

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche  
Scientifique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme  
D'ingénieur d'état en Métallurgie

*Thème :*

INFLUENCE DES VARIABLES  
THERMOMECHANIQUES SUR LA  
STRUCTURE ET LES PROPRIÉTÉS  
MÉCANIQUE D'ACIER DOUX

Proposé et dirigé par :

M<sup>r</sup> : M.KASSER

M<sup>me</sup> : N.KECHOUDE

Etudié par :

KAHLOUCHE Abdessaler

*PROMOTION : Juin 2006*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*A mes parents qui me sont les plus chers au monde.*

*A mes frères, mes sœurs le fil de ma sœur Ayhem Abdelmoktadir.*

*A tous mes amis et surtout Hamza, Mounir, Rafik, Abdel Malek et Mokhtar.*

*A tous mes collègues et surtout Abdessalam, Samir, mounir, Ahmed et Khenouche, Zino, Hacen....*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de loin et de près.*

*Abd-Essalem.*

## *Remerciements*

*Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu ALLah de ma créature de m'avoir donné toute la force nécessaire d'accomplir ce modeste travail, je remercie mes parents pour m'avoir aidé dans la mesure de leur possible, et à toute la famille.*

*Je remercie mes Mr. KASSER et Mme. KECHOUDE mes promoteurs, pour m'avoir confié un travail aussi intéressant et pour ses conseils et ses encouragements.*

*Que Mr le président de jury, trouve ici mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.*

*Que les membres du jury trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*Que les travailleurs de SIDER ANNABA, sur tout Abderezzak, Saleh et l'équipe de laminage,*

*Que l'équipe de laboratoire central, Mr CHEKIEL, Linda et Nassira.*

*Que les travailleurs de CSC, surtout KHEIR-EDDINE*

*Cette liste de remerciements n'est pas exhaustive, que tous ceux avec lesquels j'ai interagi lors de ce travail, sans toutefois les citer ci-dessus, sachent que leur contribution à la réalisation de ce mémoire a été grandement appréciée.*

*Abdessalam.*

## الملخص:

الدرفلة على الساخن، قمع المعادن بواسطة اسطوانات معدنية، بهدف تحسين الخصائص البنيوية والميكانيكية للمنتجات المسطحة، انطلاقاً من البنية الأصلية للمعدن، هناك عناصر ميكانيك الحرارة التي تؤثر على خصائص المعدن. أثناء الدرفلة على الساخن، تحدث عدة ظواهر المتمثلة في إعادة التبلور، إعادة الإنشاء، زيادة في الحبيبات الجديدة.

**كلمات مفتاحية:** الدرفلة على الساخن، الخصائص البنيوية والميكانيكية، إعادة التبلور.

## Résumé:

Le laminage consiste en une mise en forme du métal par compression entre des cylindres lisses ou cannelés, dont le but d'améliorer, par écrouissage, les caractéristiques mécaniques des produits plats, et ce, partir de la taille initiale des grains. Il y a des facteurs thermomécaniques qui influent sur les caractéristiques d'un produit plat. Pendant le laminage, plusieurs phénomènes sont constatés dont la recristallisation, la restauration et la croissance des nouveaux grains.

## Mots clés :

Laminage à chaud, restauration, recristallisation, variables thermomécaniques.

## Abstract:

Rolling consists of a working of metal by compression between rollers smooth-wheel S or grooved S, of which the goal to improve, by work hardening, the mechanical characteristics of the flat products, and this, to leave the initial size of the grains. There are thermo mechanical factors which influence the characteristics of a flat product. During rolling, several phenomena are noted of which recrystallization, restoration and growth of the new grains.

## Key words:

Hot rolling, thermo mechanical restoration, recrystallization, variables.

## *LE SOMMAIRE*

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>2</b>
-----------------------------------	----------

### **CHAPITRE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

#### **I. LE LAMINAGE**

<b>Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1. Laminage .....</b>	<b>4</b>
I.1.1. Laminage à chaud.....	4
I.1.2. Laminage à froid.....	4
<b>I.2. Les équipements de laminage.....</b>	<b>5</b>
I.2.1. Laminoirs à chaud : Fours et le laminage.....	5
I.2.2. Laminoirs à froid.....	7
<b>Conclusion.....</b>	<b>9</b>

#### **II. LES CHANGEMENTS STRUCTURAUX PENDANT LE LAMINAGE**

<b>Introduction.....</b>	<b>10</b>
<b>II.1. La restauration.....</b>	<b>10</b>
II.1.1. Restauration dynamique.....	10
II.1.2. La restauration statique.....	11
<b>II.2. La recristallisation.....</b>	<b>11</b>
II.2.1. La recristallisation dynamique.....	11
II.2.2. Recristallisation statique.....	13
II.2.3. Recristallisation méta-dynamique.....	13
<b>II.3. La germination et la croissance .....</b>	<b>14</b>
II.3.1. La germination .....	14
II.3.2. la croissance des germes.....	15
<b>Conclusion.....</b>	<b>15</b>

#### **III. INFLUENCE DES VARIABLES DE LAMINAGE**

<b>Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>III.1. L'effet de la température .....</b>	<b>16</b>
<b>III.2. L'effet de la déformation .....</b>	<b>17</b>
<b>III.3. L'effet de la vitesse de la déformation .....</b>	<b>17</b>

<b>Conclusion.....</b>	<b>18</b>
------------------------	-----------

#### **IV. LA RESISTANCE DES METAUX PENDANT LE LAMINAGE**

<b>Introduction .....</b>	<b>19</b>
<b>IV.1. Théorie de laminage.....</b>	<b>19</b>
<b>IV.2. Equilibre dans l'emprise.....</b>	<b>21</b>
<b>IV.3. Les conditions d'engagement.....</b>	<b>21</b>
<b>IV.4. La force de laminage.....</b>	<b>22</b>
III.4.1. Loi de Comportement et Frottement .....	23
III.4.2. Le frottement de laminage.....	24
<b>Conclusion.....</b>	<b>26</b>

#### **CHAPITRE B : ETUDE EXPERIMENTALE**

<b>Introduction.....</b>	<b>28</b>
<b>I. Présentation des aciers et échantillons étudiés.....</b>	<b>28</b>
I.1. Identification de l'acier laminé .....	28
I.2. Le laminage à chaud.....	29
I.3. Condition de laminage des échantillons.....	29
I.4. Prélèvements des échantillons .....	34
<b>II. Techniques expérimentales.....</b>	<b>35</b>
<b>II.1. Analyse chimique des aciers.....</b>	<b>35</b>
<b>II.2. L'examen métallographique des échantillons.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3. Les essais mécaniques.....</b>	<b>37</b>
III.4.1. L'essai de traction.....	37
III.4.2. L'essai de la dureté (HRB).....	38
<b>III. Les résultats et interprétations.</b>	
<b>III.1 Résultats expérimentaux.....</b>	<b>39</b>
III.1.1 La composition chimique des échantillons.....	39
III.1.2. Résultats de l'examen métallographique .....	40
III.1.3. L'essai de dureté.....	44
III.1.4. L'essai de traction.....	45
<b>III-2 Interprétations des résultats .....</b>	<b>48</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>51</b>

<b>ANNEXES .....</b>	<b>52</b>
<b>A. Historique et présentation du complexe SIDER (MITTAL STEEL ANNABA) .....</b>	<b>53</b>
<b>B. Les différentes cages de laminage.....</b>	<b>57</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>59</b>

INTRODUCTION  
GÉNÉRALE



## INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude, nous nous proposons d'étudier un acier au carbone laminé à chaud par **SIDER (MITTAL STEEL ANNABA)**.

Le laminage consiste en une mise en forme du métal par compression entre des cylindres lisses cannelés, dont le but d'améliorer, par écrouissage, les caractéristiques mécaniques des produits plats, et ce, partir de la taille initiale des grains. Pendant le laminage, plusieurs phénomènes sont constatés dont la recristallisation, la restauration et la croissance des nouveaux grains.

Notre étude pratique consiste en l'observation micrographique des structures issues du laminage, ainsi que la mesure de quelques propriétés mécaniques, et ce, sur des échantillons prélevés sur l'acier laminé.

Le présent rapport se départage en deux grands chapitres. Dans le premier chapitre, est regroupé l'essentiel d'une recherche bibliographique, non exhaustive, se rapportant au sujet traité. Dans le second chapitre est reportée la marche de l'étude expérimentale réalisée, les résultats des différentes observations et des différents essais effectués, ainsi que leurs interprétations éventuelles.

**CHAPITRE A**

**PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I - LE LAMINAGE.**

### **Introduction.**

Le laminage consiste en une mise à forme du métal solidifié (ou de l'alliage) par compression (écrasement) entre des cylindres lisses ou cannelés. L'acier de départ est soit un lingot, soit un demi-produit coulé en continu (Il peut s'agir de brames, billettes,... selon les produits à fabriquer). Dans le cas des produits plats, les technologies récentes de coulée continue de produits minces permettent de solidifier des demi-produits de plus en plus proches des épaisseurs finales, ce qui simplifie les opérations de laminage à chaud. Le laminage confère également au produit les propriétés mécaniques et les qualités de surface et de structure interne souhaitées. Cette transformation à la fois physique et métallurgique implique généralement plusieurs "passes" de laminage dans diverses "cages" de laminoirs.

### **I-1. Laminage à chaud et à froid.**

Il y a deux types de laminage qui sont le laminage à chaud et le laminage à froid. Chaque type de laminage a ses propres conditions de travail ainsi que ses propres propriétés.

#### **I-1-1. Laminage à chaud.**

Lorsque la déformation s'opère à une température supérieure à la température de recristallisation du métal on dit que la déformation est plastique. Ce laminage concerne autant les produits longs que les produits plats. Comme opérations et installations normalement liées au laminage à chaud, on doit mentionner :

- l'acheminement, les manipulations, les conditionnements préalables, le triage et le stockage des lingots et des demi-produits dans les halles ou les parcs à matières,
- les opérations de préparation de surface et d'élimination des défauts (écricquage, meulage, ébavurage,...) des lingots et des demi-produits, les traitements de mise à température des lingots et des demi-produits dans des fours de réchauffage à alimentation continue ou discontinue, avec enfournement froid, chaud ou direct (cas particulier des fours tunnels), les fours de réchauffage des bobineuses, les opérations de décalaminage mécanique (eau sous pression, grenailleuse, sableuse, dresseuse,...),
- le laminage à chaud proprement dit qui comporte, selon la matière entrante et les produits fabriqués, des passes de dégrossissage (Laminoirs du type blooming, slabbing, trains à billettes,...) et de finition (Laminoirs à tôles fortes, à larges bandes, à feuillard,... pour les produits plats et laminoirs à profilés pour les produits longs.) dans des laminoirs du type réversible ou continu, y incluses les opérations de changement des cylindres et de réglage des cages [1].

#### **I-1-2. Laminage à froid.**

Le laminage à froid s'opère à une température inférieure à la température de recristallisation. Il concerne essentiellement la fabrication de produits plats (épaisseurs inférieures à quelques mm). Comme opérations et installations normalement liées au laminage à froid, on doit mentionner :

- Le laminage à froid proprement dit dans des laminoirs du type réversible ou continu, avec simple ou double réduction (Cas de la fabrication des tôles très fines (ép. < 0,15mm) et des foils), avec ou sans application directe d'huile sur la tôle à laminier, y incluses les opérations de changement des cylindres et de réglage des cages, de préparation et traitement des émulsions, des huiles et graisses, des fumées et vapeurs,...
- Les opérations de recuit dans des fours à cloches (recuit base ou recuit statique) ou des fours continus (recuit continu), y incluses les opérations intégrées de chauffage, de maintien en température, de refroidissement contrôlé (direct ou indirect) à l'aide d'air, de gaz d'atmosphère ou d'eau, de décapage (cas d'un refroidissement direct humide),...
- Les opérations de planage, de skin pass à sec (Ecrouissage sec), skin pass humide (Ecrouissage humide) notamment avec émulsion, de skin pass avec double réduction [1].

Pour les deux types de laminoirs, on retrouve les opérations et installations qui suivent : Les opérations de réchauffage ou autres traitements des produits par résistance électrique ou induction, les autres opérations de conditionnement, parachèvement et finition des produits telles que décapage (pour les laminés à chaud), découpe et refendage (sciage ou cisaillage en vue de la mise à longueur, l'élimination des rives, le chutage de tête et de queue, l'élimination des défauts,...), contrôle et inspection, marquage, huilage, emballage, transfert, stockage et expédition des produits[1].

## **I-2- Les équipements de laminage.**

Pendant le laminage, la brame laminée passe par plusieurs étapes. A chaque étape il y a un équipement spécial, ces équipements sont le four de chauffage, les laminoirs, les enroulements et les bobineuses.

Chaque équipement a son propre fonctionnement, chauffage de la brame, déplacement d'ébauche et déformation de l'ébauche...

### **I-2-1- Laminoir à chaud. Les fours et le laminage.**

La diversité des trains de laminage à chaud, ainsi que le nombre et les types de cages de laminoir d'un processus de fabrication, dépendent de la nature du produit à fabriquer.

La chaîne four de réchauffage et laminoir s'appelle le "train continu à chaud". La fonction la plus immédiate du four de réchauffage est d'élever la température de l'acier dans une fourchette où sa rhéologie permet sa mise en forme à des taux de déformation importants. De plus le four agit directement sur les propriétés d'emploi du produit final : d'abord comme réacteur métallurgique (mise en solution) et comme laboratoire chimique (atmosphère, sulfuration, carburation et décarburation), mais aussi comme agent de propreté (lavage des défauts de surface par la calamine).

#### **a- Les fours de chauffage des brames.**

Afin d'éviter tout phénomène de déformation, l'acier doit être réchauffé à une température uniforme. Un chauffage irrégulier fatigue les équipements de laminage et augmente la durée des arrêts pour maintenance. Un pyromètre monté en paroi de four à réchauffer permet à l'opérateur de vérifier la température globale du four à réchauffer et l'efficacité du brûleur. La possibilité de corriger le processus de réchauffage permet une utilisation optimale de l'énergie, une meilleure qualité des produits et une réduction sensible de la pollution environnementale.

En début de laminage, sur une brame d'épaisseur 200mm, supposée à une température uniforme de 1200°C, le cœur commence à se refroidir après 30 s alors que la peau est déjà à 1120°C. au bout de 90 s, le cœur est encore à 1182°C alors que le peau est descendue à 1060°C, le profil dans l'épaisseur est assimilable (une parabole) mieux que 3°C près. La vitesse moyenne de refroidissement est de 0.5°C/s sur 120 s (pour 0.28 au cœur de la brame et 1.3°C/s en peau).

Le contact avec les cylindres entraîne une perte de 4°C pour une tôle de 3mm en sortie ayant été réduite de 1mm (petit arc de contact), et ce, 0.3 s après l'emprise. Globalement l'énergie échangée est très importante : la puissance rayonnée par une ébauche de 0.05x1.8x30 cm est de l'ordre de 25MW [2].

### b- Cage décalamineuse (brise d'oxyde).

Dans toutes les phases de fabrication de l'acier, la mesure continue des températures et le réglage de la vitesse des cylindres de chacune des cages garantit qualité et bon fonctionnement du processus de laminage. La décalamineuse est destinée à briser la couche de calamine adhérente à la surface de la brame par écrasement (5 à 15% de l'épaisseur). Avec une pression de 140 bars la brame est débarrassée de toutes les traces de calamine formée lors des séjours au four [4].

### c- Cages de laminoir.

L'acier se refroidit au fur et à mesure de sa progression à travers les cages. Si le processus de laminage est interrompu, l'acier risque de se refroidir avant la reprise du laminage. En tout état de cause, il convient d'ajuster la vitesse des cylindres pour compenser la variation de température. La vitesse des cylindres peut être réglée manuellement par un opérateur. Elle peut également se faire automatiquement au moyen de capteurs infrarouges *Raytek* montés en amont de chaque cage. Cette approche permet l'adéquation de la vitesse des cylindres des différentes cages à la température de l'acier [4].

Dans le train dégrossisseur, la cage de laminoir utilisé est un quarto réversible, lamine dans les deux sens (figure 1). Le quarto contient quatre cylindres, les axes de rotation des cylindres sont parallèles. Deux cylindres de travail et deux autres sont d'appuis, le but de ces derniers cylindres est de protéger les cylindres de travail à la déformation au cours de son contact avec le métal laminé (cambrage).

Dans le train de finisseuse, le laminoir utilisé est le quarto irréversible.

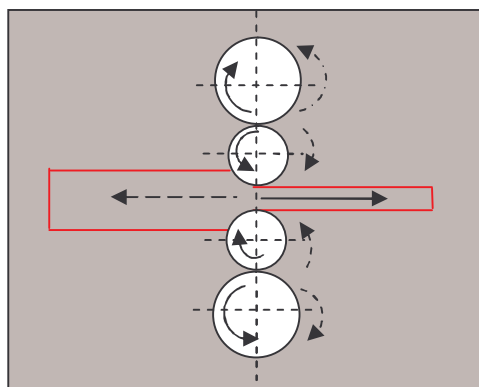


Figure 1. Laminoir quarto [3].

La figure 1 représente le principe de laminoir quarto, les flèches dessinées par les pointillés représentent le sens réversible de laminage.

#### d- Bobine réceptrice.

Dans un train de laminage à chaud, l'acier refroidi est souvent enroulé sur une bobine réceptrice afin de pouvoir être transporté vers une installation de laminage à froid ou d'un autre type. La mesure et le contrôle des températures au niveau de la section de laminage à froid sont essentiels afin de refroidir correctement l'acier avant son enroulement sur la bobine réceptrice. Un refroidissement incorrect risquerait de modifier les caractéristiques métallurgiques et entraînerait une mise au rebut de la bobine [4].

