  $OY$  l'est aussi à la frontière avec la zone centrale de la brame :

$$0 < Z < \frac{E}{2} \Rightarrow Y = Y_a$$

Sur les faces de la brame :

$$Z = 0 \Rightarrow 0 < Y < Y_a$$

$$\text{Et } 0 < Z < \frac{E}{2} \Rightarrow Y = 0$$

Le transfert thermique est déterminé par les flux évacués,  $\Phi_z$  et  $\Phi_y$ .

### II.2.1.2. Conditions initiales et aux limites :

Les conditions initiales et aux limites de l'équation (8) sont les suivantes:

$$T = T_C, t = 0 \Rightarrow \begin{cases} 0 \leq Z \leq \frac{E}{2} \\ 0 \leq Y \leq Ya \end{cases}$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \emptyset_z, t \geq 0 \Rightarrow \begin{cases} Z = 0 \\ 0 < Y < Ya \end{cases}$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = 0, t \geq 0 \Rightarrow \begin{cases} Z = \frac{E}{2} \\ 0 < Y < Ya \end{cases}$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial Y} \right) = \emptyset_Y, t \geq 0 \Rightarrow \begin{cases} Y = 0 \\ 0 < Z < \frac{E}{2} \end{cases}$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial Y} \right) = \emptyset_Y, t \geq 0 \Rightarrow \begin{cases} Y = Ya \\ 0 < Z < \frac{E}{2} \end{cases}$$

### II.2.1.3. Détermination des paramètres du modèle

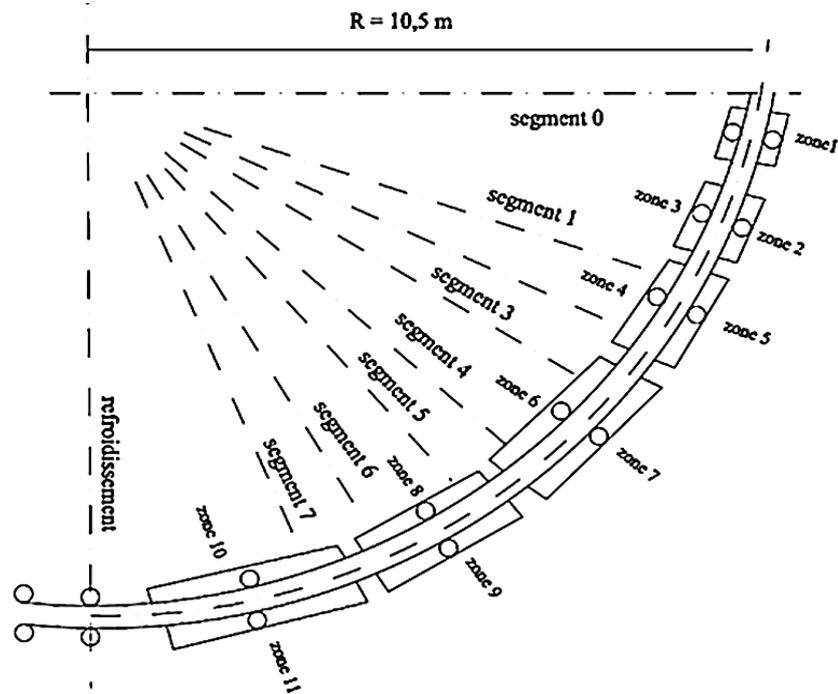


Figure 69 : refroidissement secondaire des brames (zone 1 et zone 3: pulvérisation d'eau sur grande faces, zone 2 : pulvérisation d'eau sur petite faces, zone 4 .....zone 11 : pulvérisation air + eau sur les grandes face intérieure et pulvérisation d'eau sur les grandes extérieur.

Dans la lingotière, le flux thermique évacué par les faces diminue de façon linéaire, et s'écrit :

$$\Phi_Y \text{ (en } W/m^2 \text{)} = (1.0 - 0.7 h) 10^6 \dots\dots(9)$$

Où h est la position de la tranche d'acier considérée par rapport au niveau du ménisque.

Dans la zone de refroidissement secondaire, on utilise alors pour calculer le flux thermique a relation :  $\Phi_Y = H(T_{sur} - T_{amb}) \dots\dots(10)$

H, coefficient d'échange,  $W/m^2K$ .

L'échange de chaleur est assuré par rayonnement et par convection de l'air, et on peut écrire :

$$\Phi_Y = H_{con}(T_{sur} - T_{amb}) + \varepsilon\sigma(T_{sur}^4 - T_{amb}^4) \dots\dots(11)$$

La valeur de  $H_{con}$  est déterminée à partir de la relation suivante:

$$Nu = H_{con} \frac{D}{\lambda_{air}} \dots\dots(12)$$

Pour la convection naturelle de l'air sur une surface verticale, on peut écrire :

$$Nu = f(Gr . Pr) \dots\dots(13)$$

Avec  $(Gr . Pr) \geq 10^9$ ,  $Nu$  peut s'écrire comme suit :

$$Nu = 0.12(Gr . Pr)^{1/3}$$

Après remplacement de Gr et Pr par leurs valeurs respectives, on obtient la relation :

$$H_{con} = 0.228 \frac{\lambda_{air} T_{film}}{\nu_{air}^{2/3} T_{film}} \left[ \frac{T_{sur} - T_{amb}}{T_{film}} \right]^{1/3} \dots\dots (14)$$

$$T_{film} = \frac{(T_{sur} + T_{amb})}{2} = \frac{(1000 + 25)}{2} = 1012,5 \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots(15)$$

Lorsque la brame quitte la zone de refroidissement secondaire, Le flux thermique est donné par la relation (8). La relation (11) devient dans ce cas :

$$Nu = 0.56 (Gr . Pr)^{1/4}$$

Avec  $(Gr . Pr) \leq 10^9$  et la relation  $H_{con}$  devient:

$$H_{con} = \frac{0.906 \lambda_{air} T_{film}}{D^{1/4} \nu^{1/2} T_{film}} \left[ \frac{T_{sur} - T_{amb}}{T_{film}} \right]^{1/3} \dots\dots(16)$$

### II.2.2. modèle mécanique :

La résolution des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement permet de connaître localement la vitesse, la pression et l'état de contraintes et les déformations à un temps donné. Voici respectivement ces équations :

$$\nabla \cdot \vec{V} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \operatorname{div} \mathbf{V}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\partial \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)$$

$$\Rightarrow \nabla \cdot \vec{V} = -\partial \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{Equation navier- stocks})$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \vec{f} = \rho \frac{d\vec{v}}{dt} \quad \dots\dots\dots(18)$$

On peut encore écrire cette dernière en décomposant le tenseur des contraintes en partie sphérique et déviatorique :

$$\nabla \cdot \mathbf{s} - \nabla \cdot \mathbf{P} + \rho \vec{f} = \rho \frac{d\vec{v}}{dt} \quad \dots\dots\dots(19)$$

Au cours de froissement secondaire l'acier se passe par quatre types d'états qui montrent le schéma au-dessous :

