

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : SCIENCE DE L'INGENIORAT
Département : Métallurgie et Génie métallurgique
Domaine : Technologie de fonderie
Filière : Métallurgie
Spécialité : Technologie de fonderie

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**Etude sur les criques de rives qui apparaisse dans les
brames d'acier en coulée continue**

Présenté par : AZOUZI Aboubaker

Encadrant : Dr. HACINI Mohamed Docteur Université BADJI
MOKHTAR-ANNABA

Jury de Soutenance :

Pr. HADJI Ali	Professeur	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA	Président
Dr. HACINI Mohamed	Docteur	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA	Encadrant
Pr. LEMOUI Abdenacer	Professeur	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA	Examineur
Dr. HAMANI Med Seghir	Docteur	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

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. **HACINI Mohamed** pour son aide et ses conseils précieux tout au long de la réalisation de ce travail.*

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.

Résumé

La brame est un produit semi-fini important pour la production dans le domaine industriel. Son élaboration est faite comme suit :

Conversion de la fonte en acier liquide qui est traité pour l'augmenter de ces caractéristiques mécanique et physique, en suit solidifier sous forme de brame.

Mais lors de ces phases nous avons constaté des défauts dans celle-ci (retassures au cône de retraite, fissures longitudinal sur les faces Etc.).

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.

Notre but dans ce mémoire est de viser à quelque paramètre qui influe a l'apparition de crique de rive, pour minimiser les risques de formation de ce défaut.

Liste de figure

Figure 1 : Digramme fer - carbone partie des aciers.....	4
Figure 2 : La chaîne de fabrication pour une filière fonte.....	12
Figure 3 : Les demi-produits : bloom, billette et brame.....	14
Figure 4 : Les produits finis issus du laminage.....	15
Figure 5 : Principe de la coulée en chute.....	17
Figure 6 : Principe de la coulée en source.....	18
Figure 7 : Schéma du principe de la coulée continue.....	19
Figure 8 : La distribution des défauts de la coulée continue sur la brame.....	20
Figure 9 : L'apparition des reprises de coulée sur la brame.....	21
Figure 10 : Les différentes zones de formation des criques de rives.....	22
Figure 11 : L'apparition des criques en long sur brames.....	23
Figure 12 : Organigramme d'Installations et produits du complexe.....	26
Figure 13 : Produits d'ACO1 sous forme des brames.....	28
Figure 14 : Machine de la coulée continue.....	29
Figure 15 : la poche à quenouille utilisée en SIDER.....	30
Figure 16 : Le tundish utilisé en SIDER.....	31
Figure 17 : type de la lingotière utilisé en SIDER.....	32
Figure 18 : Le mannequin de la machine coulée continué.....	34
Figure 19 : La table d'oxycoupage.....	37
Figure 20 : Les brames fabriquées à SIDER.....	38
Figure 21 : manutention des brames.....	39
Figure 22 : Pince électrique.....	40
Figure 23 : Parc de stockage.....	40
Figure 24 : Les rôles joués d'une poudre par le flux C.C.....	41
Figure 25 : photo de la poudre.....	44
Figure 26 : Présentation schématique des principaux défauts apparus sur les brames en coulées continu.....	46
Figure 27 : crique de rive sur les brames.....	48
Figure 28 : crique de rive profonde sur les brames réparées par chalumeau.....	48
Figure 29 : Principaux défauts rencontrés en coulée continue.....	49
Figure 30 : Schémas illustrant la solidification d'alliages métalliques.....	50
Figure 31 : Localisation des zones fragiles au niveau du mélange pâteux.....	51
Figure 32 : Distribution du liquide aux joints de grains en fonction de l'angle diédral.....	54

Sommaire

Résumés

Listes des figures

Table des matières

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités

I. Introduction.....3

II. Les aciers.....4

II.1. Définition.....4

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

II.3. Différentes familles d'aciers.....8

III. Fabrication de l'acier.....10

III.1. Une grande variété des produits sidérurgiques.....11

III.2. La fabrication de l'acier.....11

III.3. Les grandes étapes.....11

III.4. Les produits sidérurgiques.....13

IV. Coulée de l'acier.....15

IV.1. Coulées en lingotières.....16

IV.2. La coulée continue.....19

IV.3. Les défauts de la coulée continue des brames.....20

Sommaire

Chapitre II : Présentation du complexe

I. Complexe sidérurgique D'el-Hadjar	25
I.1. Présentation du complexe.....	25
I.2 Management de sécurité de travail	25
I.3 Organigramme de production.....	26
I.4 Gamme des produits.....	27
II.1 Aciérie à Oxygène N°1 (Brames).....	28
II.2 Atelier de la coulée continue	29
II.2.1 Carte technologique de la Machine de la coulée continue...29	
II.2.1.1 Description tout le processus d'obtention de la brame	29
a) Machine de la coulée continue de l'ACO1.....	29
b) La poche à quenouille.....	30
c) Le tundish.....	31
d) La lingotière.....	32
e) Oscillateur.....	33
f) Le mannequin.....	34
g) Zones de refroidissement.....	35
h) Equipement d'extraction (redresseur).....	35
i) Caractéristiques des rouleaux.....	36
j) La table d'oxycoupage.....	37
k) Dimension de brame.....	38
II.2.2. Poudre de la coulée continue.....	41
II.3.1 Les paramètres du procédé de coulée continue	43
II.3.2 La poudre utilisée SIDER.....	44
III. Les défauts de brames existant en SIDER.....	45
III.1 Introduction.....	45

Sommaire

III.2 Présentation schématique des principaux défauts apparus sur les brames en coulées continu.....	46
III.3 Crique transversal angle (appelé crique de rive).....	47
III.3.1 Définition du problème posé.....	47
III.3.2 Les défauts que l'on peut rencontrer	47
III.3.2.1 Les criques de rives.....	47
III.3.2.2 Aperçue sur les défauts crique de rives des brames.....	48
Chapitre III : Facteurs qui influent à l'apparition de crique de rive	
I.1 Introduction.....	49
I.2 phénomènes impliqués sur crique de rive.....	50
II. Les paramètres influents sur crique de rive.....	52
II.1 Influence de l'alliage (composition chimique).....	52
II.2 Influence de la microstructure.....	54
II.3 Influence du chargement thermomécanique.....	55
II.4 Discussion.....	56
III. L'influence de refroidissement secondaire.....	57
III.1 Importance sur le plan de la qualité.....	57
III.2 Relation entre la formation des criques et l'état thermique de la brame.....	58
III.2.1 Criques mécaniques.....	58
III.2.2 Criques thermiques.....	58
III.3 Gradients thermiques existant dans la machine.....	59
III.3.1 Dans le sens transversal.....	59
III.3.2 Dans le sens longitudinal.....	59
III.3.3 Dans le sens de l'épaisseur.....	59
III.4 meilleur profil de refroidissement.....	60
Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Référence bibliographique	63

Introduction générale

Depuis ces dernières années, la sidérurgie a beaucoup évolué techniquement et les aciers ont également changé sous l'impulsion des deux facteurs suivants :

- Augmentation des exigences dans l'utilisation des aciers pour satisfaire des mises en œuvre et emplois modernes ;
- Disponibilité de nouvelles techniques sidérurgiques permettant d'améliorer la qualité des produits, leurs propriétés et d'élaborer de nouveaux produits.

On constate ainsi que les progrès sur les propriétés des produits sont très souvent liés, par une forte interaction, aux évolutions des procédés de fabrication, par exemple :

- L'introduction massive et parfois généralisée des procédés continus, comme la coulée continue mais aussi le recuit continu, etc., a non seulement profondément modifié les conditions de fabrication mais aussi fourni des produits plus réguliers et plus précis dans leurs propriétés
- Les progrès de la métallurgie du métal liquide (contrôle de la pureté, des additions...) se traduisent par des gains sur les caractéristiques.

Cela a permis d'améliorer les performances en service de nombreux produits.

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

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

Dans l'industrie sidérurgique, la coulée continue est le procédé qui tient place entre l'élaboration de l'acier et le laminage. Cette technique prend une place de plus en plus importante sur le marché de la production d'acier en raison de ses avantages par rapport à la technique ancienne de coulée en lingots : économie d'énergie et de main-d'œuvre, meilleur rendement et amélioration de la qualité du produit.

Pour schématiser le processus en régime, on peut le décrire de la manière suivante : l'acier en fusion contenu dans une poche est lentement versé dans une lingotière sans fond maintenue à basse température par un système de refroidissement. L'acier liquide, au contact avec la lingotière, va se solidifier et une peau solide commence ainsi à se former. On parle de

Introduction générale

refroidissement primaire du brin. Sous la lingotière sont disposés des rouleaux extracteurs qui font avancer le brin dans la machine. 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.

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 .

Dans ce travail on se penchera sur les produits semi-finis et particulièrement les brames, leur élaboration, les défauts les plus répandus, les facteurs qui peuvent influencer à ce dernier et quelques solutions pour les éviter.

Le premier chapitre de ce mémoire expose les propriétés de l'acier, des informations générales pour l'obtention de l'acier, et quelques défauts de brame.

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation du complexe, gamme des produits, et explication du processus qui se déroule dans la machine à coulée continue.

Le chapitre III décrit le défaut posé, les facteurs les plus influencés, et quelques solutions théoriques.

Chapitre I : Partie bibliographique

I. Introduction

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. [2]

Origine métallurgique

L'influence de l'alliage s'exprime en premier lieu à travers sa composition chimique : de manière générale plus l'alliage a un intervalle de solidification important, plus il est sensible à la fissuration à chaud. D'autre part, le rôle de la transformation ferrite-austénite est connu. Le retrait associé à cette transformation génère des déformations dans les régions environnantes. Les nuances pour lesquelles la transformation ferrite-austénite a lieu à haute température montrent des déformations plus importantes du fait de la moindre consistance du métal, ce qui peut alors affecter la zone pâteuse et provoquer la rupture.

Origine thermique

En coulée continue, l'ensemble de la zone semi-solide est soumis à un état de contrainte et de déformation complexe lié à la solidification de la peau, et en particulier à l'intensité du refroidissement de cette dernière. Dans le cas de la coulée de brames, les effets mécaniques sont exacerbés du fait des sollicitations résultant du cintrage/décintrage, du passage entre les rouleaux et du gonflement entre ces derniers sous l'effet de la pression métallo-statique. [2]

II. Les aciers

II.1. Définition

L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2% en masse, 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. [3]

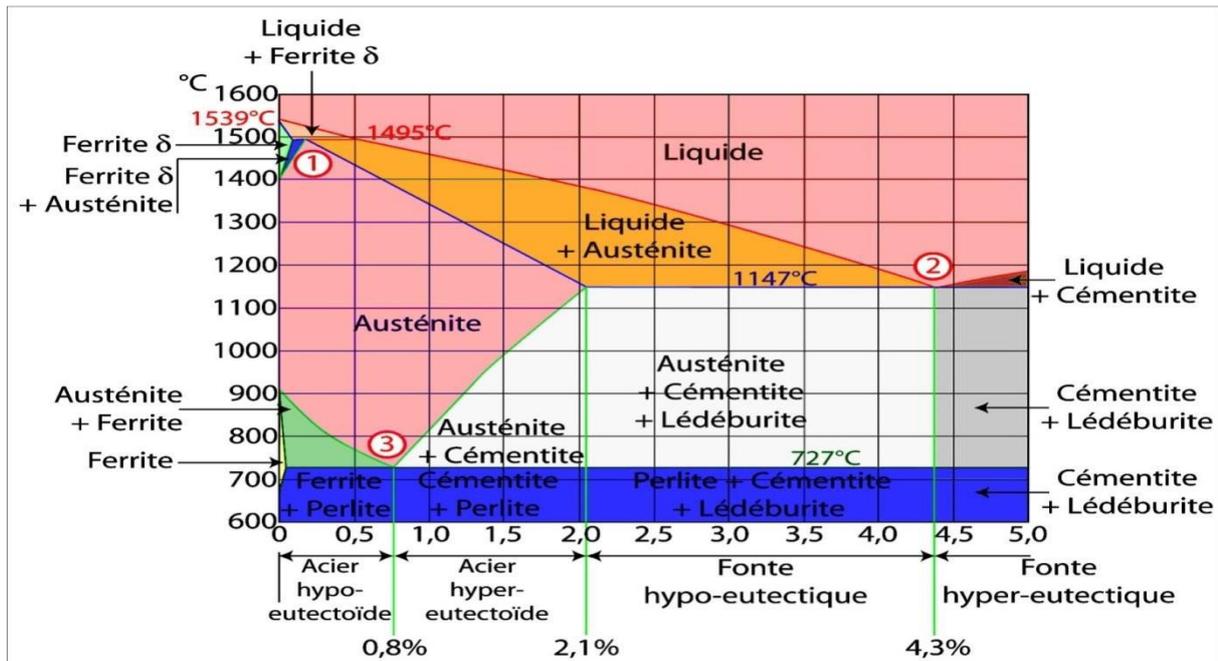


Figure 1 : Diagramme fer - carbone partie des aciers.

