

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Laminage à chaud

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

PRESENTE PAR : BENGACEMI ILYES EL HOUARI

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Dr. BOURENANE RABAH

DEVANT LE JURY

PRESIDENT: Dr. HAIAHEM. A PROF

EXAMINATEURS: Dr. BOURENANE. R MCA

Dr. NEHAL. A MCA

Dr. MOKAS. N MCB

Dr. YOUNES. R MCB

Année : 2017/2018

SOMMAIRE

Introduction générale

CHAPITRE I

Structure du complexe

I. Description generale de l'entreprise.....	1
I.1 Sider El-Hadjar	1
I.1.1 Mission	2
I.1.2 Histoire du complexe d'El Hadjar.....	2
I.1.3 Unité de production.....	3
I.1.4 Les produits et le rôle de chaque unité	4
I.1.5 Produits du complexe d'El Hadjar	5
I.1.5.a Produits plats.....	5
I.1.5.b Produits longs.....	10
I.1.6 Organisation de l'entreprise.....	12
I.1.7 Organisme de l'entreprise.....	13
I.2 REPRESENTATION DE L'UNITE (LAC).....	14
I.2.1 Organigramme.....	14
I.2.2 Description de l'unit.....	16
I.2.3 Service sécurit.....	16

CHAPITRE II

Procédé de laminage

II Procédé du laminage asymétrique (ASR).....	18
II.1 Description.....	18
II.2 Historique.....	18
II.3 Laminage à chaud.....	19
II.3.1 Progrès technologiques.....	19
II .4 Acier laminé à chaud.....	26
II.4.1 Description.....	26
II.4.2 Les bénéfices de l'acier laminé à chaud.....	27
II.5 Laminoir industriel.....	28
II.5.1 Description.....	28
II.5.2 De quoi se compose-t-il.....	28
II.5.3 Les cylindres en laminoir à chaud (Outil).....	29
II.5.3.a Définition.....	29
II.5.3.b Importance de la qualité des surfaces métalliques.....	33
II.5.3.c Atelier de rectification de cylindres (ARC)	33

CHAPITRE III

Processus de production

III. Cycles de fabrication de l'acier jusqu'au produit final.....	34
III.1 Généralité.....	34
III.2 Les différentes phases du laminage à chaud.....	36
III.2.a Le réchauffage.....	36
III.2.b Le laminage.....	36
III.3 Processus.....	37
III.3.1 La gestion des matières premières.....	37
III.3.2 La cokerie.....	37
III.3.3 L'agglomération.....	38
III.3.4 Les hauts fourneaux.....	39
III.3.5 L'aciérie.....	40
III.3.6 Le laminoir à chaud.....	43
III.4 Processus de fabrication au niveau du LAC.....	44
III.4.1 Parc à brames.....	44
III.4.2 Fours poussant.....	44
III.4.3 Laveuse à brame.....	45
III.4.4 Cage brise oxyde.....	45
III.4.5 Cage quarto.....	46
III.4.6 Planeuse.....	46
III.4.7 Cisaille volante.....	46
III.4.8 Décalamineuse.....	47
III.4.9 Train finisseur (les 6 cages)	47
III.4.10 Système de refroidissement bandes.....	48
III.4.11 Table à rouleaux sortis finisseur.....	49
III.4.12 Zone de mesure (les jauges)	49
III.4.13 Bobineuses.....	49
III.5 Défauts de laminage.....	50

III.5.1 Planéité et forme.....	50
III.5.1.a Profil.....	51
III.5.1.b Planéité.....	51
III.5.2 Projet.....	52
III.5.3 Types de défauts de surface.....	52
III.5.4 Défauts métallurgiques et microstructuraux.....	53
III.5.5 Correction des défauts de surface.....	54

CHAPITRE IV

Principales grandeurs à calculer

IV Principales grandeurs à calculer.....	55
IV.1 Équations à résoudre.....	57
IV.1.a Équation d'équilibre.....	57
IV.1.b Équations rhéologiques.....	58
IV.1.c Loi de frottement.....	59
IV.1.d Équation de la chaleur.....	59
IV.1.e Équations du comportement thermo-élastique pour les outillages.....	59
IV.1.f Modèles structuraux divers.....	60

Conclusion générale

Bibliographie

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Complexe Sidérurgique d'El-Hadjar	1
Figure I.2 Bobines laminées à chaud brutes ou décapées et tôles	5
Figure I.3 Bobines laminées à chaud et tôles striées ou l'armée	6
Figure I.4 Bobines et tôles Skin Passées	7
Figure I.5 Bobines Galvanisées	8
Figure I.6 Tôles Nervurées	9
Figure I.7 Feuillard Galvanisé	10
Figure I.8 Rond à Béton Nervuré	11
Figure I.9 Organigramme d'Installations et produits du complexe.....	12
Figure I.10 Organisme de l'entrepris	13
Figure I.11 Organigrammes de l'unité LAC.....	15
Figure I.12 Organisation de l'unité LAC	16
Figure I.13 Tenue de sécurité	17

Chapitre II

Figure II.1 laminage	18
Figure II.2 Différents types de laminoirs à chaud	25
Figure II.3 Principe d'une cage sexto	26
Figure II.4 Principe de cylindres décalés	26
Figure II.5 Schéma d'une cage quarto de laminage.....	28
Figure II.6 Schéma de cylindre de travail	32
Figure II.7 Atelier de rectification de cylindres (ARC)	33

Chapitre III

Figure III.1 cycle de fabrication de l'acier jusqu'au produit final	35
Figure III.2 Stock de minerai	37
Figure III.3 Four de coke.....	38
Figure III.4 Chaîne d'agglomération	39
Figure III.5 Haut fourneau	40
Figure III.6 convertisseur	41
Figure III.7 Coulée continue	43
Figure III.8 laminoir a chaud.....	44
Figure III.9 cage brise oxyde	45
Figure III.10 Cage Quarto (Dégrossisseur)	46
Figure III.11 Cisaille	47
Figure III.12 Train finisseur	48
Figure III.13 Les jauges	49
Figure III.14 Bobineuse	50
Figure III.15 Principales interactions « multi physiques » lors de la déformation à chaud.....	54

Chapitre IV

Figure IV.1 Défauts géométriques en laminage à chaud	56
---	----

I. DESCRIPTION GENERALE DE L'ENTREPRISE

I.1 Sider El-Hadjar

- Complexe sidérurgique intégré, filiale du groupe IMITAL, placé sous la tutelle du Ministère de l'Industrie et des Mines.
- Situé à 12km d'Annaba.
- Superficie : 832 hectares.
 - ✓ Trois cents (300) hectares occupés par les ateliers de production,
 - ✓ Trois cents (300) hectares réservés au stockage des matières premières et des produits sidérurgiques,
 - ✓ deux cents (200) hectares affectés aux structures de services,
- SIDER EL HADJAR dispose de ses propres installations maritimes reliées au réseau ferroviaire pour le transport des matières premières et les expéditions des produits finis.
- SIDER EL HADJAR dispose d'un réseau commercial composé de 7 point de vente à travers le territoire national.
- Pour des besoins en énergie et fluides le complexe est équipé :
 - ✓ Trois (3) centrales thermiques,
 - ✓ Quatre (4) centrales à oxygène,
 - ✓ Trois (3) usines à eau.
- Date de la création de l'entreprise : 03 septembre 1964.

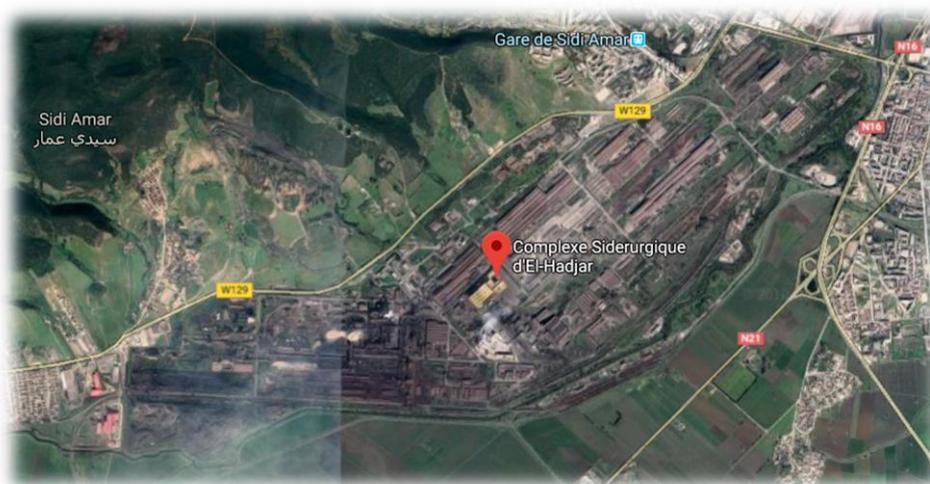


Figure I.1 Complexe Sidérurgique d'El-Hadjar

I.1.1 Mission

Fabrication et commercialisation des produits sidérurgiques finis et semi-finis pour le marché national et international.

I.1.2 Histoire du complexe d'El Hadjar

L'idée de création d'un grand pôle industriel de sidérurgie à Annaba était prévu dans le plan de Constantine de 1958, où la Société Bônoise de Sidérurgie (SBS) a été créée avec pour mission de réaliser un haut-fourneau ainsi que ses annexes, mais n'a pas été réalisé.

La Société nationale de sidérurgie (SNS) a été créée le 3 septembre 1964, chargée de la construction du Complexe sidérurgique d'El Hadjar qui a été inauguré le 19 juin 1969. Courant 1983, la restructuration de l'industrie algérienne donne naissance à l'entreprise nationale Sider qui devient Groupe Sider en 1995, pour passer de l'entreprise administrée à l'Entreprise publique économique (EPE/SPA) avec un plan de redressement en 1999, donnant naissance à 25 entreprises industrielles autonomes (filiales). Le 18 janvier 2001, c'est un partenariat entre LNM (Inde) et Sider (Algérie) qui donne naissance à Ispat Annaba.

Le complexe d'El Hadjar avait été cédé à Mittal en 2001, qui détenait 70% et 30% par l'Etat algérien à travers Sider. Par la suite, courant 2013, pour sauver l'unique complexe sidérurgique du pays employant 5000 personnes d'une cessation d'activité, il a été décidé par le gouvernement de reprendre le contrôle, le groupe public Sider augmentant sa participation dans AMA de 30% à 51% avec un plan d'investissement de 763 millions de dollars (565 millions d'euros) destiné au complexe sidérurgique de Annaba et aux mines de l'Ouenza et de Boukhadra. Une grande partie de l'investissement relatif à la modernisation du complexe, 600 millions de dollars environ, devait être financée à travers un crédit bancaire, dont la BEA (banque de Sonatrach). L'investissement à engager par les fonds propres des deux partenaires devait être de l'ordre de 123 millions de dollars. ArcelorMittal gardant le management, Sider préside le conseil d'administration, cet accord prévoyait un important plan de développement des ressources humaines au travers de formations intensives destinées aux employés afin de s'adapter aux nouvelles technologies prévues pour le site. L'objectif était d'augmenter la capacité de production du complexe d'El Hadjar (Annaba) à 2,2 millions de tonnes par an, de renforcer les capacités de l'aval par l'implantation d'un nouveau laminoir de rond à béton et de

fil machine d'une capacité de 1 million de tonnes. Cela impliquait la modernisation de la filière fonte d'Annaba, notamment du haut-fourneau, ainsi que les installations de préparation matière, aciéries et laminoirs existants et la construction d'une nouvelle filière électrique. Lors des négociations en octobre 2013, il avait été prévu que le complexe devrait atteindre sa pleine capacité de production, 2,2 millions de tonnes d'acier, en 2017. Or, le complexe de sidérurgie d'El Hadjar n'a produit en 2012, que 580 000 tonnes d'acier, alors que l'objectif initialement fixé était de parvenir à produire 600.000/700 000 tonnes pour l'année 2012. Et récemment en 2015 le DG du groupe Sider a signalé que la production d'acier du complexe sidérurgique d'El-Hadjar qui était d'un million de tonnes au départ a, depuis, chuté à 600 000 tonnes, «jusqu'à atteindre, aujourd'hui, 300000 tonnes», contre une demande nationale, pour les seuls ronds à béton et fils pour machines, d'environ 4 millions de tonnes. Cette contreperformance avec des pertes de plusieurs dizaines de millions de dollars est d'autant plus dommageable qu'elle s'inscrit dans un contexte économique porteur et une demande très dynamique d'acier sur le marché algérien.

I.1.3 Unité de production

ZONE CHAUDE

- Préparation matières et agglomération (PMA).
- Haut fourneau (HF) + Coulée pour fonte en gueuse.
- Aciérie à oxygène pour brames (ACO1).
- Aciérie à oxygène pour billettes (ACO2).
- Coulée en source pour lingots (ACE).

ZONE PRODUITS PLATS

- Laminoir à chaud (LAC + ligne de cisailage).
- Laminoir à froid avec parachèvement et revêtement (LAF/RPA).

ZONE PRODUITS LONGS

- Laminoir à rond à béton (LRB)

Unités support et logistiques

COX, PDE, FLUIDES, AMM, ATC, MCM, GTM, PORT.

I.1.4 Les produits et le rôle de chaque unité

Installation	Produits	Principaux utilisateurs
Cokerie	Coke	Métallurgie
HF 1 et HF 2	Fonte	Métallurgie
ACO 1	Brames	Industrie de transformation
ACO 2	Billettes	Industrie de transformation
Laminoir à chaud (LAC)	Tôles fortes	Construction métallique chantiers navales tube bouteille à gaz
Laminoir à chaud (LAF)	Tôles fines	Electro-ménager mobilier ? métallique industrie de transformation
Etamage	Fer blanc	Emballage métallique divers pour les industries alimentaires et chimiques
Galvanisation	Tôles galvanisées	Bâtiments pour l'agronomie industrie et élevage
Aciérie électrique (ACE)	Lingots	Recherche et production pétrolière transport des hydrocarbures
Laminoir à fil rond (LFR)	Fil rond à béton	Bâtiment et travaux publics hydraulique

TAB I.1 produit de chaque unité

I.1.5 Produits du complexe d'El Hadjar

I.1.5.a Produits plats

- ❖ **Bobines laminées à chaud brutes ou décapées et tôles**

Désignation du produit : produit laminé à chaud dans un processus de traitement thermomécanique, en acier d'usage général de construction.

Domaine d'application : aciers de construction, acier pour formage à froid, acier pour bouteilles à gaz, acier pour appareil à pression, acier pour tube.

Dimensions :

- ✚ Epaisseur : 1.6 à 12.5 mm
- ✚ Largeur : 680 à 1340 mm
- ✚ Longueur de tôle : 1200 à 6000 mm

Poids unitaire :

- ✚ Bobines : 20 tonnes max.
- ✚ Paquet de tôles : 1.5 à 4.00 tonnes

Etat des rives :

- ✚ Brutes pour le produit brut de laminage à chaud
- ✚ Dérivées pour le produit décapé et tôles.



Figure I.2 Bobines laminées à chaud brutes ou décapées et tôles

- ❖ **Bobines laminées à chaud et tôles striées ou l'armée**

Désignation du produit : produit laminé à chaud dans un processus de traitement thermomécanique, en acier d'usage général de construction.

Domaine d'application : aciers de construction.