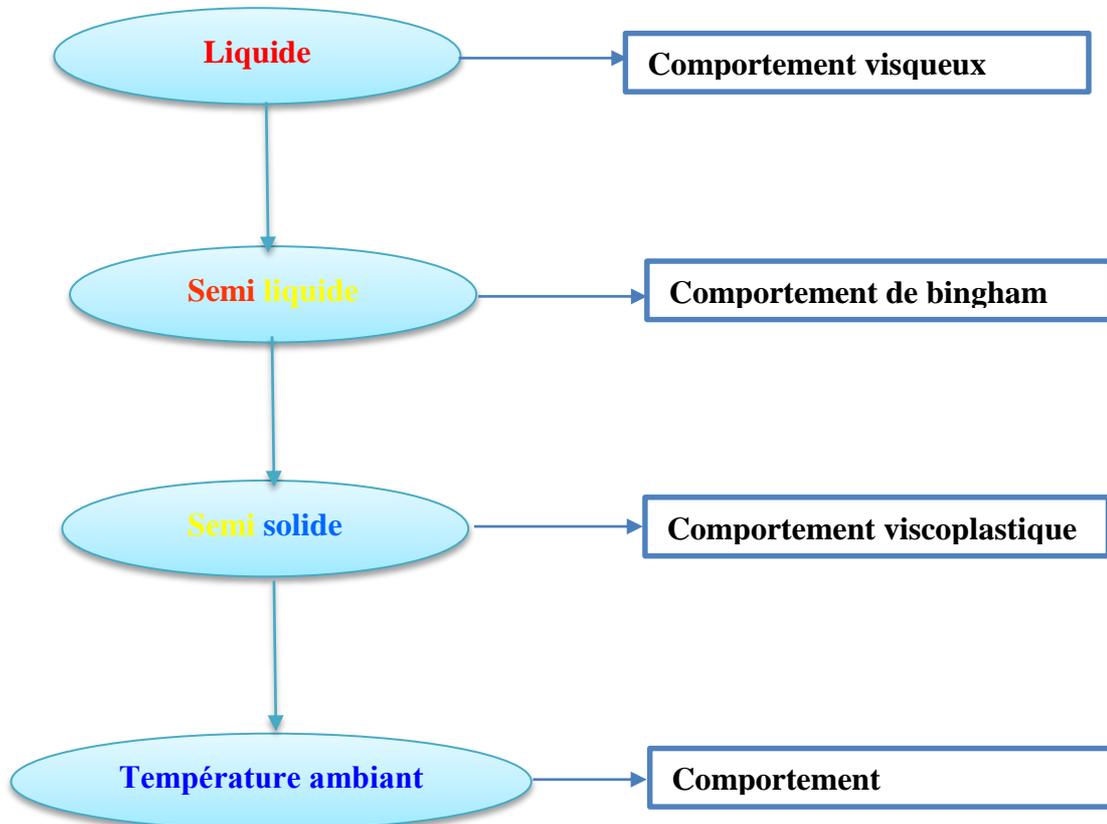
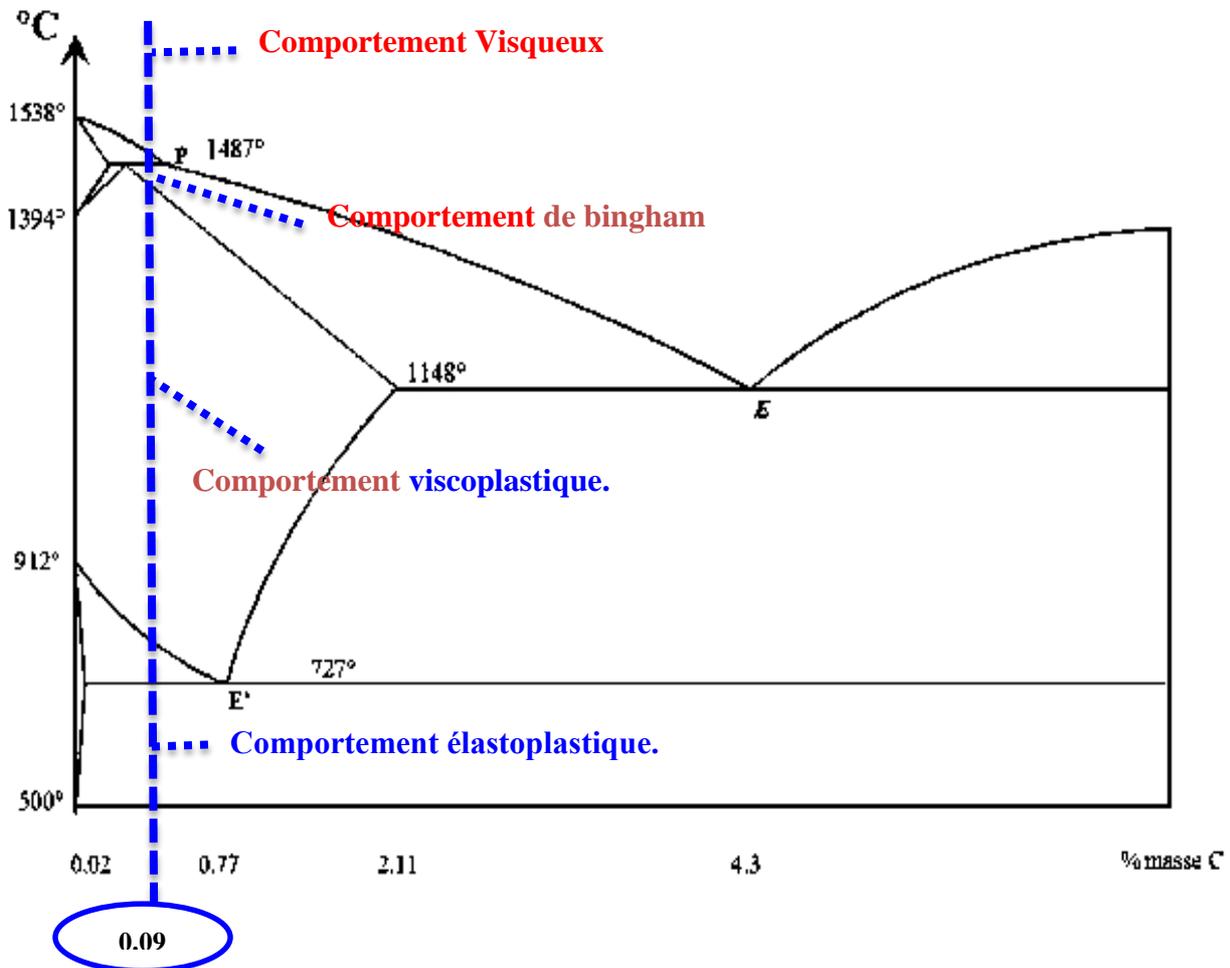


Figure 70 : Comportement de l'acier matériau en fonction de son état.

## II.2.2.1. Diagramme d'équilibre fer-carbone :



Le diagramme d'équilibre montre les états de l'acier au cours de refroidissement selon leur nuance, notre cas c'est acier au carbone A9 (0,09% de carbone) :

A l'état liquide (au-dessus de liquidus) : le comportement sera visqueux

$$\sigma = \mu \dot{\epsilon}$$

où la viscosité dépend de la température.

A l'état solide : (à température ambiante) le comportement sera élastoplastique parfait :

$$\sigma = \sigma_0 \text{signe} \dot{\epsilon}^p$$

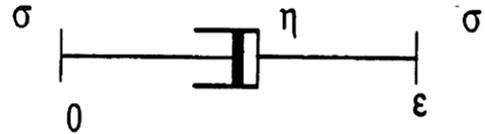
Dans notre cas pas il n'y aura pas d'écrouissage.

II.2.2.2. Entre deux états en pourra avoir :

- Un comportement de bingham dans le domaine **liquide** +  $\gamma$ .
- Un comportement viscoplastique dans le domaine  $\gamma$ .

