



Republique Algérienne Democratique et Populaire

**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

Université Larbi Tebessi

Faculté des Sciences et de Technologie

Département Génie mécanique

Mémoire de fin d'études

**Pour l'obtention du Diplôme de Master
Option : Génie des matériaux**

Thème

Contribution a l'étude du laminage à froid des aciers

Présenté par :

- Achour Oussama Zineddine
- Zemouli Soundous

Encadré par :

Dr. Mohamed Tahar HANNACHI

Devant le Jury

**Dr. Lazhar TORCHANE
Dr. M^ed Tahar HANNACHI
Dr. Bouzid LAOUADI**

**M.C.A Président
M.C.A Rapporteur
M.C.B Examineur**

**Université Larbi Tébessi- Tébessa
Université Larbi Tébessi- Tébessa
Université Larbi Tébessi- Tébessa**

Année universitaire : 2019- 2020

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. Mohamed Tahar Hannachi pour son encadrement, sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité, son aide précieux et sa bienveillance afin de mener notre travail à bon port.

Tout notre respect et nos remerciements vont vers le président et les membres du jury, qui vont pleinement consacrer leur attention afin d'évaluer notre travail, espérons qu'il le sera à la hauteur de leur attente.

Nous restons persuadés que vos conseils, remarques et critiques nous permettront de parfaire ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi, à tous le personnel du complexe sidérurgiques d'El Hadjar de Annaba et surtout L'ingénieur Abdenmour Tebessi .

Nous tenons à remercier tous les enseignants de département de Genies des matériaux de Tebessa.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicace

Je commence tout d'abord à remercier le dieu (Allah) de m'avoir donné la santé, la force, la capacité d'écrire et de réfléchir, les moyens nécessaires pour mener ce travail à terme.

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde

A MES CHERS PARENTS : *Sara Tamer et Azzedine Achour*

Tous les mots du monde ne saurait exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

C'est à travers vos encouragements que j'ai opté pour cette noble profession, et c'est à travers vos critiques que je me suis réalisée.

J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi.

Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour.

Vous résumez si bien le mot parents qu'il serait superflu d'y ajouter quelque chose. Que Dieu tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie pour que vous demeuriez le flambeau illuminant le chemin de vos enfants.

**A mes chères sœurs : *Saraet soundous et Souha*
et toute ma famille**

Merci pour votre soutien tout au long de mon parcours universitaire, pour votre appui et vos encouragements permanents

A ma fiancée : *Raphane*

Je me dois de considérer ma réussite comme une œuvre commune, merci pour ta patience, ton soutien et ta compréhension.

EN Témoignage de l'amitié qui nous uni et les souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur

A tous ceux ou celles qui me sont chers et que j'ai omis involontairement de citer.

Dédicace

A ma chère ma maman

pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs

pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A toute ma famille

pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

ملخص

لعملية الدرفلة على المعدن الصلب، كما قما بالتذكير في هاته الدراسة حاولنا تقديم التعاريف المعمقة والوصفية العامة الوصول الى الطريقة المثلى لتقليص سمك المعدن بإتقان، كل هذا مرفوقا بالدراسة بالخصائص التي تتحكم في العملية، وهذا قصد للمعدن. سلسلة التجارب الميكانيكية (كالشد والصلادة و الصدمة) قبل وبعد عملية الدرفلة على البارد الخاصة بنتائج التجريبية

ABSTRACT

In this study we have attempted to describe attentively the Cold rolling process, for steel. In the same times we giving parameters governing the rolling process. Alongside this work a series of mechanical tests wereperformed (tensile, hardness and resilience) before and after rolling.

RÉSUMÉ

Au début de notre étude nous avons tenté de décrire et définir un procédé important qui est le laminage à froid des aciers. En même temps, on a donné les paramètres gouvernant le procédé de laminage. Parallèlement à ce travail une série d'essais mécaniques à été réalisées (traction, dureté et résilience) avant et après laminage.

TABLES DES MATIERES

Résumé.....	i
Table des Matières.....	ii
Listes des tableaux et des figures.....	iii
Introductions général	1

CHAPITRE I : NOTIONS DE LAMINAGE

Introduction.....	2
I.1.Procédé du laminage.....	2
I.1.1. Laminage à froid et Laminage à chaud.....	3
I.1.2.Définition de laminage à froid.....	6
I.1.2.1. Linges du laminoir à froid.....	7
I.1.2.2. Laminoir Tandem.....	7
I.1.2.3Le réchauffage.....	9
I.2. Recuit.....	9
I.2.1. Recuit de normalisation :.....	9
I.2.2. Recuit complet.....	10
I.2.3. Recuit de régénération.....	10
I.2.4. Recuit d'adoucissement.....	10
I.3.Aspect métallurgique du procédé de laminage.....	10
I.4.Ecrouissage et restauration du métal pendant la deformation.....	11
I.5 Recristallisation dynamique.....	12
I.6.Défauts de laminage.....	13
I.6.1Défauts géométriques.....	13
I.6.2.Défautsmétallurgiques et microstructuraux.....	13
I.6.3.Défauts de surface.....	14

Conclusion.....	16
-----------------	----

CHAPITRE II : INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE LAMINEGE

II.	Différents Paramètres influençant le laminage.....	17
II.1.	Paramètres Géométriques.....	20
II.1.1	La lubrification.....	20
II.1.1.1.	Le rôle principal du lubrifiant dans le laminage à froid.....	21
II.1.2.	La vitesse.....	22
II.1.3.	Le pourcentage de réduction.....	22
II.2.	Paramètres Mécaniques.....	25
II.2.1	Les sollicitations de la matière pendant le procédé.....	25
II.2.2.	Effort de laminage.....	26
II.2.3.	Résistance des tôles laminées.....	27
II.3.	Paramètres métallurgiques de laminage.....	30
II.3.1.	Écrouissage et restauration du métal pendant la déformation.....	30
II.3.2.	Écrouissage et restauration du métal pendant la déformation.....	32
II.3.3.	Recristallisation dynamique.....	34
II.4.	Défauts de laminage.....	34
II.4.1.	Défauts géométriques.....	34
II.4.2.	Défauts métallurgiques et microstructuraux.....	36
II.4.3.	Défauts de surface	36
	Conclusion du chapitre II.....	37

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

III.1.	Procédure expérimentales.....	38
III.1.1.	Choix du métal de base.....	38
III.1.2.	Analyse chimique de l'acier	38
III.1.3.	Désignation normalisée des aciers de construction métallique	39
III.1.4.	Désignation symbolique normalisée.....	40
III.1.4.1.	Désignation numérique normalisée.....	40

III.2. Définition de microscope optique.....	42
III.2.1. Caractérisation microstructurale.....	42
III.2.1.1. Attaque chimique.....	42
III.2.1.2. Méthode	42
III.2.1.3. Les microstructures (avant et après laminage).....	42
III.3. les essais mécaniques	43
III.3.1. Les essais de traction	43
III.3.2. Description générale d'une machine de traction.....	43
III.3.3. Grandeurs mesurées.....	44
III.3.4. Expérience.....	46
III.3.4.1. Usinage des éprouvettes de l'essai de traction	47
III.4. Essais de Dureté.....	53
III.4.1. Expérience.....	54
III.4.2. le Polissage.....	55
III.5. Réduction des épaisseurs des tôles laminées	57
III.6. Discussion des résultats.....	58
III.7. Conclusion	61
Coclusion générale	61
Référence bibliographique.....	62

Liste des tableaux et des Figures

Liste des tableaux

N° Tableau	Titre	n° de page
Tableau II. 1	Défauts de profil et de planéité. Quelques remèdes [
Tableau III.1	Composition chimique du métal de base	
Tableau III.2	Constituants de l'acier	
Tableau III.3	Equivalences des nuances entre les normes NF EN 10025-2, NF 10025 et NF A 35-501	
Tableau III. 4	Désignations symbolique des aciers de Construction symboles précisant les exigences relatives à la température de transition de la résilience	
Tableau III.5	Equivalence des normes	
Tableau III.6	Correspondance entre les nuances E24 – 2	
Tableau III.7	Symbole et désignation	
Tableau III.8	Géométrie d'une éprouvette de traction déformée avant Laminage	
Tableau III.9	Les résultats expérimentaux de l'essai de traction avant laminage	
Tableau III.10	Les résultats expérimentaux de l'essai de traction déformé après Laminage	
Tableau III.11	Le résultat d'essai de dureté avant et après laminage.	
Tableau III.12	Le taux de réduction en épaisseur de tôles laminées à froid	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	La géométrie du laminage asymétrique.
Figure I.3	Train de laminage.
Figure I.5	La ligne de décapage.
Figure I.7	Bassin de recuit.
Figure I.9	Principales interactions « multiphysiques » lors de la déformation à chaud.
Figure II.1	Schéma d'une cage quarto de laminage.
Figure II.3	diagramme schématique des réductions par cages.
Figure II.5	Influence du taux de déformation par traction sur la résistance à la traction de différents aciers .
Figure II.7	Effet du taux de déformation par laminage sur les propriétés

	mécaniques.
Figure II.9	Aspects métallurgiques du laminage .
Figure I.1	La géométrie du laminage asymétrique.
Figure I.3	Train de laminage.
Figure I.5	La ligne de décapage.
Figure I.7	Bassin de recuit.
Figure I.9	Principales interactions « multiphysiques » lors de la déformation à chaud.
Figure II.1	Schéma d'une cage quarto de laminage.
Figure II.3	diagramme schématique des réductions par cages.
Figure II.5	Influence du taux de déformation par traction sur la résistance à la traction de différents aciers .
Figure II. 7	Effet du taux de déformation par laminage sur les propriétés mécaniques.
Figure II.9	Aspects métallurgiques du laminage.
Figure II.10	Aspects métallurgiques du laminage .
Figure II.11	Évolution de la taille de grain austénitique en fonction de la température de réchauffage.
Figure III.1	Microstructures de l'acier avant laminage.
Figure III.2	Microstructures de l'acier après laminage
Figure III.3	Courbe de traction.
Figure III.4	La machine de traction.
Figure III.5	Eprouvettes de traction
Figure III.9	Type d'éprouvette expérimentale de traction.
Figure III.10	Éprouvette pendant l'essai sur machine de traction.
Figure III.11.a.	Courbe de traction déformée avant laminage de l'éprouvette
Figure III.11.b	Courbe de traction déformée après le recuit de l'éprouvette
Figure III.12	Courbe de traction déformée après laminage tracée par Castem20
Figure III.13	La machine de la dureté
Figure III.14	Machine de traction pendant l'essai avant laminage.
Figure.III.15	comparaison de la dureté (HRB) avant et après laminage
Figure III.16	Variation de la vitesse de laminage par cage.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Divers procédés de formage se sont imposés dans l'industrie et connaissent un développement continu sur la base de l'expérience pratique [1]. Le choix du procédé implique de considérer les propriétés du matériau ou du semi-produit. Chaque matériau se comporte différemment en termes de température de ramollissement, de reprise élastique, de recristallisation et de dilatation thermique. Les informations des produits vous donnent un aperçu des propriétés des semi-produits thermoplastiques, ainsi que quelques conseils de formage [2].

Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Il ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid. En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques des produits. Le produit passe entre deux cylindres tournant en sens inverse qui lui font subir une réduction d'épaisseur au profit de la longueur. Par laminage, on obtient des produits en feuille (tôle) ou des profilés (rail, barre, poutrelles). La réduction d'épaisseur varie de 20 à 90 % suivant la température, le type de laminoirs et le nombre de passe. On distingue le laminage à chaud et le laminage à froid. Le laminage à froid est généralement utilisé pour obtenir des épaisseurs faibles et inférieures ou égales à 3mm. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface. Les cages des laminoirs sont généralement composées de deux ou plus de cylindres de travail de faible diamètre, assurant le laminage. Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise [3].