Selon la microstructure et la teneur en carbone, on distingue plusieurs types d'aciers :

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

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamique dépend de leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi des autres éléments d'alliage), et de la température. On peut aussi avoir des structures hors d'équilibre (martensite). [3]

II.2. Les différentes phases de l'acier

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

a) Austénite :

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer γ . L'austénite est stable à haute température (entre 910°C et 1394°C), elle est peu dure et relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est antiferromagnétique. 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). [8]

b) Bainite :

Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées. 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.

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

b.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 lame. 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.

b.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. [8]

c) 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.

La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

- Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- Grains dans les aciers ayant subi un traitement thermique de recuit.
- Et de précipités intergranulaires dans les aciers ayant un $\% C > 0,8$.

Au point de vue du diagramme Fe- Fe_3C et lors du refroidissement, la cémentite peut exister en trois différentes formes de liaison mais avec la même composition chimique. [8]

d) Ferrite :

C'est une solution solide de carbone dans le fer α c'est à dire la ferrite est constituée par du fer **a** renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone $< 0,02\%$) ainsi que d'autres inclusions. On distingue la ferrite **a** à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02% et la ferrite δ à haute température à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1%. La ferrite est peu tendue et très ductile (HV = 90, $R_m = 300N/mm^2$, $K = 300j/cm^2$). Elle est magnétique à la température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect de grains homogène polyédrique. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C.

C'est une phase de l'acier, sous la forme d'une structure cubique centrée. 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°C, résulte de l'apparition progressive du ferromagnétisme dans la structure cubique centré. [8]

e) Martensite :

La martensite (fer α) 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 α , de même composition que l'austénite initiale.

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température d'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite.

La martensite possède une grande dureté ($HV = 700 - 900$), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés. Toutes ces microstructures sont toutes des produits de décomposition de l'austénite.

Elles sont composées d'un mélange de ferrite α , de carbure (cémentite ou carbure plus ou moins complexes). La morphologie des deux phases en présence dépend essentiellement de la vitesse de refroidissement. [8]

f) 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.

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternée elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8% de carbone. Elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85%. La perlite est dure ($HV= 200$) et assez ductile $R_m = 800$ N/mm². [8]

g) Le carbone

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable du diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite (Fe_3C). [3]

II.3. Différentes familles d'aciers

Il existe des aciers faiblement alliés, à faible teneur en carbone, et au contraire des aciers contenant beaucoup d'éléments d'alliage.

a) Aciers non alliés à usage général

Ils ont une faible teneur en carbone et sont les plus utilisés, leurs qualités pouvant varier. Leurs applications vont de la construction soudée à l'ameublement en passant par l'électroménager. [8]

b) Aciers alliés

1. Aciers faiblement alliés

Aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse ; ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance.

2. Aciers fortement alliés

Au moins un élément d'addition dépasse les 5% en masse. Destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, maraging, hadfields, et à roulements. [8]

c) Aciers spéciaux

Leur composition est plus précise et plus pur et correspond à des usages définis à l'avance. Leurs applications courantes sont : forets, ressorts, arbres, matrices. [8]

d) Aciers inoxydables

L'acier inoxydable est une des trois grandes familles des aciers qui présente une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage. C'est un acier fortement allié. Ses applications sont multiples, mais aussi couteaux. ces aciers contiennent au moins 12% de chrome. [8]

III. Fabrication de l'acier

Le processus de fabrication de l'acier peut être décomposé en trois étapes :

a) Transformation des matières premières

-par la filière fonte,

Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

-par la filière électrique,

Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération ; on parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique. [8]

b) passage dans l'aciérie

Cette étape détermine le passage de la fonte liquide et de la mitraille fondue à l'acier solide : l'acier sauvage est débarrassé de l'excédent de carbone dans le convertisseur et mis à nuance lors de passage dans la station d'affinage.

La solidification de l'acier se fait ensuite par la coulée continue, à l'issue de laquelle on obtient des pré-produits (brame, billette, etc...). [8]

c) Le laminage

Deux processus de laminage à chaud prédominent, donnant lieu à des techniques différentes :

-laminage des produits longs

-laminage des produits plats

Certains produits plats peuvent ensuite subir un nouveau laminage à froid afin d'obtenir un amincissement supplémentaire de la tôle. [8]

III.1. Une grande variété des produits sidérurgiques

Les produits sidérurgiques sont définis par leur forme et leurs dimensions, telles qu'elles résultent du processus de fabrication, mais aussi par la nuance et la qualité de l'acier dont ils sont constitués. Compte tenu des utilisations très diverses de l'acier, il existe actuellement une très grande variété de produits sidérurgiques. Pour des raisons économiques, le nombre de combinaisons de produits fabriqués et de nuances n'est pas illimité et les utilisateurs sont orientés par des normes vers un ensemble de produits bien définis et susceptibles de répondre à la quasi-totalité des besoins. [4]

III.2. La fabrication de l'acier

Si l'on se place du point de vue de la chronologie historique, on peut dire que la production industrielle de l'acier est relativement récente puisqu'elle remonte à une centaine d'années environ. [4]

III.3. Les grandes étapes

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

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

La figure représente de façon schématique, la chaîne complète de cette filière depuis l'usine d'agglomération où sont préparées les matières premières jusqu'aux produits finis. [4]

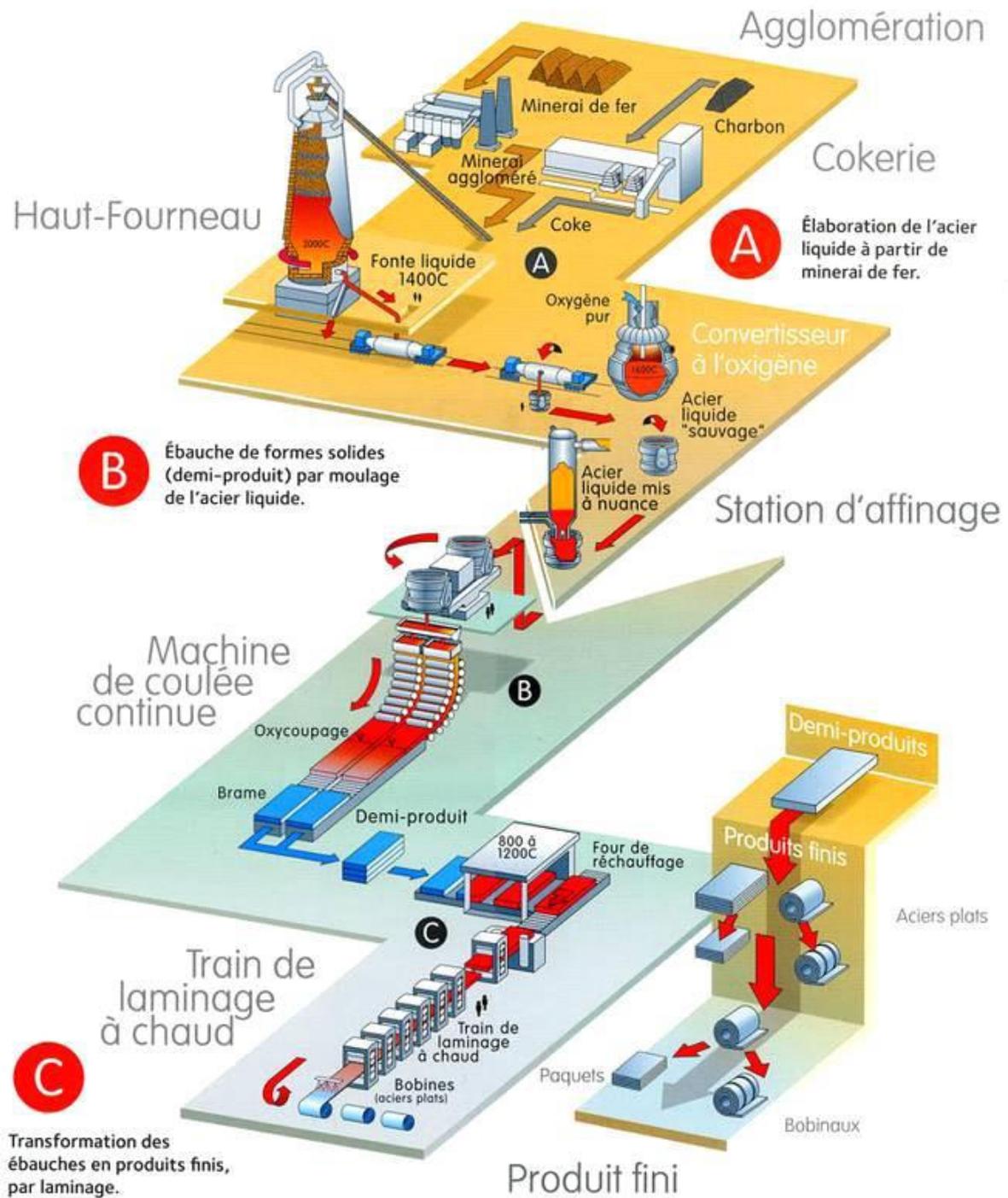


Figure 2 : La chaîne de fabrication pour une filière fonte. [4]

III.4. Les produits sidérurgiques

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

Ses opérations complémentaires, considérées conventionnellement comme ne faisant pas partie de la sidérurgie, modifient la géométrie ou les dimensions des produits livrés par la sidérurgie pour en faire des produits spécifiques comme les tubes sans soudure ou tubes soudés, produits tréfilés, profilés formés à froid, produits étirés ou laminés à froid. [4]

Coulée continue

Ce procédé permet d'obtenir directement les demi-produits sans l'étape de laminage, blooming ou slabbing, qui suit la coulée en lingots.

La coulée continue a supplanté la coulée classique en lingots en raison des gains de matière et de productivité générés.

L'acier liquide est coulé dans une lingotière en cuivre de section carrée, ronde ou rectangulaire selon le demi-produit fabriqué.

Le métal commence à former une peau solide dans la lingotière énergiquement refroidie à l'eau. Tiré vers le bas par un jeu de rouleaux, le produit achève de se solidifier.

A la base de l'installation, on extrait une barre solide, qui est découpée en tronçons à la longueur désirée.

Les demi-produits sont réchauffés dans des fours avant de passer à l'étape suivante (laminage). [8]

Les produits

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

Les demi-produits

Les brames sont les ébauches des produits plats.