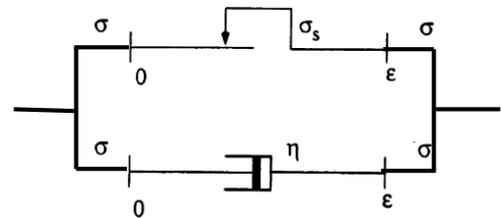
a).Modèle visqueux :

$$\sigma_{ij} = -P s_{ij} + s_{ij}, s_{ij} = \rho \mu \dot{\epsilon}_{ij} \Rightarrow$$



b).Modèle de bingham :

$$\sigma_{ij} = [\sigma_0 + \mu \dot{\epsilon}] \text{signe } \dot{\epsilon} \Rightarrow$$



c).Modèle viscoplastique de Norton Hoff :

$$\sigma_0 = K \dot{\epsilon}^m$$

$$\sigma_{ij} = -P s_{ij} + s_{ij}, s_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_0 (\dot{\epsilon}) \frac{\dot{\epsilon}_{ij}}{\dot{\epsilon}} \Rightarrow \sigma_0 (\dot{\epsilon}) = K (\dot{\epsilon})^m$$

$$\sigma_0 = K \dot{\epsilon}^m \exp\left(\frac{mcp}{RT}\right)$$

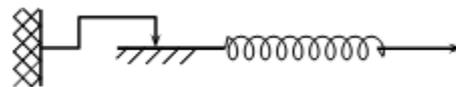
Cp : énergie d'activation.

T : température en kelvin (k).

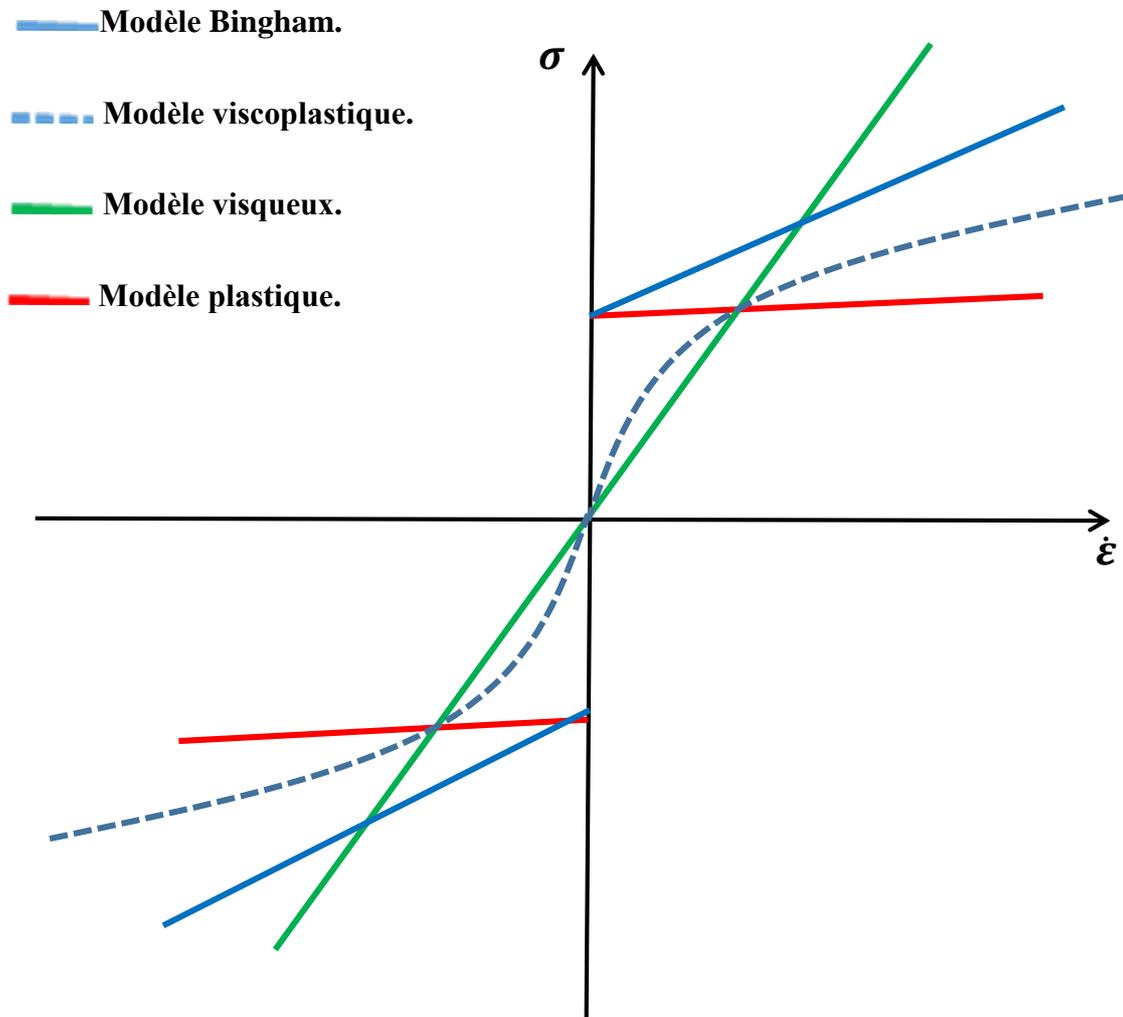
R : constante des gaz parfait.

c).Modèle élastoplastique sans écrouissage :

$$\begin{cases} \sigma = E \epsilon^e = \pm \sigma_0 (si \dot{\epsilon}^p \neq 0) \\ \epsilon^T = \epsilon^e + \epsilon^p \end{cases}$$



Les courbes présentées ci-dessous montrent l'évolution de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$  en fonction des contraintes  $\sigma$  pour les quatre modèles rhéologiques présentés.



**II.2.2.3. Modèle viscoplastique de Norton Hoff :** A la surface de la brame la température comprise à 1000 c° dans ce cas le modèle et thermo viscoplastique le modèle est écrit comme suit :

$$\sigma_0 = K \dot{\varepsilon}^m$$

$$\sigma = -P s + s, s = \frac{2}{3} \sigma_0 (\dot{\varepsilon}) \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}}{\dot{\varepsilon}} \quad \Rightarrow \quad \sigma_0 (\dot{\varepsilon}) = K (\dot{\varepsilon})^m$$

La présence de température la loi de comportement s'écrit :

$$\sigma_0 = K \dot{\varepsilon}^m \exp\left(\frac{mcp}{RT}\right)$$

$$\sigma = -P s + s, s = \frac{2}{3} \sigma_0 (\dot{\varepsilon}) \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}}{\dot{\varepsilon}} \quad \sigma = -P s + \frac{2}{3} \sigma_0 (\dot{\varepsilon}) \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}}$$

$$\sigma = -P s + \frac{2}{3} K (\dot{\varepsilon})^m \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}}$$

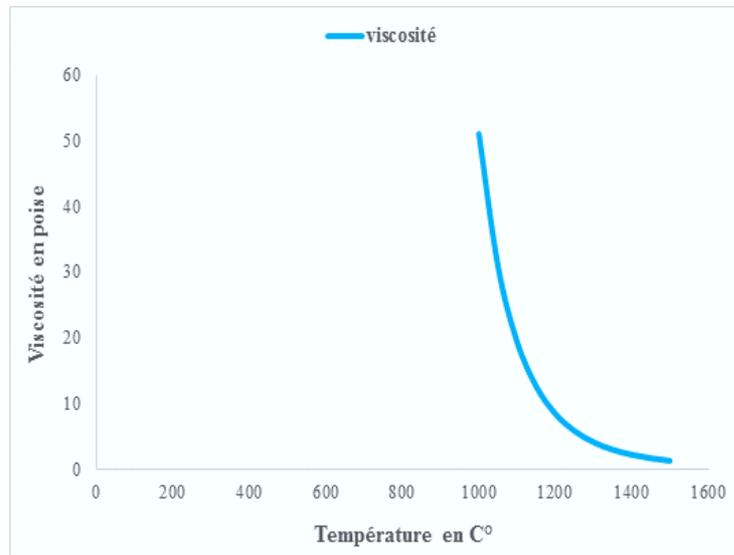
$$m = \frac{\partial \ln \sigma_0}{\partial \ln \dot{\varepsilon}}$$

Avaleur est généralement compris entre 0,1 et 0,3.