L'objectif de ce travail est

- la description et la caractérisation du procédé de laminage à froid des tôles en acier, qui permet d'obtenir des bandes minces, en réduisant progressivement les épaisseurs.
- Décrire les Identifier les différents les paramètres définissant et influençant le procédé de laminage à froid.
- Mesurer expérimentalement les taux de réduction des épaisseurs.

- Pour cela notre travail est composées de trois chapitres :

Deux chapitres qui traitent les notions et les définitions générales de procédé de laminage.

- Chapitre1 : notions fondamentales de Laminage.
- Chapitre2 : Paramètres Influençant les procédés de laminage à froid.

On évalue les résultats des essais réaliser avant et après laminage et de mener une analyse des

résultats expérimentaux pour les deux types d'éprouvettes. Elle est composée d'un seul chapitre.

- Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et Analyse.

2020

Chapitre I

Notions de laminage



I. Introduction

Cette partie a pour but de rappeler les notions utiles à la compréhension du laminage et de classer les divers travaux qui ont été réalisés sur ce procédé intéressant.

I.1. Procédé du laminage

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

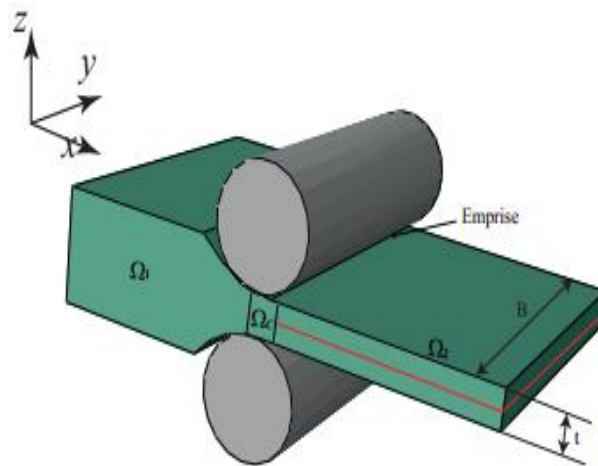


Figure I.1: Schéma illustrant le laminage des tôles [4].

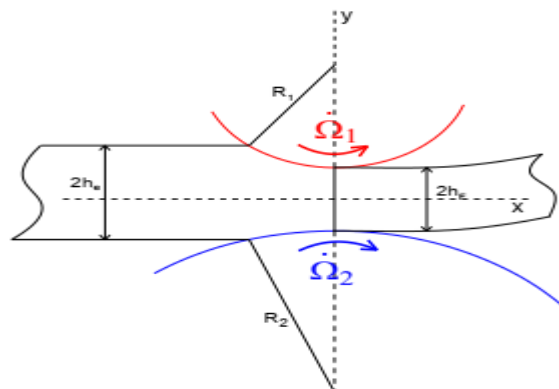


Figure I.2: La géométrie du laminage asymétrique [5].

D'un point de vue métallurgique, c'est obtenir des caractéristiques mécaniques ou métallurgiques supérieures ; l'opération précédente, qui peut être la coulée, ne donnant pas satisfaction sur ce point. Dans le cas du laminage à chaud, les structures de solidification sont détruites ou au moins modifiées. Les soufflures sont écrasées, allongées et même souvent ressoudées.

D'un point de vue mécanique, on met en œuvre des forces, des puissances, des masses, des organes souvent importants, pour l'obtention de la géométrie adéquate pour le produit final. Le procédé de laminage asymétrique permet de réduire l'épaisseur d'une tôle (ou d'un produit) par passage entre deux cylindres qui n'ont pas les mêmes diamètres (asymétrie géométrique) ou/et ne tournent pas à la même vitesse (asymétrie cinématique) ou/et n'ont pas les mêmes états des surfaces ou/et de température différente. L'asymétrie peut aussi être engendrée par une asymétrie dans les propriétés de la tôle à l'entrée comme : un gradient de température entre le haut et le bas ou une différence des paramètres rhéologiques de cette dernière.

I.1.1 Laminage à froid et Laminage à chaud

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales [6] et [7]:

- la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température.
- La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.

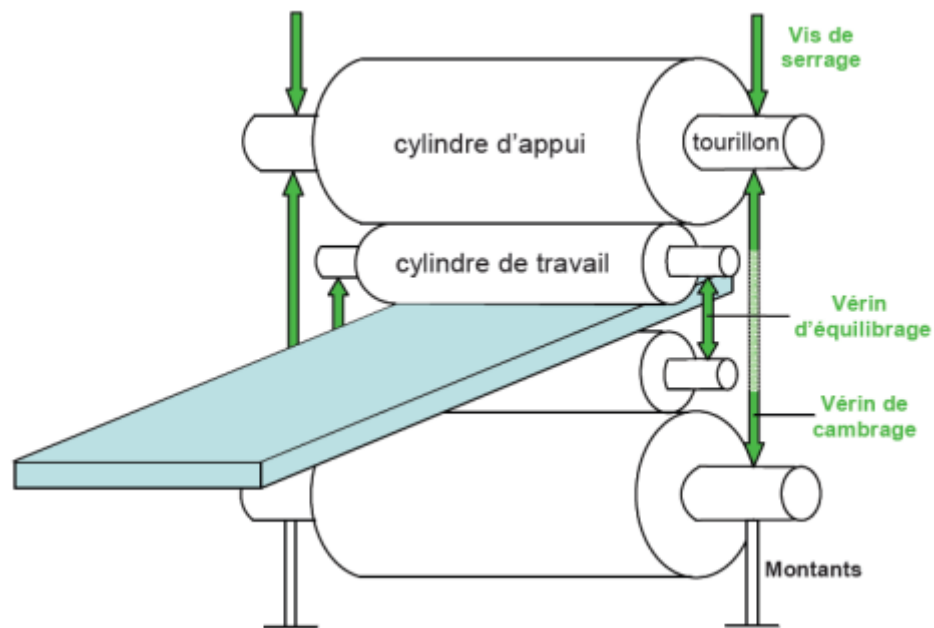


Figure I.3: Schéma d'une cage quarto de laminage [7].

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand, comme schématisé sur la Figure I.3.

Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise. Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage (figure I.4). Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-traction de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

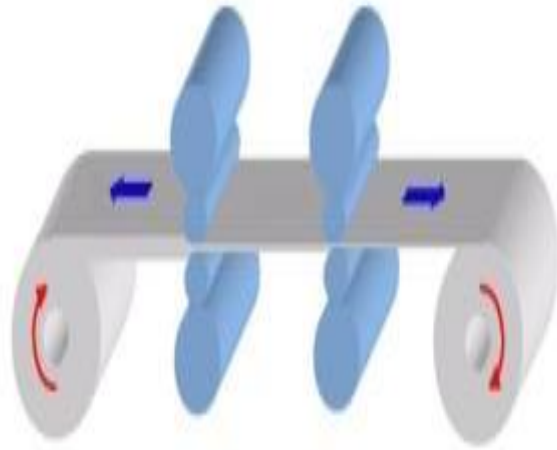


Figure I.4: Train de laminage [7].

A froid, un traitement thermique peut être fait pour restaurer la structure et éviter la rupture par endommagement. Au contraire pendant le laminage à chaud, la recristallisation dynamique s'effectue au cours de la déformation tant que la température du produit le permet (figure I.5).

Le laminage à froid n'est nécessaire généralement que pour obtenir des tolérances serrées, et un bon état de surface. D'un point de vue pratique, la différence entre le procédé à chaud et le procédé à froid tient donc surtout à la différence des géométries des produits qu'ils traitent. En l'occurrence, plus épais pour les laminages à chaud et plus minces pour les laminage à froid.

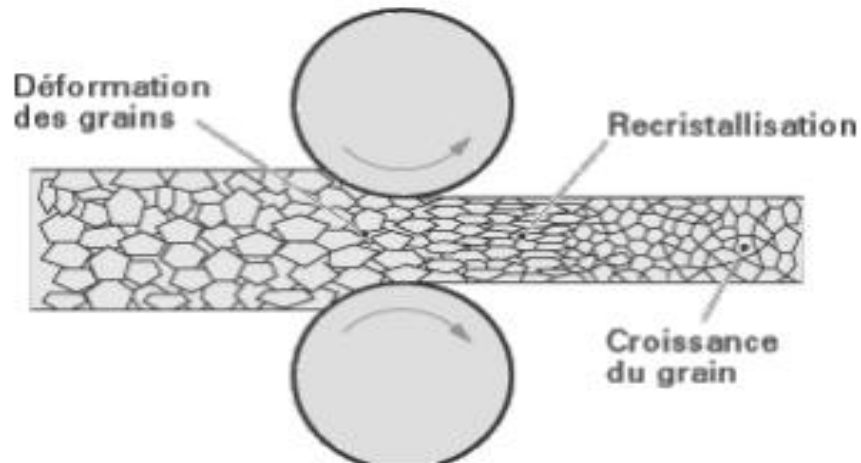


Figure I.5: Recristallisation dynamique au cours du laminage à chaud [7].

I.1.2. Définition de laminage à froid

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage (figure I.2). Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-traction de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage. A froid, un traitement thermique peut être fait pour restaurer la structure et éviter la rupture par endommagement. Au contraire pendant le laminage à chaud, la recrystallisation dynamique s'effectue au cours de la déformation tant que la température du produit le permet. Le laminage à froid n'est nécessaire généralement que pour obtenir des tolérances serrées, et un bon état de surface. D'un point de vue pratique, la différence entre le procédé à chaud et le procédé à froid tient donc surtout à la différence des géométries des produits qu'ils traitent. En l'occurrence, plus épais pour les laminages à chaud et plus minces pour les laminages à froid [8].

I .1.2.1. Linges du laminoir à froid

❖ Le décapage

La SNS possède une ligne de décapage continu. Cette ligne a été mise en service en 1974 , une extension à cette ligne mise en service fin 1978 a permis de tripler la production de 250000 T/an à 750000 T /an.

La ligne de décapage reçoit les bobines du laminoir à chaud et a pour rôle de décalaminer mécaniquement et chimiquement, de planer, de cisailer les rives.

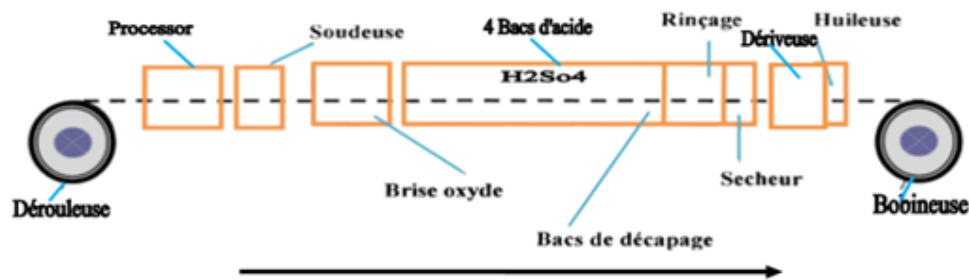


Figure I.5 : La ligne de décapage

I.1.2.2. Laminoir Tandem

Le laminoir tandem a été mis en service en 1980. Il est constitué de 5 cages quarto et peut laminier des bobines de 24 t et d'une largeur maxi 1350 mm. Il reçoit les bobines venant du décapage et a pour rôle de laminier la bande par une réduction d'épaisseur en une seule passe jusqu'à l'épaisseur finale désirée, en lui sollicitant une traction et une pression sous l'effet de deux cylindres de travail épaulés par deux cylindres d'appui. A l'entrée (première cage) l'épaisseur maximale est de 4,5mm et minimale 1,5mm, et à la sortie (tandem), l'épaisseur maximale est de 2 mm et minimale 0,16mm. Sa production nominale est de 900.000 tonnes .