Dimensions :

- ✚ Epaisseur standards : 2/4 ; 4/6 ; 5/7
- ✚ Largeur : 800 à 1250 mm
- ✚ Longueur de tôle : 1200 à 6000 mm

Poids unitaire :

- ✚ Bobines : 20 tonnes max.
- ✚ Paquet de tôles : 1.5 à 4.00 tonnes

Etat des rives :

- ✚ Brutes pour le produit brut de laminage à chaud cisailé.

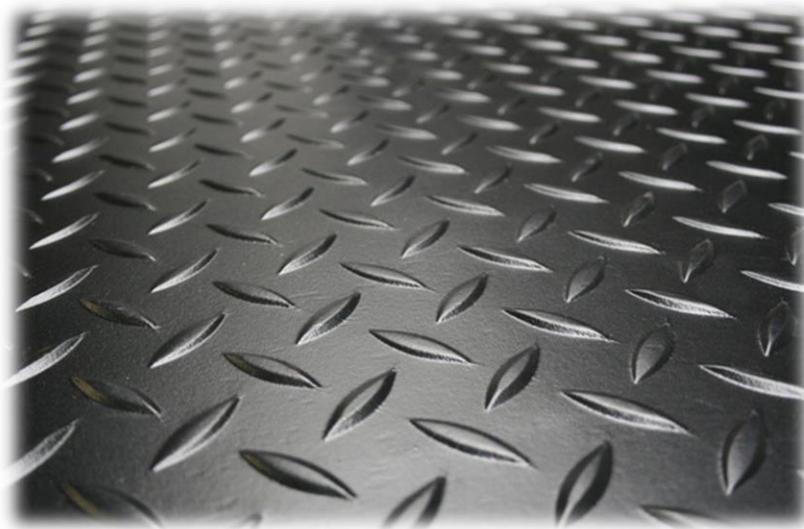


Figure I.3 Bobines laminées à chaud et tôles striées ou l'armée

❖ Bobines et tôles Skin Passées

Désignation du produit : produit plats laminés à froid, en acier doux, dans un processus de décapage-écrouissage-recuit-base et skin passage.

Domaine d'application : pour formage à froid.

Dimensions :

- + Epaisseur : 0.32 à 2.00 mm
- + Largeur : 630 à 1250 mm
- + Longueur de tôle : 1200 à 3300 mm

Poids unitaire :

- + Bobines : 18 tonnes max.
- + Paquet de tôles : 1.5 à 4.00 tonnes

Rugosité :

Finition de surface

- + Brillante b $Ra \leq 0.4 \mu m$
- + Semi-brillante g $Ra \leq 0.9 \mu m$
- + Normale m $0.6 \mu m \leq Ra \leq 1.9 \mu m$
- + Rugueuse r $Ra \leq 1.6 \mu m$

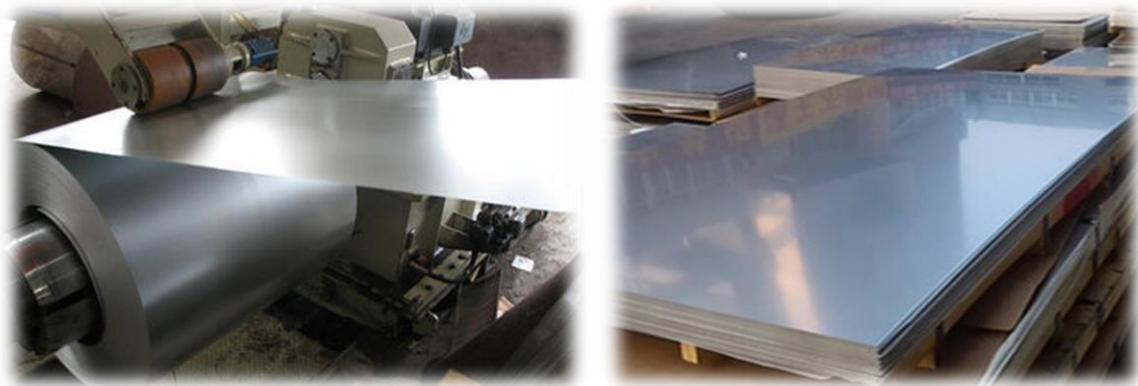


Figure I.4 Bobines et tôles Skin Passées

❖ Bobines et tôles Galvanisées

Désignation du produit : produit galvanisé par immersion à chaud.

Domaine d'application : pour formage à froid.

Dimensions :

- + Epaisseur : 0.35 à 2.00 mm
- + Largeur : 630 à 1250 mm

✚ Longueur de tôle : 1200 à 3300 mm

Poids unitaire :

✚ Bobines : 18 tonnes max.

✚ Paquet de tôles : 1.5 à 4.00 tonnes

Protection de surface :

✚ C : passivation chimique

✚ O : huilage

✚ CO : passivation chimique et huilage



Figure I.5 Bobines Galvanisées

❖ **Tôles Nervurées TN 40**

Désignation du produit : produit galvanisé par immersion à chaud.

Domaine d'application : pour formage à froid.

Dimensions :

✚ Epaisseur : 0.50 à 1.00 mm

- + Largeur : 714 mm
- + Longueur de tôle : 1000 à 9000 mm

Poids unitaire :

- + Paquet de tôles : 2.00 à 4.00 tonnes

Passivation :

- + C : passivation chimique
- + O : huilage
- + CO : passivation chimique et huilage

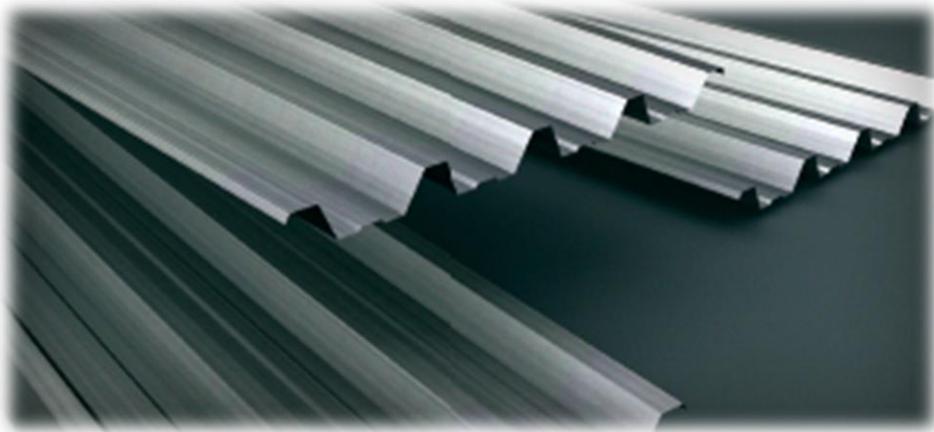


Figure I.6 Tôles Nervurées

❖ Feuillard Galvanisé

Désignation du produit : produit galvanisé par immersion à chaud.

Domaine d'application : pour cerclage, électroménager, construction etc...

Dimensions :

- + Epaisseur : 0.50 à 2.00 mm
- + Largeur : 31 à 600 mm

Poids unitaire :

- + Paquet de tôles : 100 à 600 kg

Passivation :

- + C : passivation chimique
- + O : huilage
- + CO : passivation chimique et huilage

❖ Feuillard Laminé à froid

Désignation du produit : produit décapé, laminé à froid (Etat écroui)

Domaine d'application : pour cerclage, électroménager, construction etc....

Dimensions :

- + Epaisseur : 0.50 à 2.00 mm
- + Largeur : 31 à 600 mm

Poids unitaire :

- + Paquet de tôles : 100 à 600 kg



Figure I.7 Feuillard Galvanisé

I.1.5.b Produits longs :**❖ Rond à Béton Nervuré Soudable**

Désignation du produit : produit laminé à chaud en acier d'usage général pour la construction haute adhérence.

Domaine d'application : barres nervurées en acier servant à renforcer les constructions ordinaires en béton et à constituer les armatures passives des constructions en béton précontraint.

Dimensions :

- ✚ diamètres : 10, 12, 14, 16, 20, 25 et 32 mm
- ✚ Largeur : 12 mm
- ✚ Largeur du façonné : 6 m et 9 m sur commande

Poids unitaire du fardeau:

- ✚ poids inférieur à 5 tonnes.



Figure I.8 Rond à Béton Nervuré

I.1.6 Organisation de l'entreprise

L'organisation ci-dessous représente les différentes installations.

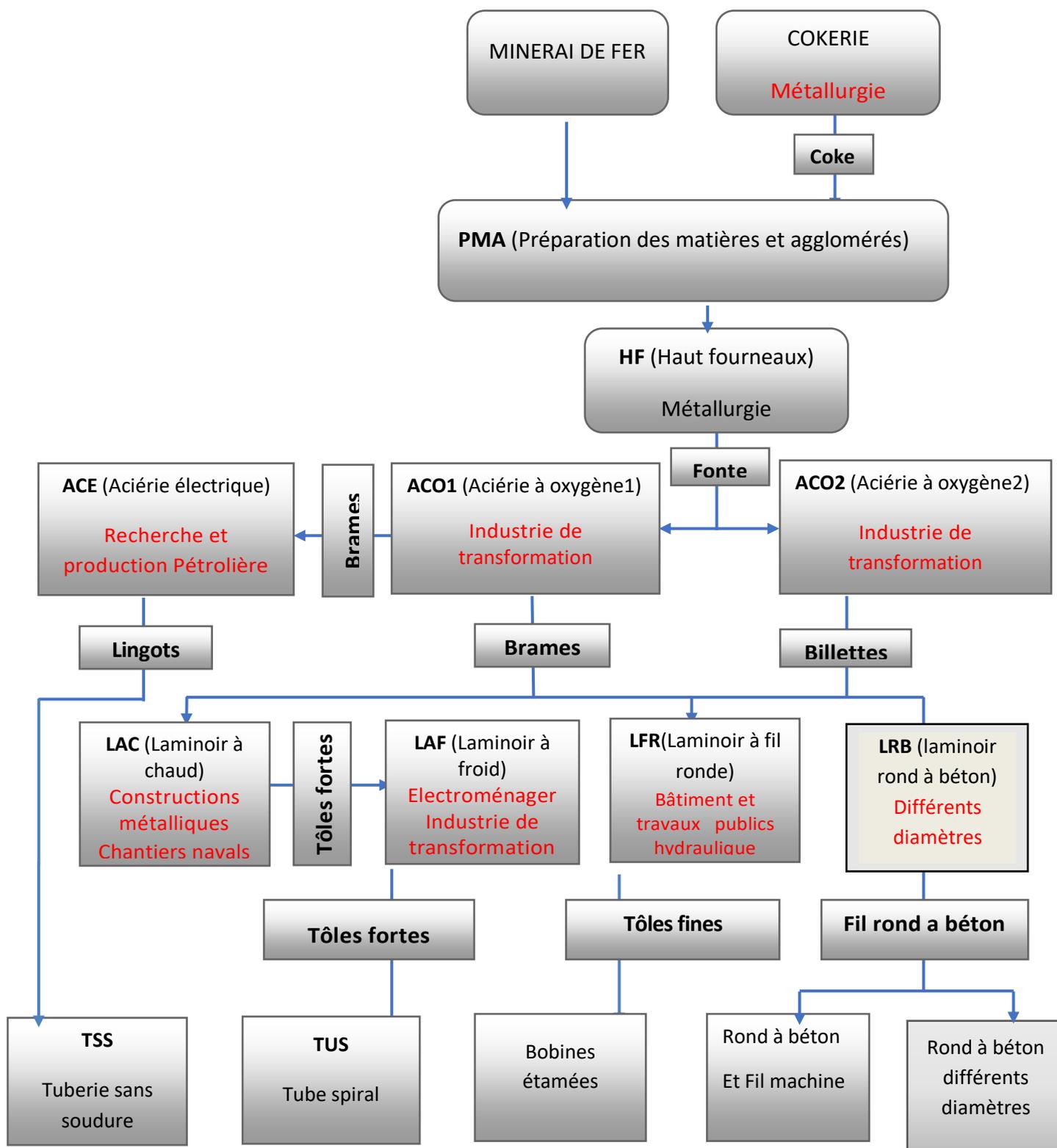


Figure I.9 Organigramme d'Installations et produits du complexe

I.1.7 Organisme de l'entreprise

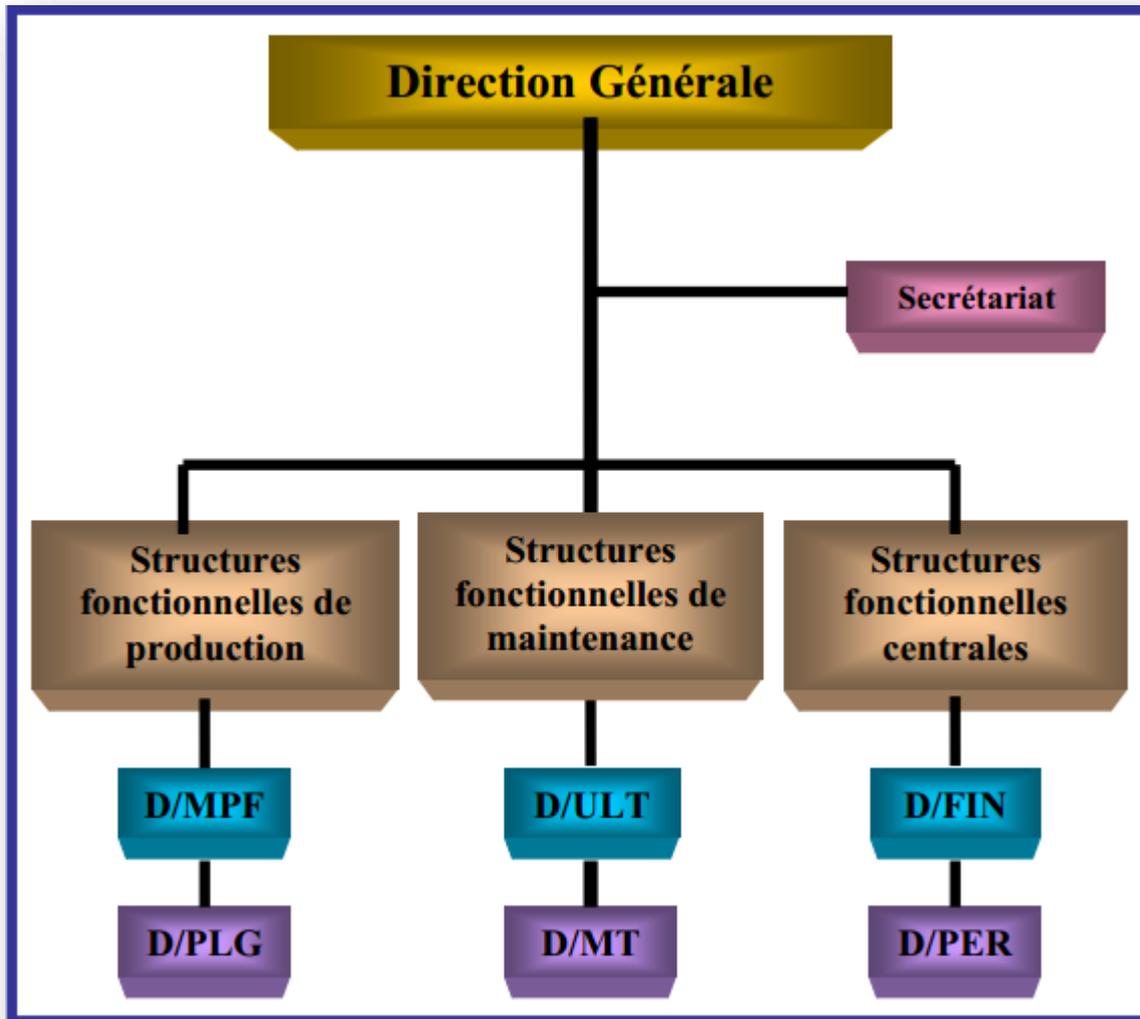


Figure I.10 Organisme de l'entrepris

Où :

- *M.P.F : Matière première de fonte*
- *P.L.G : Produits longs*
- *P.P.L : Produit plat*
- *T.S.S : Tube rie sans soudure*
- *U.L.T : Unité logistique*
- *M.G.X : Moyens généraux*
- *F.I.N : Finance*
- *P.E.R : Personnel*

I.2 REPRESENTATION DE L'UNITE (LAC)

I.2.1 Organigramme

La politique générale étant tracée et formalisée dans une note générale d'organisation, nous pouvons nous pencher sur les organigrammes qui en résultent, ils ne concernent, par nature, que le personnel interne à l'entreprise « organique » ; ils comprennent des services de documents, préparations, ordonnancement des travaux, achats, magasins.