#### e- Cadre d'enroulement.

A cette étape, l'acier refroidi se déplace à une vitesse comprise entre 23 et 30 mètres par seconde. Il est donc indispensable d'y prévoir un capteur infrarouge de température à réponse rapide. Sur certains trains de laminage, on procède à l'enroulement de l'acier chaud à sa sortie des cages débaucheuses pour le transporter vers une autre partie de l'usine. Les bobines chaudes y sont déroulées pour les passer par les cages de finition, puis refroidies et enroulées sur une bobine réceptrice. Au niveau de la section où s'effectue le déroulement, la mesure et le contrôle des températures doivent être précis. Ceci est indispensable afin de régler correctement la vitesse des cylindres des cages de finition [4].

Les étapes de laminage à chaud sont représentées dans la figure 2, ci-dessous :

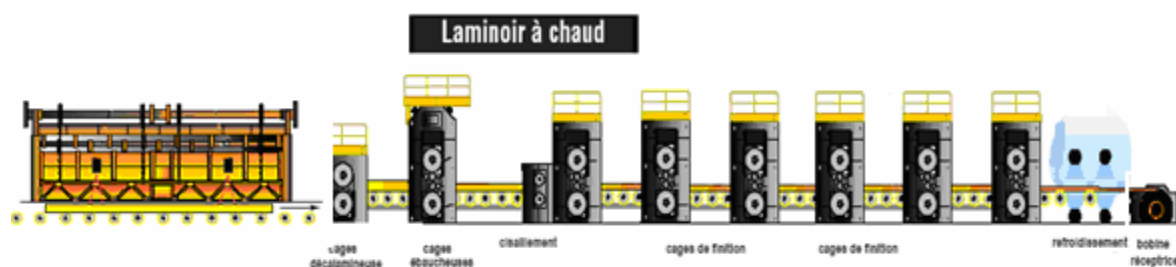


Figure 2. Les étapes de laminage à chaud

#### I-2-2- Laminaires à froid.

L'enroulement se fait très souvent à la sortie des cages de finition après refroidissement, la bobine d'acier enroulé étant alors transportée vers un train de laminage à froid dans une autre partie de l'usine ou vers d'autres installations. Le laminage à froid permet de réduire l'épaisseur des produits et de les rendre plus lisses. La température de l'acier est alors de 94°C environ ou identique à la température ambiante. Des capteurs installés entre les différentes cages de finition permettent à l'opérateur de détecter les variations de température et de procéder, le cas échéant, à des ajustements [4].

Au cours du laminage à chaud, le métal est déformé plastiquement. Les grains d'austénite, polygonaux à l'état d'équilibre se déforment comme le métal : s'aplatissent et s'allongent. Sa contrainte d'écoulement est le reflet de son évolution microstructurale. Le phénomène est plus proche de la déformation à froid mais à ces températures les mécanismes de restauration (réarrangement des défauts, annihilation de certains) sont très actifs. Entre deux passes de laminage, l'énergie de déformation dans la matrice écrouie sert de force motrice, ce qui permet

à la restauration de se poursuivre et déclenche, si elle est suffisante, une recristallisation statique. Cette recristallisation se traduit par l'apparition de nouveaux grains sur les anciens joints et croissance de ceux-ci [5].

Dans l'austénite (pendant le laminage à chaud) on distingue trois domaines de températures d'évolution du grain (figure 3) :

- à haute température (figure 3.a), la recristallisation a lieu après chaque déformation suivie d'un grossissement de grain freiné par le Nb ou le Ti.
- à température intermédiaire (figure 3.b), la recristallisation peut être incomplète ce qui conduit à un mélange de grains fins recristallisés et de grains écrouis ; à la passe suivante l'écroutissage supplémentaire fera recristalliser en premier les gros grains d'où une certaine homogénéisation.
- en dessous de la température de non-recristallisation (figure 3.c), les grains s'allongent sous l'effet de la déformation. À l'apparition de la ferrite, les grains seront d'autant plus fins que les grains seront fins et écrouis.

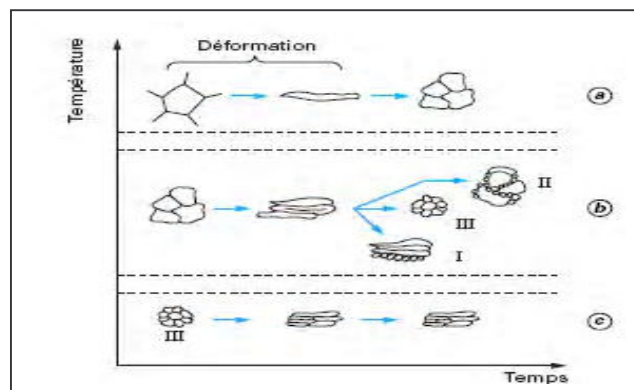


Figure 3. Évolution de la recristallisation en cours de laminage [5].

Les diverses étapes de laminage à chaud sont représentées dans figure 4, qui suit :

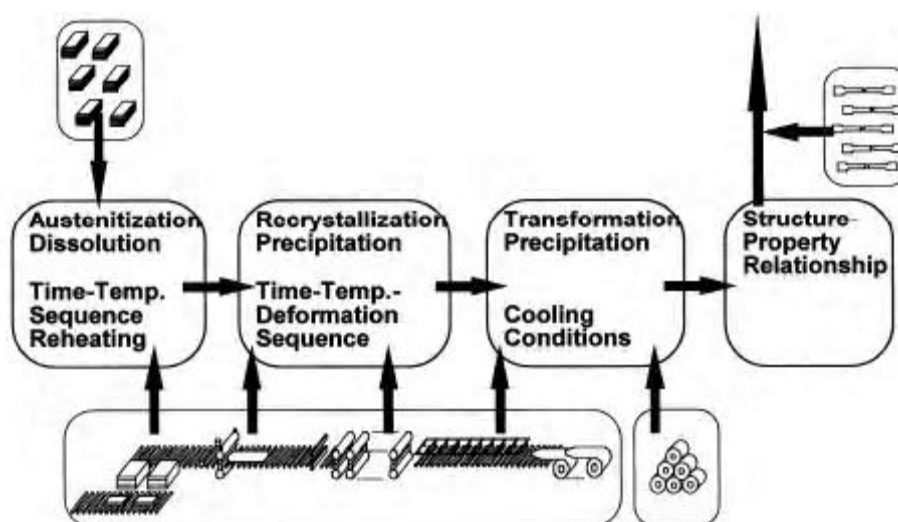


Figure 4. Les étapes de laminage à chaud et les modèles structuraux correspondants [6].

**Conclusion.**

On peut conclure que le laminage ne doit plus être considéré comme un simple moyen de mise en forme, mais comme moyen métallurgique d'amélioration des propriétés du matériau à laminier. La différence entre le laminage à chaud et à froid n'est pas la température de laminage seulement mais aussi les résultats obtenus.



## II- LES CHANGEMENTS STRUCTURAUX PENDANT LE LAMINAGE.

### Introduction.

Lorsqu'un matériau a été écroui par déformation plastique, sa microstructure est perturbée et certaines de ses propriétés physiques et mécaniques sont altérées. Le matériau n'est plus dans son état d'équilibre. La création des dislocations et des défauts ponctuels lors de l'écrouissage consomme de l'énergie, qui reste en grande partie emmagasinée dans le métal écroui. Il s'agit surtout de l'énergie élastique que l'on retrouve dans les champs des contraintes résiduelles et dans les contraintes propres des dislocations. Pour  $1 \text{ cm}^3$  de l'Al hautement déformé, cette énergie vaut environ  $2 \text{ J/cm}^3$ . Elle est la force motrice pour les phénomènes qui se déroulent lors de la restauration et de la recristallisation. Dans la plupart des métaux cette énergie n'a aucun moyen de se manifester à température ambiante, parce que la mobilité des atomes est trop faible. Il suffit alors d'augmenter la température pour que l'énergie emmagasinée remplisse son rôle de la force motrice pour la restauration et la recristallisation.

### II-1- La restauration.

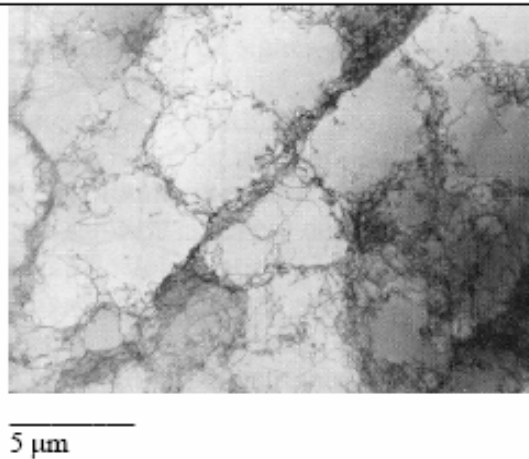
On entend par restauration l'ensemble des phénomènes (surtout annihilation des défauts cristallins), qui contribuent à remettre la microstructure en équilibre, sans germination de nouveaux grains (les joints de grain restent inchangés).

La microstructure du matériau déformé à froid présente une forte densité de dislocations préférentiellement localisées dans les parois de dislocations.

#### II-1-1- Restauration dynamique.

Au cours d'une déformation à haute température (supérieure à 0,5 fois de la température de fusion), plusieurs des mécanismes physiques se produisent simultanément. Ainsi, l'écrouissage est limité par la restauration dynamique, c'est-à-dire le réarrangement en continu des dislocations au cours de la déformation. Ce phénomène est d'autant plus efficace que l'énergie de faute d'empilement est forte (supérieure à quelque  $0.1 \text{ J/m}^2$ ). Ce mécanisme induit un adoucissement venant limiter l'écrouissage et conduit à un état stationnaire à contrainte constante pour de grandes déformations. Cette stabilité résulte d'un équilibre dynamique entre la vitesse de génération et d'annihilation des dislocations. Avec l'augmentation de la température, la densité des dislocations à l'intérieur des cellules décroît et les parois cellulaires s'affinent. Chaque grain présente donc une sous-structure constituée de cellules ou de sous-grains désorientés de quelques degrés par rapport à l'orientation initiale du grain. La restauration est d'autant plus rapide et se fait à température d'autant plus basse que l'énergie stockée est élevée. Cette énergie augmente avec la déformation et dépend de l'orientation du grain considéré [4].

Lorsque les dislocations sont effectivement très mobiles, on voit se former, à l'intérieur des grains initiaux, des sous-grains, c'est à dire des cellules contenant peu de dislocations et désorientées les unes par rapport aux autres de quelques degrés (Figure 5). Pendant la suite de la déformation, les sous-grains se détruisent et se reforment continuellement lors d'une étape appelée repolygonisation, avant d'atteindre un état quasi stationnaire qui repose sur un équilibre entre la création de dislocations, et l'arrangement et l'annihilation de dislocations [7].



**La figure 5.** Structure de cellules de dislocations dans un alliage d'aluminium [7].

Un échauffement jusqu'aux températures relativement peu élevées déclenche le processus de restauration, terme qui traduit la suppression des micro contraintes, et en partie, des distorsions du réseaux cristallin sous l'effet de la diminution de la densité des imperfections structurales ; pourtant, dans ces conditions on n'observe pas encore, par rapport à l'état déformé, des modifications de structure décelables au microscope optique [8].

### **II-1-2- La restauration statique.**

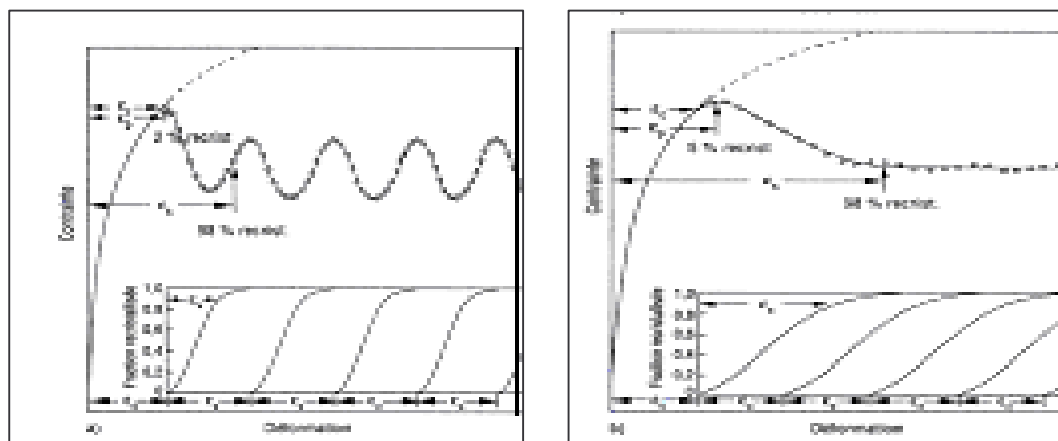
Pendant la déformation à chaud, si le taux de déformation est inférieur à la déformation critique, pour initier la recristallisation statique, le principal mécanisme d'adoucissement serait alors la restauration statique. La vitesse de la restauration statique augmente avec la température et le degré de déformation. La vitesse de déformation est petite et elle diminue avec l'augmentation des éléments d'additions du matériau. La diminution de la vitesse de recristallisation statique après la déformation peut être expliquée par une diminution de la force motrice d'adoucissement induite par la restauration statique qui se produit durant la période d'incubation qui précède la recristallisation statique.

### **II-2- La recristallisation.**

Lors d'un maintien en température (par exemple, dans le domaine inter-passe en laminage à chaud), cette structure est susceptible de recristalliser si la déformation cumulée est supérieure à une valeur critique (usuellement de l'ordre de 0,1).

#### **II-2-1- La recristallisation dynamique.**

Dans les matériaux à faible énergie de faute d'empilement, la restauration dynamique est moins efficace et il existe une valeur critique de la déformation au-delà de laquelle de nouveaux grains peuvent apparaître. Cette recristallisation est dite *dynamique* car se produisant au cours de la déformation. La présence de ces grains recristallisés, contenant une très faible densité de dislocation, induit un adoucissement très efficace de la structure. Les courbes de comportement (figure 6) sont alors caractérisées par l'existence d'un pic de contrainte, voire plusieurs, suivant les conditions de température et de vitesse de déformation [2].



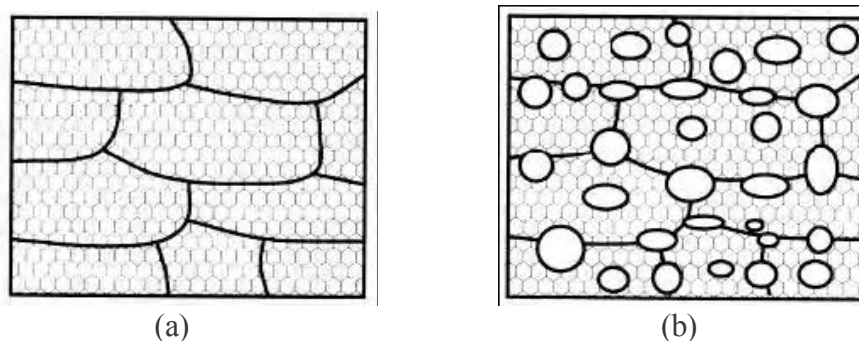
(a)

(b)

**Figure 6.** Exemples schématiques de courbes contrainte-déformation au cours de la recristallisation dynamique [2].

- (a) d'oscillation lorsque la cinétique de recristallisation dynamique.
- (b) Les différents cycles de recristallisation.

Dans des conditions thermodynamiques proches des situations industrielles de mise en forme, à savoir une vitesse de déformation supérieure à  $0,1s^{-2}$  et une température entre  $850$  et  $1200^{\circ}C$ , les lois de comportement ne présentent qu'un seul pic dont la position  $\varepsilon_p$  dépend de la température, de la vitesse de déformation et de la taille de grain avant déformation. Après ce pic, il y a décroissance de la contrainte puis stabilisation à fort taux de déformation (régime stationnaire). Dans ce domaine stationnaire, on considère que la structure s'est entièrement recristallisée, c'est-à-dire que chacun des grains présents au début de la déformation a été au moins une fois le site d'une recristallisation (figure7). La taille de grain moyenne apparente n'évolue plus, du moins à l'échelle macroscopique [2].



(a)

(b)

**La figure 7.** Recristallisation dynamique : (a) structure déformée restaurée et non recristallisée. (b) germination de nouveaux grains [7].

La température et la vitesse de déformation contrôlent à la fois la cinétique de la recristallisation dynamique, les structures qui en résultent et l'état de contrainte. Une diminution de la température, ou une augmentation de la vitesse de déformation, conduit à un accroissement de la déformation au pic de contrainte. Si la vitesse de recristallisation est telle qu'elle s'effectue dans un intervalle de déformation inférieure à la déformation critique de déclenchement du cycle de recristallisation suivant, les différents cycles d'écrouissage / recristallisation sont totalement associés (figure 7.a), les pics successifs correspondent alors à des alternances de phases d'écrouissage et de recristallisation. Quand la température n'est pas

trop élevée ou la vitesse de déformation est suffisamment grande, il y a au contraire superposition de ces cycles (figure 7.b).

Pour une nuance donnée, la taille moyenne de grain recristallisé dynamiquement est uniquement fonction de la température et de la vitesse de déformation, et elle est indépendante de la taille de grain initiale, contrairement au cas de la recristallisation statique, diminue quand la vitesse de déformation augmente ou que la température diminue. Les grains recristallisés dynamiquement sont extrêmement fins par rapport à ceux que l'on peut obtenir après recristallisation statique, dans les mêmes conditions de vitesse de déformation et de température [2].

### II-2-2- Recristallisation statique.

Lorsque la déformation appliquée excède la déformation d'entrée dans le régime stationnaire, la structure évolue par grossissement de grain d'une façon assez similaire à ce qui se produit après une recristallisation statique [2].

La recristallisation statique, très rapide à haute température, est très ralentie par la présence de niobium ou de titane et même bloquée en dessous d'une certaine température.