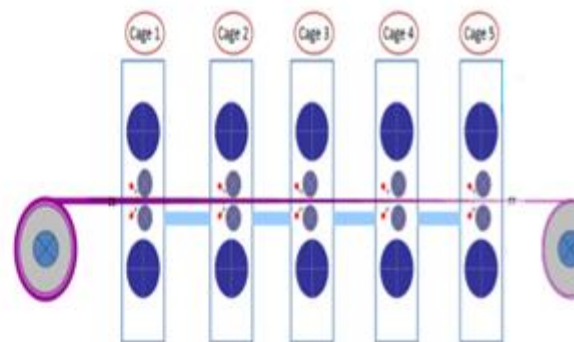


Figure I.6 : La ligne de tendem

Après laminage à froid le métal fortement ecroui serait impropre à toute utilisations s'il n'était pas soumis à un traitement thermique qui lui restitue ses propriétés mécaniques ,en particulier sa formabilité,il ya une installatin de recuit de bobines serrées par four é cloche mobile, les fours se composent de trois éléments :

- ✱ Base.
- ✱ Coiffe de protection.

✿ Cloche mobile chauffante qui vient recouvrir le tout.

Le cycle de recuit est généralement le suivant :

- ✓ Une base en cours de chargement ou déchargement.
- ✓ Une base en cours de chauffe (base – coiffe de protection – four).
- ✓ Une base en cours de refroidissement (base – coiffe de protection – coiffe de refroidissement).
- ✓ Une pile en cours de 2ème refroidissement.

Le recuit des bobines serrées s'effectue sur des bases comportant un dispositif de circulation destiné à accélérer les échanges thermiques .la charge se compose de bobine superposées qui constituent les piles (5 bobines de largeur max de 900mm par pile).

Chaque pile est coiffée d'une cloche étendue par joint torique au sable sous laquelle on envoie un gaz de protection (gaz HNX95 % N, 5% H2), afin d'éviter toute oxydation du métal et tout dépôt de carbone sur la taule pendant l'opération.

Un four à cloche, venant coiffer l'ensemble assure le chauffage de la charge à une température voisine de 700 C°.

- poids d'un four 22.5t.
- 12 brûleurs disposés tangentiellement à la cloche et répartis en 2 étages.
- combustible : gaz naturel (pré mélange d'air et gaz circulant à grande vitesse).

Après une durée de maintien qui dépend du métal à recuire et des caractéristiques à obtenir, on enlève la cloche chauffante et la charge se refroidit.

Le refroidissement extra cool utilise des échangeurs de chaleur et des ventilateurs extérieurs. Ils sont isolé des gaz chauds pendant le chauffage, au cours du refroidissement une partie du gaz (HNX) est déviée à travers le système externe, il est envoyé dans un échangeur grâce à la ventilation et ensuite est réintroduit refroidie dans la base.

Tous les gains et tous les dispositifs sont parfaitement étendus aux infiltrations d'air, car ce sont les principaux risques pour la qualité du produit.

Après refroidissement extra- cool, un second refroidissement est utilisé. On retire les bobines des bases pour les mettre sur une installation de ventilation, accélérant ainsi le temps de refroidissement nécessaire entre la température de décrochage et la température au SKIN.PASS



Figure III.6. Bassin de recuit

I.1.2.a Le réchauffage

Le réchauffage des aciers au carbone et des aciers microalliés comporte trois objectifs principaux :

- Le premier, d'ordre mécanique, est simplement de porter le métal à une température suffisante pour diminuer les efforts de formage, accroître la ductilité de l'acier de façon à pouvoir lui appliquer des déformations importantes, et de finir le laminage dans le domaine austénitique.
- Le second objectif, qui est plutôt une conséquence favorable du premier, est de se placer dans le domaine austénitique avec, pour conséquences, d'effacer partiellement la structure très grossière issue de la solidification et de réduire les gradients de composition dus au phénomène de ségrégation.
- Enfin, l'objectif essentiel de cette phase de réchauffage est la remise en solution des précipités apparus au cours de la solidification, en premier lieu parce qu'ils sont trop gros, et donc pas assez nombreux pour contribuer au durcissement de l'acier à température ambiante, et parce que les éléments tels que le niobium, le titane ou le vanadium jouent un rôle très important sur l'évolution de la structure au cours du laminage et de la transformation « allotropique ? » lorsqu'ils sont en solution solide [7].

I.3. Recuit

Les traitements de recuit présentent une grande diversité, certains d'eux sont mis en œuvre pour éliminer les hétérogénéités structurales et chimiques dans les pièces brutes de fonderie ou de forge, et d'autres sont utilisés pour obtenir des structures dont les caractéristiques mécaniques répondent à la manière la plus satisfaisante à l'utilisation dans l'industrie ; on distingue :

I.3.1. Recuit de normalisation :

En matière d'acier, le recuit ou la normalisation ont tous deux pour objet d'obtenir, au moyen d'un chauffage au dessus de point A3 provoquant l'austénitisation complète de la zone ou de la pièce traitée, suivi d'un refroidissement relativement lent, une structure affinée constituée de ferrites de perlite qui remplace, quelle qu'elle aient été, la constitution et la structure à l'état brut de soudage. La normalisation, qui comporte un refroidissement moins lent que le recuit, produit une perlite dont l'espace inter lamellaire est plus faible, donc plus dure que ne le fait le recuit. Pour certains aciers faiblement alliés, la normalisation peut provoquer une trempe de type bainitique et requérir de ce fait un traitement ultérieur de revenu.

Du point de vue du mode de mise en œuvre, le traitement global simultané est le plus complet car il affecte tout l'ensemble traité, sans gradient de température ; il produit donc uniformément l'effet métallurgique recherché aussi bien dans la zone fondue et thermiquement affectée que dans le métal de base, qui bénéficie de la même régénération thermique, s'il a été déformé à froid ou à haute température (emboutissage à froid ou à chaud). S'il s'agit d'un ensemble important et lourd, le traitement global peut poser des problèmes pratiques difficiles de déformation ou d'encombrement. On peut être amené à étayer les pièces pour éviter leur déformation et, pour les pièces trop importantes pour être normalisées en une seule fois, telles que les longues viroles, on peut traiter successivement chaque moitié qu'on introduit dans le four cependant que l'autre dépasse à l'extérieur. On peut aussi normaliser séparément chaque élément de virole, dont la soudure longitudinale, placée verticalement dans le four bénéficie du traitement sans risque de déformation; on assemble ensuite les viroles entre elles et en termine alors par un traitement de relaxation global, sans normalisation des soudures circulaires.

I.3.2. Recuit complet

On parle de recuit complet lorsque le refroidissement est lent (refroidissement au four). Il consiste en une austénitisation au dessus d'Ac3, on aura une résistance à la rupture, une limite élastique et une dureté faibles, et une ductilité élevée.

I.3.3. Recuit de régénération

C'est un recuit qui comprend : Un chauffage sans maintien prolongé, à une température légèrement supérieure à Ac3 de manière à obtenir une austénite de grains fins suivi d'un refroidissement à vitesse convenable conduisant à une structure fine.

I.3.4. Recuit d'adoucissement

Ce type de recuit consiste en un chauffage juste au dessous d'Ac1, un maintien à cette température, suivi d'un refroidissement lent pour obtenir un état suffisamment adouci et aussi exempt de contraintes que possible [9].

I.1.3 Aspect métallurgique du procédé de laminage

D'un point de vue métallurgique, le laminage apparaît comme une succession de déformations (des passes) qui vont engendrer un écrouissage (et restauration éventuellement) du métal, et de temps d'attente (les inters passes) pendant lesquels la structure de l'acier pourra évoluer. Le laminage asymétrique a le même aspect opératoire que le laminage classique sauf que les rayons, les vitesses et les rugosités des cylindres peuvent être différentes (Figure I.1.1).

I.1.3.1 Ecrouissage et restauration du métal pendant la déformation

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. La déformation plastique se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable. La présence des dislocations et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie stockée sous forme de dislocations. Dans le présent travail nous traitons la déformation plastique, dans ce cadre le nombre de dislocations va rapidement croître ce qui va conduire au durcissement de l'acier, et est couramment appelé : Phénomène d'écrouissage. A la création de ces dislocations vont être opposés différents mécanismes conduisant à leur élimination et donc à l'adoucissement du matériau ; ce sont les phénomènes de restauration et recristallisation.

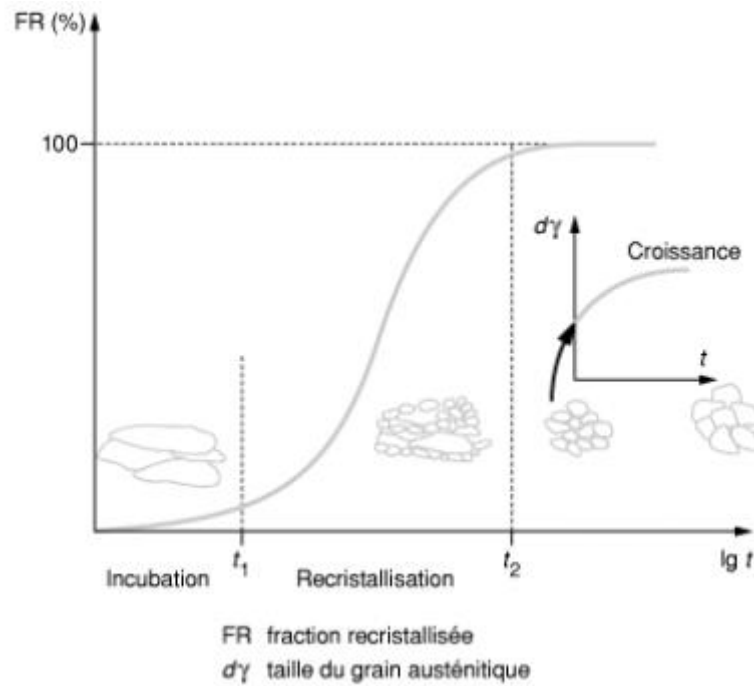


Figure I.1.5 Cinétique de recristallisation statique [7].

I.1.3.2. Recristallisation dynamique

Comme pour la recristallisation statique, la recristallisation dynamique en phase austénitique procède par germination et croissance de nouveaux grains. La première spécificité de la recristallisation dynamique réside dans le fait que l'environnement du nouveau grain recristallisé continue de s'écrourir avec le ralentissement de sa croissance. La recristallisation dynamique conduit donc à un affinement très important de la structure, au moins jusqu'à l'arrêt de la déformation. La seconde spécificité du phénomène est que la structure peut recristalliser plusieurs fois de suite au cours de la déformation. Contrairement au cas de la recristallisation statique, l'avancée de la recristallisation dynamique ne dépend pas du temps mais de la déformation appliquée. Les cinétiques sont également exprimées sous la forme d'une loi d'Avrami où le paramètre temps est remplacé par le paramètre déformation [7].

$$FR(t) = 1 - \exp(-k\varepsilon^n) \tag{I.2}$$

I.1.4 Défauts de laminage

I.1.4.a Défauts géométriques

Les machines et les outils (cylindres, cages...) ne sont pas infiniment rigides, se déforment, et cèdent élastiquement sous les efforts appliqués. Cela perturbe aussi la géométrie des produits, créant des problèmes de profil et de planéité des produits plats. Des problèmes de réglage des outils de production peuvent avoir des conséquences du même ordre.