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

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

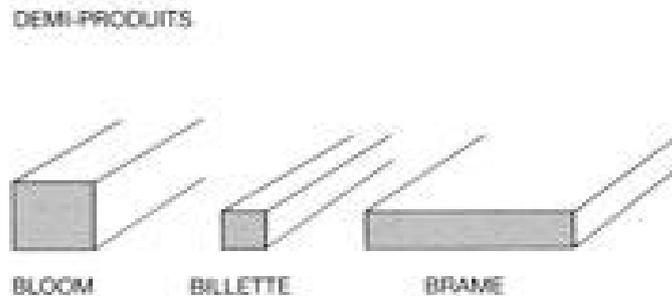


Figure 3 : Les demi-produits : bloom, billette et brame. [4]

La transformation

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

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

Après le laminage à chaud, certains produits, comme les tôles, peuvent être ensuite laminés à froid. Le laminage à froid permet de réduire encore l'épaisseur et d'obtenir une meilleure finition de surface des produits. [4]

Les produits finis

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

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

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

Les longs : Laminés des blooms et billettes, les produits longs sont les rails, profilés de construction, barres et fils. Dans le bâtiment, les fils ont un diamètre de 5 à 46 mm, les barres une section ronde de 12,5 à 60 mm de diamètre ou carrée sont donné à la figure. [4]

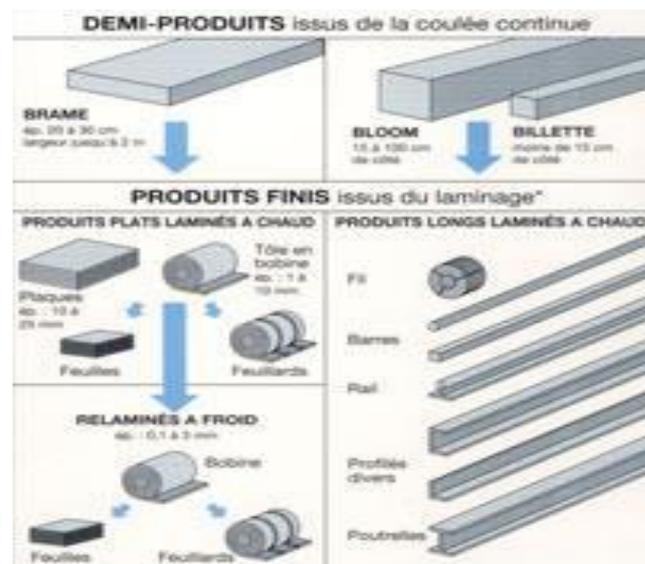


Figure 4 : Les produits finis issus du laminage [4]

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.

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 revêtu 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).

L'acier à sa sortie du four doit être surchauffé de 100 à 150°C au-dessus de sa température de fusion. La surchauffe est nécessaire pour la compensation des pertes de chaleur occasionnées par la durée de la coulée qui peut parfois dépasser 1 heure 30minutes.

Mais cette surchauffe doit être contrôlée car des températures très élevées peuvent provoquer les criques, la ségrégation chimique et la haute teneur en gaz. Les températures basses peuvent contribuer aussi à la mauvaise qualité de la surface et la haute teneur en inclusions métalliques. [3]

IV.1. Coulées en lingotières

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

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

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

a) La coulée en chute :

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

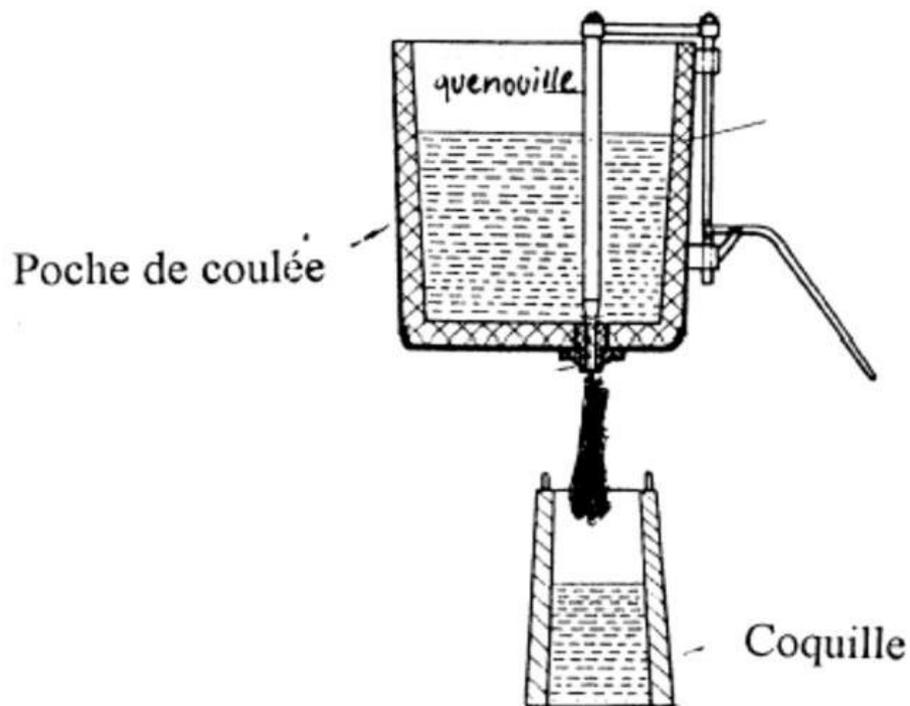


Figure 5 : Principe de la coulée en chute. [3]

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). [3]

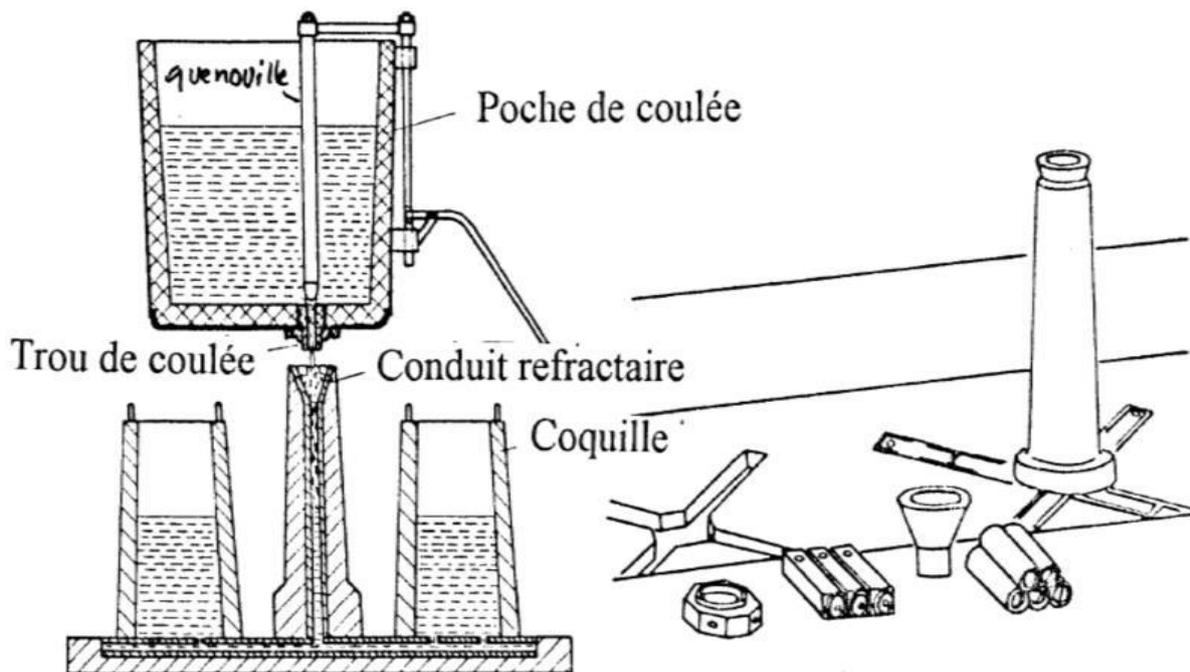


Figure 6 : Principe de la coulée en source. [3]

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. [8]

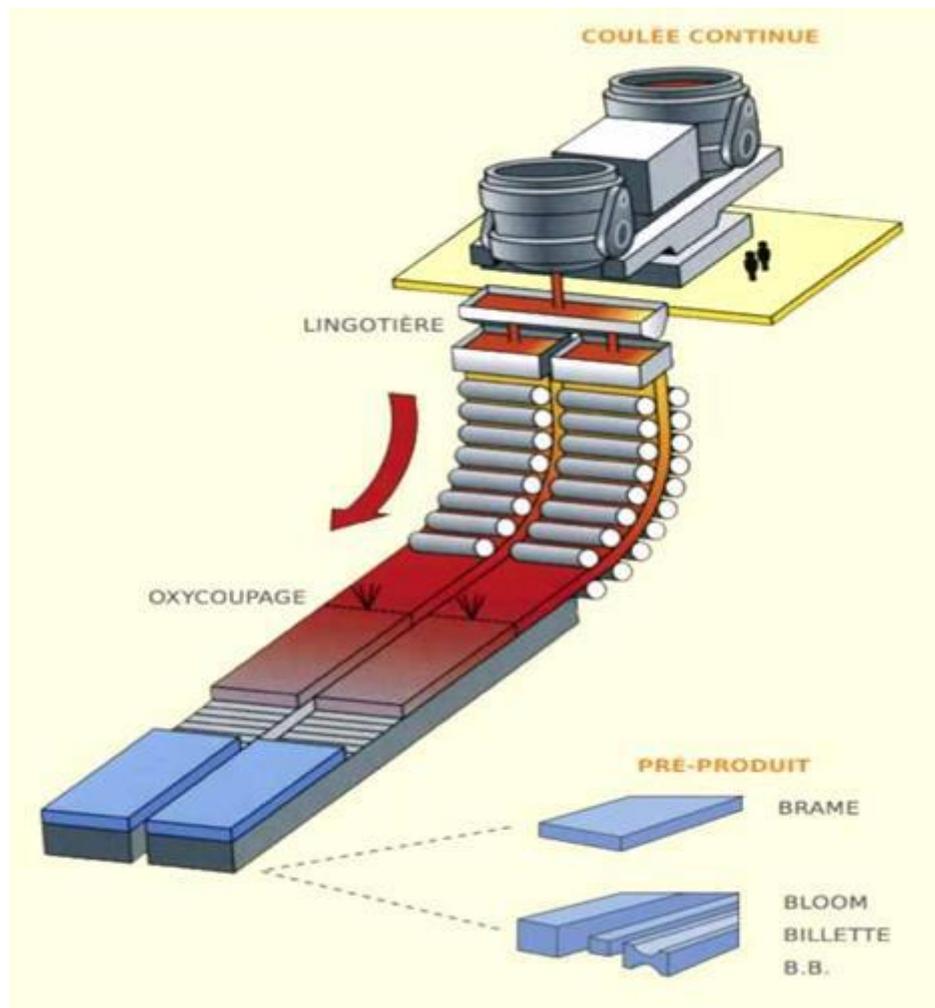


Figure 7 : Schéma du principe de la coulée continue. [8]

IV.3. Les défauts de la coulée continue des brames

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. [1]