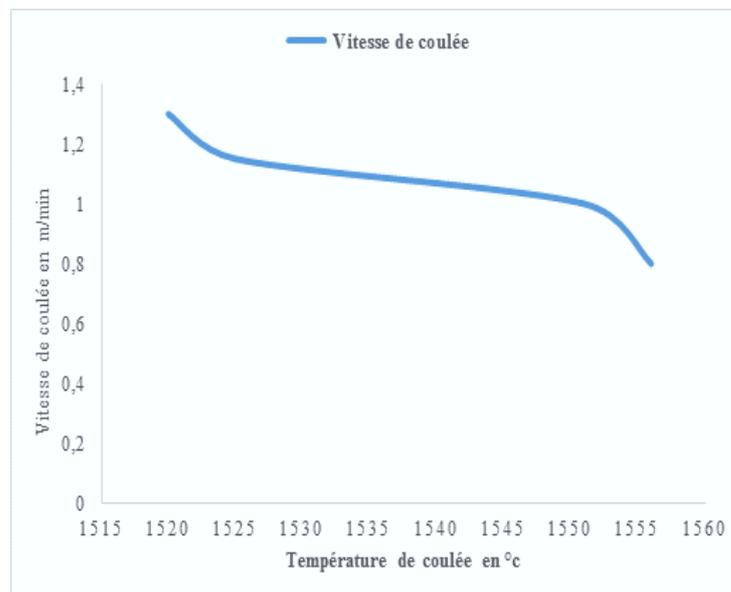
**Conclusion :**

La résolution se fait par la méthode analytique pour le modèle thermique et par la méthode itérative pour les lois de comportement mécanique. Ensuite, nous avons fait une combinaison thermomécanique en tenant compte des conditions initiales et limites.

Un programme (environnement MATLAB) permet de réaliser des résultats thermiques et mécaniques afin de cerner le problème rencontré au niveau des brames.

**I. Résultats expérimentales :****I.1. Poudre de coulée continue :**

**Figure 71: Evolution de la viscosité de la poudre en fonction de la température de coulée.**

**I.2. Vitesse de coulée :**

**Figure 72: Evolution de la vitesse de coulée en fonction de la température.**

I.3. Débit de refroidissement secondaire

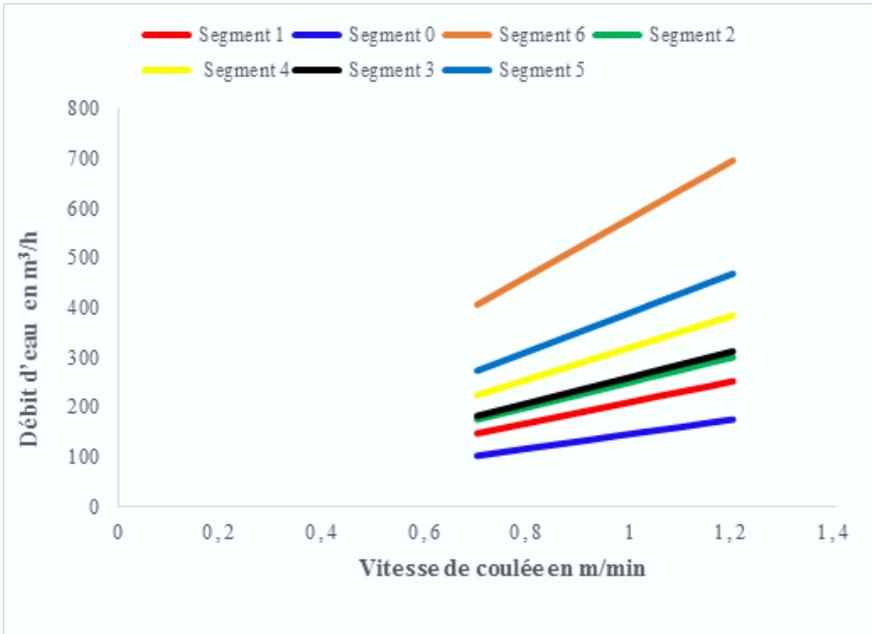


Figure 73 : débit de refroidissement secondaire en fonction la vitesse de coulée.