Un organigramme est une répartition des activités en postes de travail, complété par un regroupement et une dépendance hiérarchique des postes. Le regroupement des postes peut se faire à différents niveaux dont les appellations changent d'une entreprise à une autre, il s'agira selon les cas de :

- Division ou Directions.
- Service ou Départements.
- Cellules ou Sections ... etc.

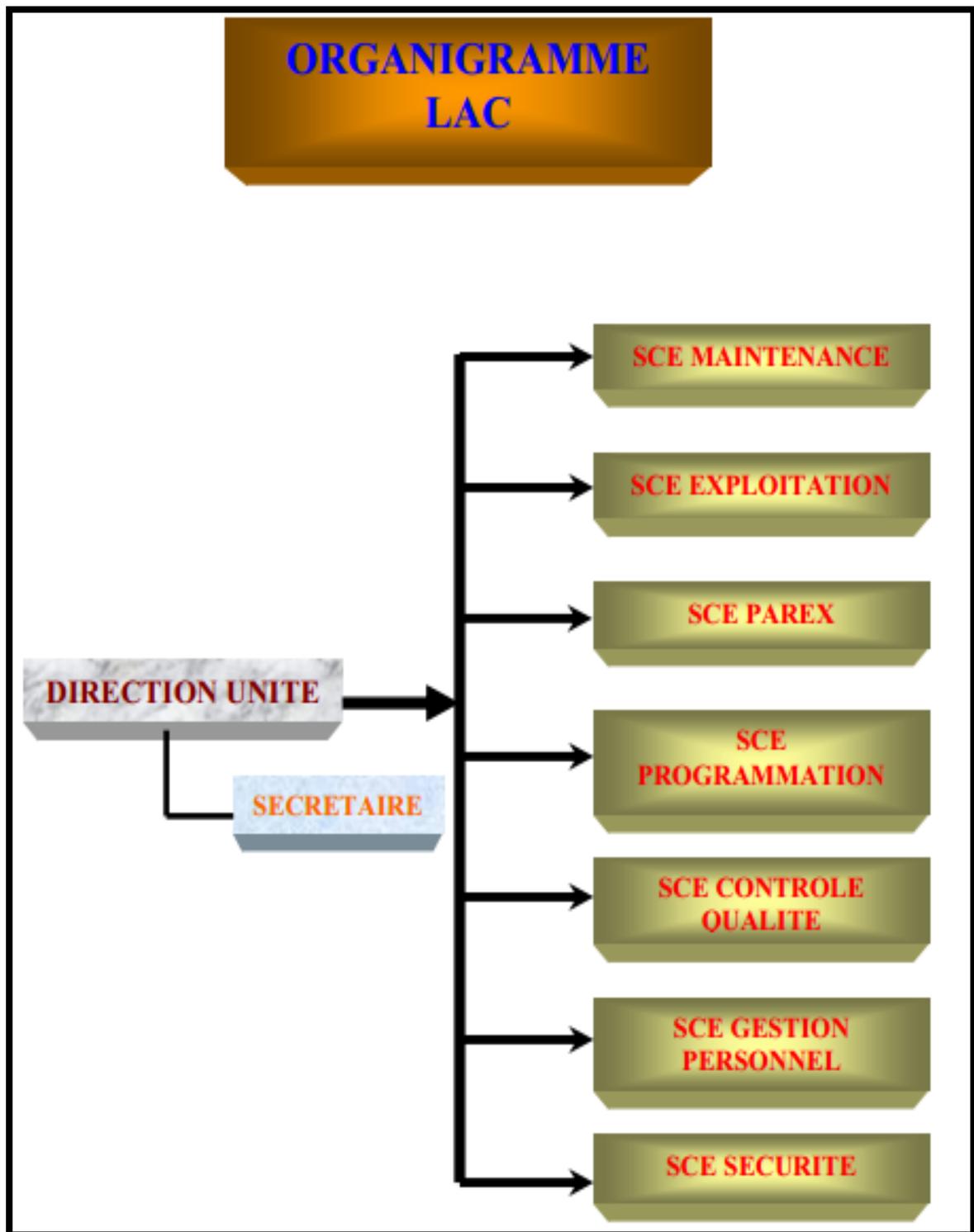


Figure I.11 Organigrammes de l'unité LAC

I.2.2 Description de l'unité

Le laminoir à chaud (LAC) est distinct de la production des bandes en acier. Elle constitue de 5 secteurs.

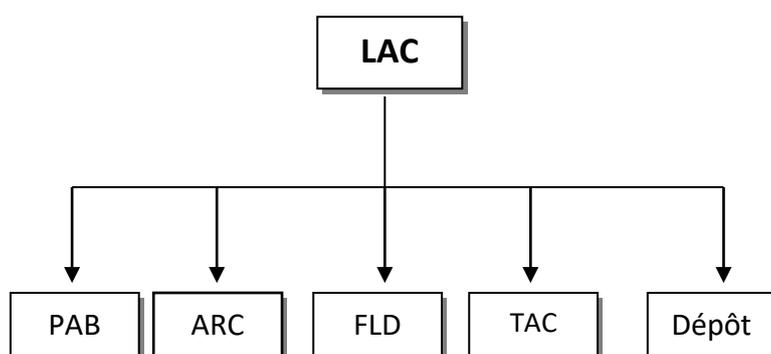


Figure I.12 Organisation de l'unité LAC

Le laminoir à chaud est composé de 04 secteurs :

1. Parc à brames (PAB).
2. Atelier de rectification de cylindres (ARC)
3. Fluide(FLD).
4. Train à chaud (TAC).
5. Dépôt.

I.2.3 Service sécurité

Le domaine d'application du système de management de la sécurité et de la santé au travail selon le référentiel OHSAS 18001 couvre l'ensemble des activités de la Division LAC.

La sécurité est l'une des principales priorités du groupe Sider. En effet chaque stagiaire et chaque employé doivent assister à une présentation de l'entreprise basée sur la Sécurité : consignes à respecter, protections à utiliser (casque, chaussures, gants et règles de Circulation dans l'usine,...).



Figure I.13 Tenue de sécurité

II Procédé du laminage asymétrique (ASR)

II.1 Description

Chacun peut définir le laminage en fonction de ce qu'il cherche :

Le laminage est une opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils tournant autour de leur axe ; c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement. C'est la définition du généraliste.

Le procédé de laminage asymétrique permet de réduire l'épaisseur d'une tôle (ou d'un Produit) par passage entre deux cylindres qui n'ont pas les mêmes diamètres (asymétrie géométrique) ou/et ne tournent pas à la même vitesse (asymétrie cinématique) ou/et n'ont pas les mêmes états des surfaces ou/et ou de température différente. L'asymétrie peut aussi être engendrée par une asymétrie dans les propriétés de la tôle à l'entrée comme : un gradient de température entre le haut et le bas ou une différence des paramètres rhéologiques de cette dernière.

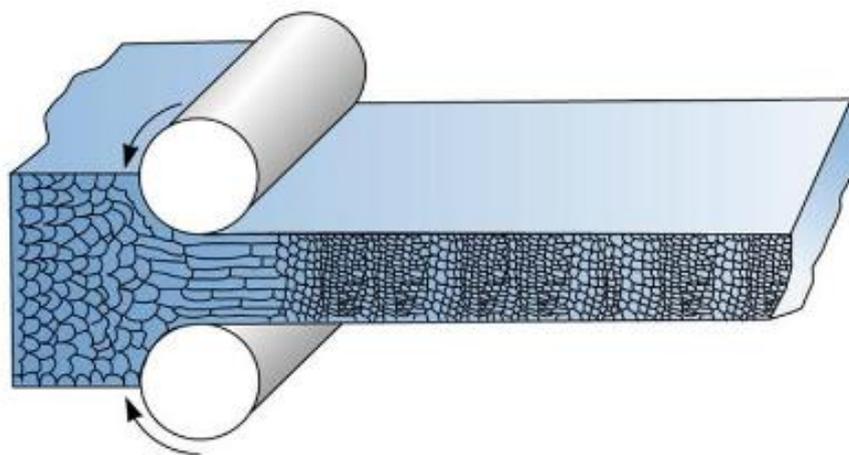


Figure II.1 laminage

II.2 Historique

Le laminage est apparu dans l'usine sidérurgique avec d'autres techniques de mise en forme telles que le forgeage au martinet, au marteau pilon ou à la presse. L'évolution des techniques de forgeage et de laminage ont historiquement suivi des voies complémentaires dans la recherche de la productivité. Les premières forges employaient l'énergie hydraulique et les premiers martinets furent construits à partir du 12^e siècle.

Ils furent peu à peu remplacés par un marteau-pilon entraîné par la vapeur, dont on trouve le premier exemple à simple action en France en 1842. Le premier marteau à double action sera

construit aux États-Unis en 1888. La presse hydraulique est une invention anglaise datant de l'année 1861.

Le premier laminoir fut employé en France en 1553 pour travailler l'or et l'argent. Vers 1750 les premières applications du laminoir à la mise en forme de l'acier sont citées dans plusieurs pays européens. Henry Cort en Angleterre introduira à partir de 1783 les premières augmentations de taille, de puissance et de capacité ouvrant ainsi une période d'évolution rapide des laminoirs. La force motrice nécessaire sera dans un premier temps la vapeur, remplacée au 20^e siècle par l'énergie électrique. [5]

II.3 Laminage à chaud

Le laminage à chaud est un type de déformation à chaud. Du point de vue de la science des matériaux, la déformation à chaud se produit dans la plage de Température de recristallisation et de recuit des matériaux c à d au-dessus de la moitié du point de fusion.

En technique de fabrication la déformation à chaud fait référence aux procédés dans lequel le matériau est chauffé pour être déformé.

Le laminage à chaud permet de produire toutes les grandes familles de produits comme les plaques, les bobines, les carrés, les ronds, les fils, les poutrelles, etc. On distinguera 4 étapes successives : le réchauffage, le dégrossissage, les finisseurs et le refroidissement avant les opérations de finissage voire de parachèvement ou de traitement anti corrosion.

II.3.1 Progrès technologiques

Née à Buttler aux États-Unis, vers 1925, la technique du laminage continu s'est développée exclusivement dans ce pays jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. À cette époque, il y avait 28 trains à bandes aux États-Unis, 4 en Europe, 1 au Japon.

Vers 1945 cette technique avait démontré sa supériorité et sa maturité et les grandes sociétés sidérurgiques l'adoptèrent.

Dans le début des années 50 – en particulier grâce au plan Marshall – les premiers trains à bandes furent installés en Europe.

La plupart des auteurs estiment, aujourd'hui, que l'on peut parler de trois générations.

❖ **1re génération** (exemple : Usinor Denain - Sollac Sérémaange - Italsider Cornigliano - BSC Port Talbot - Cockerill Seraing - Thyssen Hamborn - Klöckner Brême - Hoesch Dortmund) qui se caractérise par :

- un train dégrossisseur à une cage réversible ou quatre cages continues souvent précédées d'un duo brise-oxyde ;
- un train finisseur à 5 ou 6 cages de puissance unitaire entre 4 000 et 5 000 kW ;
- une brame type qui mesure 5 à 6 mètres de longueur et 150 mm d'épaisseur, pesant 6 à 8 tonnes par mètre de largeur ;
- une vitesse de sortie de l'ordre de 10 m/s ;
- un chauffage qui est réalisé par 3,4 ou 5 fours poussants à 3 zones de 100 t/h ;
- des largeurs de table courantes qui vont de 1,2 à 2 mètres mais les brames ne dépassent pas 1,5 mètre de largeur (limite des slabbings à haute levée de l'époque) ;
- le fait que l'on ne bobine couramment que les épaisseurs jusqu'à 6 mm, les épaisseurs plus fortes étant débitées par une cisaille volante à des longueurs marchandes et évacuées à plat ;
- une télécommande des moteurs à partir de pupitres qui est généralisée mais l'automatisme est absent ; les cages sont pré- réglées manuellement et l'opération se déroule sans aucune régulation en cours de laminage d'une bande ; seules les vitesses respectives des cages finisseuses sont ajustées manuellement en permanence.

❖ **2e génération** (exemple : RTB Newport - Usinor Dunkerque - Thyssen Beeckerwerth - Italsider Tarente no 1 - Sidmar Gand) : sous la pression des trains à froid utilisateurs qui traitent normalement des bobines de masse unitaire supérieure à celle des bobines à chaud, et du fait que la chaîne de production allant de l'aciérie à la bobine laminée à froid n'est pas économiquement logique (on coupe en plusieurs tronçons pour ressouder ensuite), on a cherché à produire des bobines beaucoup plus lourdes.

Cela conduit à laminier plus vite des brames plus épaisses, à introduire des régulations d'épaisseur et à maîtriser les tempé- ratures de laminage.

Il s'agit bien d'une deuxième génération puisque l'on va passer, sans étape intermédiaire, à des bobines dont la masse unitaire a pratiquement doublé (16 à 18 tonnes par mètre de largeur).

Ces trains résultent de l'évolution suivante :

- la nécessité d'augmenter d'une part le couple pour traiter un produit plus épais à l'entrée et d'autre part la vitesse de sortie a conduit à la construction de trains finisseurs plus puissants (6 000 à 10 000 kW par cage) permettant une augmentation du débit horaire donc de la capacité de production ;
- lorsque l'on augmente la vitesse de sortie du finisseur, on rencontre, rapidement, des difficultés d'engagement aux bobineuses. Il semble que 14 m/s soit une limite dans l'état actuel des techniques, d'autant plus que cette limite varie en fonction du rapport épaisseur/largeur du produit.

Il faut donc concevoir des trains finisseurs rapides à vitesse variable. L'engagement dans les bobineuses se fait à vitesse relativement lente (10 à 12 m/s), puis la vitesse est portée, progressivement, à sa valeur normale (15 à 17 m/s).

Le train finisseur est muni d'une régulation d'épaisseur rendue nécessaire par le fait que l'accélération introduit des changements d'épaisseur par variation de la répartition des températures tout au long des cages et par modification de l'épaisseur des films d'huile dans les paliers.

Il n'est alors plus possible de laisser aux opérateurs le contrôle des vitesses ou des positions de vis en cours de laminage, les rectifications étant trop fréquentes ou trop rapides ou les deux.

La nécessité d'une régulation automatique des vitesses est évidente ; elle est réalisée par l'intermédiaire des tendeurs de bande qui, restant levés pendant toute l'opération de laminage, agissent comme des palpeurs et exercent une traction. Il y a donc, en même temps, régulation de la traction, ce qui agit sur la largeur.