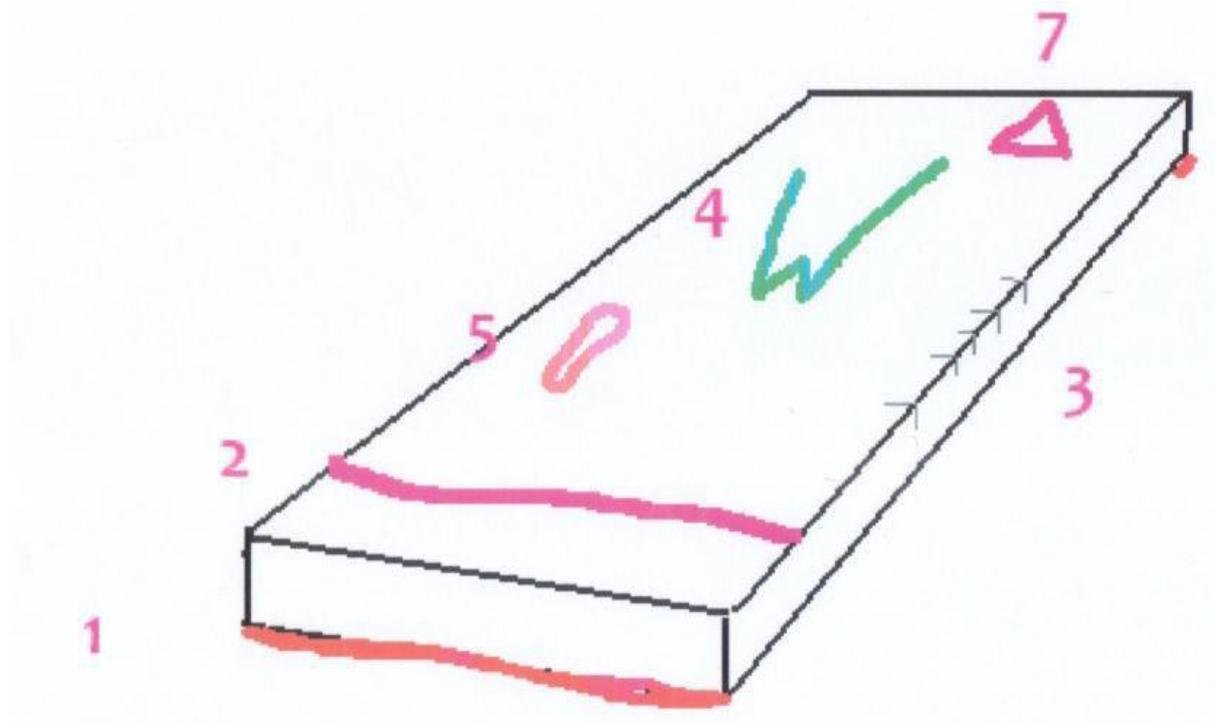


Figure 8 : La distribution des défauts de la coulée continue sur la brame. [1]

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 laminée 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. [1]

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.

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. [1]

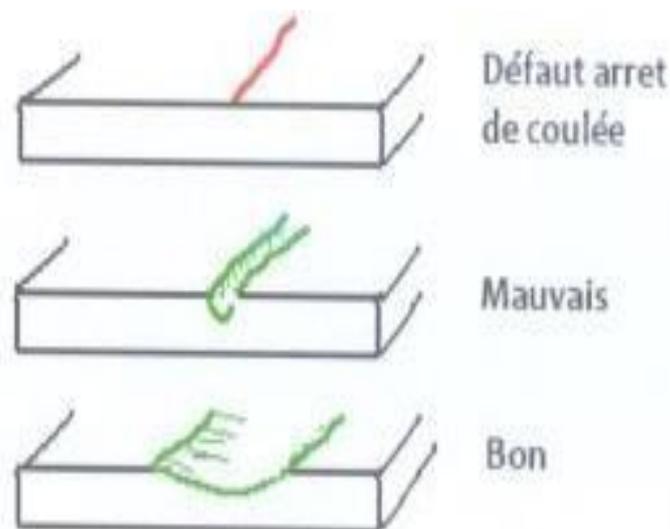


Figure 9 : L'apparition des reprises de coulée sur la brame. [1]

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. Certain aciers, certaines machines de coulée continue, ont cette propension d'en faire beaucoup. Elles sont évidemment très dangereuses pour les trains à bandes. [1]

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

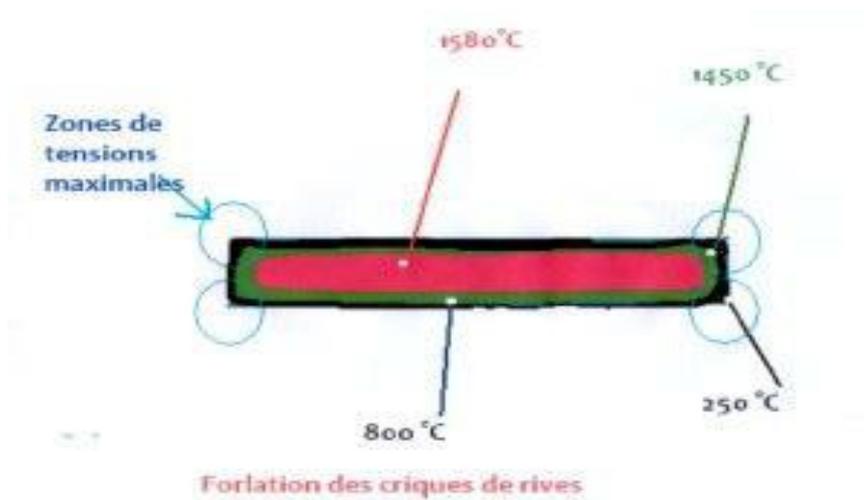


Figure 10 : Les différentes zones de formation des criques de rives. [1]

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.

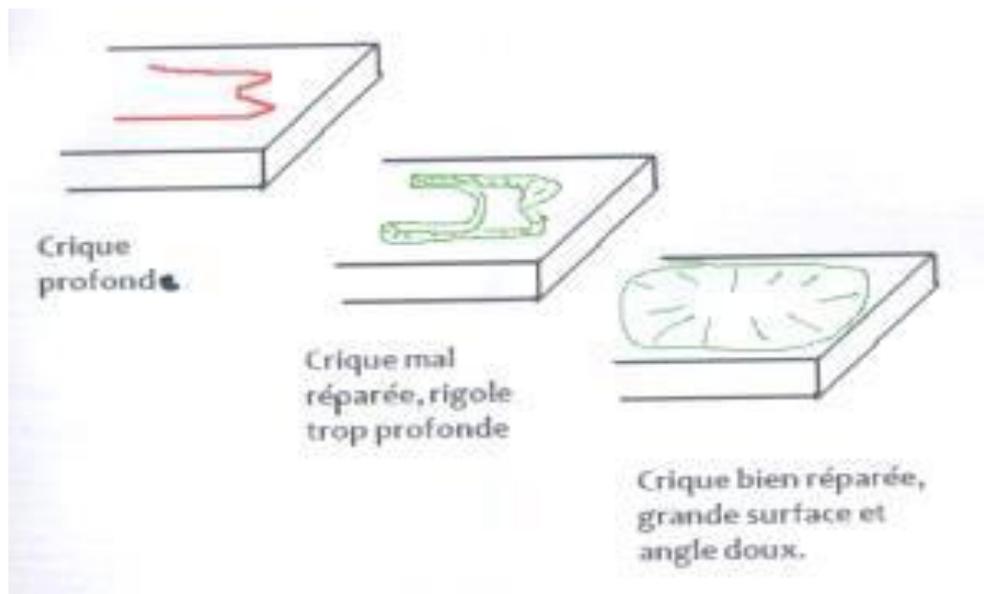


Figure 11 : L'apparition des criques en long sur brames. [1]

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. [1]

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. [1]

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. [1]

Chapitre II : Présentation du complexe.**I. Complexe sidérurgique D'el-Hadjar****I.1. Présentation du complexe**

Le complexe d'El-Hadjar représente un facteur économique pour le pays par la diversité de ses unités et ses installations de transformation du minerai de fer. L'entreprise nationale de sidérurgie a été créée pour servir l'économie du pays et répondre aux besoins du marché en matière de produits métalliques. La sidérurgie reste la base du développement industriel d'un pays. Elle s'occupe de transformation de matière première et du passage de la fonte vers l'acier. Le complexe sidérurgique principal centre d'activités sidérurgiques en Algérie est responsable de l'ensemble des opérations nécessaires à l'exploitation des ateliers et des installations existantes qui le constituent ; Il s'agit de la production de la fonte et de l'acier sous forme de tôles et de pipes et rond à béton et gueuze.

I.2 Management de sécurité de travail :

Le complexe utilise des standards universels de sécurité très exigeants qu'il impose à tous ces unités et services ainsi qu' ces sous-traitants, ces standards dicte des consignes à suivre méticuleusement car toutes erreurs peut s'avérer fatale, les standards sont les suivants :

- 1-standard isolation d'énergie.
- 2-standard espace confiné.
- 3-standard travail en hauteur.
- 4-standard trafic ferroviaire.
- 5-standard véhicule et conduite.
- 6-standard pont et levage.
- 7-standard gestion des contractants.
- 8-standard gestion des urgences.
- 9-standard investigation des incidents.
- 10-standard audit de terrain.

I.3 Organigramme de production :

L'organigramme de la figure I.1 représente les différentes installations ainsi que leurs productions(en gras) avec les principaux utilisateurs.

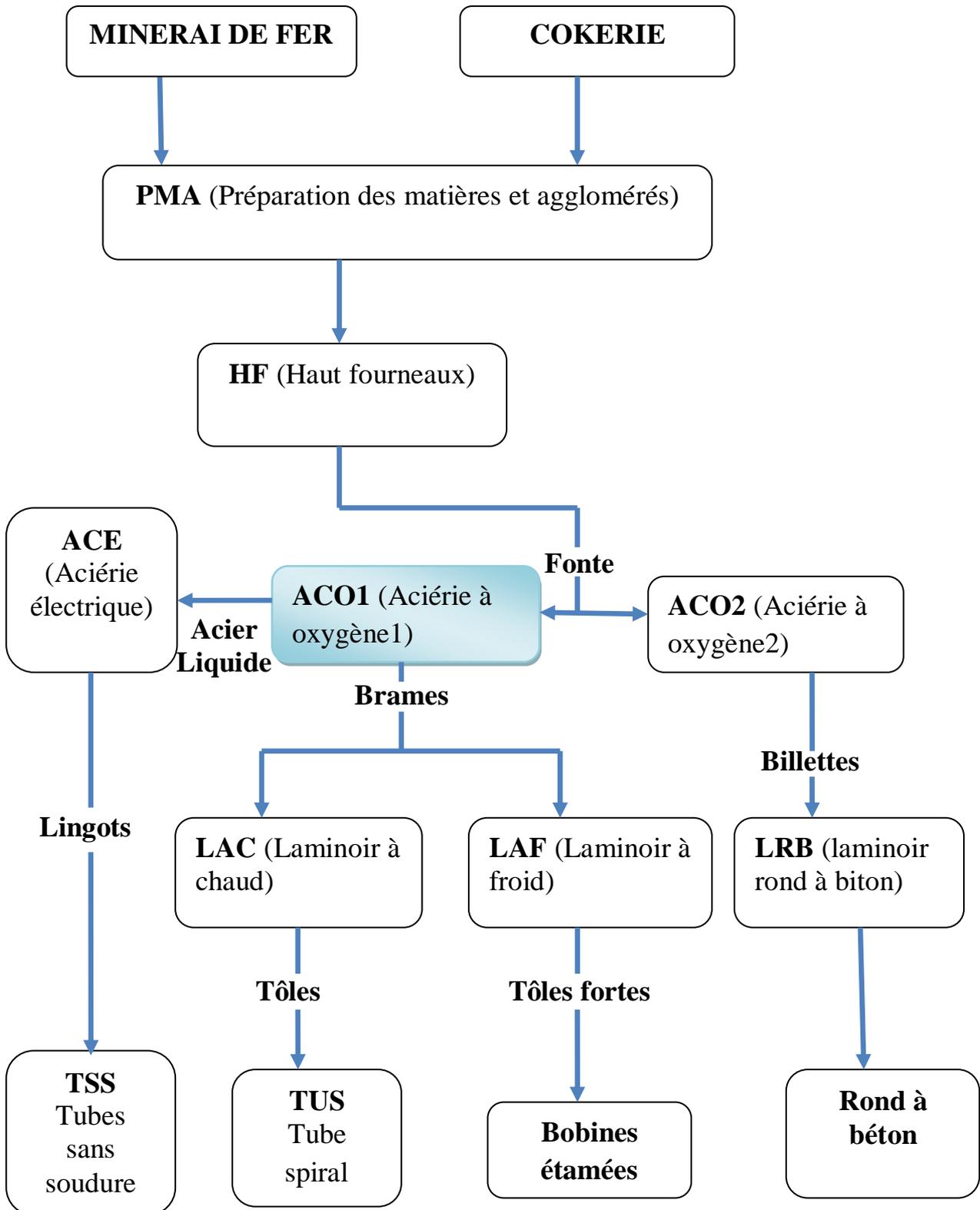


Figure 12 : Organigramme d'Installations et produits du complexe

I.4 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 métalliqueetc.

c) Tubes :

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

d) Rond à béton :

Pour construction des bâtiments et travaux publiques.