II. Résultats thermiques :

II.1. Evolution de la température en fonction du temps de coulée

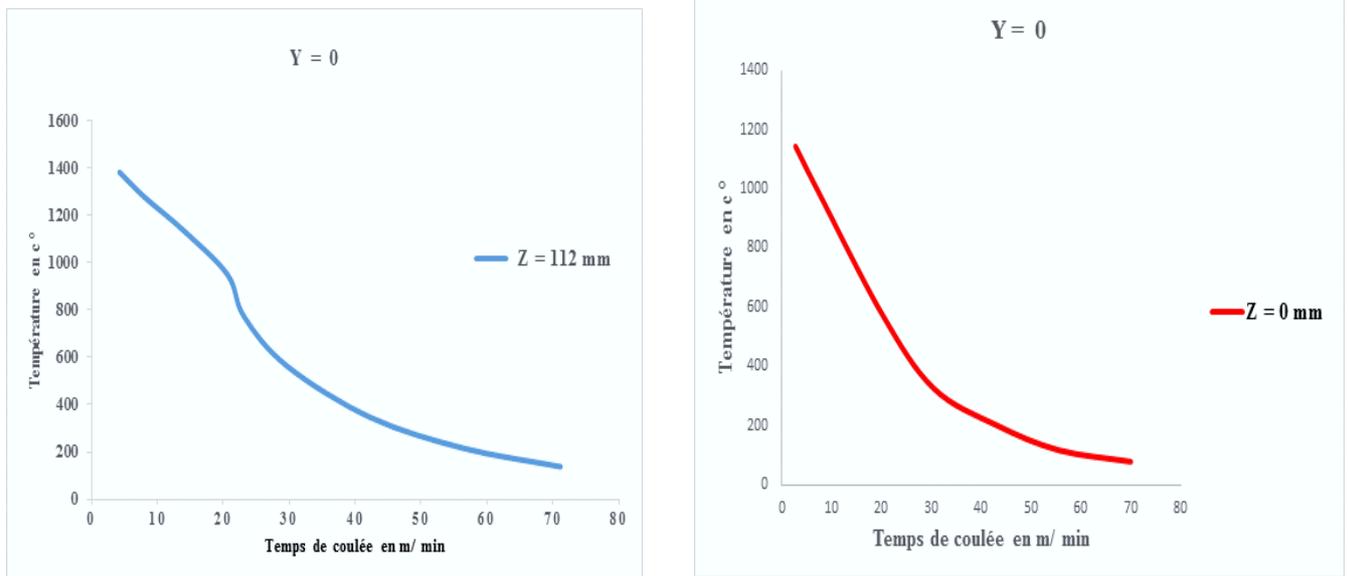


Figure 74 a : Evolution de la température en fonction du temps de coulée

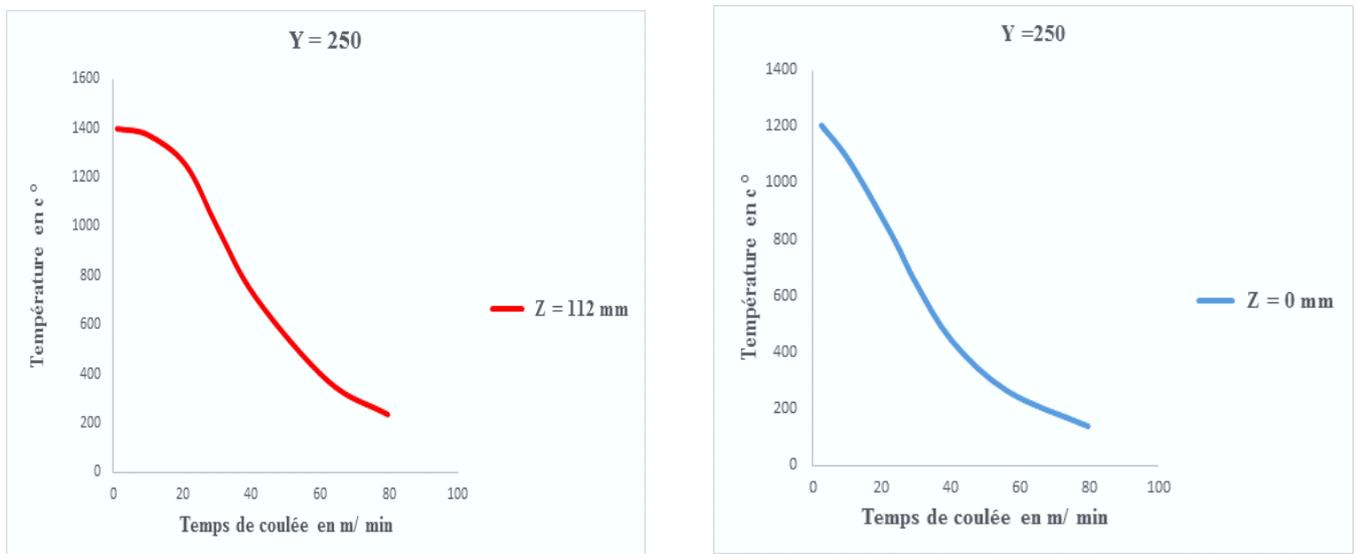


Figure 73 b : Evolution de la température en fonction du temps de coulée.

II.2. Température suivant la direction OY et OZ :

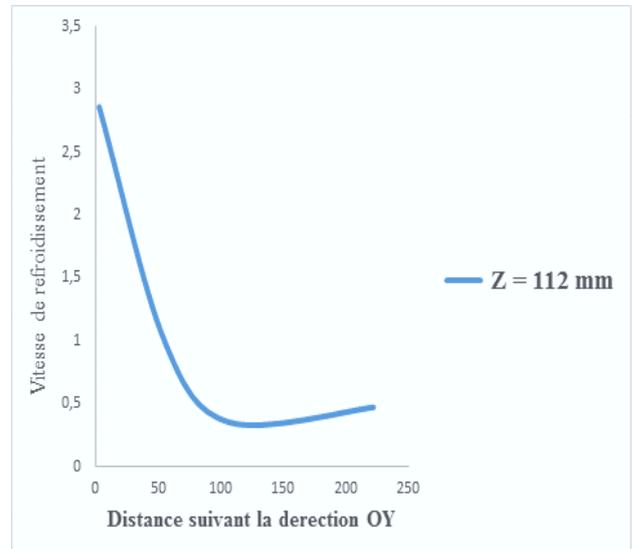
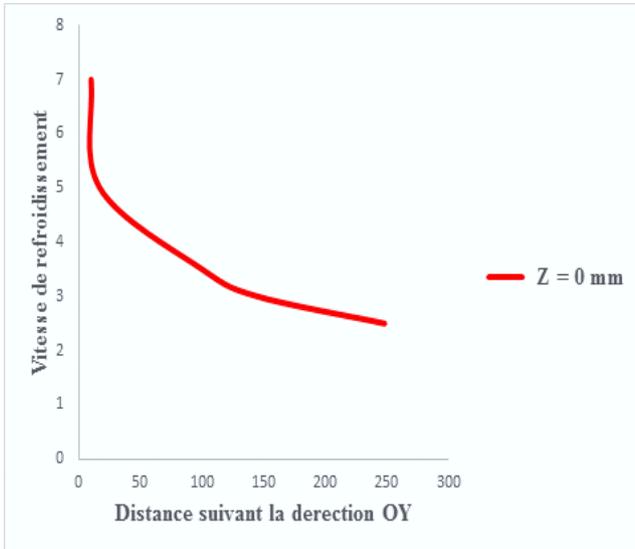


Figure 75a : Evolution de la vitesse de refroidissement suivant la direction OY

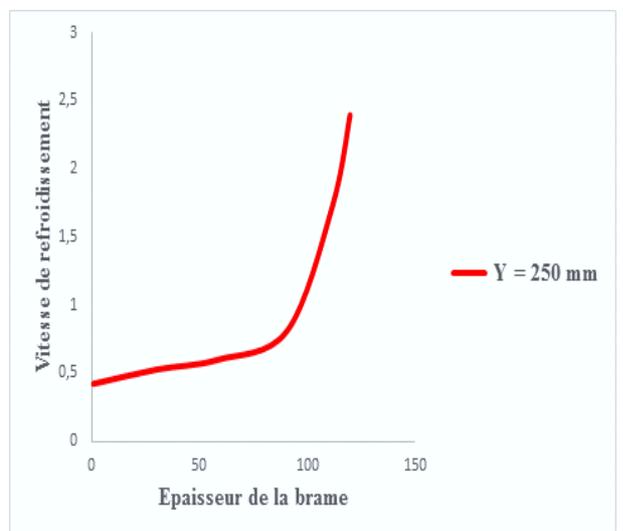
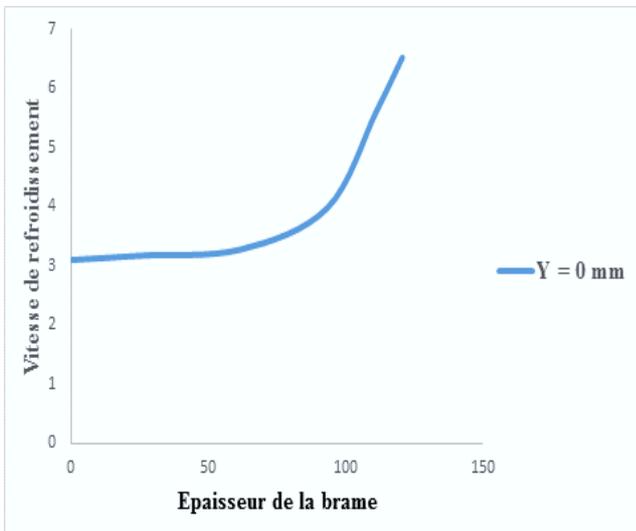


Figure 75 b : Evolution de la vitesse de refroidissement suivant la direction OZ .

**III. Interprétation des résultats :****III.1. Résultats expérimentaux :****a) La poudre de la coulée :**

La figure 70 montre que la poudre de la coulée continue utilisée (au sein d'Arcelor Mittal Annaba) varie de manière homogène ; à cause de sa faible viscosité, la température de coulée est optimale, ce qui explique une bonne fluidité de l'acier liquide dans la lingotière. ainsi que l'absence des impuretés dans cette poudre.

**b) La vitesse de coulée :**

La vitesse de coulée (1, 15 m/min) suivant les résultats de la figure 71 est insuffisante par rapport à la température de coulée (1525°C).

**c) Le refroidissement secondaire des brames :**

La variation de débit de refroidissement croît avec l'augmentation de la vitesse de coulée dans chaque segment de refroidissement de segment 0 jusqu'au segment 7 au niveau de l'oxycoupage (figure 72), donc Le refroidissement secondaire par aspersion d'eau sur la surface de la brame est homogène.

### III.2. Résultats thermiques :

#### a) Evolution de la température en fonction temps de coulée :

Résultats fournis par le modèle thermique :

Les Figures 73 donnent, à titre d'exemple, l'évolution en fonction du temps, de la température dans la plan de la petite face ( $Y = 0$ ) et dans un plan parallèle à celle-ci et situé à la frontière de la zone de rive et de la partie de la brame où un flux nul est imposé ( $Y = 250 \text{ mm}$ ).

Les Figures 73 a et 73 b représentent, respectivement, les profils  $T = f(t)$  d'une série de points situés à différents niveaux de profondeur (caractérisés par l'éloignement du point par rapport, à la grande face).