La brame type mesure 9 à 14 mètres de longueur et 200 à 250 mm d'épaisseur. Le chauffage de ces brames amène la généralisation de fours à 5 zones qui évitent des longueurs de poussée excessives.

L'augmentation d'épaisseur des brames entraîne une augmentation de puissance du train dégrossisseur. On arrive ainsi à 6 cages totalisant environ 60 000 kW. L'augmentation de longueur oblige à espacer davantage les cages dégrossisseuses.

En résumé on peut caractériser cette deuxième génération par :

- une masse unitaire des produits atteignant 16 à 18 tonnes/mètre de largeur ;
- un train dégrossisseur disposant de 1 300 à 2 000 kW pour une cage réversible ou 65 000 à 70 000 kW pour une disposition en continu ;
- un train finisseur puissant et rapide : 70 000 kW et 15 à 17 m/s avec accélération le plus souvent ;
- une régulation d'épaisseur ;
- une régulation de vitesse et de traction.

À cela il faut ajouter des aide-opérateurs qui résultent de l'adaptation des progrès techniques à la complexité des problèmes posés.

Ainsi, la présélection des réglages de vitesse et d'épaisseur évite l'intervention humaine en catastrophe entre deux bandes successives. Les opérateurs peuvent afficher sur clavier ou écran la valeur des paramètres du réglage souhaité pendant que se déroule le programme précédent.

L'alimentation électrique évolue vers la généralisation des thyristors qui vont remplacer les ignitrons.

❖ **3e génération** : l'évolution se poursuit pour augmenter la productivité et améliorer la qualité des produits, ce qui, dans un premier temps, va vers l'augmentation de la masse unitaire des brames et une automatisation de plus en plus poussée.

Elle culmine avec le boom japonais dont les innovations vont conduire l'évolution, et elle est contemporaine de plusieurs autres révolutions : la généralisation de la coulée continue et la disparition des lingots, les chocs pétroliers orientant vers les économies d'énergie et la crise mondiale de la sidérurgie entraînant la fermeture de nombreux sites traditionnels et l'arrêt des investissements lourds.

Les progrès de la coulée continue, couplés avec les économies d'énergie, aboutissent à plusieurs voies nouvelles concurrentes du laminage classique :

- le couplage direct qui consiste à placer une coulée continue en tête d'une installation de réchauffage-laminage ;
- le laminage à chaud ou très chaud qui consiste, grâce à une liaison rapide par wagons (isothermes ou non), à enfourner les brames après refroidissement le plus réduit possible.

Ce type d'exploitation suppose une maîtrise de la qualité des brames de coulée continue qui permet de s'affranchir des contrôles et nettoyages des brames exigés jusque là.

Les masses des brames vont atteindre 25 à 35 tonnes/mètre de largeur et les vitesses 25 m/s. La vitesse limite d'entrée dans les bobineuses reste la même mais l'accélération en cours de laminage permet de réduire l'écart de température entre le début et la fin de la bande – cela même avec des bobines de forte masse unitaire.

Pour les régulations d'épaisseur, le serrage des vis classique par les systèmes électromagnétiques est concurrencé par le serrage hydraulique à très faible inertie et à temps de réponse 10 fois plus court.

L'utilisation des fours à longerons se généralise avec les avantages suivants :

- plus grandes puissances de chauffe par suppression de la zone d'égalisation et augmentation des longueurs de fours ;
- meilleure qualité de surface, surtout pour les aciers sensibles aux rayures (inoxydable par exemple) ;
- souplesse d'exploitation accrue.

La généralisation des longerons a amené les constructeurs à travailler leur technique de chauffage pour en atténuer les inconvénients : traces de longerons, pertes thermiques, etc. Avec des brames aussi lourdes, il a fallu éviter des trains dégrossisseurs de longueur démesurée et limiter les pertes de température entre les deux extrémités ; cela a développé l'emploi de cages dégrossisseuses en tandem ou de cages réversibles suivies de deux cages dégrossisseuses (train dit « 3/4 continu »).

L'automatisation est poussée au maximum.

Les régulations d'épaisseur, de vitesse et de traction étant considérées comme acquises, l'évolution se fait dans les directions suivantes :

- évaluation des paramètres par un calculateur ; nous verrons en détail, plus loin, les idées qui ont permis de faire avancer les modèles vers des applications de plus en plus précises et adaptées ;
- automatisation de l'arrosage de bande sur les tables de sortie : on aborde la métallurgie du procédé ;
- automatisation de la coupe en début et en fin de bande avec deux objectifs : économie de métal et productivité de l'installation ;
- mécanisation et automatisation du changement des cylindres de travail permettant de diviser par quatre le temps nécessaire manuellement.
- évaluation des paramètres par un calculateur ; nous verrons en détail, plus loin, les idées qui ont permis de faire avancer les modèles vers des applications de plus en plus précises et adaptées ;
- automatisation de l'arrosage de bande sur les tables de sortie : on aborde la métallurgie du procédé ;
- automatisation de la coupe en début et en fin de bande avec deux objectifs : économie de métal et productivité de l'installation ;
- mécanisation et automatisation du changement des cylindres de travail permettant de diviser par quatre le temps nécessaire manuellement.

Sous l'impulsion des Japonais, l'instrumentation progresse pour permettre des mesures jusque là inaccessibles ou mal maîtrisées. Seule la mesure d'épaisseur en axe de bande pouvait être considérée comme fiable et il a fallu s'attaquer à la mesure de largeur et à celle de profil. Les mesures de température cherchent à s'affranchir des effets perturbateurs dus à la présence d'eau, de vapeur ou de calamine.

La planéité continue à être l'objet de mises au point ainsi que la cambrure (sabre).

Les détecteurs de présence sont devenus fiables et ont permis le suivi précis des brames tout au long du processus (tracking), ce qui permet une automatisation complète.

La technologie des cages a évolué pour permettre un meilleur contrôle du profil en travers et on a vu apparaître :

- le cambrage des cylindres d'appui [BURB (Back up roll bending)] ;
- le cambrage des cylindres de travail [WORB (Work roll bending)] ;
- les cylindres gonflables [(VCR) (Variable Crown Roll)] ;
- les cylindres croisés ;
- les cylindres « bouteille » ;
- les cages sexto (figure II.2 et II.3) ;
- les cylindres décalés (figure II.4).

Sur la base de ces idées nouvelles, on a rénové les trains que l'on souhaitait conserver après la crise mondiale, cela en tenant compte de la réduction des investissements. De ce fait, il n'y a pratiquement pas de train type, sauf les derniers construits entièrement neufs. Exemples (NSC) : Yawata (1982) - Hirohata (1984). [4]

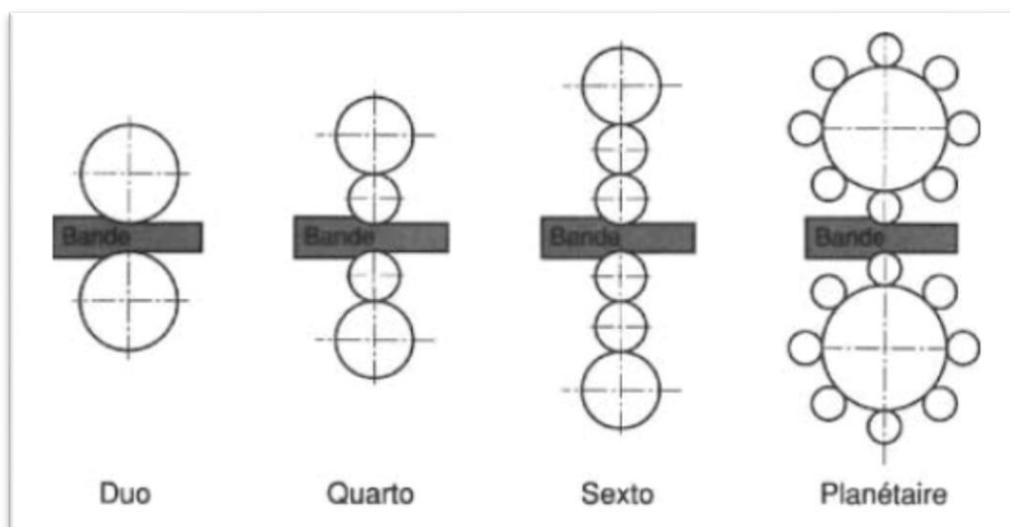


Figure II.2 Différents types de laminoirs à chaud

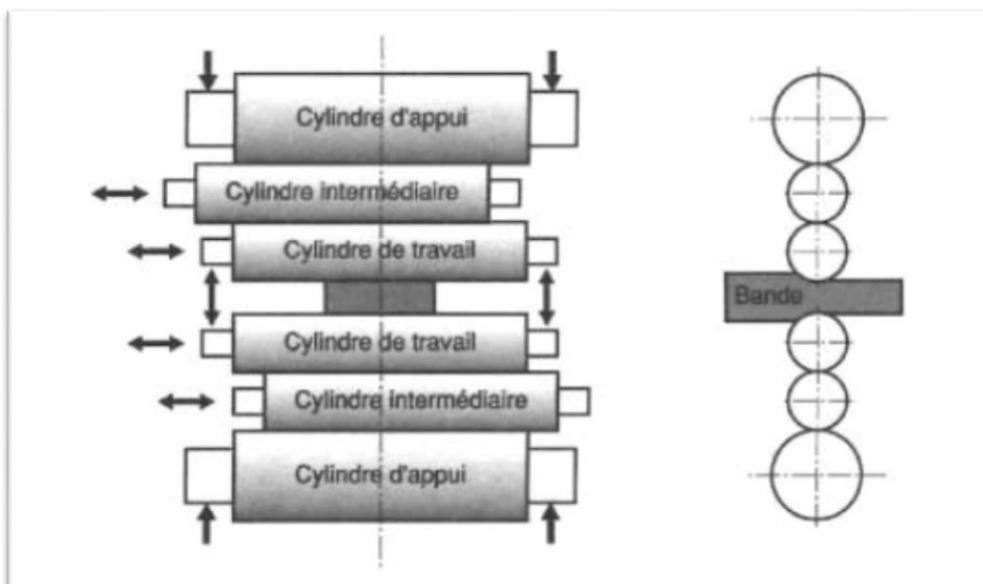


Figure II.3 Principe d'une cage sexto

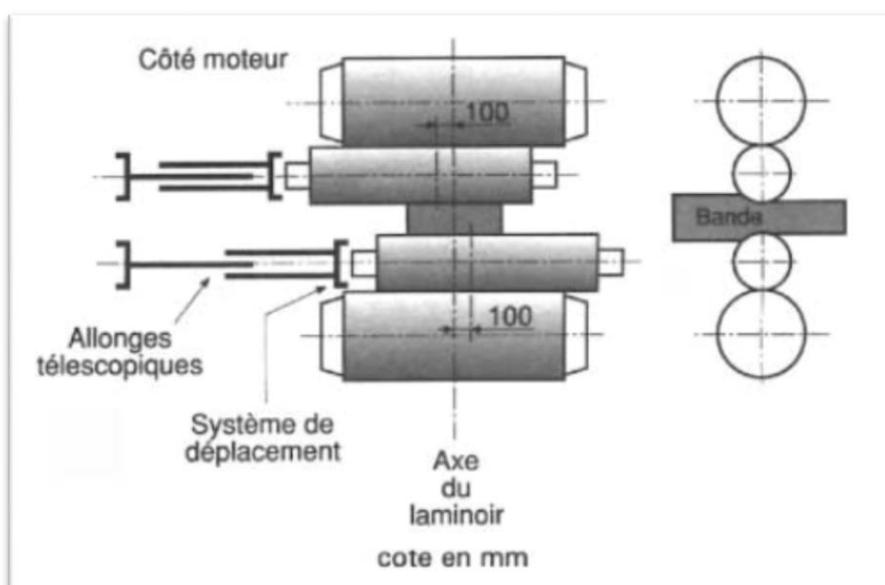


Figure II.4 Principe de cylindres décalés

II .4 Acier laminé à chaud

II.4.1 Description

L'acier laminé à chaud est un acier qui a été pressé à de très hautes températures au-delà de 800°C, ce qui est au-dessus de la température de recristallisation pour la plupart des aciers. Ceci rend l'acier plus facile à mettre en forme, et il en résulte des produits plus faciles à travailler.

Pour traiter l'acier laminé à chaud, les fabricants commencent d'abord avec une grande longueur de métal rectangulaire, appelée billette. La billette est chauffée et ensuite envoyée pour le prétraitement, où elle est aplatie dans un grand cylindre. De là, elle est maintenue à une température élevée et traverse une série de rouleaux pour atteindre ses dimensions finales. Les brins d'acier chauffés à blanc sont poussés à travers les rouleaux à des vitesses élevées. Pour la tôle, l'acier laminé est filé en bobines et laissé refroidir. Pour les autres formes, telles que barres ou plaques, les matériaux sont sectionnés et emballés.

L'acier rétrécit légèrement quand il refroidit. Étant donné que l'acier laminé à chaud est refroidi après traitement, il y a moins de contrôle sur sa forme finale, le rendant moins adapté pour des applications de précision. L'acier laminé à chaud est souvent utilisé dans des applications où des dimensions spécifiques minutieuses ne sont pas cruciales. Les voies ferrées et projets de construction utilisent souvent l'acier laminé à chaud.

L'acier laminé à chaud peut être souvent identifié avec les caractéristiques suivantes:

- Une surface calaminée un reste du refroidissement des hautes températures.
- Des bords et des coins légèrement arrondis pour les produits en barres ou plaques (du au rétrécissement et à la finition moins précise).
- Légères distorsions, où le refroidissement peut provoquer des formes légèrement trapézoïdales, à l'opposé de parfaits angles droits. [11]

II.4.2 Les bénéfices de l'acier laminé à chaud

L'acier laminé à chaud requiert généralement moins de traitement que l'acier laminé à froid, ce qui le rend beaucoup moins cher. Parce que l'acier laminé à chaud est autorisé à refroidir à température ambiante, c'est en fait normalisé ce qui signifie qu'il est exempt de contraintes internes qui peuvent provenir de la trempe ou du durcissement à froid.

L'acier laminé à chaud est idéal quand les tolérances dimensionnelles ne sont pas aussi importantes que la force globale du matériel, et où la finition de surface n'est pas une préoccupation majeure. Quand la finition de surface est un souci, la mise à l'échelle peut se faire par ponçage, sablage ou décapage par bain d'acide. Une fois la mise à l'échelle faite, diverses brosses ou finitions miroir peuvent être aussi appliquées. L'acier décalaminé offre aussi une meilleure surface pour la peinture et autres revêtements de surface. [11]

II.5 Laminoir industriel

II.5.1 Description

Le laminoir est un outil industriel servant généralement à rallonger ou à amincir des morceaux métalliques. Utilisé en boulangerie et pâtisserie, cet instrument permet aussi l'étalage, l'aplatissement et le découpage des pâtes alimentaires jusqu'à obtention de la forme et de l'épaisseur souhaitée.

II.5.2 De quoi se compose-t-il

La conception du laminoir repose généralement sur des cylindres en fonte ou en acier comportant des axes horizontaux. Leurs extrémités se logent à l'intérieur de coussinets soutenus par une structure verticale dénommée « cage du laminoir ». Elle est principalement conçue à base d'un jeu de cylindres de laminage. La paire de cylindres en fonte rectifiée ou « de travail » reçoit le matériau à allonger tandis qu'une seconde paire de cylindre en acier, aussi appelée « cylindres de soutien », permet d'empêcher la déformation des cylindres en fonte.