Les figures 8.a , 8.b représentent les décalages des cinétiques de recristallisation dans le cas d'un acier microallié au Nb. La cinétique s'exprime habituellement par des équations de type Avrami :

$$X=1-\exp\left(\frac{-0.693t}{t_{50}}\right)^{n'} \dots\dots\dots (1)$$

$$t_{50} = k \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot D^p \cdot Z \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \dots\dots\dots (2)$$

Avec :  $t_{50}$  temps pour 50 % de recristallisation,  
 $\varepsilon$  déformation,  
 $\dot{\varepsilon}$  vitesse de déformation  
 $D$  dimension du grain  
 $T$  température  
 $Q$  énergie d'activation  
 $K, n, m, p$  coefficients

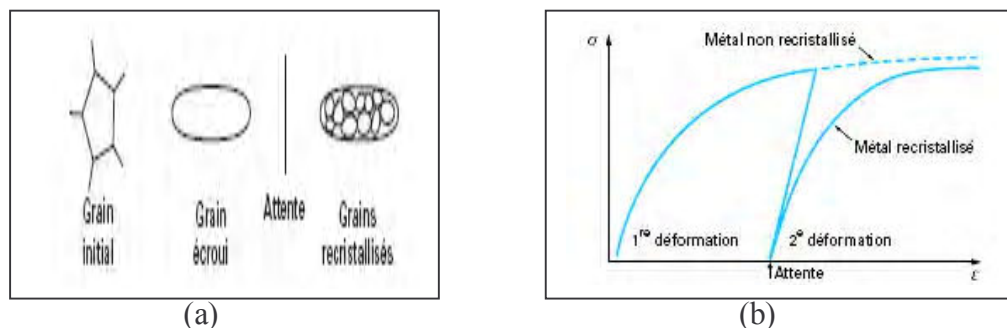
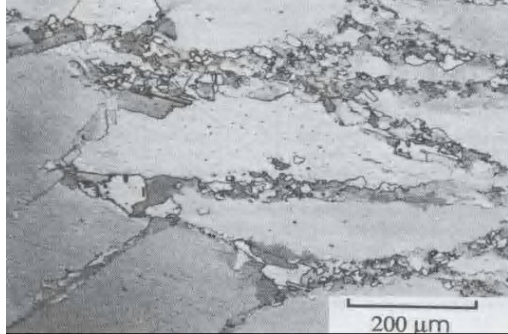


Figure 8 Recristallisation statique : (a) grain, (b) courbe contrainte-déformation [5].

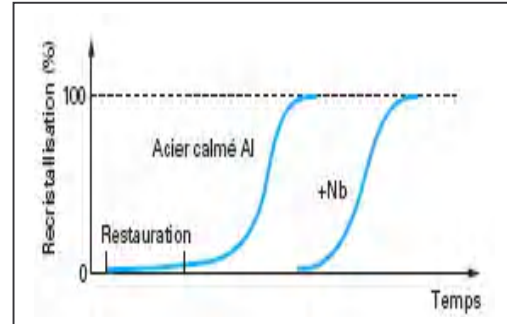
### II-2-3- Recristallisation méta-dynamique.

En revanche, lorsque la déformation est interrompue au voisinage du pic, la situation est moins bien décrite : la structure finale dépend fortement du taux de recristallisation dynamique

au moment de l'arrêt de la déformation. Les germes des nouveaux grains sont déjà partiellement présents dans le matériau. Par rapport la recristallisation statique, cette recristallisation dite *post-dynamique* ou *méta-dynamique* ne requiert pas de période d'incubation et paraît en conséquence beaucoup plus rapide. Les figures 9 représentent une microstructure des grains d'un alliage de cuivre écroui et recristallisé (a) et la cinétique de la recristallisation (b) [3].



**Figure 9.a.** Microstructure d'un alliage de Cu présentant des grains écrouis et recristallisés [7].



**Figure 9. b.** Cinétique de la recristallisation statique [5]

### II-3- La germination et la croissance.

La recristallisation est habituellement divisée en deux stades : la germination et la croissance des germes dans la matrice écrouie.

#### II-3-1- La germination.

La germination coïncide avec la formation de régions de faible taille exemptes de défauts (équivalent à des petits monocristaux sans dislocations), susceptibles de croître rapidement dans la matrice écrouie.

La germination c'est l'étape initiale de la précipitation, à partir de la matrice, de germes stables, riches en soluté (de composition très différente de celle de la solution solide) et dotés d'une interface bien définie avec la matrice. Les germes peuvent résulter de fluctuations statistiques de composition de taille suffisante (de l'ordre du nanomètre) au sein de la solution solide avec une cinétique de formation très rapide en présence de lacunes en sursaturation, ou se former préférentiellement sur les défauts du réseau ou sur les interfaces préexistantes entre les différents grains ou les particules [5].

L'équation de grossissement des grains et donnée par la formule suivante :

$$D = D_0 + At \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots(3)$$

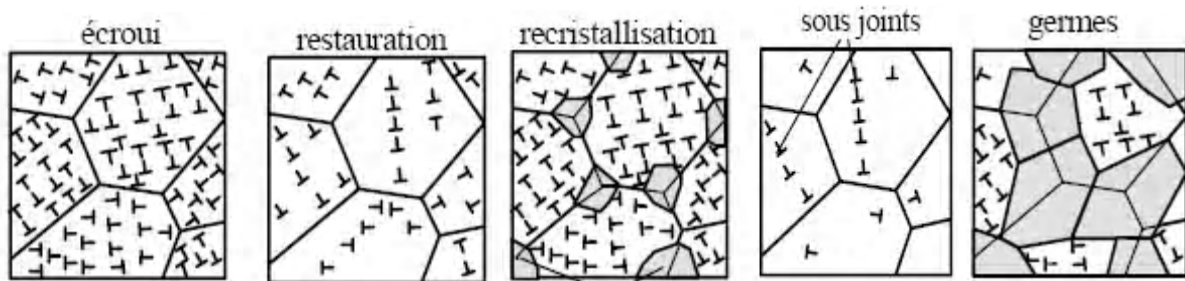
Où : D : diamètre du grain,  
 $D_0$  : diamètre initial,  
 T : température  
 t : temps  
 Q : énergie d'activation  
 A et R: constantes.

### II-3-2- La croissance des germes.

Les grains se développent aux dépens d'un entourage qui est apparemment dans le même état de perfection. Cette croissance se produit spontanément lorsqu'on poursuit le recuit après la recristallisation totale. La force motrice de la recristallisation n'existe plus ; cependant le métal n'est pas dans son état le plus stable. A la limite cet état stable serait le monocristal. Le métal recristallisé possède donc un excès d'énergie sous forme de joints de grains. La force motrice est alors l'énergie interfaciale des joints. La vitesse de croissance des grains peut être rapidement diminuée en présence d'impuretés [9].

La restauration procède par annihilation des dislocations et des réarrangements dans des sous joints. La recristallisation s'effectue par germination et croissance des grains "sans" défauts.

La figure 10 résume les phénomènes cités ci-dessus, où l'on retrouve, de gauche à droite : L'état écroui, L'état au début et vers la fin de la restauration ou de la recristallisation.



La figure 10. Schématisation des différents processus de restauration et recristallisation [10].

### Conclusion.

Dans ce paragraphe, nous avons vu les phénomènes qui se produisent au cours de la déformation à chaud d'un métal. Ces phénomènes sont la restauration, la recristallisation du métal et les mécanismes de ces phénomènes qui sont la germination et la croissance.

Pendant la déformation à chaud, les dislocations se réarrangent dans les joints des grains pour former des germes. La croissance de ces germes donne les nouveaux grains.

Les deux phénomènes qui sont liés à la déformation à chaud sont la restauration et la recristallisation, et les facteurs les plus essentiels de ces phénomènes sont la température et la vitesse de déformation ainsi que la structure initiale du métal déformé.

### III. INFLUENCE DES VARIABLES DE LAMINAGE SUR LA CINÉTIQUE DE RECRISTALLISATION ET LA STRUCTURE.

#### Introduction.

Le laminage à chaud est la déformation d'une brame ou d'un billet, si la température du chauffage du métal laminé dépasse la température de recristallisation ( $T > 0.6T_f$ ), tandis que celle à froid se fait à une température ( $T < T_f$ ). Du point de vue qualité, il rend les grains minimes et uniformes, fondamentalement le laminoir des produits plats est une réduction d'épaisseur par passage du produit entre deux cylindres animés d'un mouvement de rotation inverse, produit est entraîné par effet de frottements, la vitesse de déformation, la température et la déformation lui-même.

Il y a plusieurs facteurs qui influencent sur les propriétés du l'acier laminé, parmi ces facteurs on cite la température de laminage, la vitesse de déformation, le taux de déformation et la structure initiale des l'acier.

#### III.1. L'effet de la température.

Le réchauffage des brames à une température élevée conduit, compte tenu des produits de solubilités et des cinétiques, à une mise en solution souvent complète des composés difficilement solubles que sont le nitrure d'aluminium et les carbures ou carbonitrides de niobium et de titane. Cela a aussi pour conséquence de faire grossir le grain austénitique (environ de  $200\mu\text{m}$  en sortie de four). Celui-ci va évoluer au cours du laminage et l'austénite qui va subir la transformation sera très différente de l'austénite initiale. [2]

Les lois de refroidissement sont particulières, on pourrait dire continûment accélérées pendant le laminage, régulières pendant l'arrosage puis cassées par le bobinage.

Pendant une passe de laminage, le métal chaud est déformé plastiquement, les grains d'austénite, polygonaux à l'état d'équilibre, se déforment comme le métal: aplatissement et allongement. Sa contrainte d'écoulement est reflet de son évolution microstructurale. Il y a une consolidation rapide au début de la déformation par création de défauts. Le phénomène est assez proche de la déformation à froid mais à ces températures les mécanismes de restauration (réarrangement des défauts, annihilation de certains) sont très actifs.

La température de chauffage de l'acier est plus élevée est dépasse la température  $AC_3$ , donc la structure de l'acier est austénitique monophasée. Le grossissement des grains austénitiques augmente en fonction de la température, une température élevée donne une grande taille des grains.

La taille initiale des grains de la brame à la sortie du four de réchauffage, influe par héréditairement sur la taille finale des grains de bobine (après finisseuse).

- Taille de grain grossier au départ donne grain gros final.
- Taille de grain fine au départ donne grain fin final.

Le grain est fin donc les propriétés de résistance de l'acier sont faibles, et les propriétés de ductilités de l'acier sont grandes.

Le grain est grand donc les propriétés de résistance de l'acier sont grandes, et les propriétés de ductilités de l'acier sont faibles [2].

### **III.2. L'effet de la déformation.**

Le métal résiste à la déformation qui lui est imposée, ce qui se traduit par une force qui a pour effet d'écartier les cylindres mais aussi de les aplatir (sens radial) et de les fléchir (sens travers). Cet effort est équilibré par le bâti (montants de la cage de laminoir) qui se déforme élastiquement (comme un ressort) c'est le cédage de la cage.

La déformation produit également un effet de durcissement (écrouissage à chaud) à des températures élevées, éliminé partiellement ou complètement par polygonisation et recristallisation réalisées aux températures de traitement et suivies de refroidissement.

Dans le traitement de laminage à chaud, le durcissement par écrouissage (augmentation de la densité de dislocations) directement au cours de la déformation alterne avec le processus d'adoucissement (diminution de la densité de dislocations) par polygonisation et recristallisation dynamique pendant la déformation et le refroidissement. Plus la déformation est élevée et la température de recristallisation est basse, plus le grain est fin [2].

### **III.3. L'effet de la vitesse de la déformation.**

Les très grandes vitesses de laminage atteintes actuellement ne sont possibles que lorsque la bande est parfaitement maintenue : on constate que pour une vitesse supérieure à 10m/s, les bandes minces ( $e \leq 2\text{mm}$ ) décollent de la table à rouleaux de la sortie du finisseur et ne peuvent plus être guidées vers les bobineuses.

Il est donc nécessaire de commencer le laminage d'une bande à une vitesse d'engagement au plus égale à 10 m/s, et d'attendre que la bande soit en prise dans une bobineuse pour accélérer l'ensemble (finisseur + bobineuse) jusqu'à la vitesse de laminage maximale.

L'accélération du train permet par ailleurs d'obtenir une température de bande plus régulière : le queue de bande qui a attendu plus longtemps entre le défournement et la cage de laminage, que la tête, bénéficiera d'un apport calorifique plus important par dissipation d'une plus grande puissance de déformation. On pourra donc, par réglage correct de l'accélération, obtenue à la sortie des finisseuses, une température de fin de bande identique à la température de début de bande ou même supérieure si on le désire. Ce qui compte, c'est le temps que met un point de la bande pour traverser le train finisseur [2].

Dans le laminage la vitesse de déformation est un facteur très important, car elle joue sur le temps de déformation entre les passes de laminage.

Comme l'épaisseur diminue dans l'emprise, la vitesse linéaire moyenne du produit croît entre l'entrée et la sortie. Elle varie comme la vitesse d'entrée multipliée par le rapport des épaisseurs. Avec des cylindres à axes rectilignes et parallèles, et en l'absence de forces extérieures, la vitesse de sortie du produit est supérieure à la vitesse périphérique des cylindres, on parle de glissement en avant.



- Si la vitesse de déformation est grande la germination et la croissance des grains sont faibles et incomplètes ce qui fait que les nouveaux grains sont fins et, donc, les propriétés de résistance de l'acier sont grandes, alors que les propriétés de ductilité de l'acier sont faibles.
- Si la vitesse de déformation est faible la germination et la croissance des grains sont rapides ce qui fait que les nouveaux grains sont gros et, donc, les propriétés de résistance de l'acier sont faibles, alors que les propriétés de ductilité de l'acier sont grandes [2].

## Conclusion

Il y a plusieurs facteurs qui influent, pendant le laminage sur la structure et les propriétés du produit laminé. Parmi ces facteurs on obtient la température de laminage, la vitesse de laminage, le taux de déformation.

- l'effet de la température de déformation : la température du métal est élevée se qui donne un grossissement des grains, donc une faible résistivité à la déformation, le métal devient ductile.
- L'effet de la vitesse de déformation : pour une grande vitesse de déformation, le temps du grossissement des germes est insuffisant ce qui donne des nouveaux grains en plus que des grains originaux.
- L'effet du taux de déformation : un taux de déformation est grand, il nous permis d'avoir un allongement de grains, donc les nouveaux germes sont placés au niveau des points triples et sur les joints des grains, donc le croissance de ces grains est incomplet, la taille des grains est fine la résistance au déformation est élevé.

## IV. RESISTANCE DES MÉTAUX PENDANT LE LAMINAGE A CHAUD.

### Introduction.

Au cours du laminage, la déformation des métaux est résistée par les forces de cohésions intergranulaires qui, elles mêmes sont d'origines électrostatiques des atomes constituant les mailles du métal en question. Cette résistance à la déformation est vaincue par le moment de laminage développé par les moteurs du laminoir, grâce auxquels le phénomène de laminage a lieu. Pendant le laminage, il y a plusieurs paramètres qui jouent un rôle très important dans la résistance du métal à la déformation. Ces paramètres sont les suivants:

- Succession des épaisseurs (entrée et sortie par passe),
- Rayon des cylindres (évolution dans le temps et sous charge),
- Vitesse de rotation des cylindres,
- Tractions sur le produit (entrée et sortie),
- Rhéologie du métal,
- Frottement à l'interface métal-cylindre.

Ces paramètres font implicitement ou explicitement, intervenir la température et le temps de laminage. Les deux derniers facteurs sont des fonctions de nombreuses variables.

### IV.1. Théorie de laminage.

C'est l'analyse des phénomènes se produisant dans le matériau qui remplit le foyer de déformation entre les cylindres. Il s'agit en particulier, du contact métal-cylindre, des changements structuraux dynamiques et statiques qui se produisent dans le métal déformé, et des efforts dont la résultante est transmise par les cylindres au métal pour vaincre la résistance à la déformation et réaliser le laminage. Cette théorie fait appel à la mécanique des solides (élasticité et plasticité) ainsi qu'à la température [3].

Contrairement aux apparences, le problème est très complexe même en se limitant au laminage de produits plats. La mise en équations des phénomènes de laminage, ainsi que leurs résolutions par le calcul numérique, sont assez récentes.

La déformation du produit nécessite un apport d'énergie. Celle-ci est fournie par les moteurs d'entraînement des cylindres. Le métal résiste à la déformation qui lui est imposée. Cela se traduit par une force qui a pour effet d'écartier les cylindres, mais aussi de les aplatir localement dans le sens radial, et de les fléchir dans le sens transversal. Cet effort est équilibré par le bâti (montants de la cage de laminoir) qui se déforme élastiquement comme un ressort. Les contraintes de cisaillement dans l'emprise, ont pour résultante un couple. La réduction d'épaisseur imposée, correspond à une déformation qui peut être calculée par la formule

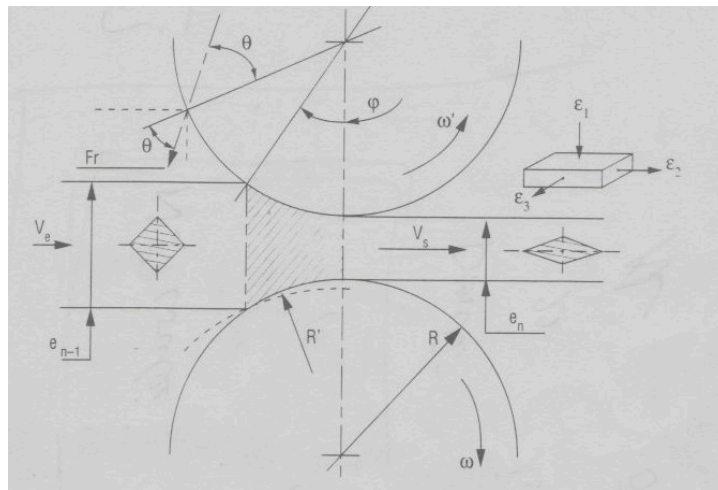
suivante:

$$\varepsilon_1 = Ln \left( \frac{e_i}{e_f} \right) \quad (4)$$

Où:

$e_i$  et  $e_f$ , représentent respectivement les épaisseurs initiale et finale du produit laminé.