On note la présence de coups provoqués par le passage d'une zone de refroidissement à la suivante, notamment à la fin du refroidissement primaire et plus particulièrement sur la petite face de la brame qui est, évidemment, la zone la plus sollicitée par le changement du régime de refroidissement.

#### b) Température suivant la direction OZ :

Les Figures 74 a représentent les profils thermiques suivant l'épaisseur de la brame pour des temps de coulée donnés. On remarque que les profils de température obtenus à la frontière de la zone de rive ( $Y = 0$ ,  $Y = 250 \text{ mm}$  et  $0 < Z < \frac{E}{2}$ ) correspondent parfaitement aux hypothèses visés.

#### c) Température suivant la direction OY :

Les Figures 74 b montrent, d'une autre manière, l'évolution de la température dans la zone de rive en donnant, pour différents temps de coulée, les profils thermiques suivant OY au niveau de la grande face et au centre de la brame. On constate que les profils de température deviennent quasiment plats ( $\frac{\partial T}{\partial Y} = 0$ ) pour :

$Y = Y_a = 250 \text{ mm}$ .

**Conclusion :**

Les résultats précédents montrent que les paramètres : vitesse de coulée, l'épaisseur de la brame, la longueur métallurgique et le temps de coulée, varient en fonction de la température de coulée, des températures de la surface et du cœur de la brame.

Les contraintes de compression et de traction sont dues au contact de la brame solidifiée avec les rouleaux.

## Conclusion générale et Recommandation

---

Les paramètres de la machine à coulée continue sont très importants pour couler des brames dont l'épaisseur est  $> 100$  mm ; ces paramètres consistent à l'épaisseur de la brame, la vitesse de coulée, température de coulée et la nature de contact brame – rouleaux.

Au cours de la solidification de la brame et son contact avec les rouleaux d'extraction on a la présence des contraintes de traction et de compression. Ces contraintes sont déterminées par modélisation thermomécanique.

Les composantes des contraintes dans la direction de coulée, hors zone de décintrage [les parties de la brame en traction (composantes positives) et en compression (composantes négatives)] nous laisse supposer qu'en surface et entre les rouleaux, l'acier subit une traction dans le sens de coulée. À l'inverse, sous chaque rouleau, la contrainte axiale est de compression. L'acier subit donc une succession de séquences de traction-compression.

On constate qu'à l'intérieur du produit, au voisinage du front de solidification l'acier est soumis à la même alternance traction-compression, mais en quadrature cette fois, c'est au niveau du rouleau que la matière est en traction (dans le sens de la coulée) et c'est entre les rouleaux qu'elle est en compression. Cela confirme l'apparition des criques sur les bords de la brame.

## Conclusion générale et Recommandation

---

Les paramètres de coulée à Arcelor Mittal Annaba sont insuffisants pour obtenir des brames saines.

D'après les résultats nous proposons :

- Une Vitesse de coulée égale à : 1.3 m/min pour une température de coulée égale à 1525°C.
- Un atelier de contrôle CND (contrôles non destructifs) pour détecter la profondeur des criques de rive sur les brames solidifiées.
- Faire des analyses chimique et métallographique pour avoir l'homogénéité de la structure.

Faire des calculs numériques tels que la modélisation thermomécanique pour gérer les transferts de chaleur dans la zone de refroidissement secondaire et contrôler les contraintes dans la zone de décintrage.

## Références bibliographiques

---

- [1]. Elaboration des métaux Ferreux (fontes et aciers), **Thèse : Mr. Bensaada**. Page 71, 120, 121, 124,125. **Décembre 2009**.
- [2]. Les alliages ferreux (Les aciers), Document Web site, **Wikipédia**. **Mai 2001**.
- [3]. Les aciers dans la construction, Publication des grands ateliers, **Mme Mariam Olivier**. Page 41, 44, 61 et 62. **Année 2009**
- [4]. Transformation dans les aciers, micrographie des aciers, document M1115D. Page 2, 4,5 **Février 1999**.
- [5]. Les aciers, classification et désignation des aciers. **Thèse : Mr .Saïd. Bensaada**. Page 155 et 162.**Octobre 2010**.
- [6]. Précis métallurgie, élaboration – propriétés et normalisation. Par **Jean Barralis** et **Gérard Maeder**, **Page 5, 6, 7 et 8. Année 2011**.
- [7]. Technologie, élaboration des métaux ferreux, les aciers, **Page 2/3, 3/3. Année 2006**.
- [8]. Document *rapport de stage*, **Arcelor Mittal- Annaba, Mr. Alexandre Bonin** page 23 et 24. **Mars-Sept 2007**.
- [9]. Simulation de la coulée chez trois aciéristes français, **Klaus Vollrath** page 1/8.**Juin 2013**.
- [10]. Modélisation 3D par éléments finis du refroidissement primaire lors de la coulée continue d'aciers. Thèse doctorat présenté *par Marc Henri* Page 14, 15, 16 et 17.**Année 2002**.
- [11]. Simulation numérique du comportement thermomécanique des pièces réfractaires de la coulée continue. Thèse doctorat. **Mr. Sylvain Peruzzi**. Page 1, et 6.**Année 2000**.
- [12]. Fabrication de l'acier, document : comment fabrique-t-on l'acier. **Fichier web site** Page 10 et11.**Année 2006**.
- [13]. Produits de la coulée continue. Document web site, **WikiPédia**. Page 8.**Avril 2005**.
- [14]. Coulée continue de l'acier – Aspects métallurgiques, dossier Techniques de l'Ingénieur, Par **Jeanne Choné**. **M7810** page 5, 6, 10, 11, 12, 13 et 14. **Juin 2004**.

## Références bibliographiques

---

- [15]. Décliquer des brames. *Mr. Jacques Debacker*. Fichier Wikipédia, Page 2, 3, et 4. **Année 2011.**
- [16]. S. Forest, M. Amestoy, G. Damman, and S. Kruch. Mécanique des milieux continus. Cours 1<sup>ère</sup> année, Ecole des Mines de Paris. **Année 2004.**
- [17]. Rapport de stage, - Arcelor Mittal Annaba, **Alexandre BONNIN** page 1, 8, 10, et page 20. **Mars-Sept 2007.**
- [18]. Fichier Arcelor Mittal university, metallurgy for professionnels, solidification **page 1.** **Mai 2010.**
- [19]. Document département maintenance de la machine coulée continue, **Arcelor Mittal Annaba.** Page 1, 2, 8, 16 et 25. **Année 1992.**
- [20]. Coulée continue de l'acier Équipement. Exploitation par *Joseph FARHI*, page 10. **Année 2001.**
- [21]. Contrôle métallurgique des installations de coulée continue, recherche du mode de refroidissement optimal en coulée continue de brames, page 15 et 16. **Année 1982.**
- [22]. Les Poudres de coulée continue, Arcelor Mittal Annaba, Mr. **Hervé Tavernier.** **Juillet 2007.**
- [23] : Statistiques finales de taux de déclassement des brames, 09 mois. **Année -2014.**

## Notations :

$A$  : Constante,  $[w/m.k]$ ;

$B$  : Constante,  $[w/ m.k^2]$ ;

$C_p$  : La chaleur spécifique,  $[j / kg.k]$  ;

$D$  : Longueur caractéristique (profondeur de ménisque),  $[m]$  ;

$e$  : Epaisseur de la tranche d'une brame,  $[m]$  ;

$f_s$  : Fraction solidifié,

$G_r$  : Nombre de Grashof ;

$H$  : Coefficient d'échange de la chaleur,  $[w/ m^2.k]$  ;

$N_u$  : Nombre de Nusselt ;

$P_r$  : Nombre de Prandtl ;

$Q$  : La source de la chaleur,  $[w/ m^3]$  ;

$T$  : La température,  $[k]$  ;

$Y_a$  : Largeur,  $[m]$  ;

## **Symboles grecs :**

$\Delta H_f$  : La chaleur de fusion,  $[j / kg]$  ;

$\epsilon$  : Emissivité de la surface ;

$\phi$  : Flux de la chaleur,  $[w/ m^2]$  ;

$\lambda$  : Conductivité thermique,  $[w/ m.k]$  ;

$\nu$  : Viscosité cinématique ;

$\rho$  : La masse volumique,  $[kg/ m^3]$  ;

$cp$  : La chaleur massique à pression constante du matériau

$L$  : La chaleur massique latente de solidification (supposée constante).