L'ensemble est enfin soutenu par deux anneaux métalliques. Lorsqu'il comporte seulement une cage, on dit que le laminoir est réversible tandis qu'on parlera de train de laminage ou « tandem » dès lors qu'il se compose de plusieurs cages. [12]

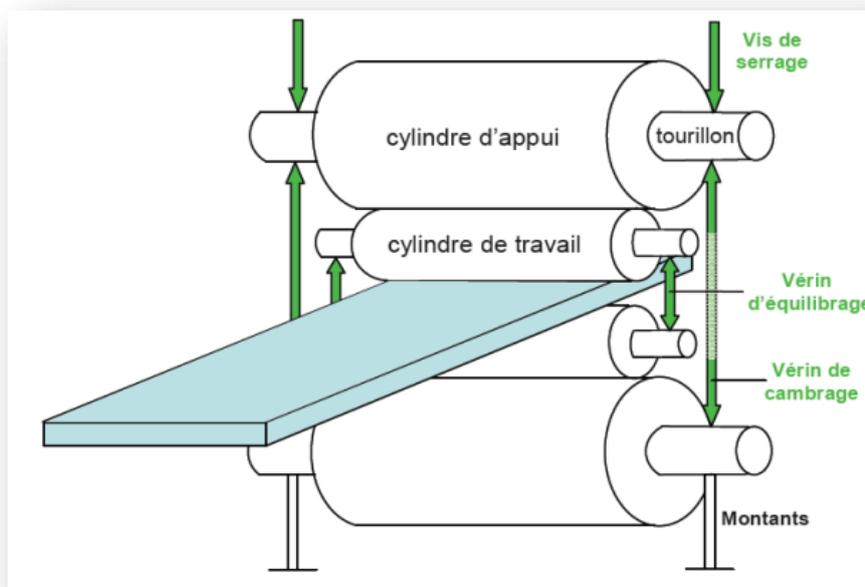


Figure II.5 Schéma d'une cage quarto de laminage

II.5.3 Les cylindres de laminoir à chaud (Outil)

II.5.3.a Définition

Les cylindres de laminage sont les outils essentiels de ce procédé de mise en forme ; ils sont soumis à de fortes sollicitations cycliques tant mécaniques que thermiques. L'optimisation de leur durée de vie est donc particulièrement cruciale car leur détérioration influe de manière pénalisante sur la qualité de surface des produits ainsi que sur les arrêts des installations industrielles. Dans un souci multiple d'augmenter la durabilité des outils, la qualité des produits et de réduire les coûts, il est nécessaire de contribuer à la maîtrise de ces dégradations et en particulier à celle de l'usure.

Matériaux utilisées dans la fabrication des cylindres de travail :

Pour que ces cylindres réunissent les conditions de qualité exigées en vue d'obtenir des tolérances dimensionnelles du produit laminé très étroites et une finition superficielle plus parfaite, et d'augmenter la productivité du train de laminage, il est nécessaire d'améliorer la résistance des cylindres dans les actions de service. Il s'agit alors d'obtenir une plus grande qualité du produit laminé, une plus grande productivité, avec un plus petit nombre de changements des cylindres dans le train pendant le service, ce qui permet d'obtenir finalement un faible coût de production.

Les cylindres conventionnels ne peuvent pas satisfaire de nos jours toutes ces exigences, particulièrement avec les conditions de travail de plus en plus sévères. Les cylindres de travail doivent être fabriqués avec un matériau dur et résistant, capable de supporter la pression de contact due à la force de laminage, les forts gradients thermiques

Cycliquement répétés et, en même temps les cylindres doivent aussi posséder une haute résistance à l'usure, dans le but de maintenir la qualité superficielle du produit laminé et augmenter la productivité du train.

Les cylindres en fonte douce sont coulés dans des moules de sable employés au dégrossissage à chaud de l'acier. Les cylindres en fonte dure, coulés dans des coquilles, sont largement employés dans des trains à tôles et dans et dans les cages de finissage des trains profilés et à fils.

Les premiers essais des cylindres en acier rapide dans les trains à bandes laminées à chaud sont très récents, ils commencent à la fin des années 80 au Japon et au début des années 90 en Europe.

Dans la production des cylindres de laminage à chaud des premières caisses finisseuses des trains à bande laminée à chaud, les cylindres en acier rapide suscitent un intérêt en

constante croissance puisqu'ils permettent d'atteindre un meilleur rendement que les cylindres en fonte à haute teneur en chrome.

La principale vertu des cylindres d'acier rapide est son excellent comportement mécanique à des très hautes températures, ajoutant à cela son supérieure résistance à l'usure et à la fissuration thermique, favorisé par le haut pourcentage de carbone (1.5 - 2.5 %) et des éléments d'alliage, comme Nb, Cr, Mo et W, qui forment des carbures durs et stables

Le carbone est l'élément essentiel pour durcir l'acier. **Rôle des éléments d'alliage** : Les éléments carburières tels que le chrome, le molybdène, le tungstène et le vanadium, ajouté séparément ou conjointement à l'acier au carbone, ont des influences communes sur le comportement de cet acier.

Type de cylindre	ØMax	ØMin	L-Tabl e	L-Totale	Point (tonnes)	Dureté	Ratio 2003	Matière	
Appui finisseuse	1425	1270	1500	4450	29.18 T	50÷53 SH-C	$0.8 \cdot 10^{-3}$	Acier coulé	
Travail finisseuse	720	650	1500	4420	7.9T	76÷80 SH-C	$6.6 \cdot 10^{-3}$	Fonte+H-chrome	
Appui quarto	1600	1500	2800	6450	58.50 0T	50÷60 SH-C	$0.10 \cdot 10^{-3}$	Acier	
Travail quarto	965	900	2800	5670	22.90 0T	70÷75 SH-C	$0.80 \cdot 10^{-3}$	Fonte+M-chrome	
Briseoxyde horizontal	1220	1090	1500	4645	÷	45÷50 SH-C	$0.10 \cdot 10^{-3}$	Fonte	
Brise oxyde vertical	1000	950	400	2542	6.90T	50÷55 SH-C	$0.10 \cdot 10^{-3}$	Acier ou fonte	
Edjer quarto	1100	1000	220	2600	10.28 T	40÷50 SH-C	$0.14 \cdot 10^{-3}$	Acierfor gé	
Pinh rool 3	Inferieur	400	370	1800	3448	1.764 1T	60 SH-C	$0.07 \cdot 10^{-3}$	Acierfor gé

	Superieur	900	870	1800	2925	2.045 T	60 SH-C	$0.07*10^{-3}$	Acierfor gé
Pinh rool 2	Inferieur	516	505. 5	1550			60 SH-C	$0.07*10^{-3}$	Acierfor gé
	Superieur	928.8	910	1550			60 SH-C	$0.07*10^{-3}$	Acier forgé

Tableaux II.1 Caractéristique technique des cylindres en LAC

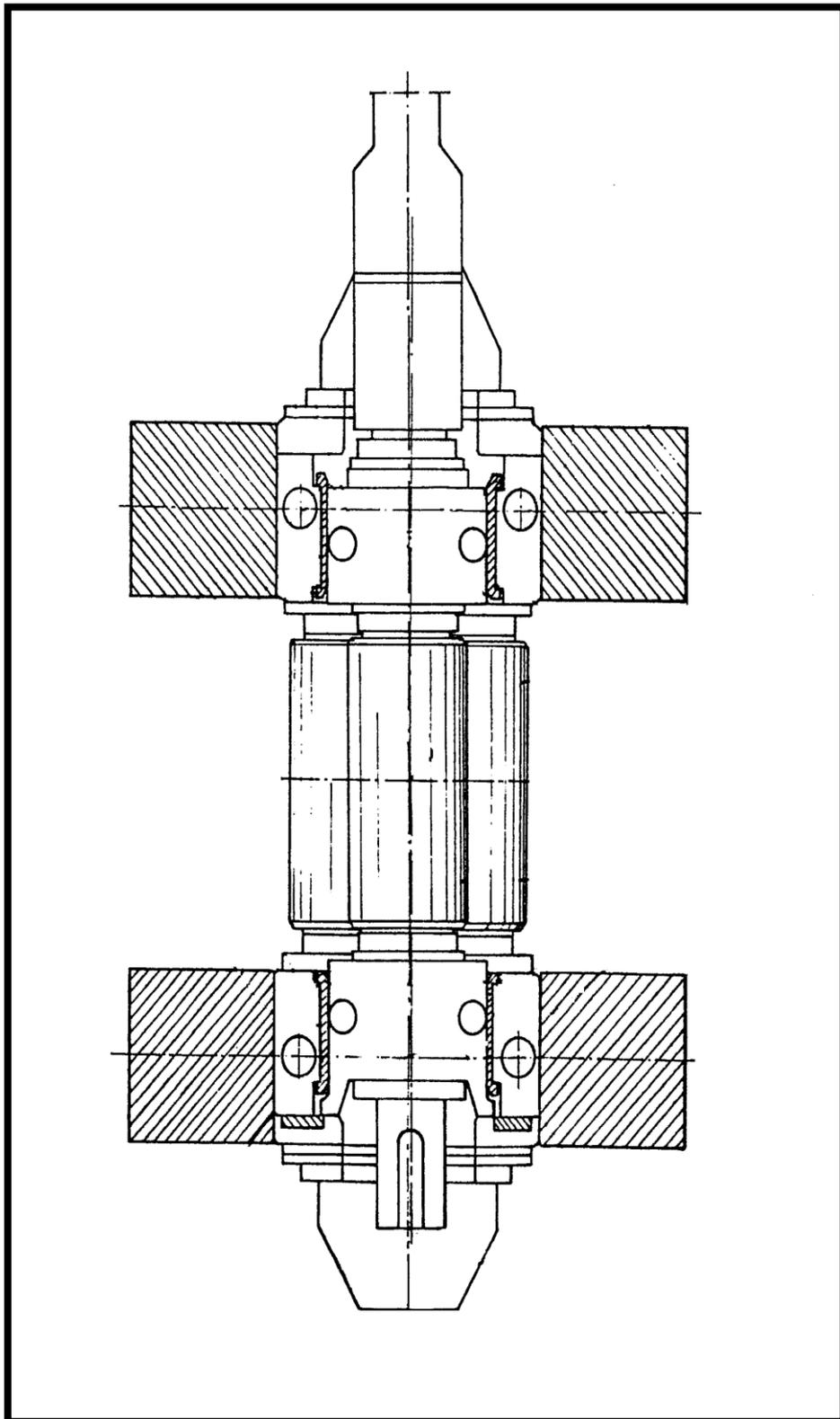


Figure II.6 Schéma de cylindre de travail

II.5.3.b Importance de la qualité des surfaces métalliques

Quelques soit le mode d'usinage par enlèvement de copeaux. Le but final est d'obtenir un produit dont la qualité d'exécution sera caractérisée par une précision dimensionnelle des formes géométriques et un degré de propreté des surfaces liées directement à la notion de rugosité. La pratique montre que les pièces travaillant à l'usure plus communément appelées pièces d'usure perdent rapidement leurs côtes fonctionnelles, si leurs surfaces des cylindres présentent des aspérités (alternance de creux et reliefs à arêtes vives).

II.5.3.c Atelier de rectification de cylindres (ARC)

Pendant le déroulement de la production et avec le temps la forme des cylindres sera déformée et pour ça on trouve l'atelier de la rectification pour une bonne production.



Figure II.7 Atelier de rectification de cylindres (ARC)

III Cycles de fabrication de l'acier jusqu'au produit final

III.1 Généralité

A partir du minerai de fer fourni par les mines d'Ouenza et de Boukhadra, dans l'unité de préparation mécanique des matières, le minerai subit un concassage, un broyage, un criblage et une mise sur tas pour une homogénéisation et alimentation des agglomérations.

Après additions de combustible fin, le mélange est humidifié avant de passer sous une hotte d'allumage pour subir une cuisson sur chaîne. Le produit obtenu est appelé aggloméré et sert à alimenter le haut fourneau pour produire de la fonte liquide.

La fonte est un fer liquide carburé contenant jusqu'à 5% de carbone associé au silicium, manganèse, phosphore et soufre. La fonte liquide produite par le haut fourneau est destinée aux aciéries à oxygène n°1 (brames) et n°2 (billettes). Le laitier, produit dérivé, sert pour les cimenteries et les travaux publics. L'aciérie à oxygène n°1 transforme la fonte liquide, provenant du haut fourneau, en acier à l'aide d'oxygène.

L'acier liquide est solidifié sous forme de produit appelé brame qui est par la suite laminé en bobines au niveau du laminoir à froid pour obtenir des tôles fines et bobines Skin-passées/galvanisées, selon les nuances et propriétés demandées par le client.

L'aciérie à oxygène n°2 transforme la fonte liquide, provenant du haut fourneau, en acier à l'aide d'oxygène. L'acier liquide est solidifié sous forme de produit appelé billette qui est laminé par la suite au niveau du laminoir rond à béton. Les produits obtenus répondent à des caractéristiques mécaniques conformes aux exigences nationales et internationales.

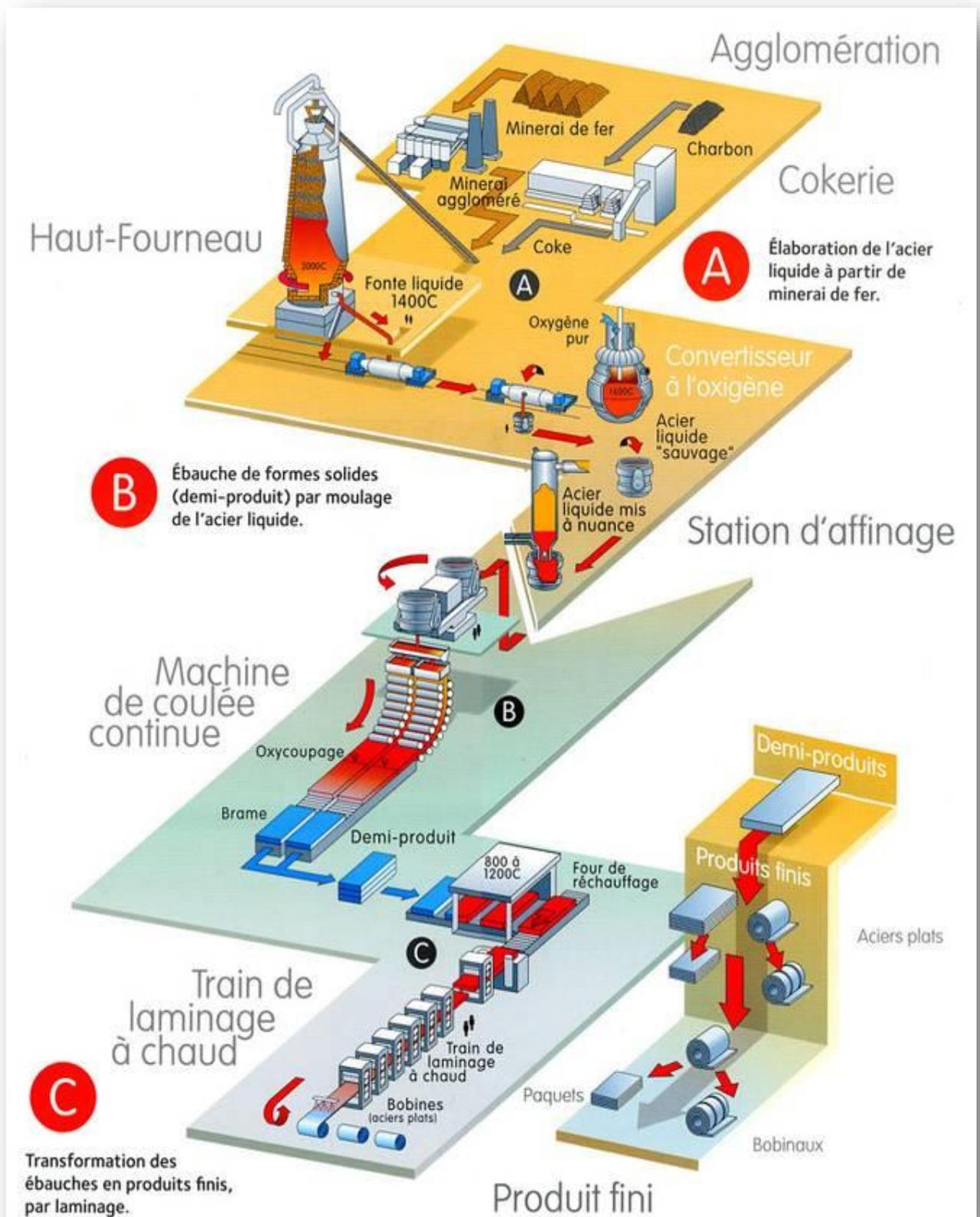


Figure III.1 cycle de fabrication de l'acier jusqu'au produit final

III.2 Les différentes phases du laminage à chaud

Les différentes étapes du laminage à chaud sont :

III.2.a Le réchauffage

Le réchauffage des aciers au carbone et des aciers micro-alliés comporte trois objectifs principaux :

Le premier, d'ordre mécanique, est simplement de porter le métal à une température suffisante pour diminuer les efforts de formage, accroître la ductilité de l'acier de façon à pouvoir lui appliquer des déformations importantes, et de finir le laminage dans le domaine austénitique.