Comme pendant le laminage, il y a conservation du volume, la diminution de l'épaisseur est compensée par un allongement ( $\varepsilon_2$ ) et un élargissement ( $\varepsilon_3$ ). Ce dernier dépend des conditions géométriques de la passe. A chaud, pour des produits plats dont le rapport largeur sur épaisseur est grand ( $>50$ ), l'élargissement devient négligeable à cause du frottement. En fait, si élargissement il y'a, celui-ci n'existe que localement près du bord du produit (en rive), là où on se trouve en écoulement libre, c'est-à-dire triaxial (figure11).



**Figure 11.** Schéma de principe du laminage

L'essentiel du produit est donc en état de déformation plane. Cet état est exprimé par les équations de déformation suivantes :

$$\begin{cases} \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \\ \varepsilon_3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Le dernier point important concerne le débit du métal. Comme l'épaisseur diminue dans l'emprise, la vitesse linéaire moyenne du produit croît entre l'entrée et la sortie. Elle varie comme la vitesse d'entrée multipliée par le rapport des épaisseurs. Cette vitesse est maximale à la sortie du foyer de déformation. Avec des cylindres à axes rectilignes et parallèles, et en l'absence de force extérieures, la vitesse de sortie du produit est supérieure à la vitesse périphérique des cylindres. Cette différence de vitesse exprime le glissement en avant du métal. En revanche, à l'entrée du foyer de déformation, les cylindres tournent plus vite que l'avancement horizontal des cylindres. Les cylindres frottent sur le métal, c'est un glissement vert l'arrière [3].

#### IV.2. Equilibre dans l'emprise.

Dans l'emprise, le produit laminé est soumis à deux types de force:

1. Les forces d'inertie liées à l'accélération du produit dans le sens du laminage. Elles sont négligeables.
2. Les forces externes s'il y en a (par exemple une traction à l'entrée ou à la sortie).

En tout point de l'arc de contact métal-cylindre, le sens des forces de contact, dépend du mouvement relatif entre le métal et les cylindres (figure12). On peut donc distinguer deux zones :

- La zone d'entrée où la vitesse circonférentielle des cylindres est supérieure à la vitesse moyenne d'avance du produit : **C'est la zone de retard**
- La zone de sortie où l'on se trouve dans le cas inverse : **C'est la zone d'avance.**

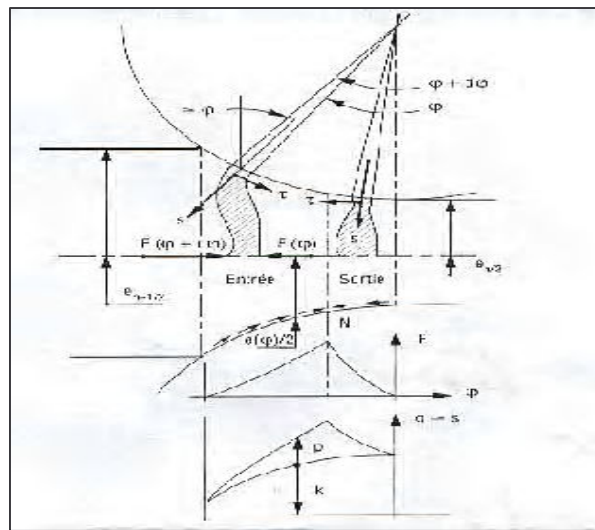


Figure 12 : l'équilibre dans l'emprise [3].

Ces deux zones sont séparées par un plan neutre correspondant à un angle neutre. Par ailleurs, en chaque point de l'arc de contact, on peut décomposer la contrainte dans un plan tangent au cylindre, en une composante normale radiale notée  $s$ , et une composante de cisaillement tangente au cylindre notée  $\tau$  [3].

### IV.3. Les conditions d'entraînement du métal par les cylindres.

En laminage à chaud, on n'exerce pas de poussée volontaire sur la brame à l'entrée de l'emprise. L'engagement doit être libre, il faut donc que le produit soit **happé** par les cylindres.

Juste avant l'engagement, le produit étant au contact avec les cylindres, la force  $F_r$  de réaction exercée par ceux-ci sur l'ébauche, fait avec la normale au point de contact un angle  $\theta$

qui dépend du frottement et de la géométrie locale. Si cette force est dirigée vers l'emprise, il y a engagement, si non, il y a refus d'engagement, et par conséquent pas de laminage possible.

A chaud, où la résistance faible du métal à la déformation plastique autoriserait de fortes réductions par passe (réduction :  $\Delta e = e_f - e_i$ ). Cette réduction est négative car elle exprime une diminution d'épaisseur. Cette condition est limitative. Après engagement, l'augmentation de la surface de contact du métal avec les cylindres, fait que les forces de frottement augmentent au contact métal-cylindre, ce qui est suffisant pour assurer l'entraînement du produit pendant toute la période stabilisée du laminage [3].

Comme conséquence, même avec un métal très peu résistant à la déformation plastique et avec un outil puissant, on ne peut envisager de dépasser un certain seuil de réduction par passe ou un taux de réduction (r) qui s'exprime par :

$$r\% = 100 \frac{\Delta e}{e_i} \quad (6)$$

Ou un corroyage par passe (c) qui s'exprime par :

$$c = \frac{e_i}{e_f} \quad (7)$$

Il faut donc faire plusieurs passes pour atteindre une épaisseur donnée. Pour cela, on peut utiliser un laminoir dont la vitesse de rotation est réversible, pour laminier dans deux directions opposées, ou alors on procède par passages successifs et simultanés dans plusieurs cages : C'est le laminage continu.

#### IV.4 La force de laminage.

La relation mathématique décrivant l'équilibre d'un élément infiniment petit de matière dans le foyer de déformation, est une équation différentielle qui s'écrit :

$$\frac{df}{d\varphi} = 2R' \cdot (s \cdot \sin \varphi \pm \tau \cdot \cos \varphi) \quad (8)$$

Avec les exigences suivantes :

- Condition de déformation plane,
- Signe positif pour les forces s'opposant au laminage,
- Le signe  $\pm$  dans la parenthèse signifiant zone d'entrée (+) ou zone de sortie (-),
- S, f et  $\tau$  sont des fonctions inconnues de  $\varphi$ ,
- R' est le rayon de l'arc de contact déformé pour le distinguer du rayon R des cylindres,

Cette équation est la relation de base pour la théorie de laminage. Pour la résoudre, en plus des conditions aux limites, il faut disposer :

- D'un modèle de frottement,
- D'une loi de comportement du métal

#### IV.4.1. Loi de comportement et frottement.

##### Rhéologie de l'acier.

Lors du laminage à chaud, le métal se trouve en état de déformation plastique. Il faut donc faire appel à des notions de plasticité aux grandes déformations. En partant des tenseurs des contraintes et des déformations pour un élément de métal et en tenant compte du fait que l'on est en état de déformation plane, on montre pour de petites déformations que, la déformation plastique commence, quand une certaine fonction des six contraintes, notée  $\sigma'$ , et appelée contrainte généralisée, atteint une valeur critique  $\sigma_0$ . Diverses formes ont été proposées pour la fonction  $\sigma'$ . Le critère de *Tresca* (*critère de cisaillement maximale*) conduit à :

$$p = \frac{f}{e(\varphi)} \quad (9)$$

Et 
$$\sigma' = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (10)$$

Ici  $\sigma'$  s'exprime comme la différence entre la plus grande et la plus petite des contraintes normales. Cette relation est souvent réécrite sous la forme suivante

:

$$\sigma' = \sigma_0 = 2\tau_{\max} \quad (11)$$

Le critère de l'écoulement ne concerne que la valeur critique. Or, ce qui est intéressant en laminage, c'est ce qui se passe après, et pendant la déformation plastique elle-même.

Le métal chaud dans l'emprise suit des lois qui obéissent au chemin thermomécanique. Ainsi la déformation et la température de l'ébauche laminée, sont des fonction du temps (t) sur toute la ligne de laminage.

$$\begin{cases} \varepsilon' = f(t) \\ T = g(t) \end{cases} \quad (12)$$

Donc la contrainte généralisée  $\sigma'$  prend à chaque instant (t) une valeur  $\sigma_0$  différente à la précédente, à cause de la baisse continue de la température dans le temps.

En laminage sans élargissement, on a :

$$k = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \quad (13)$$

Où  $k$  est la contrainte de déformation plane.

La valeur de  $\sigma_0$  est accessible expérimentalement par des essais de torsion à chaud, de traction, de compression ou de bi poinçonnement. La contrainte de déformation  $\sigma'$  dépend :

- de la déformation  $\varepsilon'$
- de la vitesse de déformation  $\varepsilon''$
- de la température  $T$

#### IV.4.2. Le frottement lors du laminage.

La loi de frottement fait intervenir de nombreux paramètres comme : la vitesse de rotation des cylindres, la température de laminage et la géométrie de la passe.

L'équation qui exprime la force de frottement est donnée par la formule suivante :

$$\tau = \mu . S \quad (14)$$

Avec :  $\mu$  le coefficient de frottement.

$S$  la force normale

Puisque l'on peut connaître en chaque point de l'arc de contact de l'emprise, les deux composantes ( $s$ ) et ( $\tau$ ) dans le plan tangent au cylindre, on peut donc calculer le coefficient de frottement ( $\mu$ ) et d'en déduire plus loin la force de laminage ( $F$ ) et le couple de laminage ( $\Gamma$ ), par intégration le long de l'arc de contact.

Si nous prenons le cas de la méthode de tranches en compression homogène, ce qui suppose :

# Qu'une section droite dans l'emprise, délimitée par deux plans verticaux, reste droite,

# Qu'il n'y est pas de cisaillement dans une section droite:

a) la relation de la plasticité donne :

$$p - q = k \quad (15)$$

Où :

$p$  est la contrainte normale dans une section droite,

$q$  est la contrainte normale au plan horizontal

L'équilibre de la tranche conduit à l'expression liant  $q$ ,  $s$  et  $\tau$ : comme suit :

$$q = s \pm \tau \tan \varphi$$

Et si  $e(\varphi)$  est l'épaisseur au point considéré alors la contrainte  $p$  s'exprime comme suit :

$$p = \frac{f}{e(\varphi)} \quad (16)$$

b) l'hypothèse de coulomb conduit à :

$$q = s(1 \pm \tan \theta \cdot \tan \varphi) \text{ si on introduit } \theta = \arctg \mu .$$

L'équation (3.5) devient alors :

$$\frac{df}{d\varphi} = 2R' s (\sin \varphi \pm \tan \theta \cos \varphi) \quad (17)$$

Et en définitive on obtient l'équation d'Orowan qui s'exprime par :

$$\frac{df}{d\varphi} = 2R' \cdot \left(k + \frac{f}{e(\varphi)}\right) \cdot \cos \varphi \tan(\varphi \pm \theta) \quad (18)$$

En tenant compte du fait que la relation  $\frac{F}{l} = q'$  et  $\tau = s \cdot \mu$ .

Cela conduit dès que le coefficient de frottement  $\mu$  est assez grand, à des valeurs de  $\tau$  qui dépassent  $\tau_{\max}$  sur une certaine partie de l'emprise, ce qui crée les conditions idoines d'entraînement du métal par les cylindres. On obtient ainsi un frottement collant qui favorise l'adhérence et donc l'entraînement.

Si lors d'une passe, on fait le rapport entre la force  $F$  de laminage et la longueur  $l$  de l'emprise, on obtient :  $\frac{F}{l} = q'$  ce qui constitue une valeur moyenne de la contrainte verticale.

Ce terme est la résistance moyenne à la compression pour la passe considérée. Il est appelé : **la dureté à chaud** par les lamineurs.



**Conclusion :**

Pendant le laminage, il y a plusieurs forces qui s'appliquent au niveau de la zone déformée entre les deux cylindres. Ces forces peuvent être résumées comme suit :

- Les forces de frottement, responsables de l'entraînement,
- Les forces de compression, responsables de la déformation.,
- Les contraintes,

La contrainte de déformation dépend de la vitesse de déformation, la température de laminage et l'angle d'entraînement.

## **CHAPITRE B**

### **PARTIE EXPERIMENTALE**

## **Introduction :**

Dans cette partie nous regroupons l'essentiel de notre étude expérimentale. Nous y passons en revue les différentes techniques utilisées ainsi que les résultats obtenus, suivis de leurs interprétations.

### **I. Présentation des aciers et échantillons étudiés.**

Notre étude porte sur différents échantillons, au nombre de quatre (04) et notés E1, E2, E3 et E4, prélevés sur différentes brames, d'acier au carbone, laminées dans des conditions différentes.

#### **I.1. Identification de l'acier laminé.**

Le matériau laminé est un acier au carbone, obtenu à partir d'une fonte désoxydée par le procédé au convertisseur à soufflage d'oxygène (LD), l'acier est produit par l'entreprise *Sider de MITTAL STEEL ANNABA*. Les brames utilisées dans le laminage sont obtenues à partir d'une coulée de l'acier liquide par la machine à couler continue. Les dimensions de ces brames (longueur, largeur et épaisseur) sont : 10000 x 1050 x 210 mm<sup>3</sup>.

Généralement la microstructure d'une brame d'acier est hétérogène, grossière et poreuse ; c'est une structure basaltique.

La structure basaltique contient, entre autres, des retassures, des grains fins rapidement refroidis, des porosités, des soufflures, des ségrégations et des grains allongés dans la direction de l'évacuation de la chaleur.

#### **I.2. Le laminage à chaud.**

Les quatre échantillons, que nous nous proposons d'étudier, E1, E2, E3, E4 sont prélevés sur des brames qui ont évolué, lors de leur laminage, selon le schéma ci-dessous, sauf pour l'échantillon E1, qui, lui, est laminé seulement par le quarto :

*Four ==> brise d'oxyde ==> laminoir quarto réversible ==> cages finisseuses ==> bobineuse.*

Avant le laminage, les brames sont chauffées dans un four. Les buts du chauffage des brames sont divers, on peut en citer, entre autres, l'élimination des défauts cristallins qui y existent, la

dissociation des carbures et des nitrures, et enfin le but essentiel qui est de réduire la résistance du métal à la déformation.

Le chauffage des brames passe par plusieurs étapes qui sont les suivantes :

- 1-1- Zone de préchauffage supérieur : 1050-1150°C.
- 1-2- Zone de préchauffage inférieur (1046 ÷ 1015°C).
- 1-3- Zone de chauffage supérieur (1306 ÷ 1218°C).
- 1-4- Zone de chauffage inférieur (1180 ÷ 1250°C).
- 1-5- Zone de homogénéisation pour régler la température de la brame dans les trois zones (la surface, le cœur et la surface inférieure de la brame) 1280 ÷ 1320°C.
- 1-6- Zone d'étape d'atténuation pour éliminer les traces des skid 1200 ÷ 1250 °C.
- 1-7- La zone de maintien (1280 ÷ 1320°C) pour garder la température du four et l'air ne pénètre pas dans le four.

Ces étapes de chauffage des brames se font dans le but très important d'éviter tout choc thermique des brames, qui amènerait à leur fatigue et leur fissuration.

La température de laminage est de 1250°C, et ce, pour garder les caractéristiques mécaniques du métal, quant au combustible utilisé dans le four c'est du gaz naturel.

### **I.3. Condition de laminage des échantillons.**

Les conditions de laminage de chaque échantillon sont les suivantes :

1. La température de chauffage dans le four est la même pour tous les échantillons, la température est égale à  $1250 \pm 50$  °C.
2. Les autres paramètres de laminage sont représentés dans les tableaux 1,..,4, qui contiennent les paramètres suivants :
  - La vitesse de laminage **VL** (m/s).
  - Le taux de déformation de chaque cage  $\xi_D$  (%).
  - La charge des cylindres **P** (kN).
  - La température de laminage de chaque cage **TL** (°C).
  - Les diamètres des cylindres de travail **D**(mm).

Les autres paramètres de laminage comme l'angle d'entraînement, la pression de laminage, le travail de laminage et le frottement à l'interface métal-cylindre peuvent être calculés à partir des formules mathématiques bien définies.

Les conditions de laminage des quatre brames, sur lesquelles les échantillons étudiés ont été prélevés, sont représentées dans les tableaux 1, 2, 3 et 4.

Les quatre brames, laminées à chaud dans le laminoir quarto, dans les conditions citées dans le tableau 1 où sont reportés le taux de réduction de chaque passe, la vitesse de déformation ainsi que d'autres paramètres.

L'épaisseur finale des ébauches, après le quarto, est de 30mm. Cette dernière est presque la même pour les autres ébauches.

La décalamineuse par l'eau dans chaque passe et le contact métal-cylindre diminue la température de l'ébauche, ce qui augmente le travail des cylindres.

Une brame, dans laquelle on a prélevé l'échantillon E1, ne subit plus aucune transformation. Les trois autres brames, dont sont issus E2, E3 et E4 passent encore dans les laminoirs de finisseuses.