$k$  : Est la conductivité thermique.

$hcv$  : Le coefficient de transfert par convection

$\epsilon_r$  : Est l'émissivité du matériau, supposé ici de type corps gris.

$h_{ij}$  : Est le coefficient de transfert entre les sous domaines  $\Omega_i$  .

$R_{ij}$  : Est la résistance thermique de contact.

$T^s_j$  : Est la température de surface

**D** : Profondeur sous le ménisque . . . . . **m**

**e** : Epaisseur . . . . . **m**

**h** : Enthalpie volumique . . . . . **J.m<sup>-3</sup>**

**J<sub>2</sub>** : Deuxième invariant du tenseur déviateur des contraintes =  $\frac{1}{2} \widehat{\sigma}_{ij} \widehat{\sigma}_{ij}$  . . . . . **N<sup>2</sup>.m<sup>-4</sup>**

**R** : Résistance thermique de contact . . . . . **W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>**

**T** : Température . . . . . **K**

**α** : Coefficient d'expansion thermique . . . . . **K<sup>-1</sup>**

**β** : Coefficient de transfert thermique par convection . . . . . **W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>**

**γ** : Poids volumique . . . . . **N.m<sup>-3</sup>**

**ε<sub>r</sub>** : Émissivité pour la radiation d'un corps gris

**ε** : Tenseur des déformations

**ε̂** : Tenseur déviateur des déformations = **ε - ε<sub>m</sub>I**.

**ε<sub>m</sub>** : Déformation moyenne =  $\frac{1}{3} \epsilon_{ij}$

**λ** : Conductivité thermique . . . . . **W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>**

**σ** : Tenseur des contraintes . . . . . **N.m<sup>-2</sup>**

**σ̂** : Tenseur déviateur des contraintes = **σ - σ<sub>m</sub>I** . . . . . **N.m<sup>-2</sup>**

**σ̄** : Contrainte équivalente de Von Mises =  $\sqrt{\frac{3}{2} \widehat{\sigma} : \widehat{\sigma}}$  . . . . . **N.m<sup>-2</sup>**

**σ<sub>B</sub>** : Constante de rayonnement ou constante de Stefan-Boltzmann

**σ<sub>B</sub> = 5,67.10<sup>-8</sup> en W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>**

**σ<sub>m</sub>** : Contrainte moyenne =  $\frac{1}{3} \sigma_{ij}$  . . . . . **N.m<sup>-2</sup>**

**t<sub>s</sub>** : composante de frottement perpendiculaire à la tranche . . . . . **N.m<sup>-2</sup>**

**∅** : Flux thermique . . . . . **W.m<sup>-2</sup>**

**J<sub>2</sub>** : Deuxième invariant du tenseur déviateur des contraintes =  $\frac{1}{2} \widehat{\sigma}_{ij} \widehat{\sigma}_{ij}$ , [N<sup>2</sup>. m<sup>-4</sup>];

**R** : Résistance thermique de contact, [W. m<sup>-2</sup>. K<sup>-1</sup>];

**α** : Coefficient d'expansion thermique, [K<sup>-1</sup>];

**β** : Coefficient de transfert thermique par convection, [W. m<sup>-2</sup>. K<sup>-1</sup>];

**γ** : Poids volumique, [N. m<sup>-3</sup>];

**ε<sub>r</sub>** : Émissivité pour la radiation d'un corps gris ;

## Indices et exposants :

*air* : Air ;

*amb* : Ambiante ;

*c* : Coulée ;

*con* : Convection ;

*l* : Liquide ;

*s* : Solide ;

*Y* : Direction horizontale ;

*Z* : Direction verticale ;

**I** : Matrice identité ;

## Liste des figures

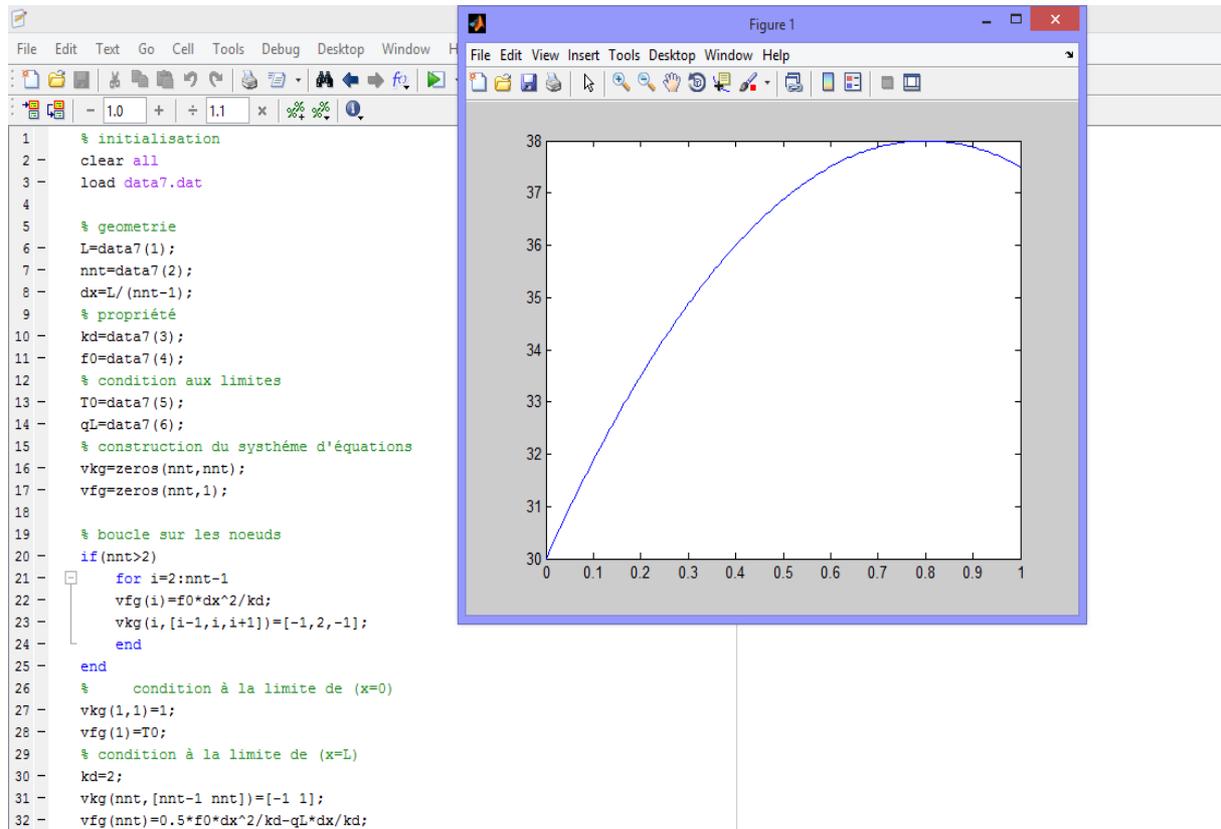
<b>Figure 1 : Digramme fer - carbone partie des aciers</b> .....	<b>4</b>
<b>Figure 2 : Structure austénitique</b> .....	<b>5</b>
<b>Figure 3 : Structure ferritique</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 4 : Structure perlitique</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 5 : Structure perlite lamellaire</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 6 : Structure cémentite</b> .....	<b>7</b>
<b>Figure 7 : Structure martensitique</b> .....	<b>7</b>
<b>Figure 8 : Structure bainite supérieure</b> .....	<b>8</b>
<b>Figure 9 : Structure Bainite inférieure</b> .....	<b>9</b>
<b>Figure 10 : Processus global de l'élaboration de l'acier</b> .....	<b>11</b>
<b>Figure 11 : Convertisseur à oxygène</b> .....	<b>14</b>
<b>Figure 12 : Principe de l'élaboration à oxygène</b> .....	<b>15</b>
<b>Figure 13 : Principe d'élaboration dans un four électrique</b> .....	<b>16</b>
<b>Figure 14: Les arcs électriques</b> .....	<b>16</b>
<b>Figure 15 : Four électrique dans une aciérie</b> .....	<b>16</b>
<b>Figure 16 : Principe et réactions d'affinage</b> .....	<b>17</b>
<b>Figure 17 : Principe de la coulée en chute</b> .....	<b>19</b>
<b>Figure 18 : Principe de la coulée en source</b> .....	<b>19</b>
<b>Figure 19 : Schéma du principe de la coulée continue</b> .....	<b>20</b>
<b>Figure 20 : Poche de coulée alimentant un répartiteur</b> .....	<b>21</b>
<b>Figure 21 : Répartiteur</b> .....	<b>21</b>
<b>Figure 22 : Busette à fond conique</b> .....	<b>22</b>
<b>Figure 23 : Busette immergées isolées</b> .....	<b>22</b>
<b>Figure 24 : Lingotière</b> .....	<b>23</b>
<b>Figure 25 : Refroidissement secondaire simultané de deux brames</b> .....	<b>23</b>
<b>Figure 26: Le mannequin</b> .....	<b>24</b>
<b>Figure 27 : Rouleaux d'extraction</b> .....	<b>24</b>
<b>Figure 28 : Exemple d'oxycoupage</b> .....	<b>25</b>
<b>Figure 29 : Produits de la coulée continue</b> .....	<b>26</b>
<b>Figure 30 : Les brames</b> .....	<b>27</b>
<b>Figure 31 : Les billettes en acier</b> .....	<b>27</b>
<b>Figure 33 : Les blooms</b> .....	<b>28</b>