Le second objectif, qui est plutôt une conséquence favorable du premier, est de se placer dans le domaine austénitique avec, pour conséquences, d'effacer partiellement la structure très grossière issue de la solidification et de réduire les gradients de composition dus au phénomène de ségrégation.

Enfin, l'objectif essentiel de cette phase de réchauffage est la remise en solution des précipités apparus au cours de la solidification, en premier lieu parce qu'ils sont trop gros, et donc pas assez nombreux pour contribuer au durcissement de l'acier à température ambiante, et parce que les éléments tels que le niobium, le titane ou le vanadium jouent un rôle très important sur l'évolution de la structure au cours du laminage et de la transformation lorsqu'ils sont en solution solide [Fabrègue, 2000]. [1]

III.2.b Le laminage

D'un point de vue métallurgique, le laminage apparaît comme une succession de déformations (des passes) qui vont engendrer un écrouissage (et restauration éventuellement) du métal, et de temps d'attente (les inters passes) pendant lesquels la structure de l'acier pourra évoluer.

Le laminage asymétrique a le même aspect opératoire que le laminage classique sauf que les rayons, les vitesses et les rugosités des cylindres peuvent être différentes.[1]

III.3 Processus

III.3.1 La gestion des matières premières

Le département « gestion des matières premières » a pour mission de décharger les navires et de répartir soigneusement les produits avant de les entreposer dans le stock des matières premières. Ces opérations sont effectuées au moyen de grues et d'un réseau impressionnant de bandes transporteuses. Ce département est également responsable du transport de la fonte en provenance des hauts fourneaux vers l'aciérie ainsi que des expéditions des produits finis. Finalement, il contribue à nos réalisations dans le domaine environnemental par la réutilisation de produits de récupération et de matières premières secondaires. [11]



Figure III.2 Stock de minerai

III.3.2 La cokerie

Le charbon est chauffé à une température de 1250°C dans les fours à coke. Comme ces fours ne contiennent pas d'oxygène, le charbon ne peut pas brûler. Ce procédé est appelé 'la distillation sèche'. Il faudra 18 heures pour convertir 35 tonnes de charbon en 25 tonnes de

coke métallurgique. La pâte à coke est sortie du four grâce à une défourneuse équipée d'un bras poussoir. Un guide-coke amène le coke dans un wagon d'extinction et le transfère vers la tour d'extinction où il est refroidi avec de l'eau. Ensuite, le coke est déchargé sur un quai où le résidu d'eau va s'évaporer. Le coke est ensuite transféré, via une bande transporteuse, vers la station de concassage et de criblage. Lors de la distillation, une quantité importante de gaz et de fumées est générée qui, après purification, est transformée en gaz de cokerie et d'autres sous-produits valorisés comme du goudron, du soufre, de l'ammoniac, de la naphthaline et du benzol. La production de coke métallurgique et la purification des gaz sont des opérations totalement automatisées. Le coke métallurgique est utilisé comme carburant pour le haut fourneau. Il joue en outre un rôle important dans le procédé chimique qui a lieu dans le haut fourneau. Les gaz de cokerie sont entièrement utilisés en interne comme carburant. [11]



Figure III.3 Four de coke

III.3.3 L'agglomération

Dans nos usines d'agglomération, nous cuisons un mélange de fines de minerai, des matières de récupération ferrifères et des fondants. Ceci est réalisé sur grille mobile qui se déplace lentement et qui utilise le poussier de coke comme carburant. La chaîne d'agglomération est composée de chariots grillagés sur lesquels est étalé le mélange à agglomérer. Ce dernier est brûlé par le dessus, en passant sous une hotte d'allumage. Lorsque la chaîne avance, l'air est aspiré vers des caissons d'aspiration. Le mélange est ainsi cuit de haut en bas. À la fin de la

ligne, la pâte d'aggloméré tombe sur un banc d'écrasement, où elle est criblée et refroidie. L'aggloméré dispose de la composition chimique parfaite, granulométrie et attributs physiques à utiliser dans le haut fourneau. L'aggloméré représente 90% de la charge métallique du haut fourneau. La partie restante est constituée de pellets et de minerais calibrés. [11]

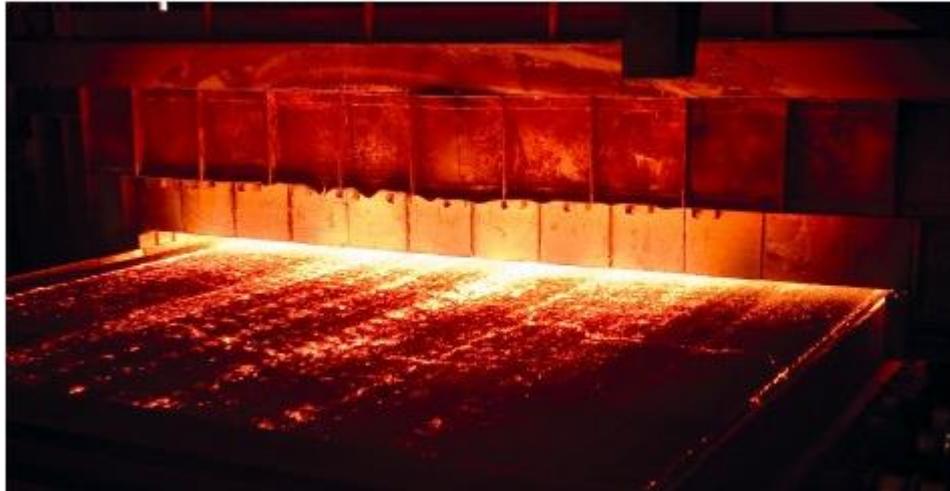


Figure III.4 Chaîne d'agglomération

III.3.4 Les hauts fourneaux

Les hauts fourneaux produisent de la fonte liquide par fusion du minerai de fer dans une atmosphère réductrice. Le minerai de fer est composé de fer et d'oxygène. La fusion du minerai de fer dans une atmosphère réduite va permettre d'éliminer l'oxygène. Les matières premières utilisées dans le haut fourneau, le coke et l'aggloméré, sont chargées via des trémies peseuses. A la base du haut fourneau, de l'air chaud d'une température allant de 1000°C à 1200°C est insufflé dans le four. L'air chaud réagit avec le coke et le charbon pulvérisé et forme un gaz de réduction qui absorbe l'oxygène du minerai de fer. En même temps, de la chaleur est créée qui est nécessaire pour la fusion des minerais réduits. La charge du haut fourneau descend et la conversion du minerai de fer en fonte se produit. La fonte est collectée au cœur du haut fourneau. A intervalles réguliers, la fonte va s'écouler via l'un des deux trous de coulée pour arriver dans les poches torpilles, qui transfèrent la fonte liquide vers l'aciérie. En plus de la fonte, le haut fourneau produit également du laitier. Ce laitier flotte au-dessus de la fonte. Il est constitué de fondants et de gangue (partie non ferreuse du minerai). Ce laitier est évacué simultanément avec la fonte et granulé à l'aide d'un puissant jet d'eau, asséché dans des tambours à filtres rotatifs et transporté vers les industries de la

construction. Lors de la production de la fonte, de larges quantités de gaz qui contiennent un certain nombre de poussières provenant de la charge du haut fourneau sont également générées. Le gaz est collecté puis épuré avant d'être distribué à d'autres utilisateurs. Notre utilisateur principal est la centrale électrique d'Electrabel située à proximité. [11]



Figure III.5 Haut fourneau

III.3.5 L'aciérie

L'aciérie est divisée en deux sections:

- ✚ le convertisseur, où la fonte est traitée et transformée en acier liquide;
- ✚ la coulée continue, où l'acier liquide est solidifié en brames.

❖ **Convertisseur**

La fonte est transportée à l'aciérie où, si nécessaire, une première désulfuration est effectuée. Ainsi les scories, créées dans le haut fourneau, sont éliminées.

Après l'élimination des scories, la fonte, à laquelle une quantité bien précise de ferrailles a déjà été ajoutée, est versée dans le convertisseur. Comme l'acier est recyclable à l'infini, les ferrailles peuvent être ajoutées facilement tout au long du processus de fabrication de l'acier. En effet, 15 à 20% des matières premières nécessaires à la fabrication de l'acier sont remplacées par des ferrailles recyclées. De l'oxygène pur est ensuite soufflé sur le bain de

fonte au moyen d'une lance refroidie à l'eau. Cela nous permet d'enlever le carbone et d'autres impuretés chimiques. Afin d'optimiser le processus d'affinage, des additifs (comme par exemple la chaux) sont également ajoutés et de l'azote ou de l'argon est injecté à la base du convertisseur.

Les éléments impurs sont transformés en scories, qui flottent à la surface du bain liquide, ou en gaz.

Les gaz sont refroidis dans une chaudière et totalement nettoyés dans une installation de dépoussiérage. Une partie de ce gaz de convertisseur est utilisé dans nos départements de production comme une alternative au gaz naturel. Le reste est utilisé par Electrabel pour produire de l'électricité. Après avoir soufflé de l'oxygène, la fonte est devenue de l'acier liquide.

L'acier liquide peut à présent être transvasé dans une poche à acier où il peut subir d'autres traitements :

- ✓ Des éléments d'alliage peuvent être ajoutés.
- ✓ Dans l'installation de traitement en poche, l'homogénéité de l'acier liquide peut être améliorée en modifiant sa température et sa composition. Cela permet de purifier davantage l'acier de ses impuretés et inclusions.
- ✓ Afin de produire des aciers encore plus déformables, l'acier liquide peut être traité dans une des deux stations de dégazage sous vide. Cela lui permet d'être tout à fait décarburé, désoxydé sous vide et allié.



Figure III.6 convertisseur

❖ La coulée continue

A la coulée continue, l'acier liquide se solidifie sous forme de brames. Tout d'abord le pont de coulée place la poche à acier dans un des deux bras du tourniquet. Le tourniquet effectue un mouvement de 180° pour amener la poche en position de coulée. Lors de l'ouverture du fond de la poche à acier, l'acier liquide est coulé dans un répartiteur de 80 tonnes. Le répartiteur a deux trous de coulée qui mènent chacun à une lingotière qui va déterminer la taille de la brame.

Dès que le fond de la poche à acier est ouvert, l'acier s'écoule jusqu'à vider complètement la poche. Grâce à la grande capacité des répartiteurs, une poche à acier vide peut aisément être remplacée par une poche pleine sans interrompre le processus de coulée continue. Cela se fait en pivotant simplement le tourniquet de 180°. C'est ce qui permet d'avoir un procédé en continu.

Après avoir quitté la lingotière, l'acier liquide est supporté par une série de rouleaux – groupés en segments – au travers desquels il est guidé. Une très grande quantité d'eau refroidie est aspergée sur l'acier liquide entre les rouleaux pour solidifier les brames. L'acier est coulé verticalement mais est progressivement courbé de sorte qu'il sorte horizontalement de la machine. Les brames qui sortent de la coulée continue sont coupées en longueur au moyen d'installations alimentées en gaz naturel et en oxygène sous haute pression.

Le site de Gand dispose de deux coulées continues. La coulée continue n°2 produit des brames de largeur unique (alors que la coulée continue n°1 peut en produire à double largeur), ce qui ne nécessite donc pas de découpage supplémentaire. Les largeurs obtenues à la coulée n°1 se situent entre 1310 et 2630 mm et entre 950 et 2000 mm à la coulée n°2. L'épaisseur des brames est toujours de 22 cm et elles sont coupées à une longueur de 10,6 mètres maximum. [11]

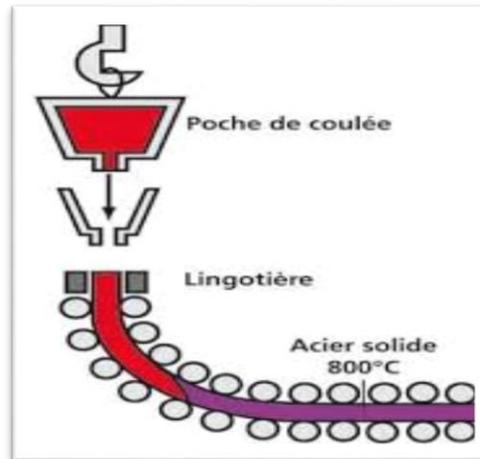


Figure III.7 Coulée continue

III.3.6 Le laminoir à chaud

Les brames en provenance de la coulée continue sont d'abord triées dans le parc à brames. Tous les défauts de surface sont éliminés à l'aide de chalumeaux à oxygène et au gaz naturel.

Avant de pouvoir laminier les brames, elles doivent être chauffées à une température allant de 1000°C à 1270°C. Cette opération est effectuée dans les fours à longerons mobiles du laminoir à chaud.

La brame à la sortie du four est recouverte d'une couche d'oxyde qui doit être éliminée avant d'être enroulée. La couche est brisée et enlevée par un jet d'eau ayant une pression de 120 bars.

Ensuite, la brame est amincie en plusieurs étapes. La brame fait plusieurs passes dans un dégrossisseur réversible et un dégrossisseur continu qui réduisent son épaisseur pour atteindre approximativement 3 cm.

L'épaisseur finale est atteinte dans le train finisseur. Avant d'y entrer, la couche d'oxyde est une nouvelle fois éliminée. La brame est alors dirigée dans un laminoir à 7 cages consécutives. Chaque cage de laminage va réduire l'épaisseur et allonger la tôle. A la sortie de ligne, l'épaisseur, la largeur, le profil, la planéité et la température de la tôle sont contrôlés.