II.1 Aciérie à Oxygène N°1 (Brames) :

Construite en 1972, l'aciérie à oxygène n°1 (ACO1) 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'ACO1 est de 1037 KT/an de brames conformes.

Les principales installations de l'ACO1 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.

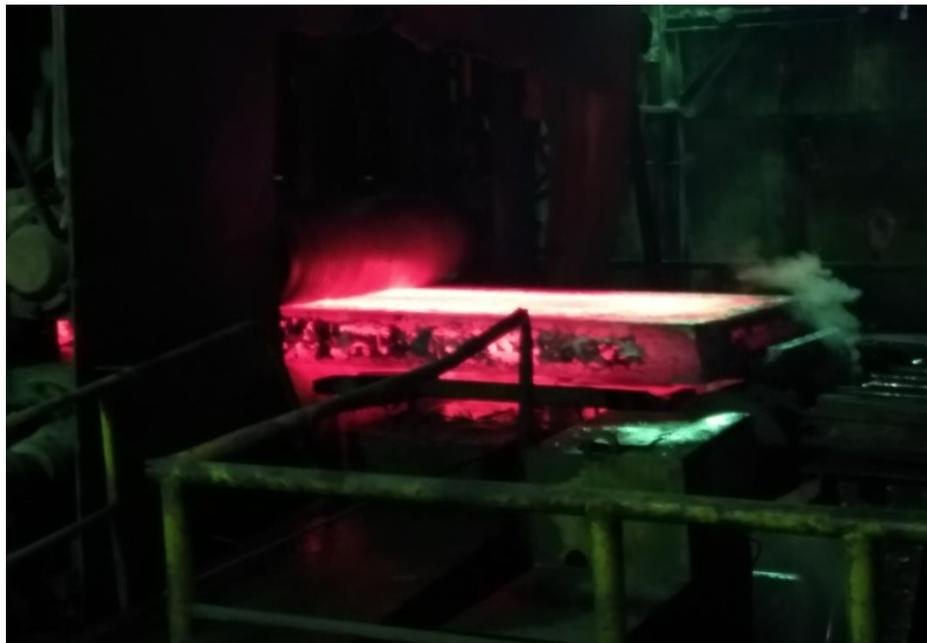


Figure 13 : Produits d'ACO1 sous forme des brames.

II.2 Atelier de la coulée continue :

II.2.1 Carte technologique de la Machine de la coulée continue :

II.2.1.1 Description tout le processus d'obtention de la brame :

a) Machine de la coulée continue de l'ACO1 :

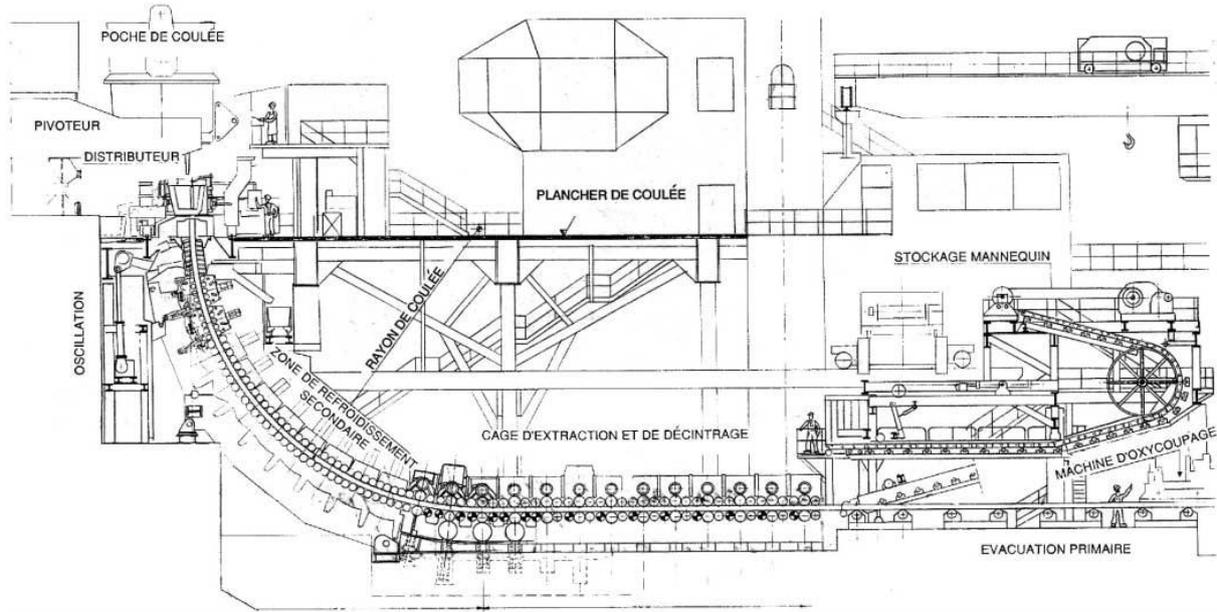


Figure 14 : Machine de la coulée continue [12]

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.

b) La poche à quenouille :

La poche à quenouille consiste à avoir un trou au fond de la poche, bouché par une quenouille en matériau réfractaire. Un levier permet de relever la quenouille, et de faire couler le métal. Ce dispositif présente un inconvénient : tout blocage de la quenouille entraîne la perte du contenu de la poche. Si on insiste, on casse la quenouille. Si les choses se passent vraiment mal, on se retrouve avec un bloc de métal figé dans la poche, la remise en service de la poche n'étant pas assurée.



Figure 15 : la poche à quenouille utilisée en SIDER

c) 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. [12]



Figure 16 : Le tundish utilisé en SIDER

Nb de tundish : 20 tundish.

Dimensions :

Longueur = 4300 mm ;

Largeur = 1900 mm ;

Hauteur = 1200 mm.

Type : bac en acier a garnissage réfractaire.

d) La lingotière :

C'est moule sans fond en cuivre qui est refroidie par aspersion d'eau et qui nous la forme de notre produit. [12]



Figure 17 : type de la lingotière utilisé en SIDER

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

Description :

La lingotière utilisée en courbe, refroidie par eau et comporte des plaques de cuivre. Il s'agit d'une lingotière à passage continu 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. [12]

e) 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.

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.

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.

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. [12]

f) Le mannequin :**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. [12]



Figure 18 : Le mannequin de la machine coulée continué

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. [12]

g) Zones de refroidissement :**Refroidissement de la lingotière (refroidissement primaire) :****Caractéristique :**

Quantité totale d'eau : 6000 L/min (360 m³/ h) ;

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

Pression : Environ 5 kg/ cm² 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 %.[12]

Refroidissement par aspersion (refroidissement secondaire) :**Quantité globale d'eau :**

3300 L / min (198 m³/ 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 / cm² aux tuyères ;

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

Perte d'eau : maximal 10%.

h) 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.

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.

i) Caractéristiques des rouleaux :

Refroidissement interne.

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. [12]

j) 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.



Figure 19 : La table d'oxycoupage.

k) 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.



Figure 20 : Les brames fabriquées à SIDER

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 21 : manutention des brames

La pince électrique :

Sert au levage et au déplacement des brames vers le parc de stockage.



Figure 22 : Pince électrique.



Figure 23 : Parc de stockage

II.2.2. Poudre de la coulée continue :

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.

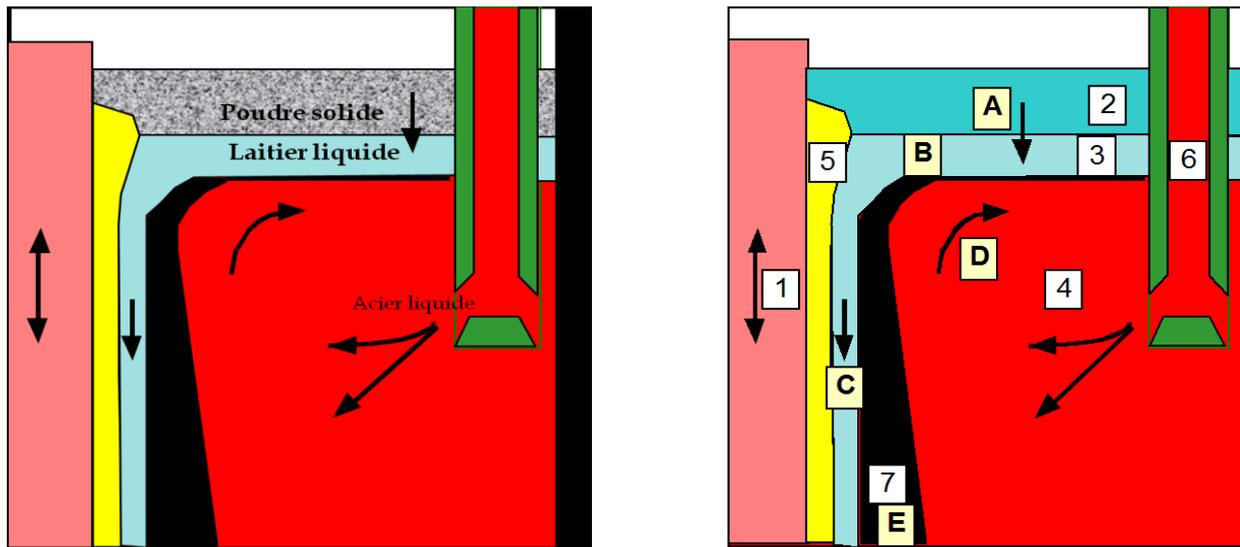


Figure 24 : Les rôles joués d'une poudre par le flux C.C.

- A. Réserve de flux C.C. :** Isolation thermique, fusion ;
- B. Infiltration :** Isolation O₂, 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.**

Les principales caractéristiques d'une poudre de graissage :

Les différents types de poudres C.C :**a) Les mélanges pulvérulents :**

Faible granulométrie (< 100 mm) ;

Somme de poudres de compositions différentes.

b) Les granulés (procédé d'atomisation) :

Composé de granulés de composition quasi-identique.

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

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. [5]

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 ».

La vitesse de fusion est régulée par la teneur et la nature des carbonés. [5]

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 (CaO/SiO_2) et de la teneur en fluor.

II.3.1 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 reliés au ce facteur sont :

Le flux d'argon ;

Le design de la buse ;

La vitesse de coulée ;

La largeur du moule.

II.3.2 La poudre utilisée SIDER :

DAMET (Denain Anzin Metallurgie) Melubir 9560 / MSA : [5]

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 25 : photo de la poudre.