Des défauts géométriques peuvent apparaître à la suite de la déformation locale du rouleau en contact avec la tôle dans l'emprise [7] : Les contraintes de pression dans le contact sont relaxées par l'élargissement de la tôle qui est fort si les rapports épaisseur/largeur et épaisseur/longueur de contact sont grands (c'est le cas du laminage à chaud). Cet élargissement est faible car inhibé par le frottement des outils dans le cas du laminage à froid; les contraintes de contact, donc les déformations des cylindres, seront très fortes si on lamine des produits minces parce que les effets du frottement seront exacerbés par le grand rapport surface/volume. Le rôle des efforts de tension et contre tension imposées par les moteurs de bobinage est dans ce cas primordial pour minimiser ces défauts. A ces défauts d'origine mécaniques se superposent des déformations d'origine thermiques, liées à la dilatation, qui conduit à une hétérogénéité du diamètre du cylindre le long de son axe. Ces dilatations peuvent entraîner des hétérogénéités d'épaisseur des produits finaux.

I.1.4.b Défauts métallurgiques et microstructuraux

Les défauts microstructuraux sont très dépendants de l'alliage considéré. Ce sont des tailles de grains hétérogènes, des textures cristallographiques mal orientées, des inclusions non métalliques, des porosités, des fissures. Certains de ces défauts sont hérités des structures de coulée [8].

Les discontinuités (porosités, fissures et criques), qui relèvent des phénomènes et mécanismes d'endommagement des matériaux, sont engendrées par la conjugaison d'états de contrainte de tension et de l'existence d'hétérogénéités : d'où un couplage mécanique/métallurgie à l'échelle microscopique [10]. De plus les paramètres de structure granulaire et de texture évoluent autant par la déformation elle-même que lors des recristallisations induites par la déformation à chaud (recristallisation dynamique) ou lors des traitements thermiques (recristallisation statique).

Leur prévision passe par l'utilisation des modèles de métallurgie physique appropriés, eux-mêmes couplés à la thermomécanique [11].

I.1.4.c Défauts de surface

Parmi les défauts de surface se distinguent les défauts de type chimique comme la corrosion, incrustation d'oxyde, pollutions par les lubrifiants ou des défauts de rugosités. Ce dernier cas est très directement contrôlé par la mécanique du contact produit-cylindre [12]. Des microfissures peuvent provenir de contraintes de traction superficielle, des porosités peuvent être la conséquence du piégeage de lubrifiants (poches d'huile) ou de phénomènes de corrosion, du rebouchage incomplet de trous initiaux induits par un décapage par exemple.

Pour minimiser ces déformations ou corriger ces défauts, on peut recourir à des actionneurs de profil, en pratique des vérins d'équilibrage du cylindre de travail ou de cambrage des cylindres d'appui. Le pilotage de ces actionneurs n'est toutefois pas aisé. D'autres techniques de correction peuvent être utilisées : la translation des cylindres de travail (roll shifting) [13], le refroidissement ou la lubrification différentielle, ou encore le désaxement des cylindres haut / bas (pair-cross)...Tous ces problèmes de géométrie ne seront pas pris en compte dans notre modélisation. Et pour conclure, on peut résumer les principales interactions, métallurgiques, thermiques et mécanique.

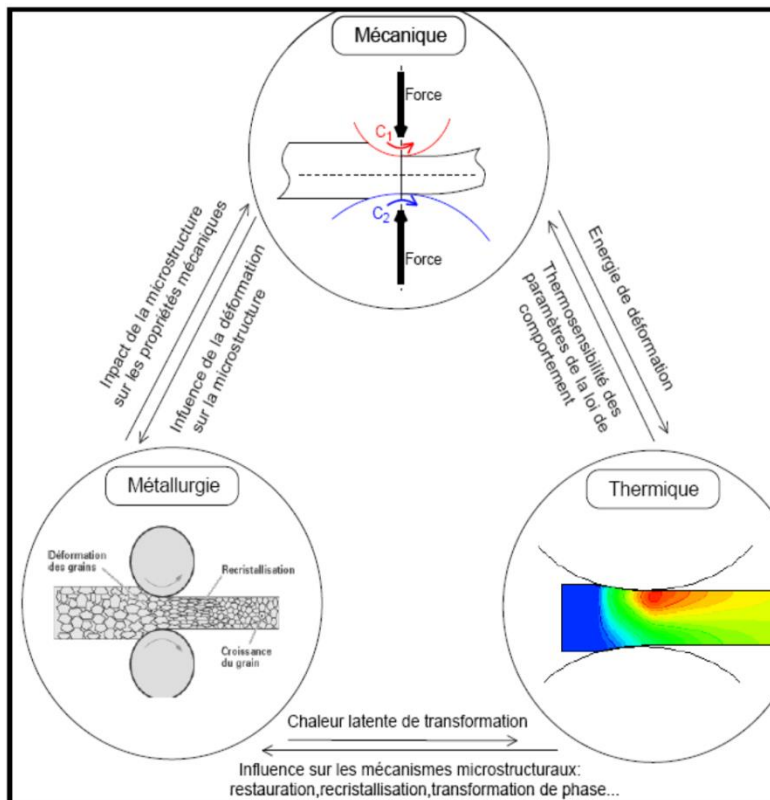
I.5. Conclusion du chapitre I

Dans ce chapitre on a pu définir le procédé de laminage comme un moyen de mise en forme. Le laminage à froid est généralement utilisé pour obtenir des épaisseurs faibles et inférieures ou égales à 3mm. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface, mais également comme un moyen métallurgique d'amélioration des aciers.

2020

Chapitre II

Paramètres Influençant le Laminage à Froid



II. Différents Paramètres influençant le laminage

Mettre en forme un matériau, c'est lui conférer de manière contrôlée et reproductible trois types de propriétés :

- Une forme géométrique, avec des tolérances fixées – de plus en plus sévères.
- Des propriétés mécaniques, qui requièrent une microstructure (au sens large) adéquate.
- Des propriétés de surface, au premier rang desquelles l'aspect visuel, lié à la rugosité.
- Le formage des métaux à froid entraîne des modifications plastiques de la forme d'un corps solide. Pendant ce processus, avec des conséquences parfois néfastes :
 - Géométriques (dimensions, écarts de forme) ;
 - Mécaniques (contraintes résiduelles) ;
 - Métallurgiques (structure, taille des grains, fissures).

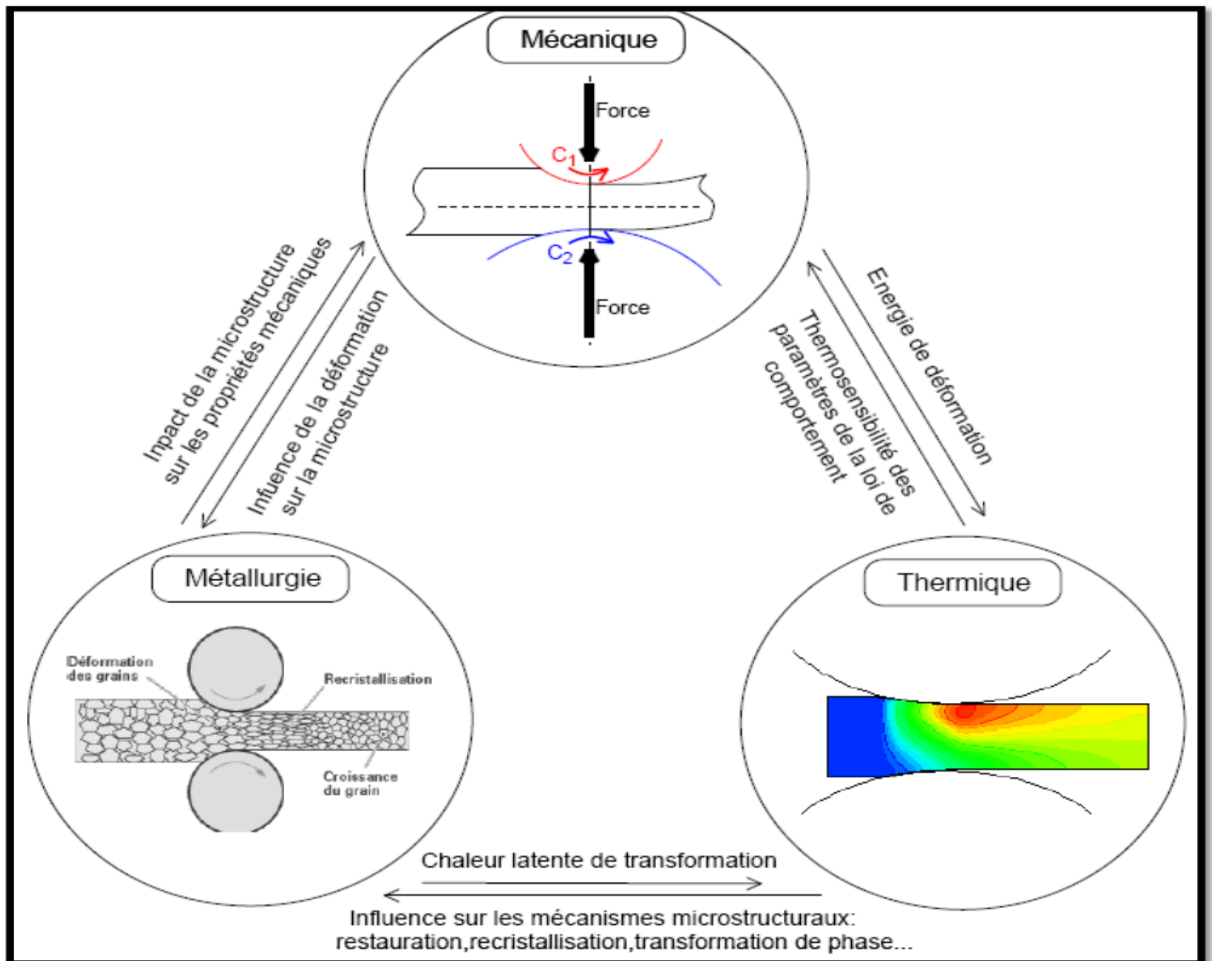


Figure II.1 : Principales interactions lors de la déformation à chaud [14].

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales [15] et [16]:

- la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température.
- La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal.
- Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit.

Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.

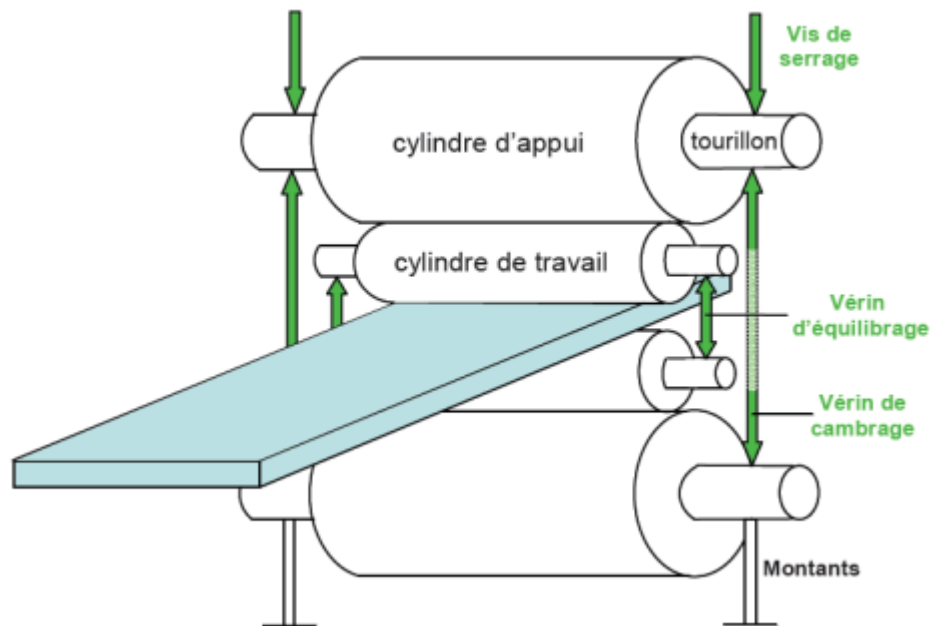


Figure II.2: Schéma d'une cage quarto de laminage [16].