<b>Les paramètres de laminage dans le quarto</b>					
<b>N°=passe</b>	<b>VL (m/s)</b>	<b><math>\xi_D</math> (%)</b>	<b>P (kN)</b>	<b>TL (°C)</b>	<b>D (mm)</b>
Passe 1	1.00	19.97	6935	1261	Tr 1500
					Ap 900
Passe 2	2.00	24.95	7866	1250	Tr 1500
					Ap 900
Passe 3	2.50	33.25	9889	1238	Tr 1500
					Ap 900
Passe 4	2.80	39.75	10614	1221	Tr 1500
					Ap 900
Passe 5	3.75	38.95	10544	1189	Tr 1500
					Ap 900

**Tableau 1.** Conditions de laminage, dans le laminoir quarto des échantillons E1, E2, E3 et E4.

Le nombre de passes		Les paramètres de laminage de l'échantillon E2				
		VL (m/s)	$\xi_D$ (%)	P (kN)	TL (°C)	D
Laminoirs finisseurs	Cage 1	0.901	43.4	15898	978	Tr 679.75
						Ap 1408.00
	Cage 2	1.683	39.5	15673	939	Tr 711.70
						Ap 1425.00
	Cage 3	2.793	32.0	14937	919	Tr 685.30
						Ap 1416.00
	Cage 4	4.288	27.9	14033	903	Tr 676.90
						Ap 1412.20
	Cage 5	5.912	20.7	13033	884	Tr 718.30
						Ap 1411.90
	Cage 6	7.523	15.9	12154	863	Ap 1421.30
						Tr 705.90

**Tableau 2.** Conditions de laminage, dans le train finisseur de l'échantillon E2.

Le nombre de passes		Les paramètres de laminage de l'échantillon E3				
		VL (m/s)	$\xi_D$ (%)	P (kN)	TL (°C)	D
Laminoirs de finisseuse	Cage 1	1.220	43.0	12349	986	Tr 679.75
						Ap 1408
	Cage 2	2.243	38.5	12967	967	Tr 711.70
						Ap 1425
	Cage 3	3.549	31.1	11712	948	Tr 685.30
						Ap 1416
	Cage 4	5.649	28.9	10978	937	Tr 676.90
						Ap 1412
	Cage 5	7.923	21.1	9979	922	Tr 718.30
						Ap1411
	Cage 6	10.261	17.3	9797	904	Tr 705.90
						Ap 1421

**Tableau 3.** Conditions de laminage, dans le train finisseur de l'échantillon E3

Nombre de passes		Les paramètres de laminage de l'échantillon E4				
		VL (m/s)	$\xi_D$ (%)	P (kN)	TL (°C)	D
Laminoirs de finisseuse	Cage	1.473	29.9	14226	971	Tr 679.75
						Ap 1408
	Cage	2.244	27.9	12672	952	Tr 711.70
						Ap 1425.
	Cage	3.248	24.5	11719	934	Tr 685.30
						Ap 1416
	Cage	4.594	23.5	10286	919	Tr 676.90
						Ap 1412
	Cage	6.073	18.4	9744	902	Tr 718.30
						Ap1411.90
	Cage	7.532	14.5	8672	884	Tr 705.90
						Ap1421

**Tableau4.** Conditions de laminage, dans le train finisseur de l'échantillon E4.

Nous remarquons, d'après les tableaux 2, 3 et 4 qu'au cours du laminage, dans le train finisseur, la vitesse de laminage va augmentant d'une cage à l'autre (de la 1<sup>ère</sup> vers la 6<sup>ème</sup>), alors que le taux de déformation va en diminuant, de même que la température qui va, elle aussi en diminuant progressivement.

Dans le tableau5, ci-dessous, sont regroupées les températures moyenne de laminage ( $TL_m$ ) des trois bobines, qui sont passées par le laminoir quarto et les laminoirs du train finisseur,



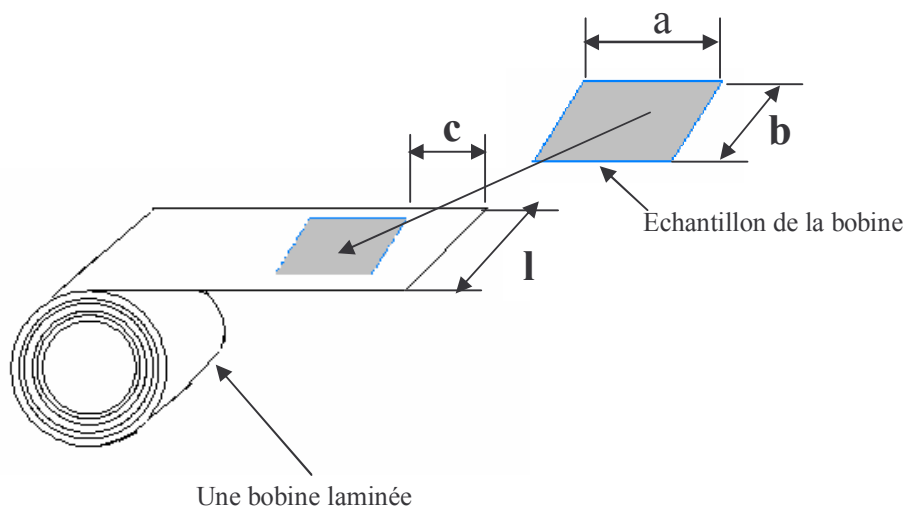
les vitesses moyennes de laminage ( $VL_m$ ) ainsi que leurs épaisseurs finales, nos échantillons E2, E3 et E4, sont justement prélevés sur ces bobines.

D'autres paramètres	Bobine 2 (E2)	Bobine 3 (E3)	Bobine 4 (E4)
Température moyenne de laminage $TL_m(^{\circ}C)$	914	944	927
L'épaisseur finale (mm)	2.2	2.2	4
Vitesse moyenne de laminage $VL_m$ (m/s)	3.85	5.14	4.194

**Tableau 5.** Température moyenne de laminage, vitesse moyenne de laminage et épaisseur finale de la tôle des bobines.

#### I.4. Prélèvements des échantillons.

Le prélèvement des échantillons a été fait à partir des ébauches déjà laminées à chaud, en prenant les derniers mètres, en laissant environ 5 mètres de la fin de bobine, pour éviter les défauts qui y existent. Les dimensions des échantillons ainsi prélevés pour les essais sont de  $500 \times 500 \text{ mm}^2$ , comme montré dans la figure13, ci-dessous :



**Figure13.** Prélèvement et dimensions des échantillons

Les dimensions du prélèvement des échantillons sont comme suit :

**a** : correspond à la longueur de l'échantillon prélevé.

**b** : correspond à la largeur de l'échantillon prélevé.

**c** : correspond aux derniers mètres de la bobine qui sont éliminés du prélèvement,  $c > 5m$ .

**l** : correspond à la largeur de la brame laminée.

## **II. Techniques expérimentales.**

Différentes techniques ont été utilisées pour mener au mieux notre étude expérimentale. Après l'analyse chimique des échantillons étudiés, on procède à une observation au microscope, puis on effectue des essais mécaniques.

### **II.1. Analyse chimique des aciers.**

La composition chimique des aciers laminés est obtenue à partir d'une analyse spectrométrique des échantillons prélevés.

Le procédé de spectrométrie consiste à bombarder l'échantillon par les rayons X. On doit procéder au polissage de l'échantillon, et ce, avant l'analyse, pour éviter que les résultats ne soient erronés par la présence des impuretés.

L'analyse chimique du métal est très importante car les propriétés d'un matériau restent liées à ses éléments d'addition, à titre d'exemple on peut citer, entre autres, l'effet du taux de carbone sur les propriétés mécaniques d'un métal.

### **II.2. L'examen métallographique des échantillons.**

Pour faire les examens métallographiques il faut préparer les échantillons selon diverses étapes comme précisé dans ce qui suit :

#### **II.2.1. L'enrobage.**

Après prélèvement des échantillons, on procède à l'enrobage à froid, qui est effectué manuellement à l'aide d'une résine qui se solidifie entre 25 et 30 minutes.

### **II.2.2. Polissage.**

Le polissage contient deux étapes qui sont le pré-polissage et le polissage de finition.

#### **a) Pré-polissage.**

Il consiste à rendre la surface plane et brillante de façon à faire disparaître toutes rayures qui risqueraient de gêner l'observation microscopique ultérieure. Pour cela on frotte le métal avec des abrasifs de plus en plus fins (P 180, 400, 600, 800, 1000, 1200); et on prend soin de rayer l'échantillon dans un certain sens avec un abrasif, puis dans le sens perpendiculaire avec le suivant.

On utilise une machine où le papier est fixé sur un disque tournant dans un plan horizontal avec une vitesse d'environ 300 trs/min.

Durant l'opération de polissage, un filet d'eau coule sur le papier afin d'éviter l'échauffement du métal et d'éliminant les grains et particules arrachés.

#### **b) Polissage de finition.**

Après avoir terminé l'opération de pré-polissage on a fait subir aux échantillons un polissage de finition renferment les opérations suivantes :

##### **b.1) Polissage à la pâte diamantée.**

Ce polissage consiste à frotter les échantillons sur un disque de drap en soin, imbibé d'une suspension d'une pâte diamantée répartie à l'aide d'une huile spéciale sur le disque. La granulométrie utilisée est  $1\mu\text{m}$ .

##### **b.2) le Polissage à l'alumine.**

Le polissage se fait comme précédemment, l'agent de polissage étant l'alumine le drap est remplacé par un feutre. La granulométrie de l'alumine étant de  $0.3\mu\text{m}$ . un jet d'eau coule sur le feutre afin d'éviter l'échauffement de l'échantillon et d'éliminer les grains d'alumine et particules arrachés. A la fin de cette opération les échantillons sont lavés ensuite séchés à l'air.

### **II.2.3. Attaque chimique.**

Après le polissage final l'échantillon subit une attaque chimique qui s'effectue à l'aide d'un électrolyte de Nital 2% (98 ml d'éthanol + 2 ml d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>)) pendant 5 secondes puis il est immergé dans l'eau distillé ensuite dans l'éthanol puis séché à l'aide d'un séchoir.

### **II.2.4. L'observation microscopique.**

L'observation microscopique réalisée à l'aide d'un microscope optique équipé d'une camera et liée au micro-ordinateur pour la prise les photos des structures obtenir. Pour les échantillons on fait les grossissements 100 et 500.

## **II.3. Les essais mécaniques.**

Les essais mécaniques réalisés, sur les échantillons étudiés, sont l'essai de traction et l'essai de dureté. Les échantillons sont convenablement préparés avant tout essai.

Les éprouvettes de traction sont prélevées, à l'aide d'une cisaille, sur trois bobines déjà laminées, et ce, à environ 10 m de la fin des bobines. Les échantillons prélevés sont ensuite usinés par fraisage, sous une lubrification afin d'éviter l'échauffement du métal, pour réaliser la partie calibrée recherchée.

Les éprouvettes sont réalisées selon les normes française A9.

Les échantillons destinés aux essais de dureté sont convenablement polis afin d'en éliminer la couche de calamine (la couche d'oxyde).

Il est à signaler que nous n'avons pas pu réaliser ces essais, de dureté et de traction, sur l'échantillon E1, et ce, pour des problèmes survenus en dernier lieu et difficilement rattrapables

### **II.3.1. L'essai de traction.**

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer les caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité (**Re**) en MPa, résistance à la traction (**Rm**) en MPa, **Re<sub>0.2</sub>** limite d'élasticité à 0.2% et l'allongement après rupture notamment (%**A**).

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à la rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. On impose généralement une déformation croissante à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de  $L_0$ , et on mesure simultanément l'effort  $F$  et l'allongement  $(L-L_0)$  voir figure 14.

Où :

$L_0$  : la longueur initiale entre repères est donnée par la formule suivante :

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0} \quad (19)$$

$S_0$  : la surface initiale de l'éprouvette;

$$S_0 = e l \quad (20)$$

$e$  et  $l$  sont respectivement l'épaisseur et la largeur initiales de l'éprouvette.

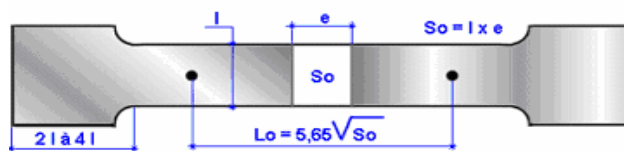


Figure 14. Éprouvette de traction

### II.3.2. L'essai de dureté HRB.

Les essais de dureté sont d'une grande utilité pour le métallurgiste, à cause de leur simplicité et de leur caractère peu destructif.

La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Cependant, le processus opératoire doit être très précis pour assurer la reproductibilité et la fidélité des résultats. C'est ce qui explique le grand nombre de normes dans ce domaine, pour les essais proprement dits, les machines d'essais et les étalons..

Pour notre part nous utilisons l'essai Rockwell, qui mesure la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelée dureté Rockwell B (**HRB**) ou d'un cône de diamant de  $120^\circ$ , appelée dureté Rockwell C (**HRC**).

L'essai consiste à appliquer une précharge de 100 N sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur  $e_0$  (figure 15). On applique une force supplémentaire  $F$ , pendant 3 à 8 s, le cône (ou la bille) s'enfonce d'une profondeur  $e_1$ . On supprime la force  $F$ , le cône reste enfoncé d'une profondeur  $e_2$ . La profondeur rémanente  $(e_2 - e_0)$  permet le calcul de la dureté selon la formule

$$HRB = 500.(130 - (e_2 - e_0)) \quad (21)$$

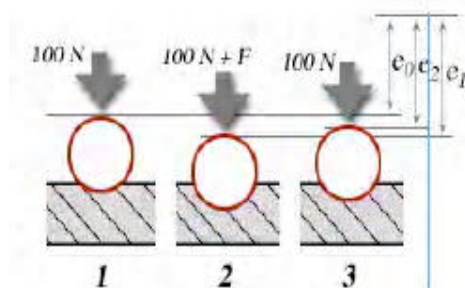


Figure 15. Principe de la dureté HRB

- Dans notre cas, le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre, et la charge  $F$  est de 980 N (100 kgf).
- Sur le duromètre que nous avons utilisé, les indices Rockwell se lisent directement sur un cadran gradué.

### III. Résultats et interprétations.

Les différents résultats expérimentaux obtenus sont résumés dans ce paragraphe, puis suivis de leurs interprétations.

#### III.1 Résultats expérimentaux.

Dans ces résultats nous retrouvons ceux de l'analyse chimique, des observations micrographiques, ainsi que ceux des essais de dureté et de traction.

##### III.1.1. Composition chimique des échantillons.

Les compositions chimiques des quatre (04) échantillons étudiés, obtenues par analyse spectrométrique, sont reportées dans le tableau6.

Les éléments	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ti	Ni	Cr	Mo
Echantillon E1	0.066	0.39	0.01	0.014	0.008	0.017	0.057	0.002	0.004	0.012	0.004
Echantillon E2	0.067	0.39	0.01	0.011	0.008	0.014	0.050	0.002	0.004	0.012	0.004
Echantillon E3	0.068	0.33	0.01	0.014	0.006	0.019	0.057	0.002	0.006	0.012	0.004
Echantillon E4	0.057	0.39	0.01	0.015	0.013	0.017	0.060	0.002	0.004	0.012	0.004

Tableau6. La composition chimique des échantillons étudiés.

### **Commentaires.**

On remarque que les quatre échantillons sont presque de la même composition chimique, sauf l'échantillon E4 qui a une teneur de carbone légèrement plus faible que celle des autres.

#### **III.1.2. Résultats de l'examen métallographique.**

Cette partie est consacrée à la caractérisation microstructurale, des quatre échantillons, E1, E2, E3 et E4, d'environ la même composition chimique, mais laminés dans des conditions différentes.

Les figures (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 et 23), représentent les microstructures observées pour les quatre échantillons étudiés par deux grossissements pour chaque échantillon. Les deux grossissements utilisés sont 100 et 500.

#### **L'échantillon E1 (figures 16 et 17).**



**Figure 16.** Microstructure de l'échantillon E1, après l'attaque chimique.  
Laminé par le quarto réversible. G100.

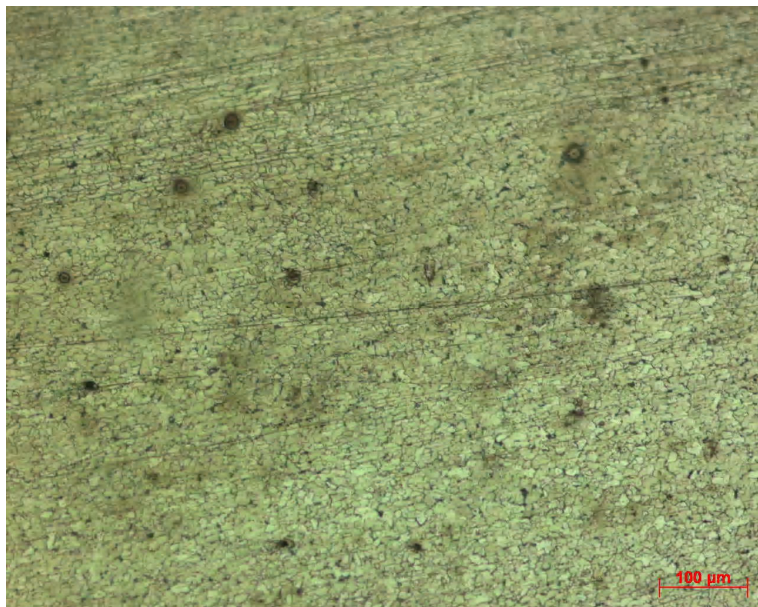


**Figure 17.** Microstructure de l'échantillon E1, après l'attaque chimique au nital. Laminé par le quarto réversible. G500.