<b>Figure 34 : La distribution des défauts de la coulée continue sur la brame .....</b>	<b>29</b>
<b>Figure 35: L'apparition des reprises de coulée sur la brame.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure 36 : Les différentes zones de formation des criques de rives.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure 37 : L'apparition des criques en long sur brames.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure 38 : Répartition du liquide en sortie de 3 types de busettes immergées.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 39 : Schéma d'un produit en cours de solidification en coulée continue.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 40 : Diverses résistances thermiques dans une lingotière.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure 41 : Mécanisme de formation des marques d'oscillation par Recouvrement périodique ménisque.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 42 : Organigramme historique d'Arcelor Mittal .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure 43 : Organisation d'Arcelor Mittal Annaba.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 44 : Produits d'ACO<sub>1</sub> sous forme des brames .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure 45 : Photo machine coulée continue utilisé en Arcelor Mittal Annaba.....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 46: Coupe d'une machine coulée continue utilisée en Arcelor Mittal Annaba .....</b>	<b>46</b>
<b>Figure 47 : Le tundish utilisé en Arcelor Mittal Annaba.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 48 : Type de la lingotière utilisé en Arcelor Mittal Annaba.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 49 : Le mannequin de la machine coulée continué (Arcelor Mittal Annaba)...</b>	<b>50</b>
<b>Figure 50 : Zone de refroidissement secondaire (Arcelor Mittal Annaba).....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 51 : Installation de la machine coulée continue en courbe.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 52 : Les rouleaux.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure 53 : L'emplacement des rouleaux dans la zone de refroidissement .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 54 : La table d'oxycoupage.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure 55: Les brames fabriquées en Arcelor Mittal Annaba.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure 56 : Manutention des brames.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure 57 : Pince électrique.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 58 : Parc de stockage.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 59 : Les rôles joués d'une poudre par le flux C.C.....</b>	<b>60</b>
<b>Figure 60 : La cristallisation la poudre de la coulée continue.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure 61 : La poudre de la coulée.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure 62 : Présentation schématique des principaux des principaux défauts apparus sur les brames coulées en continue .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure 63: crique de rive sur les brames (Côté droite).....</b>	<b>69</b>
<b>Figure 64 : crique de rive sur les brames (Côté gauche).....</b>	<b>69</b>

<b>Figure 65 : crique de rive sur les brames réparées par chalumeau.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure 66 : Histogramme taux de déclassement des brames par défauts année 2014...71</b>	<b>71</b>
<b>Figure 67 a : Aspect micrographie des criques de rive sur les brames. (Observation sans attaque).....</b>	<b>76</b>
<b>Figure 67b : Aspect micrographie des criques de rive sur les brames (Observation par attaque NITAL).....</b>	<b>76</b>
<b>Figure 68 : Tranche de la brame.....</b>	<b>79</b>
<b>Figure 69 : Refroidissement secondaire des brames.....</b>	<b>82</b>
<b>Figure 70 : Comportement du matériau en fonction de son état .....</b>	<b>85</b>
<b>Figure 71: Evolution de la viscosité de la poudre en fonction de la température de Coulée .....</b>	<b>91</b>
<b>Figure 72: Evolution de la vitesse de coulée en fonction de la température .....</b>	<b>92</b>
<b>Figure 73 : débit de refroidissement secondaire en fonction la vitesse de coulée .....</b>	<b>93</b>
<b>Figure 74 : Profil de température suivant la direction OZ.....</b>	<b>94</b>
<b>Figure 75 : Profil de température suivant la direction OY à la grande face de la brame.....</b>	<b>95</b>

## Liste Des Tableaux

<b>Tableau 1 : Taux de déclassement par défaut année - 2014 .....</b>	<b>85</b>
<b>Tableau 2 : Fourchettes des aciers utilisées pour la coulée continue des brames en Arcelor Mittal Annaba .....</b>	<b>86</b>
<b>Tableau 3 : Composition de l'acier avant la coulée .....</b>	<b>86</b>
<b>Tableau 4 : Composition de l'acier après la coulée .....</b>	<b>86</b>
<b>Tableau 5 : Composition chimique de la poudre de la coulée .....</b>	<b>87</b>
<b>Tableau 6 : La viscosité en fonction de la température .....</b>	<b>88</b>
<b>Tableau 7 : Vitesse de coulée en fonction de la température de coulée .....</b>	<b>89</b>
<b>Tableau 8 : Débit de refroidissement en fonction de la vitesse de coulée .....</b>	<b>90</b>
<b>Tableau 9 : Débit de refroidissement dans chaque zone .....</b>	<b>91</b>



```

1  % initialisation
2  clear all
3  load data7.dat
4  % Tc=[1520];
5  % Vx=[1.5];
6  % R=[10.5];
7  % Ds=[241 168 667 288 368 299 499];
8  % Tsu=[1200];
9  % Tdc=[1069];
10 % Tamb=[25];
11 % Lar=[600];
12 % L=[7000];
13 % E=[260];
14 % geometrie
15 L=data7(1);
16 nnt=data7(2);
17 dx=L/(nnt-1);
18 % propriété
19 kd=data7(3);
20 f0=data7(4);
21 % condition aux limites
22 T0=data7(5);
23 qL=data7(6);
24 % construction du système d'équations
25 vkg=zeros(nnt,nnt);
26 vfg=zeros(nnt,1);
27
28 % boucle sur les noeuds
29 if(nnt>2)
30     for i=2:nnt-1
31         vfg(i)=f0*dx^2/kd;
32         vkg(i,[i-1,i,i+1])=[-1,2,-1];
33     end
34

```