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand, comme schématisé sur la Figure II.3.

Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise.

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage (figure I.4). Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-traction de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

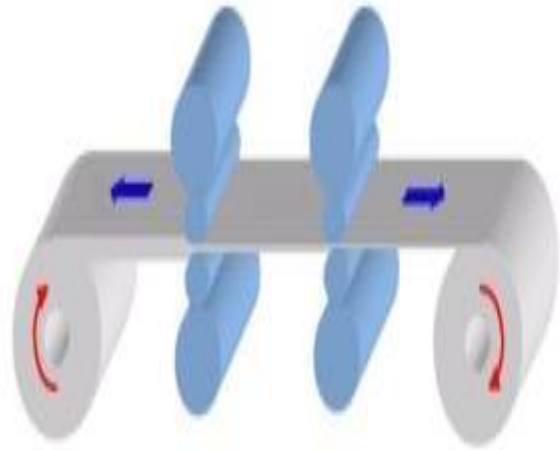


Figure II.3: Train de laminage [16].

II.1. Paramètres Géométriques

Il y a six paramètres jugés importants qui influencent l'étirage pour l'utilisation d'un même matériau initial. Ces paramètres sont la lubrification, la vitesse de laminage, le pourcentage de réduction, la planéité, la géométrie des filières et des mandrins ainsi que les variations dans la géométrie de la matière première.

II.1.1 La lubrification

La lubrification a une influence sur la friction aux interfaces de contact entre le métal et l'outillage. Elle a, par le fait même, une influence sur le fini de surface. Certains types d'huile permettent un meilleur glissement de la bande aux interfaces de contact et réduisent la force laminage pour une même vitesse, Névés [17] a observé des variations de l'effort de traction de plus de 38%. Des analyses de la rugosité de surface de tubes étirés avec différentes

huiles ont été effectuées par Bourget [18]. Un changement de la qualité de la surface est remarquable. Il n'y a toutefois pas eu d'expérimentation sur les forces d'étirage engendrées par ces différents lubrifiants.

Les performances d'un lubrifiant peuvent être évaluées selon deux paramètres afin de réduire la friction et les bris lors de l'étirage. Ces deux paramètres sont l'épaisseur de la couche de lubrifiant et la susceptibilité du tube d'être en contact avec l'outillage [19].

II.1.1.1. Le rôle principal du lubrifiant dans le laminage à froid

–**Réduction du frottement** : le lubrifiant est indispensable pour la réduction des forces de laminage, produire une haute qualité de l'état de surface de la bande en acier laminé, avec un meilleur contrôle du profil de la tôle, et réduire aussi le dépôt des ordures sur tôle.

–**Refroidissement** : la lubrification permet de minimiser la température du cylindre de travail, la chaleur est causée à partir de la friction ainsi que la déformation, l'eau est un bon moyen de refroidissement, mais un pauvre lubrifiant. On peut citer les paramètres utilisés et qui ont influences :

–**Emulsion** : contient 1,5-5% de surfactant ce qui empêche la cassure de l'huile libre dans des layers séparés, donc pas besoin d'agiter.

–**Dispersion** : dans lequel les surfactants forment une couche protectrice sur la surface de la particule de l'huile en éliminant la coalescence, la distribution de la granulométrie des particules est plus étroite que dans le cas de l'émulsion. En position verticale la couche d'huile se sépare et peut facilement être dispersée par agitation mécanique.

Pour des Dispersions stables, le système entre émulsions et dispersions aucune, agitation n'est recommandée.

La propreté des surfaces : les lubrifiants causent le dépôt du Charbon.

II.1.2. La vitesse

La vitesse de laminage a une influence sur les efforts de traction. En général, une augmentation de la vitesse engendre une diminution de la force de laminage. La force sur le diminue aussi de son côté [18] accordent cette diminution à une baisse de la friction causée par un épaissement du film d'huile entre le tube et l'outillage. Cet épaissement cause par contre une rugosité plus élevée sur les bandes laminées. Toutefois

puisque la rugosité au final est fonction du pourcentage de réduction, il est possible que pour une vitesse plus élevée, donne un pourcentage de réduction approchant 50 % en une seule passe obtienne le même fini de surface plus faible.

II.1.3. Le pourcentage de réduction

La déformation maximale que l'on peut faire subir à l'acier est fonction des propriétés mécaniques avant et après laminage. En effet, plus le tube sera initialement déformable, c'est-à-dire un allongement à la rupture élevé, plus il sera possible de réduire sa section. Par contre, un pourcentage de réduction plus élevé entraîne des efforts plus importants attribués à l'augmentation de la déformation plastique. Cette augmentation de la déformation plastique implique aussi des forces de contact plus élevées entre bande et l'outillage, augmentant ainsi la friction aux interfaces Paré [19] a donné une plage de pourcentage de réduction pour les bandes en acier. Un pourcentage de réduction de 65 % a été obtenu en trois passes. Les propriétés mécaniques en aciers actuels avant laminage permettent donc des déformations élevées. Les facteurs qui restreignent la déformation maximale en une seule passe sont alors les propriétés mécaniques du tube après étirage La contrainte de traction doit être inférieure à la limite élastique du matériel écroui en sortie des filières.

$$H_0 - H_1 = \Delta H \quad (\text{II.1})$$

La distribution d'une manière harmonique des épaisseurs de la bande laminée à la sortie de chaque cage du laminoir tandem à 5 Cages va minimiser la consommation de l'énergie et crée du profit au niveau des résultats économiques du laminage tandem.

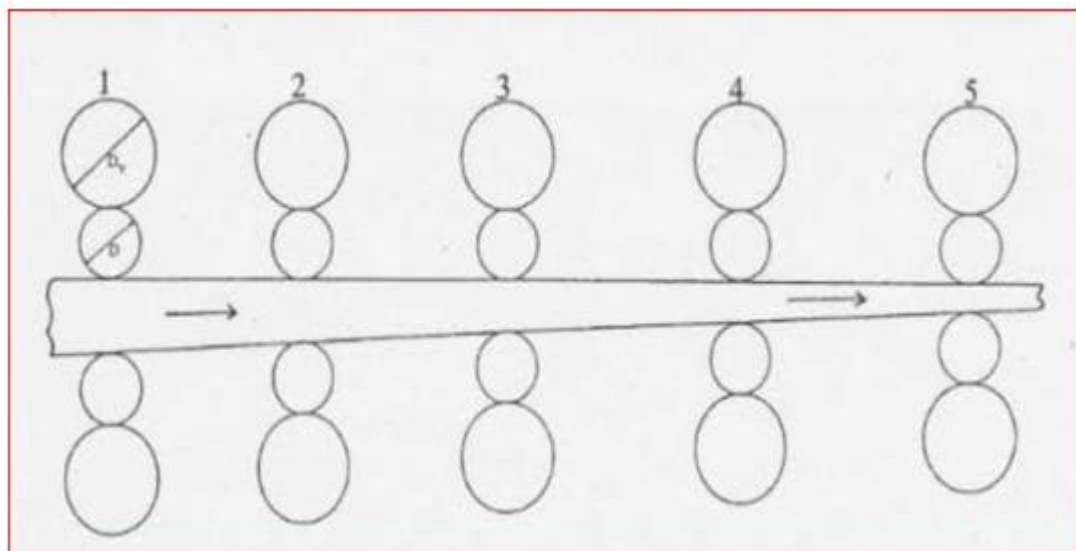


Figure II.4 : diagramme schématisé des réductions par cages [20].

Le modèle mathématique du processus de laminage est très important par ce qu'il est utilisé pour calculer les différentes grandeurs qu'influence le processus de laminage. Ce modèle est employé dans l'algorithme du calcul des logiciels qui sont utilisés pour estimer précisément des grandeurs plus importantes dans le processus de laminage, comme les forces et les couples nécessaires pour effectuer le laminage lui-même.

Ces logiciels sont développés pour faciliter l'étape de calcul, ils offrent les résultats plus vite et, en changeant les variables d'entrée, nous pouvons observer et comparer les effets que ce changement avait sur les résultats.

Calcul de la longueur du foyer de déformation :

Dans notre cas, le processus de laminage à froid ne prévoit pas l'élargissement de la bande c'est pourquoi, nous notons :

 **Largeur de la Bande**

$$B_0 = B_1 = B_f \quad (\text{II.2})$$

B_0 : Largeur initiale de la Bande

B_f : Largeur finale de la Bande

Taux de réduction d'épaisseur

$$H_0 - H_1 = \Delta H$$

$$\Delta H = \frac{H_0 - H_f}{H_0} \% \quad (\text{II.3})$$

H_0 : Epaisseur Initiale

H_f : Epaisseur Finale

$$CB = \frac{\Delta H}{2} \quad (\text{II.4})$$

$$\cos \alpha = \frac{OC}{OA} = \frac{\left(R - \frac{\Delta H}{2}\right)}{R} \quad (\text{II.5})$$

$$AC = R * \sin \alpha \quad (\text{II.6})$$

$$Ld = AC = \sqrt{AB^2 - BC^2} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{AB}{BC} = \frac{BE}{AB} \quad (\text{II.8})$$

$$AB = \sqrt{(BC)(BE)} \quad (\text{II.9})$$

$$AB = \sqrt{\Delta H \cdot R} \quad (\text{II.10})$$

$$Ld = \sqrt{(R \cdot \Delta H) - \left(\frac{\Delta H}{2}\right)^2} \quad (\text{II.11})$$

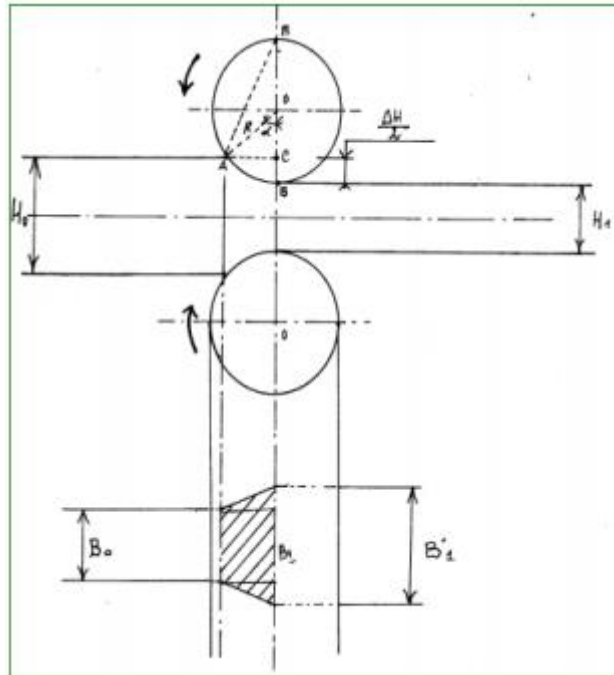


Figure II.5 : Représentation théorique du Contact Cylindres de travail-Tôle (Foyer de déformation) [21].

II.2 . Paramètres Mécaniques

II.2.1. Les sollicitations de la matière pendant le procédé

Chaque coup de cage impose localement au tube un incrément de déformation plastique de quelques pourcent, la matière subit au final une série de petites déformations tridimensionnelles, avec un tri axialité variable Cette histoire mécanique complexe peut conduire à la nucléation de defaults (fissures longitudinales) dans le régime de la fatigue oligocyclique [22].