**Commentaires.**

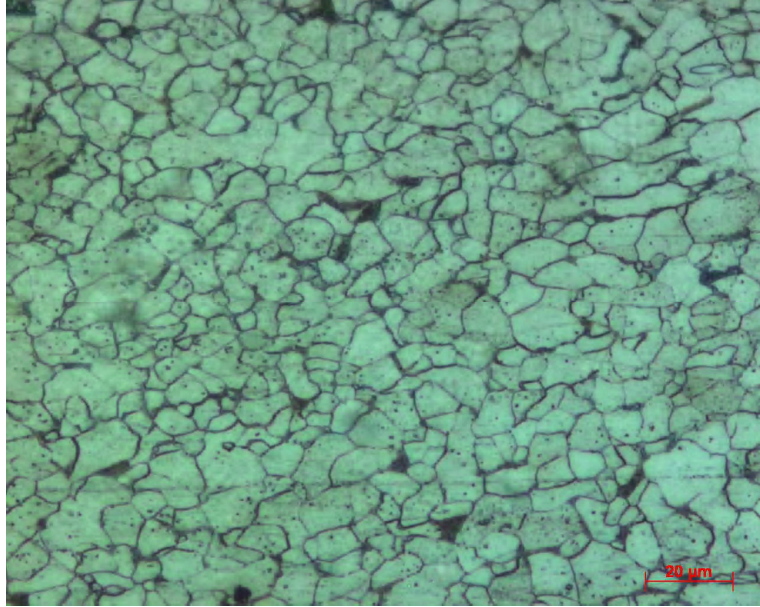
On observe que la microstructure est ferrito-perlitique, où la perlite, occupe une proportion estimés environ à 6% (comptage ponctuelle). Elle est localisée au niveau des joints de grains de ferrite et les joints triples. Les grains ferritiques sont plus gros.

**L'échantillon E2 (figures 18 et 19) :**



**Figure 18.** Microstructure de l'échantillon E2, après l'attaque chimique. Laminé avec un taux de déformation  $\epsilon=4.56$ , et une température de bobinage de 855°C. G100



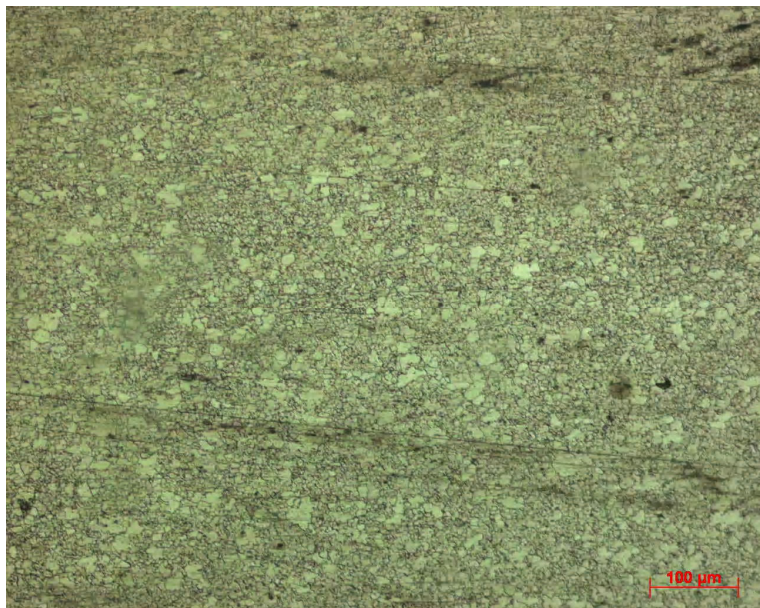


**Figure 19.** Microstructure de l'échantillon E2, après l'attaque chimique. Laminé avec un taux de déformation  $\epsilon=4.56$  et une température de bobinage de 855°C. G500

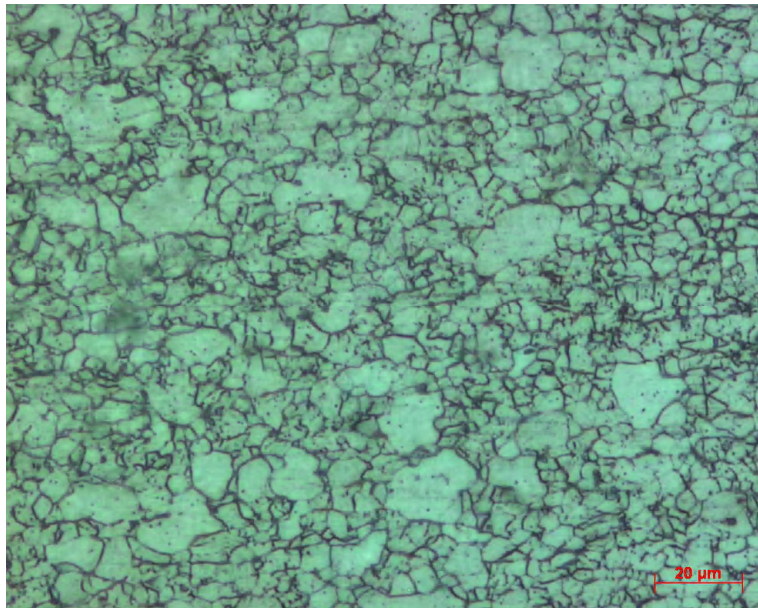
**Commentaires.**

On observe que la microstructure est ferrito-perlitique. La perlite, est dans une proportion estimés environ à 4% (comptage ponctuelle). Elle est localisée au niveau des joints de grains. Les grains ferritiques sont très fins et leur taille moyenne est de 7.94μm.

**L'échantillon E3 (figures 20 et 21) :**



**Figure 20.** Microstructure de l'échantillon E3, après l'attaque chimique. Laminé avec un taux de déformation  $\epsilon=4.56$ , et une température de bobinage de 890°C. G100.

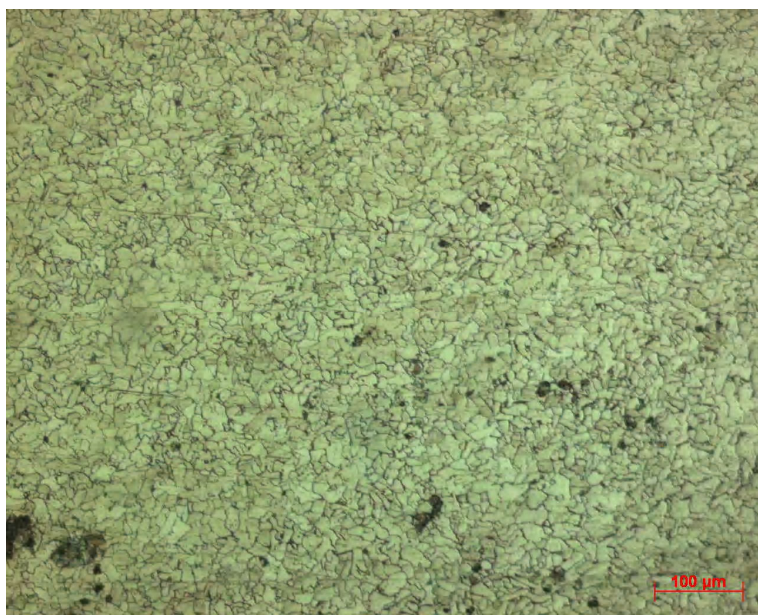


**Figure 21.** Microstructure de l'échantillon E3, après l'attaque chimique. Laminé avec un taux de déformation  $\varepsilon=4.56$ , et une température de bobinage de 890°C. G500.

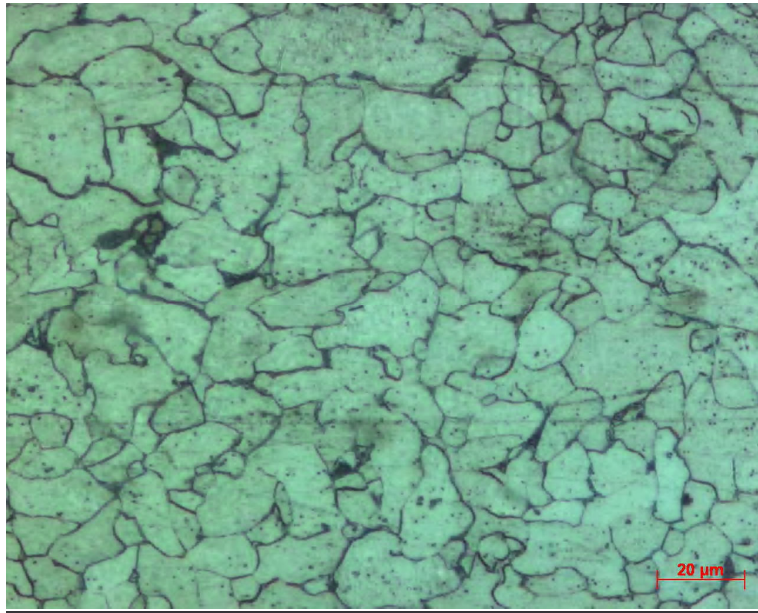
### Commentaires.

On observe que la microstructure est ferrito-perlitique, où la perlite occupe les joints de grains. La quantité de perlite est faible, et la proportion estimée de cette phase est d'environ 5%. Les grains de cet échantillon sont très fins par rapport à ceux de l'échantillon E2, la taille moyenne des grains est d'environ 5.86 μm.

### L'échantillon E4 (figures 22 et 23) :



**Figure 22.** Microstructure de l'échantillon E4, après l'attaque chimique. Laminé avec un taux de déformation  $\varepsilon=3.96$  et une température de bobinage de 895°C. G100.



**Figure 23.** Microstructure de l'échantillon E4, après l'attaque chimique. Laminé avec un taux de déformation  $\epsilon=3.96$ , et une température de bobinage de 895°C. G500.

### Commentaire.

Les figures représentent une structure ferrito-perlitique, avec des gros grains de taille moyenne égale à 12.45µm. La perlite est localisée au niveau des joints de grains et les points triples des joints de grains. Sa proportion reste faible par rapport à celle de la ferrite. Elle est environ de 4%.

On peut résumer, les résultats des tailles moyennes des grains et les proportions de la perlite estimées à partir des micrographiques, dans le tableau 7, ci-dessous :

	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>D<sub>g</sub> (µm)</b>	<b>7.94</b>	<b>5.86</b>	<b>12.45</b>
<b>% de perlite</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>

**Tableau 7.** La taille moyenne des grains et la proportion de la perlite dans les échantillons E2, E3 et E4.

Les proportions de la perlite sont estimées par la méthode de comptage ponctuel.

### **III.1.3. Résultats de la dureté.**

Pour s'assurer de la reproductibilité des résultats, sur chaque échantillon nous avons effectué trois (03) essais.

Les résultats de l'essai de dureté des trois échantillons sont représentés dans le tableau 8.

<i>Echantillon</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>
<i>Essai 1</i>	62	67	69
<i>Essai 2</i>	63	69	69.5
<i>Essai 3</i>	62	69	69
<i>Valeur moyenne (HRB)</i>	62.33	68.33	69.16

**Tableau 8.** Résultats des essais de dureté.

### Commentaires.

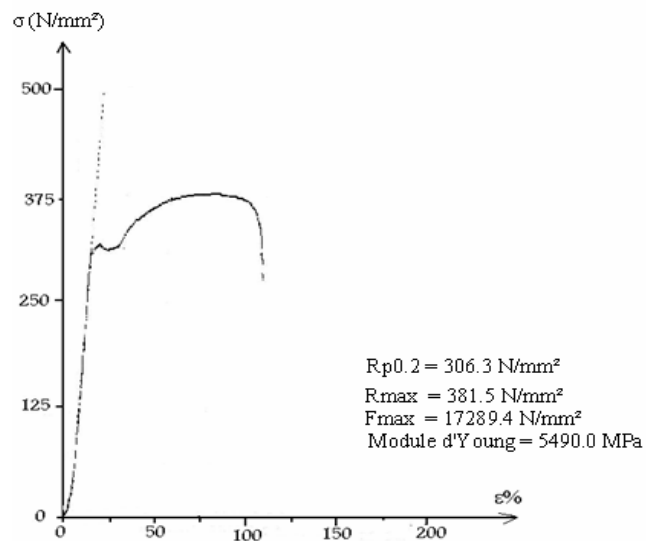
On remarque que l'échantillon E2, prélevé sur la bobine de 2,2 mm d'épaisseur finale et embobinée à 855°C, est le moins dur (62.33 HRB) par rapport aux deux autres échantillons.

L'échantillon E4 est d'une dureté de 69.16 HRB, et est un peu plus dur que l'échantillon E3 qui, lui, a une dureté de 68.33 HRB, il faut rappeler que l'échantillon E2 a été plus fortement déformé que l'échantillon E4, et que les températures de bobinages des deux échantillons sont très proches.

### **III.1.4. Résultats des essais de traction.**

Le tableau 9, regroupe les résultats de la traction des trois échantillons E2, E3 et E4. Ces différents résultats sont obtenus à partir des courbes de traction (figures 24, 25 et 26).

#### **Courbe de traction de l'échantillon E2:**



**Figure 24.** Courbe de la traction de l'échantillon E2

On remarque que la courbe de traction de l'échantillon E2, représentée dans la figure 24, est conforme à la courbe de la traction théorique. On rappelle que cet échantillon a été laminé par un taux de déformation  $\varepsilon=4.56$ , avec une épaisseur finale égale à 2.2mm, et de température de bobinage égale à 855.5°C.

#### Courbe de traction de l'échantillon E3:

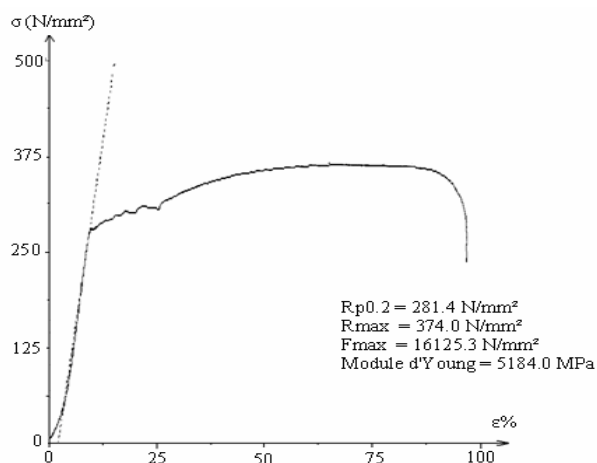


Figure 25. Courbe de la traction de l'échantillon E3

La figure 25, représente la courbe de l'essai de traction de l'échantillon E3, on remarque que la zone de la limite de l'élasticité, n'est pas conforme à la courbe théorique de traction. L'échantillon E3 est déformé par un taux de déformation  $\varepsilon=4.56$ , à une température de bobinage de 890°C. La valeur maximale de résistance à la déformation est d'environ 375 N/mm<sup>2</sup>.

#### Courbe de traction de l'échantillon E4:

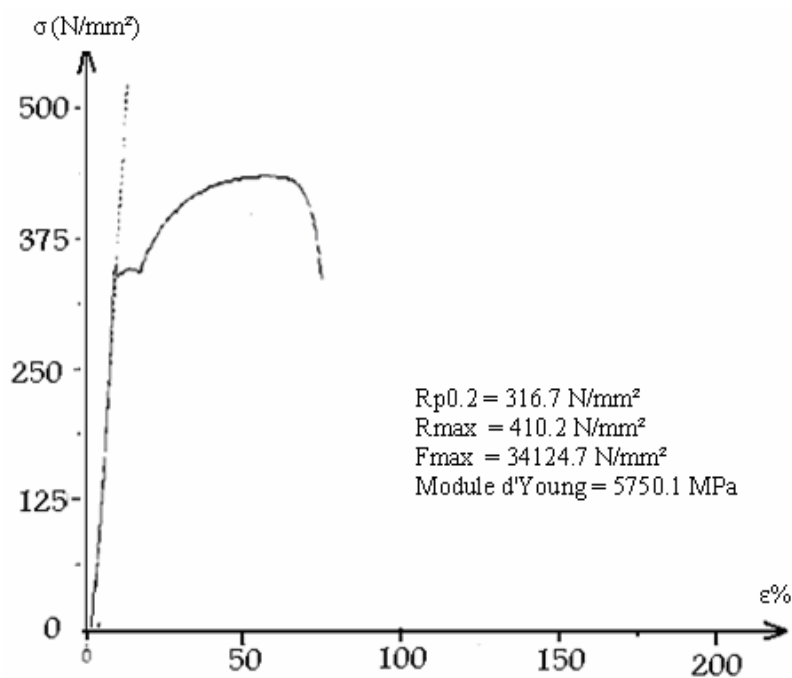


Figure 26. Courbe de la traction de l'échantillon E4

La courbe de traction de l'échantillon E4, est représentée dans la figure 26. On remarque que cette courbe de traction conforte la courbe théorique de la traction. La limite d'élasticité de cet échantillon (E4) est d'environ de 316.7 N/mm<sup>2</sup>.

L'échantillon E4 est laminé par un taux de déformation  $\varepsilon=3.96$ , à une température de bobinage de 895°C.

Les résultats de l'essai de traction des trois échantillons E2, E3 et E4 sont représentés dans le tableau 9. Ce tableau contient toutes les propriétés de la résistance à la déformation des trois échantillons, ces propriétés sont la résistance maximale à la rupture, la limite d'élasticité et le module d'Young des trois échantillons.

Les paramètres	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>
<b>La charge appliquée (N)</b>	400000	400000	400000
<b><math>F_m</math> (N)</b>	17289.4	16125.3	34124.7
<b><math>S_0</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	45.32	43.12	83.20
<b>Module d'Young (MPa)</b>	5490.0	5184.0	5750.1
<b><math>R_{max}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	381.5	374.0	410.2
<b><math>R_{p0.2}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	306.3	281.4	316.7
<b><math>L_0</math> (mm)</b>	38.03	37.10	51.53
<b>A%</b>	43%	48%	46%

**Tableau 9.** Résultats des essais de traction.

Les différents paramètres du tableau étant définis comme suit :

$F_m$  : charge maximale à la traction (N/mm<sup>2</sup>)

$S_0$  : la section initiale de l'éprouvette

$R_{max}$  : résistance maximale à la traction  $R_m=100$ . ( $F_m / S_0$ )

$R_{p0.2}$  : la limite d'élasticité à 0.2%

$L_0$  : distance entre repères à l'état initial (mm)

$L$  : distance entre repères après la rupture (mm)

$A\%$  : allongement après la rupture.