III. Les défauts de brames existant en SIDER

III.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 :

a) 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.

b) 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.

III.2 Présentation schématique des principaux défauts apparus sur les brames en coulées continu :

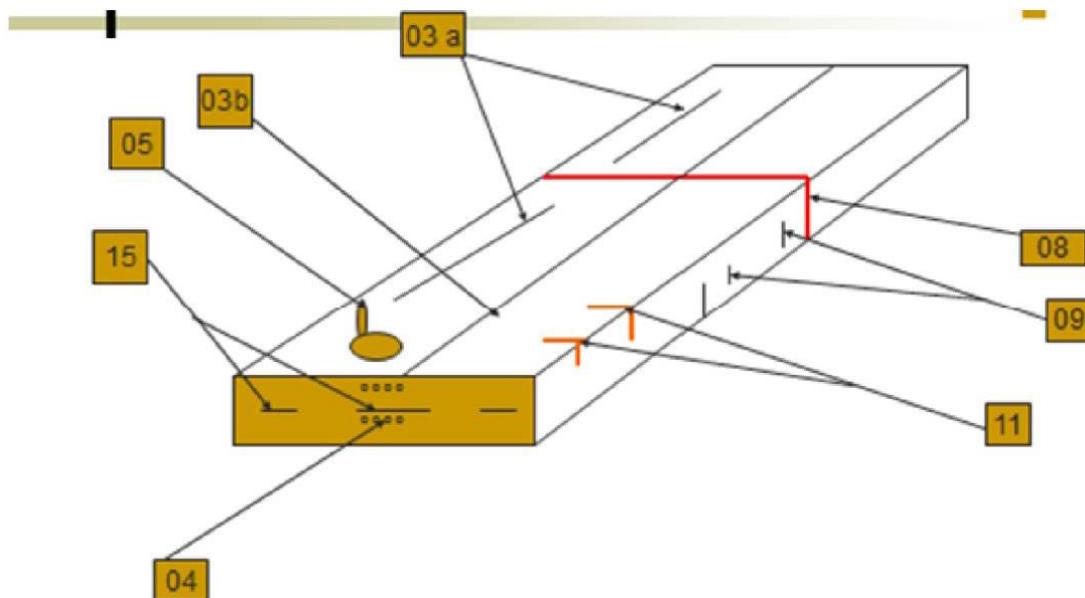


Figure 26 : Présentation schématique des principaux défauts apparus sur les brames en coulées continu

D02 : cône de retrait ;

D03 : cricque longitudinale ;

D03 : cricque longitudinale de face ;

D04 : soufflures ;

D05 : incrustation de scorie ;

D08 : ceinture ;

D09 : cricque transversal champs ;

D11 : cricque transversal angle (appelé cricque de rive) ;

D12 : cambrage ;

D13 : mauvaise coupe ;

D15 : cricque de section ;

D16 : hors longueur plus ;

D17 : hors longueur moins.

III.3 Crique transversal angle (appelé crique de rive)**Aspect :**

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

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

Origine :

Mauvais alignement lingotière et corset zéro ;

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

Refroidissement hétérogène.

III.3.1 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 appropriés et une bonne inspection avant l'enfournement donc il faut que les brames enfournées aux fours du laminoir soient sans défauts de surface.

III.3.2 Les défauts que l'on peut rencontrer :**III.3.2.1 Les criques de rives :**

Elles sont petites et fines sur les coins, longueur environ 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 brame est soumise à des tensions dues à l'extraction de la brame, à l'entre distance des appuis des rouleaux de guidage (maintenues 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 en jeu :

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.3.2.2 Aperçu sur les défauts critiques de rives des brames :



Figure 27 : craque de rive sur les brames



Figure 28 : craque de rive profonde sur les brames réparées par chalumeau.

Chapitre III : Facteurs qui influent à l'apparition de crique de rive**I.1 Introduction :**

Les axes de recherche actuels s'inscrivent dans une logique qui vise à améliorer sans cesse la qualité des produits. Cette qualité des produits bruts de coulée revêt deux aspects : la qualité de surface et la qualité interne. Une surface de qualité signifie absence de fissures de surface (criques), de défauts d'aspects et limitation des inclusions non-métalliques piégées sous la surface du produit. Les principaux défauts internes (qualité interne) que présentent les produits de coulée continue sont les ségrégations majeures et les criques internes. Les ségrégations majeures (ségrégations centrales) se forment dans la partie basse de la machine de coulée continue, au voisinage de la fin de solidification. Les criques internes ségrégées peuvent se former tout au long de la machine. Garantir une qualité des produits coulés en continu nécessite des réglages très sophistiqués des machines de coulée qui dépendent fortement de la nuance d'acier. L'amélioration permanente de la productivité et de la qualité des produits bruts de coulée, qui sont difficiles à couler en continu, nécessite d'adopter de nouveaux réglages des machines et de mettre en place de nouveaux moyens d'actions en ligne (réduction mécanique du produit en cours de solidification, refroidissement intense du produit, mode de lubrification en lingotière de coulée continue, brassage électromagnétique...).

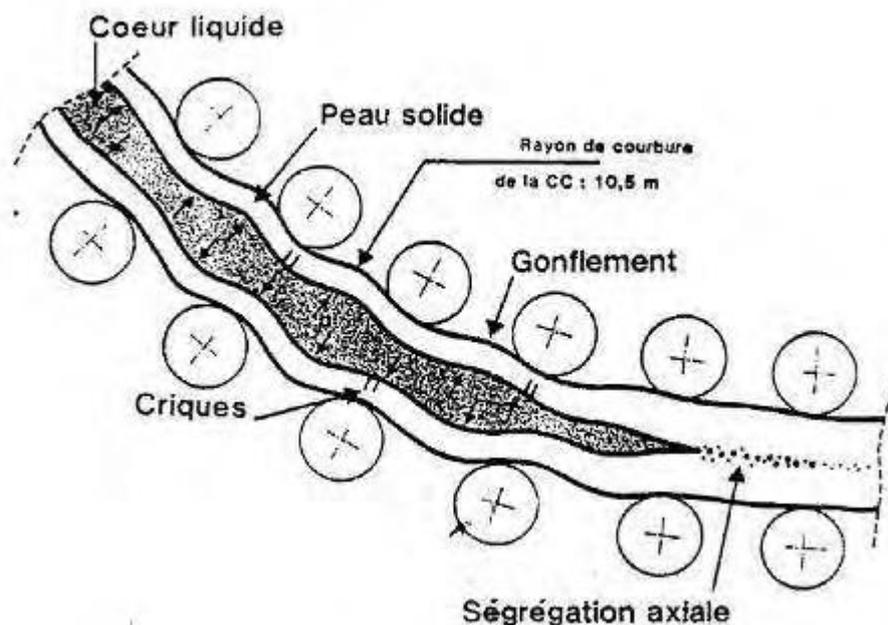


Figure 29 : Principaux défauts rencontrés en coulée continue

Au cours de sa solidification, le produit subit un ensemble complexe de sollicitations thermomécaniques (cintrage de la brame à cœur liquide, décintrage éventuel, sollicitations cycliques, problème d'alignement des rouleaux, gonflement entre les rouleaux dû à la pression ferrostatique, inhomogénéités excessives dues à des évolutions thermiques mal maîtrisées...) qui peuvent justifier l'apparition de criques à chaud. [15]

I.2 phénomènes impliqués sur crique de rive

Stades de solidification de la zone pâteuse

Du point de vue thermodynamique, la solidification est la transformation de l'état liquide à l'état solide ; cela donne au matériau une structure résultant des transferts de chaleur et des gradients de température agissant à l'échelle du produit, et des transferts de solutés agissant à l'échelle de l'interface. Ce changement d'état se fait de façon continue, et la zone où coexistent la phase solide et la phase liquide est appelée 'zone pâteuse' ; le domaine de température délimitant le début et la fin de la solidification est appelé 'intervalle de solidification'. Ce domaine semi-solide peut être décomposé en différents stades (Figure 30 (a)). Notons que, dans certaines conditions, le transport de soluté peut également avoir lieu à l'échelle du produit ; cette hétérogénéité est appelée macro ségrégation. [16]

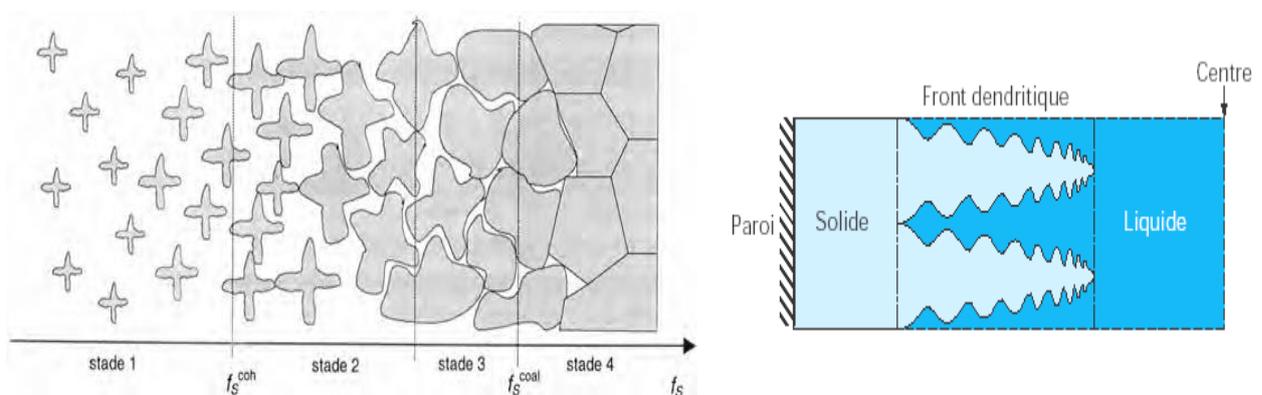


Figure 30 : Schémas illustrant la solidification d'alliages métalliques.

(a) Différents stades de solidification (cas d'une structure équiaxe).

(b) Croissance dendritique du front de solidification en coulée continue (structure colonnaire).