Une première analyse numérique du procédé *HPTR* a été réalisée dans [23] pour un matériau de type Zircaloy-4 en utilisant une loi monotone classique. Les niveaux de contrainte relevés sont trop élevés car adoucissement/durcissement cyclique du matériau n'est pas pris en compte avec ce type de formalisme.

Le problème de mise au point des gammes de laminage est d'autant plus critique pour des aciers *ODS* car la présence des nano oxydes renforce leurs caractéristiques mécaniques mais abaisse leur capacité à être déformés. Le matériau doit donc subir une série de traitements thermiques pour abaisser ses caractéristiques mécaniques [24]. Pour étudier la faisabilité des gammes de laminage il faut être capable de renseigner une loi de comportement réaliste dans le logiciel. Cette loi doit être identifiée à partir d'essais réalisés sur des éprouvettes ayant subi des traitements thermiques adaptés à chaque nuance.

II.2.2. Effort de laminage

La connaissance des efforts intervenant lors du processus d'étirage est essentielle dans l'élaboration de la conception d'une machine pour l'étirage. Bien entendu, il y a peu d'éléments dans la littérature qui répertorient l'évolution des forces et des réactions lors du procédé d'étirage de tube et encore moins lorsqu'il est question d'étirage de tubes à paroi variable.

Pour estimer les forces intervenant dans le procédé, il faut donc se tourner vers ce qui a été étudié,

soit au niveau de l'étirage de tube à paroi constante.

Néanmoins, la connaissance des forces en jeu durant le procédé est essentielle dans la sélection et le développement de machine-outil permettant de faire de l'étirage.

Plusieurs modèles analytiques et numériques ont été développés afin d'estimer la force requise et les réactions sur le mandrin pour compléter un cycle d'étirage à paroi constante. Dans un cadre industriel, les équations analytiques basées sur la théorie de la plasticité élémentaire peuvent être satisfaisantes. D'ailleurs, LANGE présente une équation analytique développée par Siebel pour calculer la force de déformation pour de l'étirage sur mandrin fixe.

Détermination de la pression totale de laminage

La pression totale est déterminée à partir de la valeur de la pression spécifique est la surface de contact métal-cylindre sur laquelle s'applique la pression unitaire ou spécifique.

$$P = P_m \cdot F_c = P_m \cdot B \cdot l_{app} (T) \dots\dots\dots(51)$$

P_m : pression spécifique kgf/mm².

B: largeur de la bande mm.

lapp: longueur du foyer de déformation d'après Tselikov en mm.

II.2.3. Résistance des tôles laminées

L'état structural est très important puisque l'on assiste à une compétition entre l'écroutissage et la recristallisation.

Tous les artifices préconisés visent à obtenir un état structural stable et fournir de bonnes propriétés après une déformation. Pour cette raison, il n'y a pas unanimité sur l'importance de la déformation idéale. En effet, ce paramètre est lié à tous les autres par le biais des recristallisations statique et dynamique. En général, tous les facteurs qui conduisent à une structure modifiée par écroutissage sont favorables, pour peu que cet état reste suffisamment stable dans le temps vis-à-vis des cinétiques de recristallisation, pour que la transformation ait lieu sur cette différence de celle que l'on obtiendrait dans le traitement thermique de référence. Afin de déterminer la tension maximale que les tôles laminées peuvent supporter dans le domaine élastique, des essais de traction :

- Le taux de déformation est la seule variable qui contrôle essentiellement la valeur du durcissement.
- La dureté, la limite d'élasticité, la résistance à la traction augmentent avec le taux de déformation.
- La forme de la courbe de durcissement n'est pas générale et varie avec chaque acier, on observe très souvent une limite du durcissement à partir de 70 % de déformation et une déformation préalable de 20 % environ est nécessaire pour enregistrer un durcissement appréciable ;

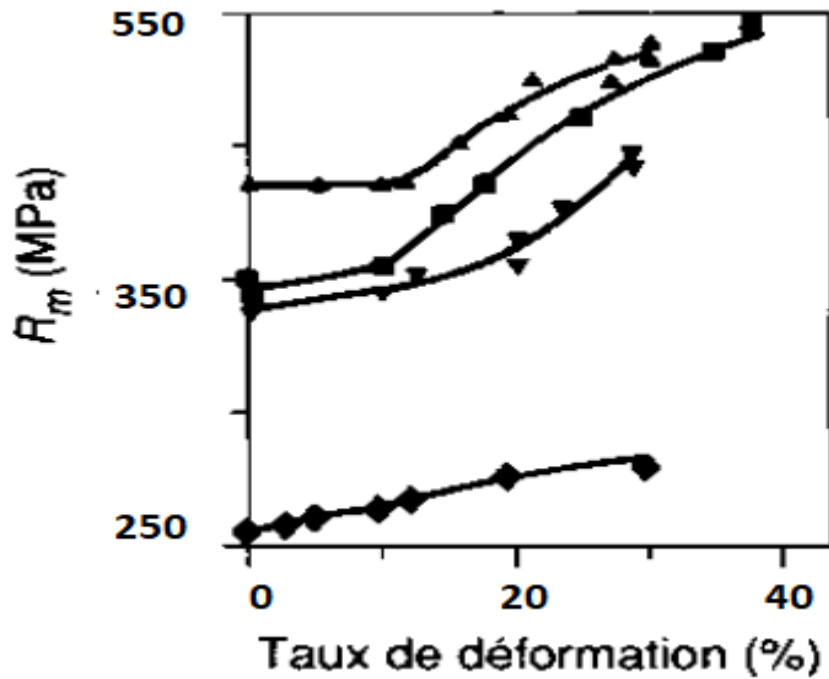


Figure II.6: Influence du taux de déformation sur la résistance à la traction de différents aciers [21].

Les résultats de la littérature sont très nombreux.

Les aciers à hautes caractéristiques ont la meilleure réponse au traitement.

Le gain sur la limite d'élasticité et sur la résistance à la traction est de 30 % environ.

La ductilité est conservée le plus souvent.

Les propriétés de résilience et de résistance à la propagation de fissures sont largement améliorées. Les conditions de traitement varient d'un auteur à l'autre, mais les résultats sont néanmoins directement comparables. Les figures II.7 et II.8 montrent qu'un traitement thermique permet d'obtenir, par l'intermédiaire d'une diminution de la température de laminage et d'une augmentation du taux de déformation, un accroissement simultané de la limite d'élasticité et de la résistance mécanique à la rupture d'aciers, sans détérioration importante de leur ductilité.

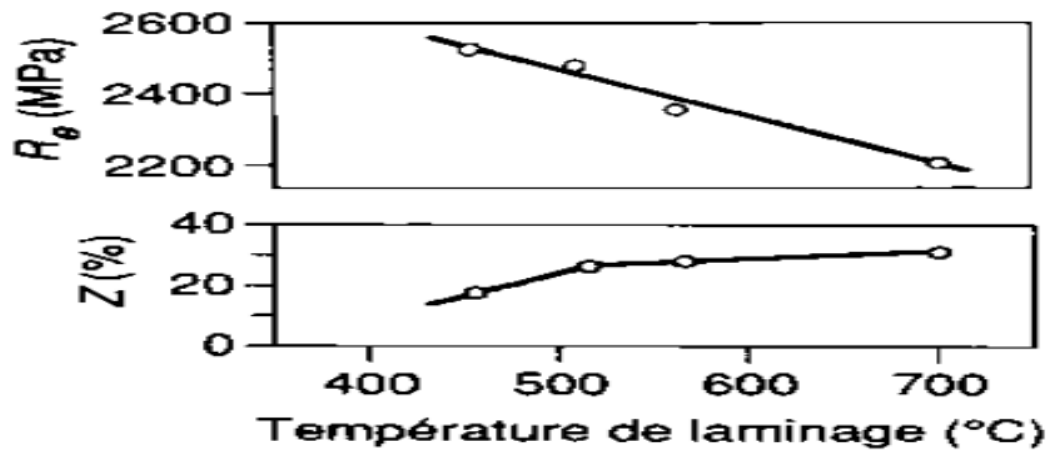


Figure II.7 : Effet de la température de laminage sur la limite d'élasticité et la striction d'un acier [21].

Les caractéristiques de résistance mécanique, de ductilité et de résistance à la rupture fragile des aciers « ausformés » permettent l'emploi de ces matériaux pour des applications dans la construction métallique [21].

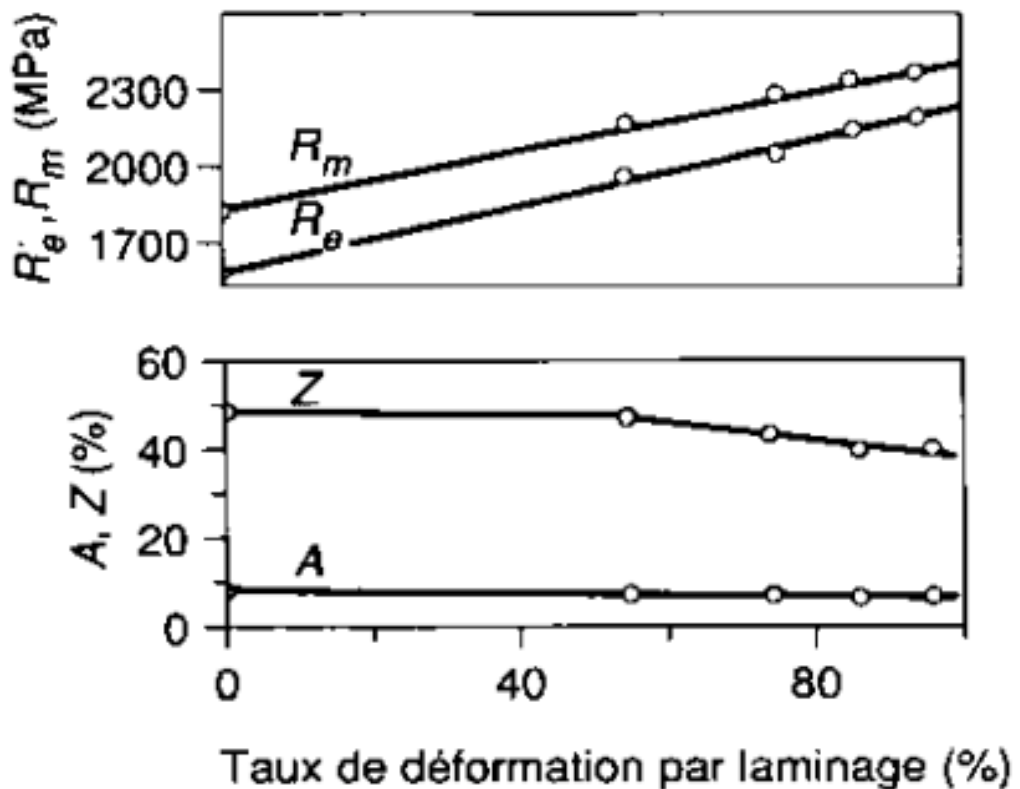


Figure II.8 : Effet du taux de déformation par laminage sur les propriétés mécaniques [21].

II.3. Paramètres métallurgiques de laminage

D'un point de vue métallurgique, le laminage apparaît comme une succession de déformations (des passes) qui vont engendrer un écrouissage (restauration éventuellement) du métal, et de temps

d'attente (les inters passes) pendant lesquels la structure de l'acier pourra évoluer (*figure II.9*).