**Commentaires.**

On remarque que l'échantillon E2 est le moins résistant à la déformation comparativement aux deux autres; cet échantillon est pris dans une bobine laminée avec un taux de déformation plus élevé, et embobinée à une température plus basse (855°C) que ceux des deux autres bobines, où sont prélevés les échantillons E3 et E4.

L'échantillon E4, qui a subi un taux de déformation un peu plus petit par rapport aux deux autres échantillons, a une valeur de résistance maximale  $R_{\max} = 410.2 \text{ N/mm}^2$ .

Pour l'allongement après la rupture, on remarque que l'échantillon E3 est celui qui s'est allongé le plus, comparativement aux deux autres échantillons.

**III-2 Interprétations des résultats.**

Dans le tableau 10 nous regroupons certaines conditions de laminage,  $VL_m$  vitesse de laminage moyenne,  $TL_m$  la température de laminage moyenne et le taux de déformation ( $\epsilon$ ) des échantillons E2, E3 et E4, ainsi que les divers résultats expérimentaux : dimension moyenne des grains ( $D_g$ ), la dureté (HRB) et les résultats de l'essai de traction ( $R_{\max}$  et  $A\%$ ).

		<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>Conditions de laminage</b>	$VL_m$ (m/s)	3.85	5.140	4.194
	$TL_m$ (°C)	914	944	927
	$\epsilon = \ln(h_i/h_f)$	4.56	4.56	3.96
<b>Résultats expérimentaux</b>	$D_g$ ( $\mu\text{m}$ )	7.94	5.86	12.45
	HRB	62.33	68.33	69.16
	$R_{\max}$ (N/mm)	381.5	374	410.2
	A%	43%	48%	46%

**Tableau 10.** Certaines conditions de laminage et résultats expérimentaux

Dans la figure 27 nous représentons le nuage des points des variations des dimensions moyennes des grains, des différents échantillons, et ce, en particulier en fonction des taux des déformations et la vitesse moyennes de laminage.

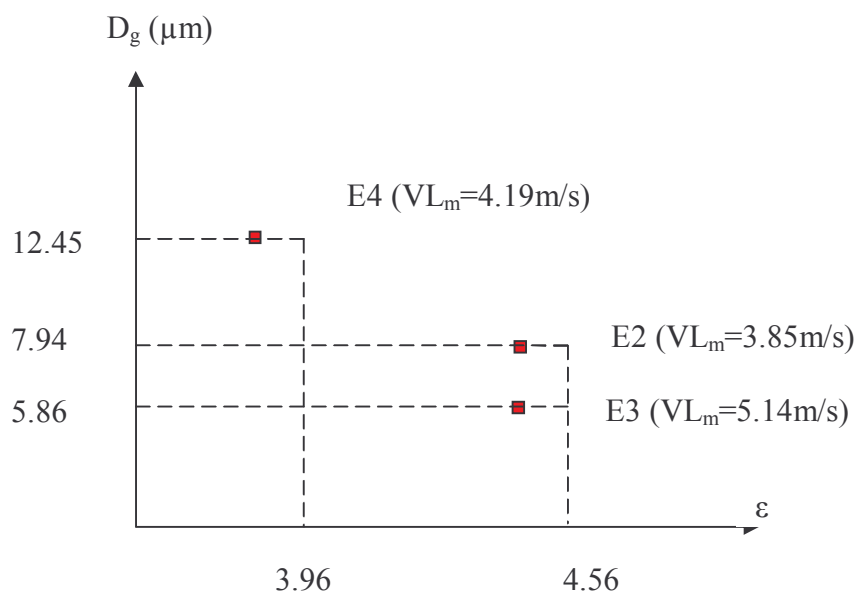


Figure 27. Nuage des points de la variation de la dimension moyenne des grains; des échantillons E2, E3 et E4, en fonction du taux de déformation ( $\epsilon$ ) et de la vitesse moyenne de laminage

Les conditions de laminage, et les résultats obtenus reportés dans le tableau 10, nous permettent les quelques interprétations qui suivent.

Les échantillons E2 et E3 sont déformés avec le même taux ( $\epsilon = 4,56$ ), mais à des vitesses de laminage différentes, celle de E3 étant supérieure à celle de E2 (5,140 m/s et 3,85 m/s respectivement). Nous remarquons que la taille moyenne des grains de l'échantillons E3 est plus fine (5,86  $\mu\text{m}$ ) que celle des grains de l'échantillons E2 (7,94  $\mu\text{m}$ ). Fait qui met en relief l'effet de la vitesse de laminage sur la dimension moyenne finale des grains, qui d'ailleurs est conforté par la bibliographie, qui souligne que l'augmentation de la vitesse de laminage affine la taille des grains déformés ( paragraphe A.III.2). La dureté mesurée sur ces deux échantillons, HRB (E2) = 62,33 et HRB (E3) = 68, 33, rejoint ces faits, à savoir que le structure la plus fine est aussi la plus dure.

Il est à signaler, néanmoins, que les résultats des essais de traction, ne sont pas très conformes, ce que nous attribuons, à priori, hormis le fait que ces essais n'aient été réalisés qu'une seule fois, à d'autres phénomènes, intervenant probablement au cours du laminage à chaud et dont on n'a pas tenu compte.

Les résultats relevés pour les échantillons E3 et E4 soulignent le double effet du taux de déformation et de celui de la vitesse de laminage ; E3 est déformé avec un taux un peu



plus élevé que celui de E4 ( $\varepsilon = 4,56$  et  $\varepsilon = 3,96$  respectivement), et une vitesse moyenne de laminage aussi plus élevée (5,140 m/s et 4,194 m/s respectivement). Faits qui expliquent la dimension moyenne des grains de E3 (5,86  $\mu\text{m}$ ) pratiquement la moitié de celle des grains de E4 (12,45  $\mu\text{m}$ ), et à travers desquels transparait l'effet conjugué du taux de déformation ( $\varepsilon$  grandissant, dimension moyenne des grains diminuant) et la vitesse de laminage ( $V_L$  grandissant, dimension moyenne des grains diminuant) souligné par la bibliographie (paragraphe A.III.2 et A.III.3).

Malheureusement nous n'avons pas pu corréler les propriétés mécaniques relevées, et la microstructure observée, pour probablement les mêmes raisons sus citées.

Les essais mécaniques n'ayant été réalisés qu'une fois, leur reproductibilité restant à prouver, et d'autre part le nombre considérable des paramètres mis en jeu dans le laminage à chaud, réalisé à l'échelle industrielle, ont fait que l'interprétation des résultats est restée peu aisée et incomplète.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE.

A travers ce travail, réalisé en majeure partie au niveau de MITTAL STEEL Annaba, nous avons essayé de mettre en exergue l'influence de deux variables du laminage sur la structure finale d'un acier, à savoir le taux de déformation et la vitesse moyenne de laminage.

Nous signalons que les échantillons étudiés ont été prélevés sur des bobines déjà laminées, dont les paramètres de laminage sont nombreux.

Notre étude nous a permis de constater les faits suivants, au demeurant, confortés par notre recherche bibliographique. :

- La vitesse de laminage joue un rôle important, quant à la dimension finale des grains : plus la vitesse est élevée et plus fin est le grain final.
- Le taux de déformation, de son côté, influe sur la dimension moyenne des grains obtenus suite au laminage : plus ce taux est élevé et plus les grains sont fins.

Aussi pour accroître les propriétés mécaniques, qui sont gérées en grande partie, par la dimension moyenne des grains, il y a lieu de laminier les brames avec un taux de déformation élevé et une vitesse de laminage élevée, si l'on n'avait à considérer que ces deux paramètres.

Par ailleurs, il y a lieu de signaler, que dans tout travail expérimental, il faut veiller à la reproductibilité des résultats, pour aboutir à une interprétation rigoureuse, et confirmer au mieux les phénomènes physiques. Et que les paramètres d'étude doivent être pris et varier un par un afin de dégager l'effet propre de chacun. Chose que nous n'avons pas pu faire, malheureusement, par manque de moyens et de temps, mais que nous recommandons vivement.

## **LES ANNEXES**

## Annexe A

### Historique et représentation du complexe d'EL-hadjar.

#### A- Historique.

L'entreprise nationale de sidérurgie (SIDER) a été créée, le 03/09/64 dans le cadre de la mise en application du plan de Constantine par la société bonoise de sidérurgie (SBS) pour réaliser les objectifs fixes en matière des besoins en acier et pour répondre au impératifs socio – économiques du pays.

L'entreprise nationale de sidérurgie, issue de la restructuration de la société nationale de sidérurgie (SNS), par abréviation SIDER à été créée par décret N0 83-658 du 5 novembre 1983, elle est chargée de la recherche, du développement de la production, de l'importation, de l'exportation et de la distribution des produits relevant de la sidérurgie et de la métallurgie de base et de l'élaboration de l'acier.

L'entreprise nationale de sidérurgie « SIDER » regroupe outre les structures fonctionnelles traditionnelles : direction financière, direction de personnel, direction d'administration générale, direction de développement et de la planification générale ; les structures opérationnelles suivantes :

- Complexe sidérurgique d'EL-HADJAR
- Le groupe commercial GCL
- La direction de la recherche appliquée (DRA)
- Direction des projets (les laminoirs repartis).

#### B- Activité du complexe.

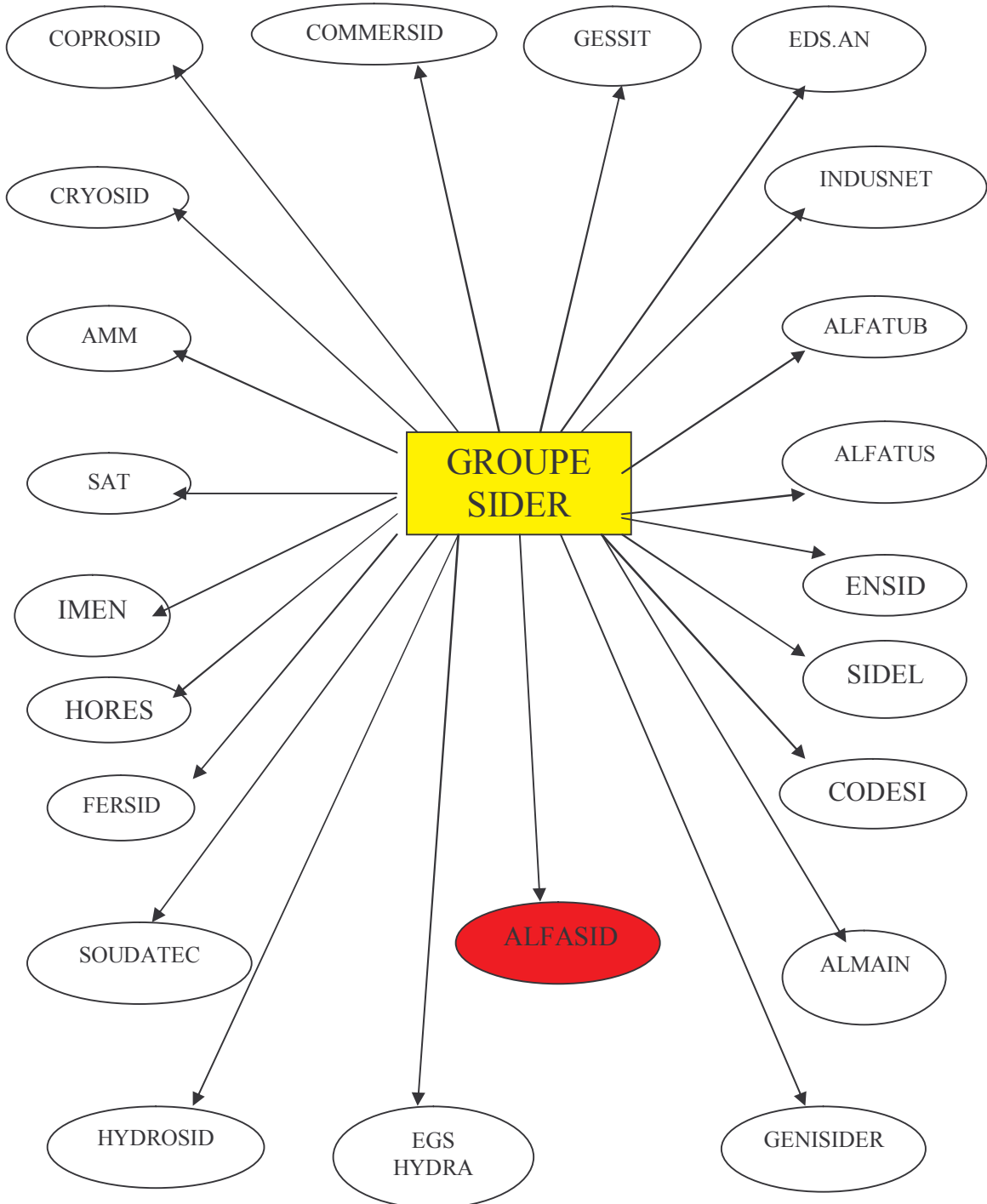
Le complexe sidérurgique d'EL-HADJAR, principal centre d'activités sidérurgique en Algérie est responsable de l'ensemble des opérations nécessaires à l'exploitation des ateliers et installations existantes.

- Ateliers de préparation des matières (minerai, charbon, aggloméré)
- Les hauts fourneaux I (HF1), le 19/06/1969
- L'aciérie à oxygène N°1 (ACO1), le 05/06/1972
- Le laminoir à chaud ainsi que la tuberie (TUS)
- Le laminoir à froid (LAF) en 1974
- Le démarrage de la tuberie sans soudure (TSS) et enfin certains ateliers, tels que le HF2, ACO2 et l'agrandissement des anciennes unités tel que l'ACO1

Le principal pôle de production est à ce jour, le complexe sidérurgique D'EL-HADJAR, situé à 15 Km de la ville Annaba, s'étendant sur 800 Hectares dont :

- Ateliers 300 h
- Stockage 300 h
- Surface de service 200 h

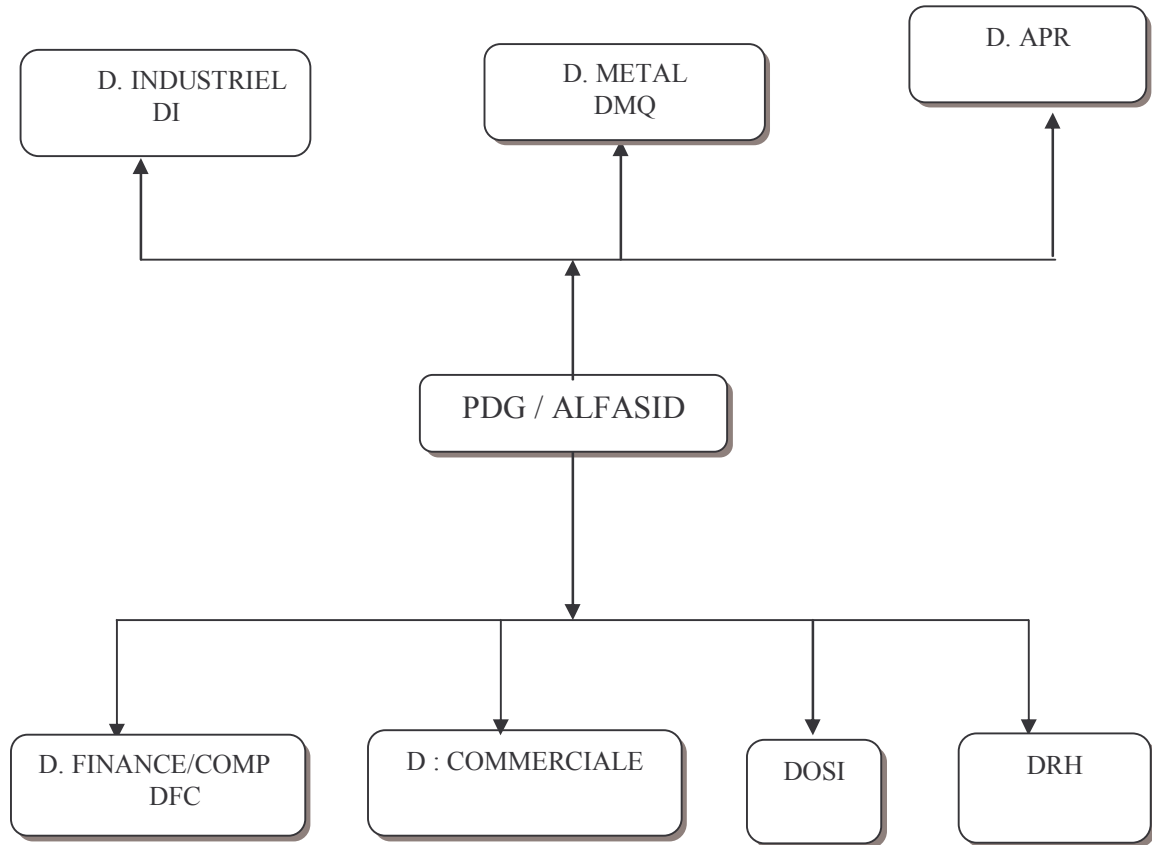
**C- Représentation de groupe SIDER**



**D- Présentation d'ALFASID**

ALFASID est la plus grande filiale, et contient les directions qui sont représentées dans l'organigramme suivant :

**L'organigramme :**



Le complexe contient un laboratoire central pour les analyses et les études des propriétés de la matière première et les produits fabriqués au niveau de ALFASID comme l'acier, la fonte et les produits laminés à chaud et à froid.