Pendant le premier stade, les dendrites flottent librement dans le liquide, la zone pâteuse se comporte comme une suspension. Lorsque les dendrites commencent à former un réseau connecté, on atteint le second stade où la fraction de solide seuil est appelée 'fraction solide de cohérence'. Le liquide peut encore circuler aisément à travers le réseau. Par la suite, et au fur et à mesure que l'alliage se solidifie, le réseau dendritique devient de plus en plus dense et seuls de fins films liquides subsistent entre les grains solides ; la perméabilité du réseau poreux chute : on atteint le stade 3. A partir de la fraction solide de coalescence (stade 4), des ponts solides se forment entre les grains, ce qui isole le liquide résiduel dans des poches. [2]

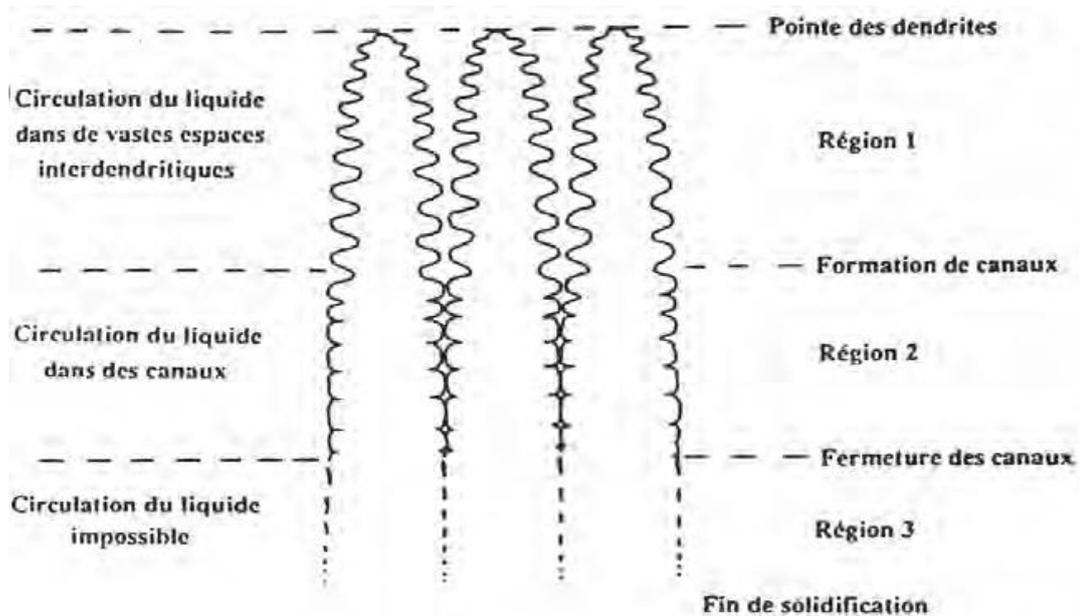


Figure 31 : Localisation des zones fragiles au niveau du mélange pâteux

Dans les régions 1 et 2, le mouvement relatif entre les phases liquide et solide permet à la zone pâteuse d'absorber les sollicitations thermomécaniques extérieures. Les zones sensibles à la fissuration à chaud seront situées dans la région 3 (région où les films de liquide résiduels se retrouvent piégés) ; la perméabilité de la zone pâteuse chute brutalement en toute fin de solidification.

On vient de voir précédemment que c'est la séparation interdendritique qui rend la zone pâteuse vulnérable aux formations de pores et de fissures à chaud. Mettent en évidence l'évolution importante du comportement mécanique de la zone pâteuse en fonction de la fraction de solide. Il semblerait cependant que la fissuration soit plus un problème en limite de déformation qu'en contrainte maximale car, en toute fin de solidification, le matériau présente de grandes difficultés à accommoder les déformations alors que sa résistance mécanique se développe. Au final, l'alliage accuse principalement une perte importante de ductilité (ou déformation à rupture) dans une gamme de températures correspondant aux bornes de l'intervalle de fragilité de l'alliage. Cela coïncide avec l'intervalle de fraction solide pendant lequel la microstructure présente une configuration critique vis-à-vis du chargement mécanique : les films de liquide résiduels représentent autant de points faibles dans la structure (stades 3-4 de la figure30, ou région 3 de la figure31). Ces bornes correspondent donc respectivement à la fraction de solide à partir de laquelle la circulation du liquide devient impossible et à la fraction de solide pour laquelle les ponts solides deviennent suffisamment résistants et où la structure cesse alors d'être fragilisée par ces films de liquide résiduel. [2]

II. Les paramètres influents sur crique de rive

Lors de la solidification, tout alliage métallique passait obligatoirement une certaine période de sa vie dans un état où le risque de fissuration à chaud existe. L'objet de ce paragraphe est alors de passer en revue l'ensemble des paramètres qui peuvent influencer la tenue de l'alliage à la crique de rive.

II.1 Influence de l'alliage (composition chimique)

L'influence de l'alliage s'exprime en premier lieu à travers sa composition chimique. Celle-ci détermine la composition des phases liquide et solide en fonction de la température mais aussi la fraction de solide. Elle a une influence importante car, plus l'alliage aura un intervalle de solidification important, plus il sera sensible aux fissures à chaud puisqu'il passera d'autant plus de temps dans un état vulnérable. La fragilité d'une nuance donnée dépend alors en grande partie du chemin de solidification et plus particulièrement de la cinétique de disparition du liquide vers la fin de la solidification. En conséquence, la tenue à la fissuration à chaud dépend fortement de la composition chimique en éléments tels que le soufre et le phosphore : ces derniers ont tendance à abaisser de manière conséquente la température de fin de solidification. Ces deux éléments ont alors une influence néfaste sur la résistance à la

crique. L'effet du soufre peut être cependant contrecarré par la présence de manganèse car celui-ci favorise la précipitation d'une solution (Fe-Mn)S dont la température de fin de solidification est plus élevée que celle du sulfure de fer. En ce qui concerne l'influence du pourcentage de carbone, les opinions sont partagées. Lorsque la teneur en carbone croît l'intervalle de solidification s'élargit ce qui favoriserait la crique. Cependant plus la teneur en carbone est faible et plus le retrait est important ; or celui-ci génère une variation relative de volume du fait de la différence de densité entre le liquide et le solide. Par conséquent, l'acier résistant le mieux aux criques se situerait vers 0.15–0.2 % de carbone. [18]

Le risque de fissuration est aussi intimement lié aux phases en présence au moment de la solidification. Ceci peut s'expliquer par le fait que les fissures cheminent plus difficilement dans une structure mixte que dans une structure totalement ferritique ou, a fortiori, totalement austénitique. L'influence de ces phases peut en partie se justifier par le fait que la solubilité des impuretés telles que soufre et phosphore est bien plus grande dans la ferrite que dans l'austénite ; cela signifie alors que la cinétique de disparition du liquide en fin de la solidification sera d'autant plus faible que la quantité d'austénite présente est importante. D'autre part, le retrait associé à la transformation ferrite-austénite génère des déformations supplémentaires qui peuvent affecter la zone pâteuse lorsque ces transformations ont lieu à haute température.

En outre, l'angle de mouillage de la phase solide par le liquide interdendritique peut lui aussi avoir une influence sur la sensibilité à la crique de l'alliage. L'angle de mouillage représente la capacité du liquide à s'étaler sur le solide en fonction de la température et surtout de la composition du liquide. Il agit donc sur la morphologie de la phase liquide (films continus ou discontinus, poches...) en toute fin de solidification et génère en ce sens une structure plus ou moins résistante. La Figure 32 montre la répartition du liquide autour du grain pour différentes valeurs de θ . Ainsi, au cours d'un essai de traction in situ dans un MEB, on notent que pour un alliage Al-Sn pour lequel l'angle diédral est nul, la rupture se fait le long d'un joint de grain mouillé, alors que pour un alliage Al-Cd, qui a un angle diédral très grand le liquide se présente sous forme d'inclusions inertes le long d'un joint de grain et ne participe pas directement à la rupture, même si celle-ci se fait également le long d'un joint de grains. Enfin, ils notent que seuls les joints de grains mouillés par du liquide et orientés perpendiculairement à la direction de traction rompent de façon fragile. [21]

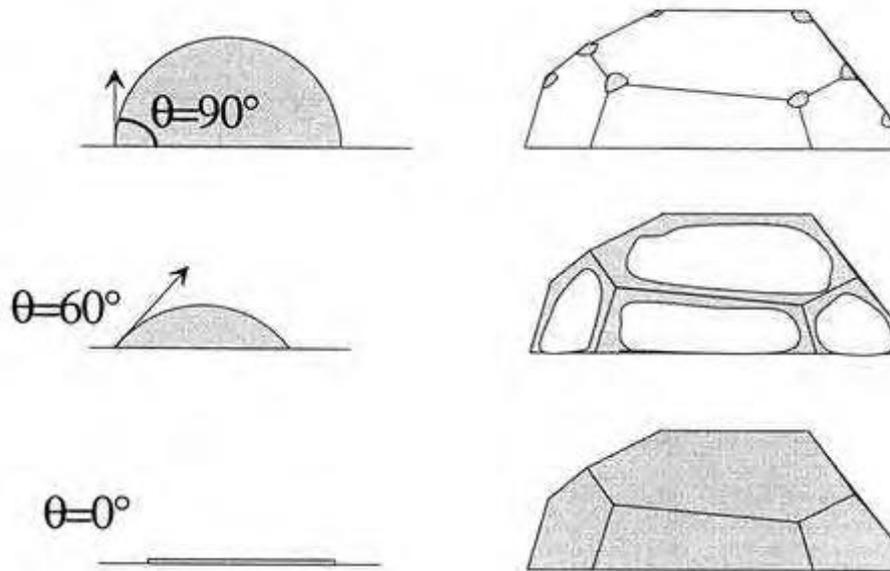


Figure 32 : Distribution du liquide aux joints de grains en fonction de l'angle diédral θ

L'épaisseur du film intergranulaire, tout comme la tension de surface, ont une influence non négligeable sur le risque encouru ; lorsque l'épaisseur du film progresse, la tendance à la crique croît elle aussi. Il faut cependant noter que l'on manque de données appropriées sur les caractéristiques des films liquides aux hautes températures. [17]

II.2 Influence de la microstructure

La microstructure (morphologie, topologie, taille) évolue au cours de la solidification. Cette dernière aura une importance capitale sur le risque d'apparition de criques de rives étant donné qu'elle peut conditionner la distribution du liquide par rapport à la phase solide. Ainsi, une microstructure fine sera moins sensible à la fissuration à chaud étant donné que cela favorise une meilleure accommodation des déformations par glissements aux joints de grains. De la même manière, il y a une ductilité bien plus grande dans le cas d'une microstructure équiaxe que dans le cas d'une microstructure colonnaire.

La microstructure exerce une influence sur le comportement mécanique de la zone pâteuse ainsi que sur sa perméabilité ; or cette structure de solidification est elle-même fonction d'une part de l'alliage, mais aussi des évolutions thermiques locales. [19]

II.3 Influence du chargement thermomécanique

Le chargement appliqué à la zone pâteuse joue un rôle important, qu'il soit d'origine thermique (vitesse de refroidissement) ou d'origine mécanique (déformations et contraintes environnantes).

Les évolutions thermiques pilotent le temps passé localement par l'alliage dans un état vulnérable ainsi que l'étendue et la distribution de la zone pâteuse, avec présence éventuelle de points chauds. Le chargement mécanique dépend, lui, du chargement thermique, de l'alliage (coefficient de dilatation thermique, facteur de retrait...) ainsi que de la géométrie de la pièce et des paramètres procédé. En coulée continue, les causes qui amènent à des sollicitations mécaniques sont multiples (cintrage, décintrage, gonflement, défaut d'alignement de rouleaux...).

Une corrélation entre la contraction de l'alliage et la sensibilité à la crique en fonction de la composition a été mise en évidence. Cela confirme que la contraction observée au cours de la solidification est causée par la contraction du réseau de la phase solide, et donc que la contraction –dans l'intervalle de solidification– peut être utilisée comme 'mesure' de la sensibilité de la fissuration à chaud. [19]

II.4 Discussion

Les phénomènes physiques qu'il met en jeu sont nombreux et complexes. Les déformations subies par la zone pâteuse sont fonction de la thermique de la pièce et des conditions aux limites imposées par les paramètres du procédé. La façon dont ces déformations sont transmises et accommodées dépend quant à elle des propriétés rhéologiques de la zone pâteuse, et la possibilité d'alimentation en liquide est liée à la perméabilité du milieu. Ces propriétés macroscopiques sont enfin fonction de la microstructure développée en cours de solidification et en particulier de la morphologie/topologie du squelette solide en fin de solidification; l'impact de la morphologie provient des propriétés de mouillage du solide par le liquide, qui influe sur la formation de ponts solides entre les dendrites consolidant la structure lors de la dernière étape de solidification. [20]

D'autre part, les ségrégations chimiques prenant place à l'échelle du produit peuvent aussi modifier localement la sensibilité à la crique de l'alliage.

Au final, et compte tenu de la complexité du problème, il apparaît nécessaire de ne prendre en compte que les facteurs ayant une influence prépondérante sur la fissuration à chaud. De manière générale, le risque de fissuration à chaud se situe dans un intervalle de température défini entre le moment où le liquide ne peut plus circuler parmi la phase solide et celui où la structure cesse d'être fragilisée par ces films de liquide résiduel.