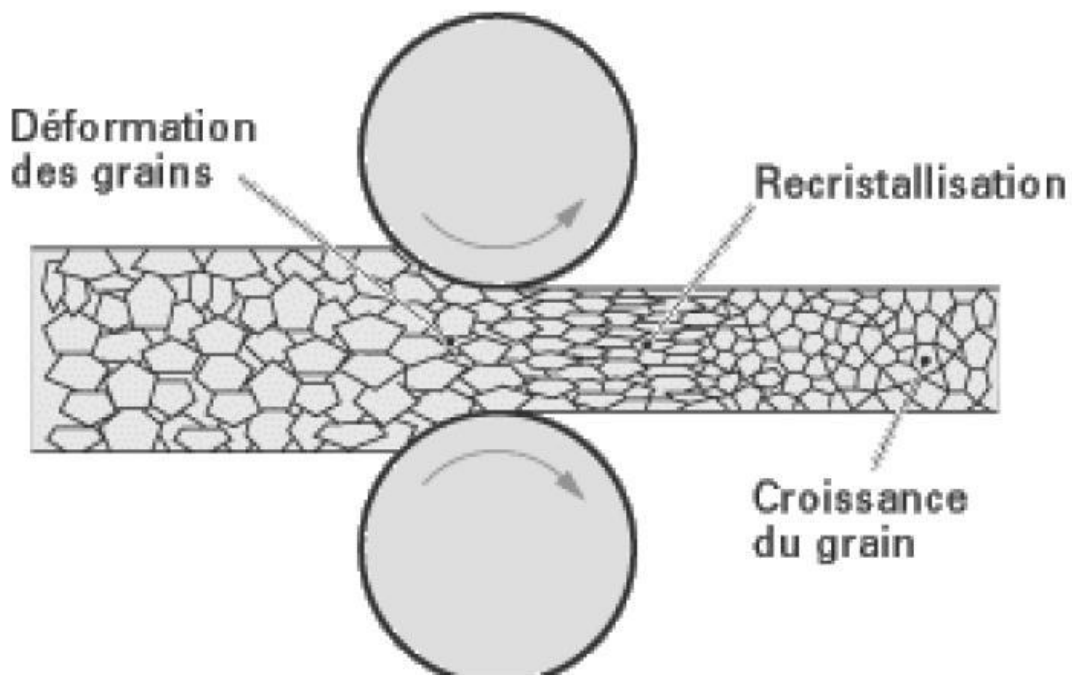


Figure II.9 : Recristallisation dynamique au cours du laminage à chaud [14].

II.3.1. Ecrouissage et restauration du métal pendant la déformation

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. La déformation plastique se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable.

La présence des dislocations et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie stockée sous forme de dislocations.

Dans le présent travail nous traitons la déformation plastique, dans ce cadre le nombre de dislocations va rapidement croître ce qui va conduire au durcissement de l'acier, et est couramment appelé « Phénomène d'écrouissage ».

A la création de ces dislocations vont être opposés différents mécanismes conduisant à leur élimination et donc à l'adoucissement du matériau ; ce sont les phénomènes de restauration et recristallisation.

Il est également nécessaire de distinguer l'adoucissement qui se produit simultanément à la déformation, c'est la restauration ou recristallisation dynamique, de celui qui intervient après la déformation, c'est la restauration et recristallisation statique ou post-dynamique.

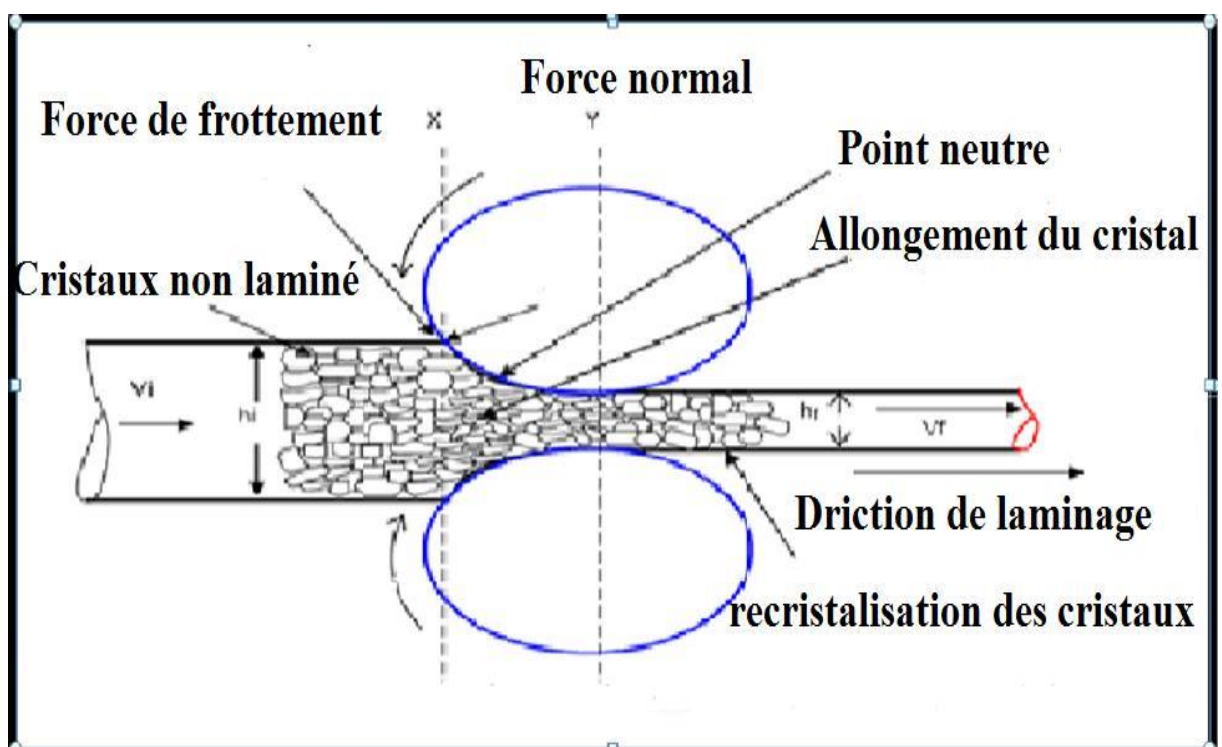


Figure II.10 : Aspects métallurgiques du laminage [25].

II.3.2. Écrouissage et restauration du métal pendant la déformation

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. Ce phénomène a une amplitude limitée et, lorsque la déformation imposée excède une déformation critique – la limite d'élasticité –, les mécanismes mis en jeu à l'échelle microscopique pour accommoder la déformation macroscopique appliquée sont différents.

La déformation se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui

assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable.

Fort heureusement, les réseaux cristallins sont « imparfaits », c'est-à-dire qu'ils contiennent des défauts d'agencement des atomes, les dislocations [26-28].

La présence de ces défauts – dits linéaires – et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie à mettre en œuvre.

Dans un matériau métallique non soumis à une quelconque déformation (à l'équilibre), la densité de ces défauts est déjà importante ($\rho \approx 10^{10}$ à 10^{11} dislocations/m² à température ambiante). Néanmoins, leur nombre va rapidement croître avec la déformation plastique conduisant au durcissement de l'acier ; c'est le phénomène d'*écrouissage*.

On imagine bien que ce mécanisme a des limites, ne serait-ce que pour assurer la solidarité du réseau cristallographique.

À la création de nouvelles dislocations vont donc être opposés différents mécanismes conduisant à leur élimination et donc à l'adoucissement du matériau; ces mécanismes ont pour noms restauration et recristallisation.

L'objectif de ce texte n'est pas la description microscopique fine de ces phénomènes, pour laquelle on se reportera aux références [29] et [30].

Néanmoins, pour différencier ces deux mécanismes d'adoucissement, nous parlerons de restauration lorsque l'élimination des dislocations est réalisée de façon discrète sans modification profonde de la structure métallurgique, de recristallisation lorsque la création de nouveaux grains et le mouvement des joints de grains sont mis en jeu, conduisant à une élimination simultanée d'un grand nombre de dislocations.

Il est également nécessaire de distinguer l'adoucissement qui se produit simultanément à la déformation de celui qui intervient après la déformation, pendant les temps interpassés.

Dans le premier cas nous parlerons de restauration ou recristallisation dynamique, dans le second de restauration et recristallisation statique (figure II.10).

Les mécanismes microscopiques mis en jeu dans les deux situations sont similaires mais les conséquences qu'ils engendrent sur la structure métallurgique peuvent se différencier, en particulier en ce qui concerne la recristallisation.

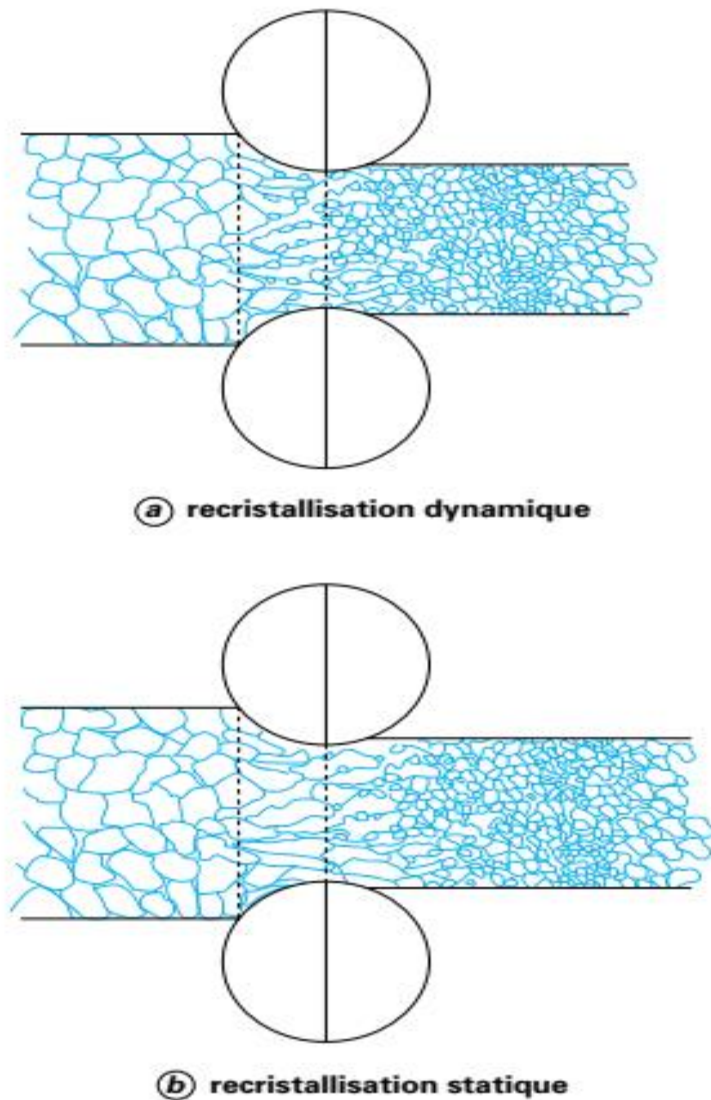


Figure II.11 : Évolution de la taille de grain austénitique en fonction de la température de réchauffage [30].

II.10.3. Recristallisation dynamique

Comme pour la recristallisation statique, la recristallisation dynamique en phase austénitique procède par germination et croissance de nouveaux grains.

La première spécificité de la recristallisation dynamique réside dans le fait que l'environnement du nouveau grain recristallisé continue de s'écraser avec le ralentissement de sa croissance.

La recristallisation dynamique conduit donc à un affinement très important de la structure, au moins jusqu'à l'arrêt de la déformation.

La seconde spécificité du phénomène est que la structure peut recristalliser plusieurs fois de suite au cours de la déformation.

Contrairement au cas de la recristallisation statique, l'avancée de la recristallisation dynamique ne dépend pas du temps mais de la déformation appliquée.

Les cinétiques sont également exprimées sous la forme d'une loi d'Avrami où le paramètre temps est remplacé par le paramètre déformation.

II.4. Défauts de laminage

II.4.1. Défauts géométriques

Les machines et les outils (cylindres, cages...) ne sont pas infiniment rigides, se déforment, et cèdent élastiquement sous les efforts appliqués.