Avant d'enrouler la tôle, l'acier est refroidi par un jet d'eau à basse pression pour obtenir la température adéquate. Ensuite, la bande est enroulée, pourvue d'un cerclage métallique, le poids est mesuré et un numéro d'identification est attribué par un système de marquage automatique.

Un tiers des bobines laminées à chaud est livré directement aux clients. Deux tiers sont envoyés vers la ligne de laminage à froid. [11]

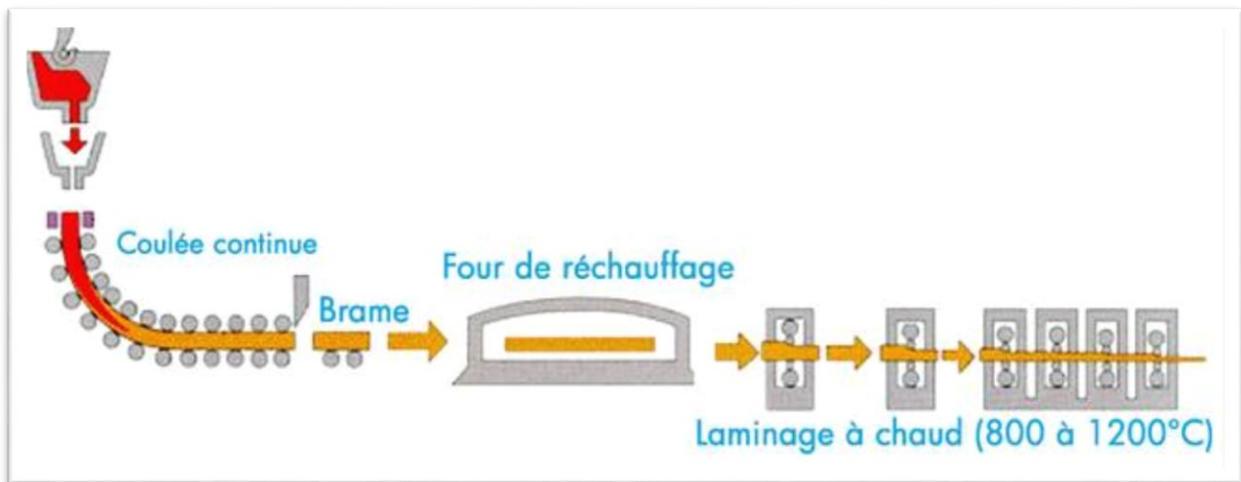


Figure III.8 laminoir à chaud

III.4 Processus de fabrication au niveau du LAC

III.4.1 Parc à brames

Après contrôle et élimination de défauts, les brames sont stockées suivant leurs dimensions et leur type d'acier, des listes sont établies, contenant toutes les informations nécessaires (N° de brame, dimension, type et nuance) et sont envoyées au service de programmation pour l'établissement des programmes de laminage.

III.4.2 Fours poussant

Le laminoir à chaud dispose de trois fours poussant :

- (01) fours d'une capacité de 125 tonnes par heure.
- (02) fours d'une capacité de 240 tonnes par heure.

Les combustions utilisées sont soit le gaz naturel ou fuel pour le premier, soit le gaz naturel ou le gaz de cokerie pour les deux autres.

Les fours permettent le réchauffage des brames jusqu'à une température de 150°C, dite laminage, pour éviter les chocs thermiques, le réchauffage se fait graduellement, pour cela il existe trois zones :

- La zone de préchauffage permettant l'adaptation graduelle des brames, aux températures élevées dans cette zone, la température peut atteindre jusqu'à 1100°C.
- La zone d'égalisation permettant de l'homogénéisation des brames à une température de 1250°C.

Les brames sont enfournées dans le four, au moyen de pousseuses et glissent sur les skis (glissières) refroidis à l'eau, jusqu'à la zone de défournement.

III.4.3 Laveuse à brame

Cette installation permet d'enlever la calamine qui se forme sur les brames durant leur séjour dans le four, le milieu ambiant ainsi que le temps de séjour contribuent à la formation de cette calamine (oxyde de fer) cette dernière est enlevée par jets d'eau avec une pression de 140 bars.

III.4.4 Cage brise oxyde

C'est une cage duo universelle, composée de deux cylindres horizontaux et deux cylindres verticaux, elle permet l'élimination de la calamine restée adhérente après la laveuse à brames l'opération se fait par la réduction de l'épaisseur et de la largeur, tout accompagné par un décalaminage à l'eau avec une pression de 140 bar le laminage au niveau de cette cage, permet de diminuer le nombre de passes.

Les cylindres de cette cage sont refroidis à l'eau avec une pression de 4 bars (la vitesse de laminage de cette cage est de 1.25 m/s, taux de réduction pouvant atteindre 30%).

Elle permet à l'aide d'un travail réversible (aller et retour) de réduction l'épaisseur et la largeur des brames jusqu'à l'obtention d'une ébauche ou d'une tôle, dans les dimensions programmées, le nombre de passes (5 à 7 passes) est en fonction de l'épaisseur finale à réaliser.



Figure III.9 cage brise oxyde

III.4.5 Cage quarto

On appelle aussi le Dégrossisseur. Son rôle est de diminuer l'épaisseur du brame par le passage entre ces rouleaux 7 fois pour obtenir l'épaisseur voulue pour passer à les cages finisseuses.



Figure III.10 Cage Quarto (Dégrossisseur)

III.4.6 Planeuse

À la sortie du quarto, les tôles laminées peuvent présenter une mauvaise planéité qui sera corrigée par cette installation, la planeuse est utilisée seulement lors des laminages des tôles fortes. Elle est constituée de plusieurs rouleaux (9 rouleaux de travail, 27 rouleaux d'appuis et 2 rouleaux auxiliaires).

III.4.7 Cisaille volante

Placée devant le train finisseur, cette installation permet l'ébouage des têtes et queues des ébauches, provenant du quarto, afin d'éliminer l'irrégularité de l'épaisseur et de largeur, sur la tête et la queue provoquée par la déformation qu'a subie la brame durant son ébauchage, la tête est coupée en forme d'arrondie pour faciliter son engagement au train finisseur, tandis

que la queue est coupée droite pour éviter son retournement, entre les cages qui risqueraient d'abîmer la surface des cylindres.



Figure III.11 Cisaille

III.4.8 Décalamineuse

Elle permet d'éliminer la couche de calamine, qui se forme durant le parcours entre la cage quarto et le train finisseur en exerçant une légère pression avec des rouleaux prévus à cet effet, accompagné par jet-stream d'une pression de 140 bars.

III.4.9 Train finisseur (les 6 cages)

C'est un train à action continue de la première cage à la dernière cage l'ébauche, durant son passage, est prise dans toutes les cages en même temps, cette installation est destinée à la production des tôles minces livrées en bobines, en réduisant successivement l'épaisseur de l'ébauche, pour la porter jusqu' à la dimension demandée et de donner à la bande un profil bien déterminé suivant sa destination, les vitesses du train finisseur vont dans l'ordre croissant de la première cage à la dernière et les réductions vont de la dernière à la première.

Les cylindres de travail et d'appui sont refroidis à l'eau avec une pression respectivement de 18 à 4 bars.

Le train finisseur est doté des aussi des systèmes de mesure et de contrôles suivants :

- jauge d'épaisseur à rayons X.

- jauge de largeur : placée en aval de la jauge d'épaisseur, elle sert pour la mesure des largeurs de bandes.



Figure III.12 Train finisseur

III.4.10 Système de refroidissement bandes

Placée à la sortie du train finisseur, ce système permet de refroidir la bande pour l'obtention des températures de bobinage désirée.

Le refroidissement se fait par écoulement laminaire d'eau cette installation est composée de :

- 84 caissons supérieurs comportant chacune, 43 buses avec un débit global d'arrosage bande de 6000 m³ / heures.
- 117 rampes inférieures comportant chacune 19 buses avec un débit global unitaire de balayage de 700 m³ / heure.

III.4.11 Table à rouleaux sortis finisseur

Cette table permet l'acheminement de la bande, du train finisseur jusqu'aux bobineuses, elle est composée de 264 rouleaux automoteurs, divisée en quatre sections, les vitesses de ces sections sont synchronisées avec celle de la dernière cage finisseuse, respectivement de 7%, 10%, 12% et 15% de plus que la vitesse de la cage n°6.

III.4.12 Zone de mesure (les jauges)

Avec des appareille moderne pour assure que les dimensionne sont correspondant au celle voulu par le client



Figure III.13 Les jauges

III.4.13 Bobineuses

la sortie du train finisseur, la bande peut atteindre une longueur supérieure à 500 m. L'enroulement des bandes, ainsi obtenues par laminage, est assuré par des bobineuses, il existe trois toutes identiques par leur fonctionnement chaque bobineuse équipée de :

- deux a rouleaux entraîneurs de diamètre différents, permettant le guidage de la bande vers le mandrin.
- deux sections comportant quatre rouleaux permettant le serrage de spires contre le mandrin.
 - ❖ un mandrin expansible permettant l'enroulement de la bande, son diamètre est de 760mm.

Les vitesses de ces équipements :

- + roulement entraîneurs : 20% de plus que la vitesse cage N°6.
- + roulement sections : 25% de plus que la vitesse cage N°6.
- + mandrin : 30% de plus que la vitesse cage N°6.



Figure III.14 Bobineuse

III.5 Défauts de laminage

En laminage à chaud, si la température de la pièce n'est pas uniforme, le flux du matériau se produira plus dans les parties les plus chaudes et moins dans le refroidisseur. Si la différence de température est suffisante, des fissures et des déchirures peuvent se produire.

III.5.1 Planéité et forme

Dans une pièce métallique plane, la planéité est un attribut descriptif caractérisant l'étendue de l'écart géométrique par rapport à un plan de référence. La déviation de la planéité complète est le résultat direct de la relaxation de la pièce après laminage à chaud ou à froid, en raison du profil de contrainte interne provoqué par l'action de compression transverse non uniforme des rouleaux et les propriétés géométriques inégales du matériau d'entrée. La répartition transversale de la contrainte différentielle / induite par l'allongement par rapport à la contrainte appliquée moyenne du matériau est communément appelée forme. En raison de la relation stricte entre la forme et la planéité, ces termes peuvent être utilisés de manière interchangeable. Dans le cas des bandes et des feuilles métalliques, la planéité reflète

l'allongement différentiel des fibres sur la largeur de la pièce. Cette propriété doit faire l'objet d'un contrôle précis basé sur le retour afin de garantir l'usinabilité des tôles dans les processus de transformation finaux. Quelques détails technologiques sur le contrôle de la planéité sont donnés dans.

III.5.1.a Profil

Le profil est constitué des mesures de la couronne et du coin. Couronne est l'épaisseur au centre par rapport à l'épaisseur moyenne sur les bords de la pièce. Wedge est une mesure de l'épaisseur à un bord par opposition à l'autre bord. Les deux peuvent être exprimés en mesures absolues ou en mesures relatives. Par exemple, on pourrait avoir 2 mil de couronne (le centre de la pièce est 2 mm plus épais que les bords), ou on pourrait avoir 2% de couronne (le centre de la pièce est 2% plus épais que les bords).

Il est généralement souhaitable d'avoir une certaine courbure dans la pièce à usiner car cela entraînerait une tendance de la pièce à tirer vers le centre de la fraise, et ainsi fonctionnerait avec une stabilité plus élevée.

III.5.1.b Planéité

Le maintien d'un espace uniforme entre les rouleaux est difficile car les rouleaux dévient sous la charge requise pour déformer la pièce. La déflexion amène la pièce à être plus fine sur les bords et plus épaisse au milieu. Cela peut être surmonté en utilisant un rouleau couronné (couronne parabolique), mais le rouleau couronné ne compensera que pour un ensemble de conditions, en particulier le matériau, la température et la quantité de déformation.

Parmi les autres méthodes de compensation de la déformation des cylindres, citons la couronne à variation continue (CVC), le laminage croisé par paires et le cintrage des cylindres de travail. CVC a été développé par SMS-Siemag AG et consiste à rectifier une courbe polynomiale du troisième ordre dans les cylindres de travail, puis à déplacer les cylindres de travail latéralement, de manière égale et opposée l'une à l'autre. L'effet est que les rouleaux auront un espace entre eux qui est de forme parabolique, et variera avec le décalage latéral, permettant ainsi le contrôle de la couronne des rouleaux dynamiquement. Le roulage croisé consiste à utiliser des cylindres plats ou paraboliques, mais en déplaçant les extrémités de manière à ce que l'écart entre les bords des rouleaux augmente ou diminue, permettant ainsi un contrôle dynamique de la couronne. Le cintrage du rouleau de travail implique l'utilisation de cylindres hydrauliques aux extrémités des cylindres pour contrer la déflexion du rouleau.

Une autre façon de surmonter les problèmes de déviation est de diminuer la charge sur les rouleaux, ce qui peut être fait en appliquant une force longitudinale; c'est essentiellement dessin . Un autre procédé pour diminuer la déflexion du rouleau consiste à augmenter le module d'élasticité du matériau en rouleau et à ajouter des supports de soutien aux rouleaux.

Les différentes classifications pour les défauts de planéité sont:

- Onde de bord symétrique - les bords des deux côtés de la pièce sont «ondulés» car le matériau sur les bords est plus long que le matériau au centre.
- Onde de bord asymétrique - un bord est "ondulé" car le matériau d'un côté est plus long que l'autre côté.
- Boucle centrale - Le centre de la bande est "ondulé" car la bande au centre est plus longue que la bande sur les bords.
- Quart de boucle - C'est un défaut rare où les fibres sont allongées dans les régions de quartier (la partie de la bande entre le centre et le bord). Ceci est normalement attribué à l'utilisation d'une force de cintrage excessive, car la force de flexion peut ne pas compenser la déflexion du rouleau sur toute la longueur du rouleau.

III.5.2 Projet

La différence entre l'épaisseur de la pièce métallique initiale et laminée s'appelle le projet. Donc si t^0 est l'épaisseur initiale et t_f est l'épaisseur finale, puis le projet d est donné par

$$d = t^0 - t_f$$

Le tirant d'eau maximum qui peut être atteint par des rouleaux de rayon avec coefficient de frottement statique entre le rouleau et la surface métallique est donnée par

$$d_{max} = f^2 R$$

C'est le cas lorsque la force de frottement sur le métal provenant du contact d'entrée correspond à la force négative du contact de sortie.

III.5.3 Types de défauts de surface

Il existe six types de défauts de surface:

Tour

Ce type de défaut se produit lorsqu'un coin ou une ailette est plié et roulé mais pas soudé dans le métal. Ils apparaissent comme des coutures sur la surface du métal.

Broyage

Ces défauts se produisent comme un tour de plume.

Échelle roulée

Cela se produit lorsque l'échelle de laminage est roulée dans le métal.

Croûtes

Ce sont de longues taches de métal lâche qui ont été roulées dans la surface du métal.

Coutures

Ce sont des lignes ouvertes et discontinues qui s'étendent sur toute la longueur du métal et qui sont causées par la présence d'écailles ainsi que par la rugosité de passage du broyeur.

Rubans

Ruptures de surface importantes.

III.5.4 Défauts métallurgiques et microstructuraux

Les défauts microstructuraux sont très dépendants de l'alliage considéré. Ce sont des tailles de grains hétérogènes, des textures cristallographiques mal orientées, des inclusions non métalliques, des porosités, des fissures. Certains de ces défauts sont hérités des structures de coulée.