III. L'influence de refroidissement secondaire

Dans les installations de coulée continue de brames, le refroidissement secondaire a un rôle considérable à jouer tant du point de vue de la productivité des machines que du point de vue de la qualité des brames.

On s'efforce donc de tirer le meilleur parti du refroidissement secondaire en recherchant les conditions de fonctionnement optimales :

- une intensité maximale des échanges thermiques entre la brame et l'eau,
- des conditions de refroidissement compatibles avec les exigences de qualité des brames.

Pour cela, il est essentiel de bien connaître les mécanismes de transfert de la chaleur dans la zone de pulvérisation et de préciser l'influence des différents paramètres liés, soit à la marche de la machine, soit au dispositif de refroidissement lui-même. [5]

III.1 Importance sur le plan de la qualité

Dans le cas de la coulée d'aciers, les exigences de qualité deviennent très importantes, particulièrement en ce qui concerne la santé interne de la brame.

L'apparition de défauts, surtout des criques, est étroitement liée à la façon dont sont refroidies les brames et le refroidissement secondaire lui-même peut être à l'origine de nombreux défauts : l'arrosage peut provoquer de petites criques superficielles ou sous cutanées.

Un puits trop long peut provoquer des criques au front de solidification lors du redressement ou encore être responsable de l'apparition d'une ligne axiale de ségrégation. Une température de peau inadéquate peut favoriser l'apparition de criques dans des zones sollicitées mécaniquement, etc...

Le rôle du refroidissement secondaire est donc important dans ce cas : il doit permettre de contrôler le refroidissement de la brame selon des critères métallurgiques précis.

Dès qu'on aborde la production d'acier, le problème de la qualité des brames devient prépondérant et conditionne la marche de la machine de coulée.

Parmi les différents impératifs concernant la qualité des brames (criques, inclusions, ségrégations), le problème de la criquabilité est directement lié au refroidissement secondaire. C'est sous cet angle que nous aborderons l'optimisation métallurgique du refroidissement. [5]

III.2 Relation entre la formation des criques et l'état thermique de la brame

On peut exprimer sommairement la condition de formation d'une crique

Pour qu'il y ait crique, il faut qu'apparaisse un état de contrainte tel que la charge de rupture de l'acier soit dépassée avant que cet équilibre ne puisse évoluer vers un relâchement des contraintes par fluage.

L'apparition d'un état de contrainte peut être liée à une cause mécanique ou à une cause purement thermique. Cette constatation nous conduit à distinguer les notions de "crique mécanique" et de "crique thermique".

III.2.1 Criques mécaniques

Au cours de la coulée, un certain nombre d'incidents peuvent créer par sollicitation mécanique un état de contraintes pouvant conduire à la crique, par exemple : le frottement de la peau dans la lingotière, le décalage d'un rouleau, le redressement sur cœur liquide, le redressement associé à une "mauvaise" température de peau.

L'existence de ces criques est évidemment en étroite relation avec la fragilisation à chaud de l'acier. Le problème important est de connaître l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier en fonction de la température de façon à pouvoir déterminer les niveaux et les zones de température où la fragilité est accrue du fait d'une baisse de la plasticité du métal. Du point de vue de la conduite thermique de la machine, on peut ainsi définir pour la température de peau de la brame des "bandes interdites" en dehors desquelles on s'efforcera de se tenir, en particulier aux points critiques tels que le redressement. [5]

III.2.2 Criques thermiques

Dans la croûte solide de la brame existent des gradients de température longitudinaux, transversaux et dans l'épaisseur de la brame qui peuvent engendrer des contraintes de tension (régions froides) et de compression (régions chaudes) et l'on peut ainsi aboutir à la formation de criques d'origine thermique.

Du fait du comportement élastoplastique de l'acier à haute température, on peut penser que c'est la variation temporelle du gradient thermique qui est nuisible plutôt que le gradient lui-même.

Des constatations expérimentales sont confirmées dans cette hypothèse : des essais de criquabilité ont été réalisés par arrosage de petits lingots non entièrement solidifiés. Ils ont montré que ce n'est pas un arrosage continu (même très intense) qui provoque la crique mais

une alternance de périodes avec et sans arrosage (c'est à dire pour les "vitesses" de gradient thermique élevées). [5]

III.3 Gradients thermiques existant dans la machine

Des variations de température rapides existent dans la machine.

III.3.1 Dans le sens transversal

On a fréquemment des hétérogénéités d'arrosage dues, soit à un gicleur bouché, soit au recouvrement insuffisant ou au contraire exagéré des impacts de deux gicleurs voisins. Des différences de température notables apparaissent alors entre deux points voisins et pendant des temps assez brefs (temps de passage entre deux rouleaux).

III.3.2 Dans le sens longitudinal

La température de surface subit d'assez fortes variations lors du passage successif d'un rouleau et d'un gicleur.

De tels cycles sont assez néfastes pour la santé de peau de la brame. Néanmoins, ils n'affectent que la zone de peau (moins de 5 mm) et les criques qui ont pu se former quoique indésirables disparaissent après écriquage.

Les changements de zone de refroidissement (surtout la sortie de la lingotière et le réchauffement en sortie du secondaire) peuvent donner lieu à des variations de température importantes et qui affectent une profondeur plus grande. On remarque que les perturbations de surface se ressentent dans la croûte solide jusqu'à une profondeur de l'ordre de 5 cm. [14]

III.3.3 Dans le sens de l'épaisseur

Toutes les perturbations de surface que nous venons de décrire provoquent des variations plus ou moins prononcées du gradient thermique présent dans l'épaisseur de la croûte solide.

III.4 meilleur profil de refroidissement

Les contraintes thermiques qui apparaissent lors du refroidissement peuvent avoir des conséquences indésirables sur la qualité métallurgique de la brame. Il faut donc rechercher un profil de refroidissement permettant de minimiser ces contraintes à tous les niveaux.

Ce profil doit également tenir compte des contraintes d'origine mécanique : dans ce cas, les contraintes sont inévitables, mais c'est leur effet que l'on cherche à minimiser.

Elle consiste à adopter un profil de refroidissement basé sur un certain nombre de critères thermiques déterminés empiriquement.

Nous allons définir les critères à respecter pour diminuer les risques de formation des criques.

a) Niveau de la température de surface

Nous avons vu qu'il est indispensable de se placer hors des zones de mauvaise plasticité du métal. La température de surface de la brame, surtout dans les régions où l'a croûte solide est sollicitée mécaniquement, devra donc se situer en dehors de la "poche de forgeabilité" relative à l'acier considéré, laquelle poche devra être précisée par étude expérimentale.

b) Limitation de la longueur du puits

L'une des causes de la formation de criques internes transversales est le fait de redresser la brame sur cœur liquide. Il faut par conséquent solidifier toute la brame avant le point de redressement. C'est-à-dire que l'on devra limiter la profondeur du puits à une valeur fixée par la géométrie de la machine. [5]

c) Minimisation des contraintes thermiques

Une première idée est d'adopter un profil tel que le gradient thermique d'épaisseur reste constant. Ceci conduit à une décroissance linéaire de la température de peau (donc à un gradient longitudinal constant).

L'idée est séduisante mais conduit à une baisse de la température de peau exagérée et incompatible avec les exigences précédentes.

Une autre proposition est de maintenir la température de peau constante tout au long du refroidissement secondaire.

Le gradient thermique longitudinal est alors nul et le gradient d'épaisseur varie régulièrement. C'est un profil de refroidissement assez simple à réaliser. [5]

Conclusion

La littérature précédente on note que pour obtenir des brames saines il faut réagir avec les facteurs : la nuance d'acier, les sollicitations thermomécaniques au cour de solidification (cintrage de la brame à cœur liquide, décintrage éventuel, problème d'alignement des rouleaux, gonflement entre les rouleaux dû à la pression ferrostatique...), transfert de chaleur au cours de refroidissement secondaire.

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

Conclusion générale

La brame est un produit semi-fini qui sera laminé pour obtenir des produits fondamentaux dans le domaine industriel. Pour aboutir à une production de bonne qualité de brame on doit respecter plusieurs précautions à savoir :

- traitement de l'acier liquide conformément aux normes (caractéristique mécanique et physique) pour une nuance demandé.
- la bonne voie de transformation de l'acier liquide (machine à coulée continue) au produit voulu. Au cours de cette phase il surgit des défauts tels que « les fissures longitudinal sur les arrêtes, pour les éviter on doit s'assurer que tous les dispositifs et tous les paramètres soit justes pour contrôlés le refroidissement secondaire.

Les paramètres de la machine à coulée continue sont très importants pour couler des brames saines ; ces paramètres consistent à la nature de l'alliage coulée, la microstructure, transfert de chaleur 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.

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.

Référence bibliographique

- [1] Décricqueur de brames. Mr. Jacques Debacker. Page 4.6 et 7 Année 1982.
- [2] Rupture à chaud dans les aciers au cours de leur solidification, Thèse Mr. Olivier Cerri.16, 24 et 37 Année 2007
- [3] Elaboration des métaux Ferreux (fontes et aciers), Thèse : *Mr. Bensaada*. Page 71, 120,121, 124,125. Décembre 2009
- [4] Métallographie et traitements thermiques des métaux. L.Lakhtine, édition Mir Moscou1978
- [5] Contrôle métallurgique des installations de coulée continue, recherche du mode de refroidissement optimal en coulée continue de brames, page 15 et 16. Année 1982
- [6] Fabrication de l'acier, document : Comment fabrique-t-on l'acier. Fédération française de l'acier, édition juillet 2012.
- [7] Etude de la fragilité à la solidification d'aciers au carbone, M. Bobadilla, 1988.
- [8] Les aciers dans la construction, Publication des grands ateliers, *Mme Mariam Olivier*. Page 41, 44, 61 et 62. Octobre 2006.
- [9]Acieries de Conversion dossier Techniques de l'Ingénieur, Par Daniel MEYER. M 7 650. Page 22,25
- [10]Coulée Continue de Brames Minces dossier Techniques de l'Ingénieur, Par Joseph FARHI. Page 6.8
- [11]Coulée Continue de l'Acier. Données Physiques et Métallurgiques, Dossier Techniques de l'ingénieur. Par Joseph FARHI. Page 2,5 et 12
- [12]Coulée Continue de l'Acier. Équipement. Exploitation. Dossier Techniques de l'ingénieur. Par Joseph FARHI. Page 2-14
- [13]Principaux Produits Sidérurgiques. Dossier Techniques de l'ingénieur. Par Marc GRUMBACH et Alain MOREAU. Page 4,9
- [14] Studies of surface crack formation by spray cooling in continuous casting Thèse, Université de KOBE
- [15]Comportement mécanique de la brame dans la zone de refroidissement secondaire d'une machine de coulée continue d'acier, R. Kraemer. Année 1986
- [16] Overview : the rheological properties of solidifying aluminium foundry alloys, A. K. Dahle. Année 1996
- [17] La crique dans les pièces moulées en acier, A. F. Gerds, Steel Founders' Société d'Amérique. Année 1976

Référence bibliographique

- [18] Défaut de crique dans l'acier moulé, 95 F 005, Aciéries Delachaux, Association Technique de Fonderie, J.L. Place. Année 1995
- [19] Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium, Progress in Materials Science, D. G. Eskin. Année 2004
- [20] Caractérisation du comportement thermomécanique d'alliages de fonderie pendant la solidification, Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, Année 1996.
- [21] Continuous observation of hot crack-formation during the deformation and heating in SEM, Solidification and Casting of Metals, H. Fredriksson. Année 1979