**1- Laboratoire d'analyse spéciale :** Dans ce laboratoire, on fait les analyses des échantillons, des différentes filiales du complexe ou bien de l'extérieur du complexe.

Les échantillons analysés sont : les réfractaires, les poudres des poches, les alliages (acier et fonte)

**2- Laboratoire d'analyse des matières premières** les analyses effectuées, dans ce laboratoire, sont réalisées par voie humide et par appareillage. Les échantillons analysés proviennent de la PMA où ils sont préparés et envoyés au laboratoire, les échantillon sont, entre autres, le sable, la coke, le minerai, la chaux, les bores, la poussière des gaz, ...

A titre d'exemples, nous présentons les résultats d'analyses effectuées sur certains minerais :

Les résultats des analyses, faites par Fluorescence X, des minerais d'El-Ouanza, de Boukhadhra et le minerai de la Mauritanie sont donnés dans le tableau suivant :

Elément	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	PF*	IP**
El-Ouanza	46.70	9.93	6.07	1.16	0.58	2.04	---	13.04	1.64
Boukhadhra	51.34	4.01	0.13	0.29	1.26	2.51	---	9.10	0.43
Mauritanie	64.19	0.90	4.39	0.27	0.55	0.060	1.05	1.44	0.20

\* PF : Perte au four, chauffées à 1000°C.

\*\* IP : Indice de basicité.

Vu que le minerai d' El-Ouanza et de boukhadhra sont pauvres en Fe, on leur ajoute un minerai importé, plus riche en fer (par exemple le minerai de la Mauritanie).

**3- Laboratoire d'analyse d'eaux:** Dans ce laboratoire en effectue les analyses de différents types d'eau: brute, industrielle, déminéralisée, adoucie, les eaux de rejet industrielle. On y fait le contrôle de la qualité d'eau qui sert à refroidir les différents types d'installations telle que les annexes des fours, les échangeurs de chaleur...

**4- Service de contrôle de fabrication :** Le service de spectrométrie est indispensable pour les analyses de la composition chimique des échantillons. Ils nous donnent les taux des différents éléments dans la nuance pour la fonte, l'acier, le fer à béton : C, S, Si, Mn, P, Fe...

Un exemple d'analyse de fonte est donné dans le tableau ci-dessous :

Résultat de l'analyse de la fonte par spectrométrie

Elément	C	Mn	Si	P	S	Fe
%	4.71	1.2	0.91	0.055	0.012	93.05

L'échantillon à analyser est à récupérer dans labo de spectromètre à l'aide d'un système pneumatique, dans une cartouche une fois l'analyse effectuée, le résultat est remis à l'émetteur pour qu'il puisse faire la correction de la composition chimique à obtenir.

**5- Service des essais :** Ce service contient plusieurs laboratoires différents qui sont les suivants :

- Laboratoire de métallographie.
- Laboratoire de traitement thermique et réfractaire.
- Laboratoire des essais mécaniques : essai de la dureté, de traction, et de résilience.

**5.1- laboratoire de métallographie :**

Ce laboratoire fait les examens micrographiques pour déterminer la structure des différents échantillons métalliques, en acier ou en fonte.

Avant l'observation microscopique il faut préparer convenablement l'échantillon selon les étapes suivantes : l'enrobage, le polissage, la finition et enfin l'attaque chimique.

**5.2- laboratoire de traitement thermique et réfractaire :**

Réfractaire : le labo réfractaire permet de vérifier les propriétés des produits réfractaires pour déterminer s'ils sont bien aptes à être utilisés pour un emploi donné.

**5.3- laboratoire des essais mécaniques :** où l'on compte les machines de la dureté, de traction, ainsi que celles de résilience.



## ANNEXE B

### LES DIFFÉRENT TYPES DES CAGES.

#### Types de cages [3].

La cage est l'élément de base constituant un train de laminoir. Les différents types de cages sont représentés dans les figures 1 à 7.

#### 1. Cage Duo.

Deux cylindres dont les axes sont parallèles dans un plan vertical. Leur distance peut être réglée par positionnement d'un seul axe (supérieur) ou parfois des deux axes. Les axes sont le plus souvent horizontalement, cage horizontale. Peuvent être verticaux, cage verticale. Dans certains trains continus modernes, ils peuvent même être inclinés par exemple à  $45^\circ$  alternativement à droite et à gauche, cage oblique, (figure 1) .

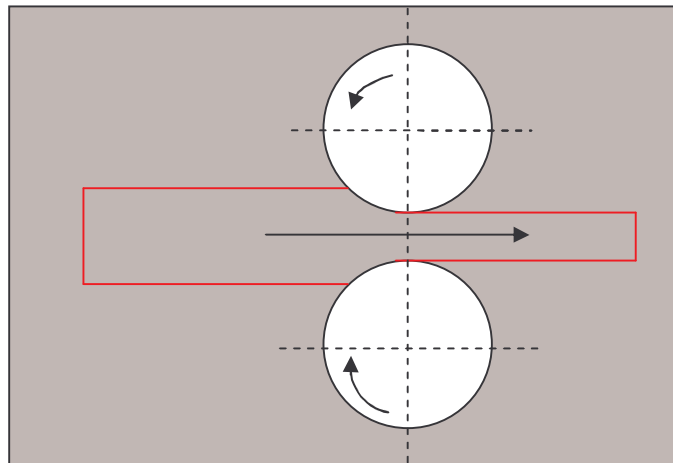
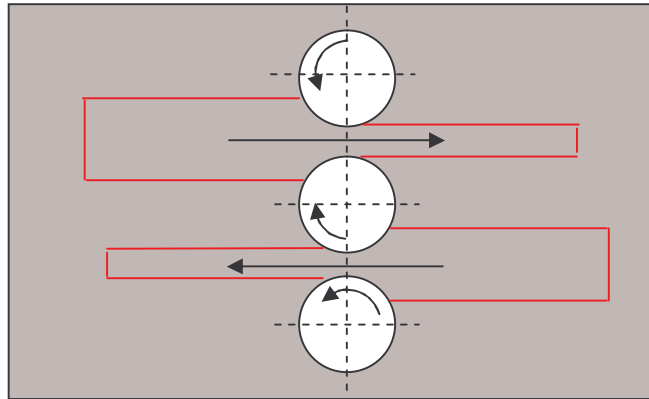


Figure 1. Cage duo

#### 2. Cage Trio.

Trois cylindres dont les trois axes sont parallèles dans un même plan vertical. En général l'axe du cylindre médian est fixe, le serrage est réalisé par descente du cylindre supérieur et levée du cylindre inférieur. L'avantage principal de la disposition en trio est de permettre les allers et retours longitudinaux du produit tout en ayant un ensemble en mouvement (moteur, cage à pignons, allonges, cylindres) dont le sens de rotation ne s'inverse jamais. Le plus souvent, la vitesse ne varie pas ce qui conduit à une attaque très simple et économique. Pour un même encombrement au sol, le trio offre plus de possibilités (nombre de passes) que le duo. Par contre les plans de laminage ne sont pas constants, ils changent en fonction des diamètres réels des cylindres (neufs ou usés). Les efforts sur le cylindre médian et ses empoises, sont constamment inversés, ce qui est mécaniquement défavorable en matière de jeu, (Figure 2) [3].

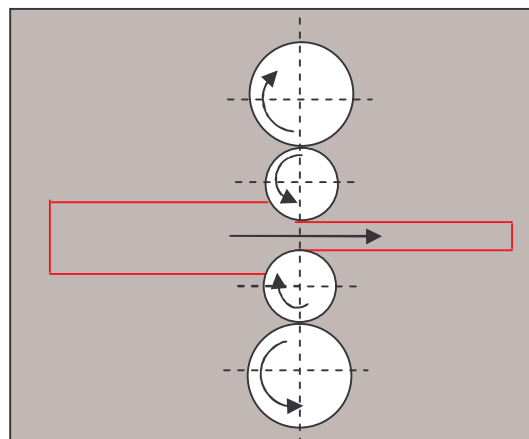


**Figure 2.** Cage trio

### 3. Cage Quarto.

Utilisé en laminage des produits plats cylindres lisses et de grande largeur. Alors le trio à deux plans de laminage superposés, (c'est-à-dire qu'il équivaut à deux duos superposés ayant le cylindre médian en commun), le quarto n'a qu'un plan de laminage, c'est-à-dire que c'est un duo très « sophistiqué » sur le plan mécanique. La tendance à la séparation et à la flexion des cylindres de travail est limitée par la présence de robustes cylindres d'appui dont c'est d'ailleurs le seul rôle.

Cette disposition donne un autre avantage : celui de revenir à des cylindres de diamètre modeste d'où des réductions et allongements forts pour un couple moteur raisonnable et un élargissement très faible, (Figure 3).

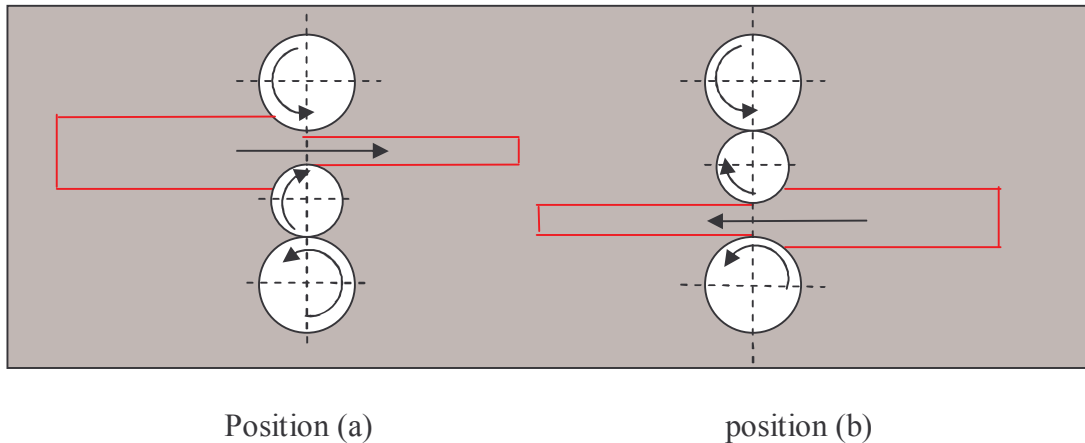


**Figure 3.** Cage Quarto

### 4. Cage Trio Lauth.

Le cylindre médian est d'un diamètre inférieur aux deux autres, Le laminage se fait tantôt en bas, tantôt en haut avec, dans chaque cas le cylindre inférieur ou supérieur jouant le rôle de cylindre d'appui.

Le cylindre médian est déplacé verticalement entre les passes (prend les position (a) et (b))  
 Les cylindres inférieur et supérieur sont également resserrés entre les passes, (Figure4).

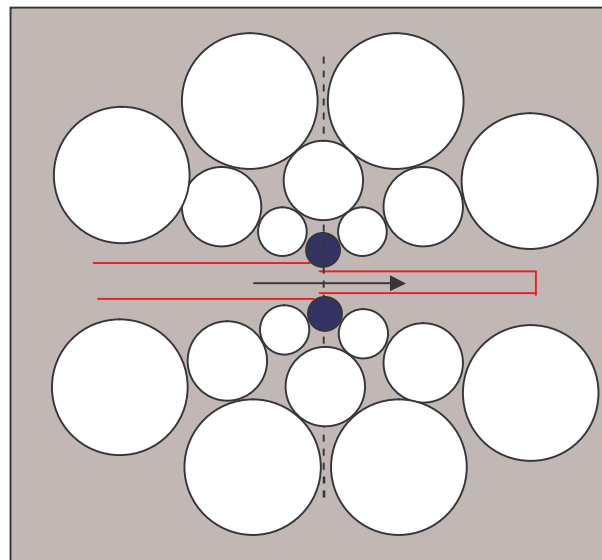


**Figure 4.** Cage trio Lauth.

### 5. Train spéciaux Sendzimir.

Ce sont des cages dans lesquelles les cylindres de travail sont choisis de diamètres inférieurs à la normale, mais sont soulagés par plusieurs autres cylindres de plus gros diamètre en nombre variable. Cette disposition permet d'augmenter la pression de laminage et donc la réduction par passe sans augmenter pour autant la puissance du moteur. Sert surtout au laminage à froid du feuillard.

La cage Sendzimir possède : deux cylindres de travail (cylindres rouges) 18 cylindres d'appui dont 10 intermédiaires, (Figure 5).



**Figure 5-** Cage Sendzimir.

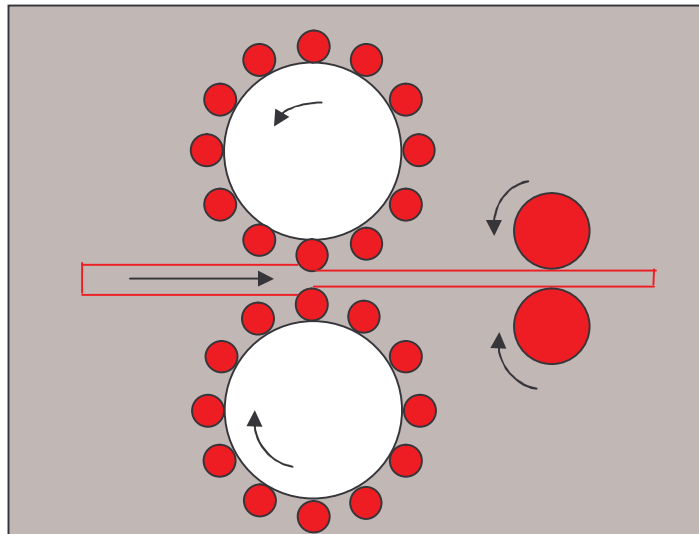
### 6. Train planétaire

Laminage à chaud de produits plats larges et minces. Deux cylindres porteurs commandés, et environ 18 rouleaux de travail sur chaque cylindre porteur.

Théoriquement très fortes réduction et obtention de l'épaisseur finale en une seule passe, inconvénients surface, dendritique, servitudes : effort engagement et d'extraction nécessaire. Cette cage n'est pas auto entraînée vis-à-vis du produit. La tenue mécanique des rouleaux de travail pose des problèmes. En pratique peu d'applications industrielles, (Figure6).

Remarque

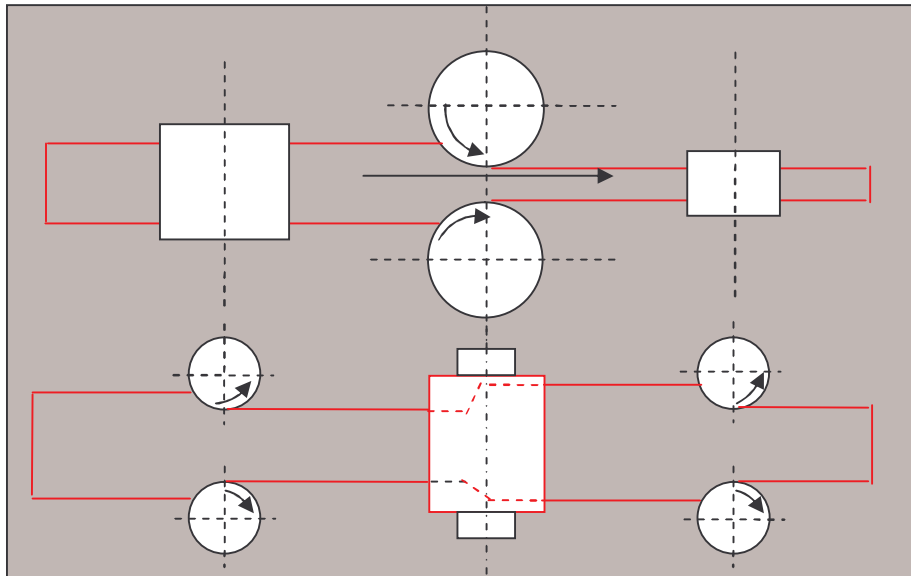
Les gros cylindres tournent dans le sens de l'écoulement du produit. Les satellites tournent en sens inverse.



**Figure 6.** Train Planétaire

**7. Cage universelles pour large plat**

Les deux paires de cylindres verticaux se trouvent de part et d'autre de la cage duo principale et dans des plans parallèles au plan vertical des cylindres horizontaux principaux. Les cylindres verticaux servent à contrôler l'élargissement de triple point de vue : Dimension, géométrie et qualité de peau, (Figure 7).



**Figure 7.** Cage universelle.

## RÈFÈRENCES BIBLIOGRAPHIE

- [1] - REGION WALLONNI. *Projet de laminoir à chaud et de laminoir à froid de l'acier*. DGRNE (1999).
- [2] - BERANGER & GUY. *Le livre de l'acier*. Lavoisier (1994).
- [3] - PE-F- SOLLAC. *Sidérurgie générale de l'acier aux produits finis*, tome 2; (1975).
- [4] - [www.raytek.com/steel\\_br\\_55501-2\\_Fra\\_revb.pdf](http://www.raytek.com/steel_br_55501-2_Fra_revb.pdf). *Industrie de l'acier fabrication et transformation*. 2002;
- [5] - GRUMBACH Marc. *Aciers microalliés*. Technique de l'ingénieur (M 4525).
- [6] - ANDORFER (J) AUZINGER (D). *Revue de Métallurgie CIT*, n°7-8 (1998), p. 883-892.
- [7] - J.-M. HAUDIN & F. MONTHEILLET. *Déformation plastique et essais mécaniques Notions fondamentales sur les matériaux*, SNPMD Editeur, Paris (1989).
- [8] - LAKHTINE. *Métallurgie et traitement thermiques des métaux*. Edition de Moscou. (1978)
- [9] - BENARD. *Métallurgie Générale*. MASSON ET Cie, EDITEURS (1969).
- [10] - HAESSNER, F. Ed. *Recrystallisation of Metallic Materials.....* (1978).
- [11] – PAWLAK. *Travail de l'acier laminage 106*-Revue Métallurgie (1979).