Les discontinuités (porosités, fissures et criques), qui relèvent des phénomènes et mécanismes d'endommagement des matériaux, sont engendrées par la conjugaison d'états de contrainte de tension et de l'existence d'hétérogénéités : d'où un couplage mécanique/métallurgie à l'échelle microscopique.

De plus les paramètres de structure granulaire et de texture évoluent autant par la déformation elle-même que lors des recristallisations induites par la déformation à chaud

(recristallisation dynamique) ou lors des traitements thermiques (recristallisation statique). Leur prévision passe par l'utilisation des modèles de métallurgie physique appropriés, eux mêmes couplés à la thermomécanique.

III.5.5 Correction des défauts de surface

De nombreux défauts de surface peuvent être arrachés de la surface des produits laminés semi-finis avant d'être laminés. Les méthodes de scarification ont inclus l'ébrèchement manuel avec des ciseaux (18ème et 19ème siècles); broyage et meulage avec des ciseaux à air et des broyeurs; brûler avec une torche oxycombustible, dont la pression de gaz chasse le métal ou les scories fondus par la flamme; et le scarf laser.

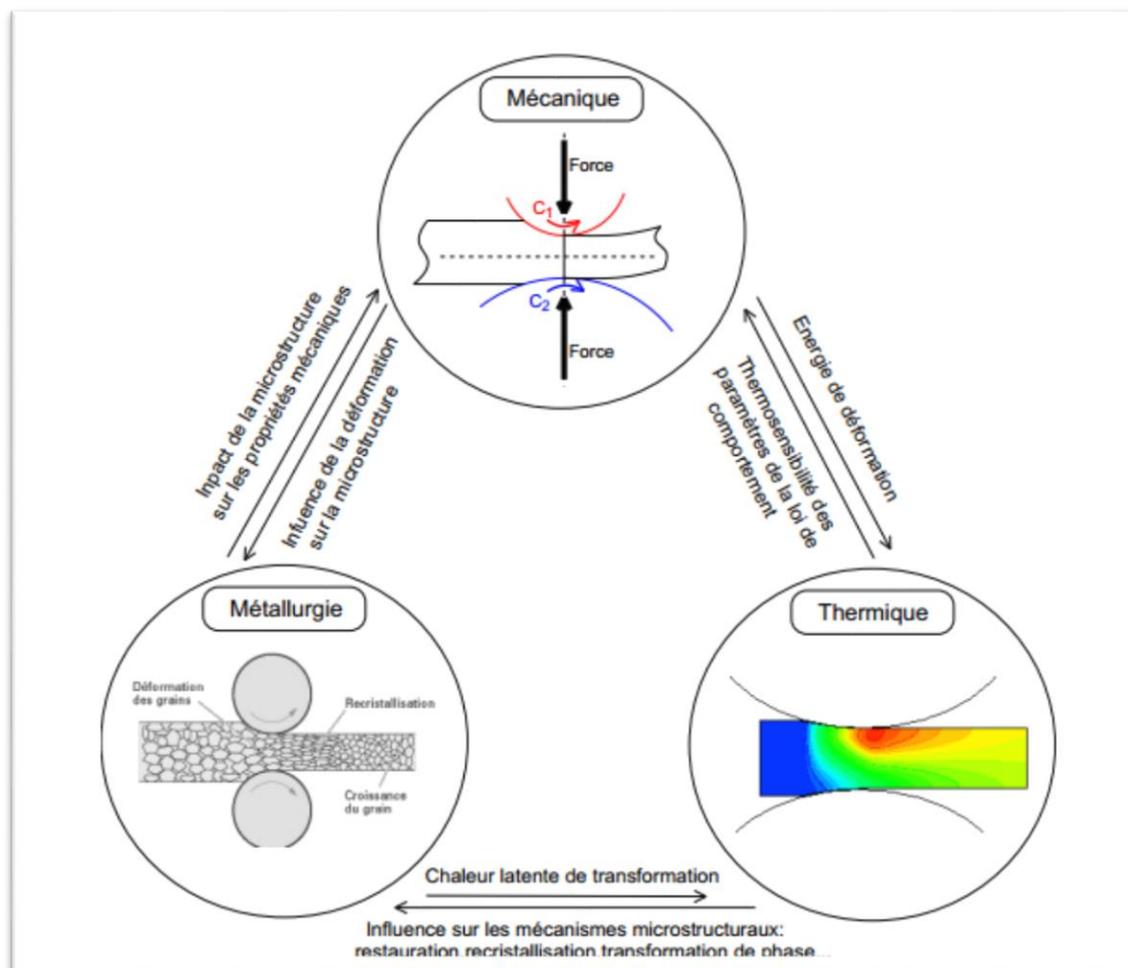


Figure III.15 Principales interactions « multi physiques » lors de la déformation à chaud

IV Principales grandeurs à calculer

Sur le plan de la thermomécanique de l'écoulement du métal en laminage à chaud, les principales grandeurs utiles sont les suivantes.

La géométrie finale du produit

Pour ne prendre que l'exemple simple du laminage à la plate de brames ou de tôles, on observe :

- Des défauts géométriques en tête et en pied (langue de chat, queue de poisson, figure 1) qui sont des effets de régime transitoire à l'engagement et au dégageant ;
- Un élargissement, a priori inconnu, qui s'accompagne d'une forme convexe ou concave, mais non rectiligne, de la rive.

Tous ces défauts donnent lieu à des chutes (article Tôlerie fortes [M 7 920] dans ce traité), qui sont autant de coûts supplémentaires. Quant au laminage en cannelures, outre les effets d'extrémités, c'est le problème du remplissage qui est posé, c'est-à-dire de la conformité du produit fini au modèle visé.

Les contraintes développées dans le matériau, qui sont importantes à plus d'un titre :

- Contraintes de contact ; elles donnent, par intégration, le couple C de laminage (lié à la puissance P des moteurs par la relation $P = \lambda C \omega$, $\lambda > 1$ représentant les pertes) et l'effort vertical de séparation F ; ce sont elles qui déterminent la déformation des cages, et surtout la flexion des cylindres, qui elle-même donne le profil transversal en laminage à la plate ; elles ont aussi leur importance pour l'usure des cylindres ;
- Contraintes à cœur ; elles jouent aussi sur la qualité du produit : des contraintes compressives favoriseront la fermeture des porosités ; des contraintes dépressives, au contraire, peuvent ouvrir des fissures internes ou des criques de surface.

La déformation ε :

En chaque point du matériau, qui va définir l'écroutissage du produit et sa structure finale (recristallisation...) ; la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ joue également un rôle structural parallèle.

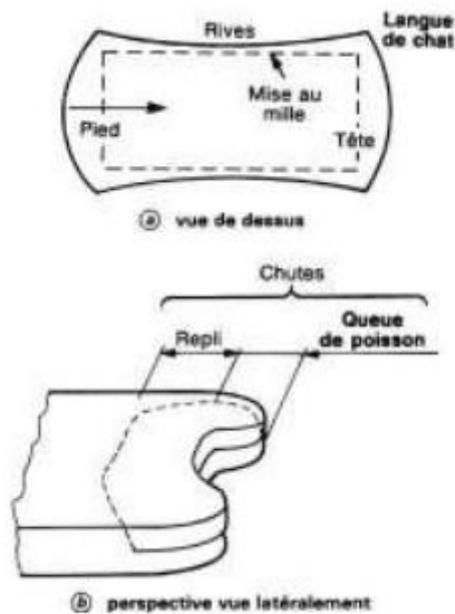


Figure IV.1 Défauts géométriques en laminage à chaud

La température, qui revêt en laminage à chaud de l'acier une importance toute particulière. Conditionnant les structures par de multiples phénomènes métallurgiques, elle doit être maintenue dans un intervalle dépendant de la nuance laminée. Au cours du laminage, elle subit des variations parfois importantes (pouvant atteindre une baisse de 200 °C en surface sur une seule passe), dues au cumul de plusieurs phénomènes :

- échanges radiatifs (surtout) et convectifs avec le milieu extérieur, éventuellement amplifiés et contrôlés par arrosage ;
- refroidissement de la peau par contact avec les cylindres plus froids ;
- source interne de chaleur due à la déformation plastique, donnant une puissance $W = \sigma_0 \varepsilon$.

Enfin, de la connaissance des paramètres précédemment décrits, on peut tirer d'autres conséquences, telle **l'usure des cylindres**. La loi dite d'Achard spécifie que la vitesse d'**usure abrasive** (ici exprimée en épaisseur usée e) vaut :

$$\frac{d_e}{d_t} = k_u \frac{\sigma_n \cdot v_g}{HV}$$

Avec HV Dureté Vickers de la peau des cylindres,

k_u Coefficient d'usure abrasive (il dépend de la nuance d'acier et des conditions de contact : lubrification, calamine...).

Intégrée au long du temps, cette formule permet, si l'on connaît k_u , de savoir au bout de combien de kilomètres de produit les cylindres doivent être changés. Il faut noter que cette analyse devrait intégrer les autres modes d'usure présents en laminage à chaud, Pour utiliser toutes les potentialités de la théorie, un modèle complet se composera donc :

- d'un **cœur mécanique** résolvant les équations de la mécanique pour un corps plastique (ou plus précisément viscoplastique), donnant le champ de vitesse, la géométrie, les contraintes σ , la déformation et la vitesse de déformation ; pour un corps plastique (ou plus précisément viscoplastique), donnant le champ de vitesse, la géométrie, les contraintes σ , la déformation ϵ et la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$;

-de **modèles périphériques** utilisant les résultats précédents :

- résolution de l'équation de la chaleur (donnant la température T),
- calcul des déformations élastiques des outils (laminoir et cylindres) à partir des contraintes,
- prédiction de l'évolution des paramètres métallurgiques à partir de ϵ , $\dot{\epsilon}$, T et σ .

Ces divers modèles doivent être couplés, puisque :

- la température modifie les paramètres rhéologiques décrivant le comportement de l'acier, donc l'écoulement, les déformations et contraintes ; il en est de même de l'évolution structurale ;
- la déflexion des outillages modifie les conditions aux limites géométriques du problème.

IV.1 Équations à résoudre

Elles, par contre, ne changent pas.

IV.1.a Équation d'équilibre :

C'est l'équation fondamentale de la dynamique, pour les milieux continus :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\sigma_x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\sigma_y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\sigma_z} &= -\rho (g_x - \gamma_x) \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\sigma_x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\sigma_y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\sigma_z} &= -\rho (g_y - \gamma_y) \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\sigma_x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\sigma_y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\sigma_z} &= -\rho (g_z - \gamma_z) \end{aligned} \quad (1)$$

Ou, sous la forme équivalente, plus usitée, du principe des puissances virtuelles :

$$\forall V^*, \int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^3 \partial_{ij} \varepsilon_{ij}^* dV = \int_{\partial\Omega} \mathbf{T} \cdot \mathbf{V}^* ds \quad (2)$$

Avec S surface,

V volume,

(On a ici négligé forces de masse et d'inertie, comme on le fait le plus souvent dans les problèmes de mise en forme des métaux).

Ω est le domaine de l'espace occupé par le produit, de frontière extérieure $\partial\Omega$, σ et $\mathbf{T} = \sigma \cdot \mathbf{n}$ représentent les contraintes réelles, et cette égalité est vraie pour tout champ v^* (dont dérivé ε^*), dit virtuel : il peut être différent du champ de vitesse réel, mais doit vérifier les conditions aux limites en vitesse, et être continûment différentiable. Cette équation n'exprime que la puissance apportée par les efforts extérieurs à la surface ($\int_{\partial\Omega} \mathbf{T} \cdot \mathbf{V}^* ds$) est égale à la puissance dissipée à l'intérieur par la déformation ($\int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^3 \partial_{ij} \varepsilon_{ij}^* dV$)

IV.1.b Équations rhéologiques :

Relations entre le tenseur des contraintes et ses dérivées, d'une part, et les tenseurs cinématiques : ε , $\dot{\varepsilon}$. Pour un corps viscoplastique isotrope, cela se traduira par l'équation entre tenseurs :

$$\sigma = \sigma(\bar{\varepsilon}, \bar{\dot{\varepsilon}}, T, \text{structure}) \quad (3)$$

IV.1.c Loi de frottement

On appelle ainsi toute relation permettant de calculer τ en fonction des paramètres qui la conditionnent (propriétés mécaniques et physico-chimiques des surfaces des deux corps en présence et du lubrifiant, rugosités, température, pression, vitesses...). **En laminage, le frottement joue un rôle particulièrement important** : c'est lui qui rend possible le laminage en entraînant le produit dans l'emprise (analyse du phénomène au paragraphe 3.2.5). Laminer sans frottement est impossible, et le frottement requis est d'autant plus fort que l'on vise des réductions importantes sur des produits épais avec de petits cylindres.

L'effet du frottement sur les champs de vitesse et de contraintes peut être également très marqué ; nous verrons qu'il l'est d'autant plus que le produit est mince (§ 3.2.5) : les phénomènes de surface jouent d'autant plus que le rapport surface/volume ($\approx 1/\text{épaisseur}$) est grand. Il sera donc essentiel en laminage à froid, moins fondamental en laminage à chaud.

Dans la suite du texte, nous utiliserons, outre la loi de Tresca (D5) :

- la loi de Coulomb : $\tau = \min(\mu\sigma_n, \tau_{max})$;
- la loi dite de Norton : $\tau = \alpha ||v_g||^p$;

Avec p paramètre de sensibilité du frottement à la vitesse de glissement.

IV.1.d Équation de la chaleur :

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial X} + V_y \frac{\partial T}{\partial Y} + V_z \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \lambda_{th} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + \dot{W}(x, y, z) \quad (4)$$

qui exprime que la chaleur créée par la déformation plastique (\dot{W}) en un point (x, y, z) de l'espace en est évacuée par le mouvement du point matériel échauffé $\left(V_x \frac{\partial T}{\partial X} \right)$ et par conduction $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \right)$, le reste $\left(\rho c, \frac{\partial T}{\partial t} \right)$ servant à échauffer ce point de l'espace.

IV.1.e Équations du comportement thermo-élastique pour les outillages :

$$\sigma = \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon \left[\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - \frac{E\alpha}{1 - 2\nu} (T - T_0) \right] \mathbf{1}$$

Avec $\mathbf{1}$ tenseur unité,

α Coefficient de dilatation linéaire.

IV.1.f Modèles structuraux divers :

Ils expriment l'endommagement, la taille de grain, la probabilité de criques... en fonction des paramètres d'histoire thermomécanique vus avant. [8]

- [1] Anouar Halloumi. Modélisation mécanique et thermique du procédé de laminage asymétrique. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011. Français.
- [2] Philippe Mangin. Identification des paramètres clés du laminage transversal : vers la formalisation des connaissances scientifiques et technologiques. Paris : paris tech; 2012
- [3] Huy Le Dang. Modélisation simplifiée des processus de laminage. Autre. Université Paris-Est, 2013. Français. <NNT : 2013PEST1121>. <pastel-00966940>
- [4] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> réf.int M7940
- [5] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> réf.int M7830
- [6] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> réf.int M7840
- [7] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> réf.int M7900
- [8] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> réf.int M7840
- [9] <https://www.les-industries-technologiques.fr/metiers/technicien-de-laminage-a-chaud/>
- [10] <http://www.reliance-foundry.com/blog/acier-lamine-chaud-contre-froid-fr#gref>
- [11] <https://belgium.arcelormittal.com/fr/>
- [12] <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/le-laminoir-industriel-528>