Cela perturbe aussi la géométrie des produits, créant des problèmes de profil et de planéité des produits plats. Des problèmes de réglage des outils de production peuvent avoir des conséquences du même ordre. Des défauts géométriques peuvent apparaître à la suite de la déformation locale du rouleau en contact avec la tôle dans l'emprise. Les contraintes de pression dans le contact sont relaxées par l'élargissement de la tôle qui est fort si les rapports. Épaisseur/largeur et épaisseur/longueur de contact sont grands (c'est le cas du laminage à chaud).

Cet élargissement est faible car inhibé par le frottement des outils dans le cas du laminage à froid; les contraintes de contact, donc les déformations des cylindres, seront très fortes si on lamine des produits minces parce que les effets du frottement seront exacerbés par le grand rapport surface/volume.

Le rôle des efforts de tension et contre tension imposés par les moteurs de bobinage est dans ce cas primordial pour minimiser ces défauts.

A ces défauts d'origine mécaniques se superposent des déformations d'origine thermiques, liées à la dilatation, qui conduit à une hétérogénéité du diamètre du cylindre le long de son axe.

Ces dilatations peuvent entraîner des hétérogénéités d'épaisseur des produits finaux (*Tableau II. 1*).

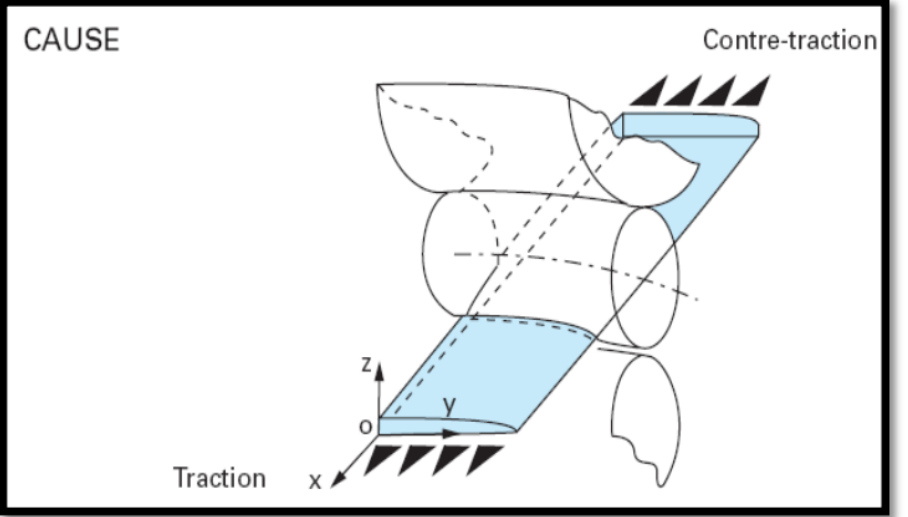
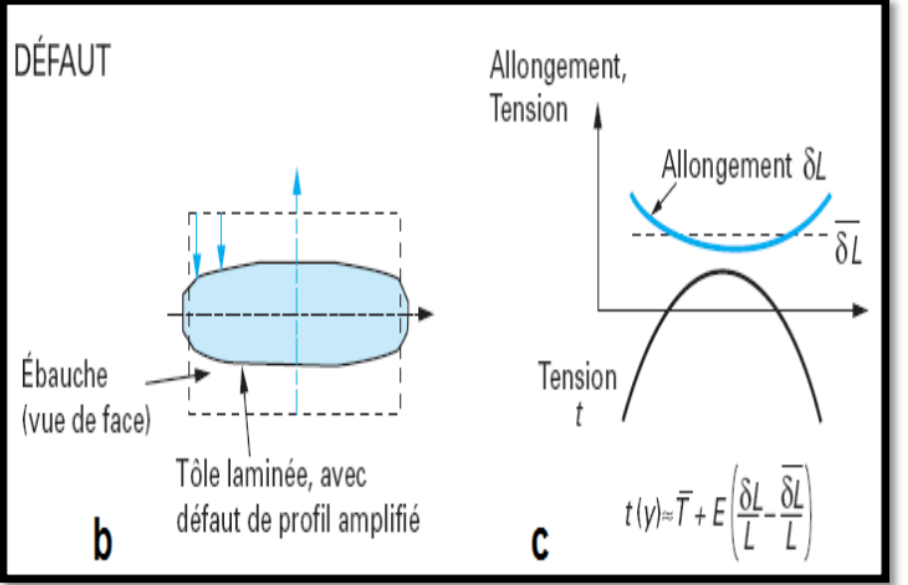
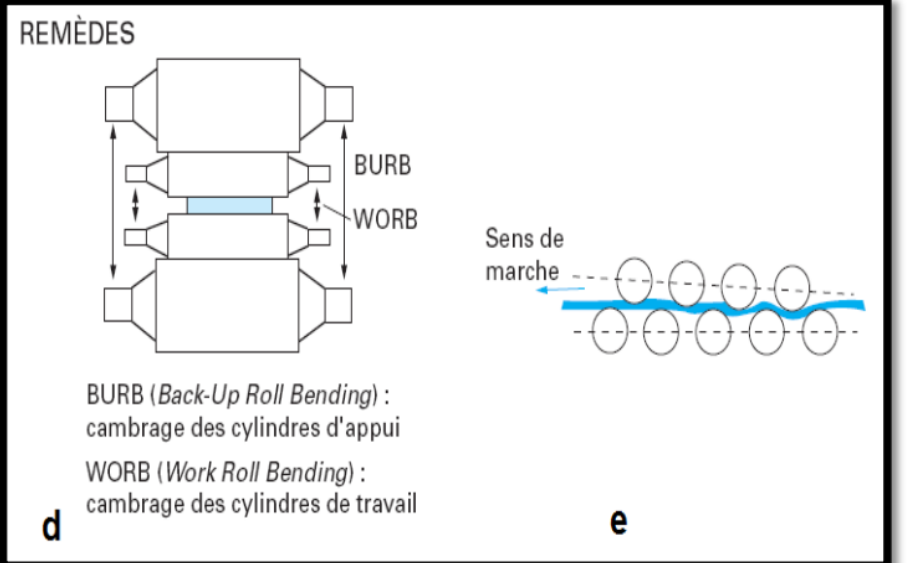
<p>a. cédage des cylindres (flexion, aplatissement)</p>	<p>CAUSE</p> 
<p>b. réduction donc allongement différentiels c. conséquence : tension hétérogène, zones en compression, flambement = défaut de planéité</p>	<p>DÉFAUT</p>  <p>b Tôle laminée, avec défaut de profil amplifié</p> <p>c $t(y) \approx \bar{T} + E \left(\frac{\delta L}{L} - \frac{\delta L}{L} \right)$</p>
<p>d. remède, pendant le laminage : «actionneurs de profil et planéité» (ici, contre-flexion des cylindres) e. remède aux défauts de planéité, après le laminage : le planage</p>	<p>REMÈDES</p>  <p>d BURB (<i>Back-Up Roll Bending</i>) : cambrage des cylindres d'appui WORB (<i>Work Roll Bending</i>) : cambrage des cylindres de travail</p> <p>e</p>

Tableau II. 1: Défauts de profil et de planéité. Quelques remèdes [31].

II.4.2. Défauts métallurgiques et microstructuraux

Les défauts microstructuraux sont très dépendants de l'alliage considéré. Ce sont de stalles de grains hétérogènes, des textures cristallographiques mal orientées, des inclusions non métalliques, des porosités, des fissures. Certains de ces défauts sont hérités des structure de coulée [32].

Les discontinuités (porosités, fissures et criques), qui relèvent des phénomènes et mécanismes d'endommagement des matériaux, sont engendrées par la conjugaison d'états de contrainte de tension et de l'existence d'hétérogénéités : d'où un couplage mécanique/métallurgie à l'échelle microscopique [33].

De plus les paramètres de structure granulaire et de texture évoluent autant par la (recristallisation dynamique) ou lors des traitements thermiques (recristallisation statique). Leur prévision passe par l'utilisation des modèles de métallurgie physique appropriés, eux-mêmes couplés à la thermomécanique.

II.4.3. Défauts de surface

Parmi les défauts de surface se distinguent les défauts de type chimique comme la corrosion, incrustation d'oxyde, pollutions par les lubrifiants ou des défauts de rugosités. Ce dernier cas est très directement contrôlé par la mécanique du contact produit-cylindre des microfissures peuvent provenir de contraintes de traction superficielle, des porosités peuvent être la conséquence du piégeage de lubrifiants (poches d'huile) ou de phénomènes de corrosion, du rebouchage incomplet de trous initiaux induits par un décapage par exemple. Pour minimiser ces déformations ou corriger ces défauts, on peut recourir à des actionneurs de profil, en pratique des vérins d'équilibrage du cylindre de travail ou de cambrage des cylindres d'appui. Le pilotage de ces actionneurs n'est toutefois pas aisé. D'autres techniques de correction peuvent être utilisées : la translation des cylindres de travail (roll shirting), le refroidissement ou la lubrification différentielle, ou encore le désaxement des cylindres haut / bas (pair-cross) Tous ces problèmes de géométrie ne seront pas pris en compte dans notre modélisation.

II.5. Conclusion du chapitre II

Tout ce qui précède montre que le laminage ne doit plus être simplement appréhendé comme un simple moyen de mise en forme à chaud mais également comme un moyen métallurgique d'amélioration des matériaux métallique à chaque fois que ceux-ci doivent être utilisés à l'état brut de laminage à chaud. La métallurgie du laminage à chaud a permise une bonne compréhension, au moins qualitative et descriptive, des phénomènes et permet d'ores et déjà d'obtenir des caractéristique que l'on ne saurait obtenir par traitement thermique (cas des aciers C-Mn après recuit de normalisation). Les problèmes spécifique du laminage à chaud ainsi que ceux de l'aptitude au formage (fongibilité) laissent ouvert un vaste champ d'investigation.

2020

Chapitre III
Techniques Expérimentales

III.1. Procédure expérimentales

L'expérience est complément essentiel à la théorie et représente l'argument de toutes les questions du comportement mécaniques des aciers avant (déformation) et après (déformation). Dans cette étape on a peu faire une série d'expérience (analyse chimique, l'essai traction, Dureté et l'essai résilience) sur des éprouvettes plates. Les résultats sont enregistrés et commentés convenablement. En parallèle une partie calcul additionnelle pour déterminer les paramètres géométriques.

III.1.1. Choix du métal de base

Le matériau utilisé Pour le recuit est l'acier de construction E24–2(S235JR) de composition chimique normalisée (tableau III.1).

III.1.2. Analyse chimique de l'acier

L'analyse spectrale prend une part exceptionnelle à coté des examens mécaniques et chimiques. En peut de temps, elle livre des informations sur l'échantillon en déterminant avec certitude aussi bien les concentrations importantes en éléments d'alliages, que pour les petites teneurs en impuretés indésirables. Elle est l'un des moyens les plus rationnels pour le contrôle des nuances en usine.

Tableau III.1. Composition chimique du métal de base

Eléments	C	Mn	Si	P	S	Al
Masse %	.062	.250	.039	.006	.035	0.054

Le tableau suivant illustre les constituants de notre acier :

Tableau III.2. Constituants de l'acier

% Ferrite (fer α)	% perlite
92.25	7.75

III.1.3. Désignation normalisée des aciers de construction métallique

Tous les aciers de construction métallique sont :

- désignés symboliquement à partir de leur emploi et de leurs caractéristiques mécaniques selon les principes définis par la norme NF EN 10027-1 ;
- numérotés selon le système décrit par la norme NF EN 10027-2.

III .1.4. Désignation symbolique normalisée

La désignation symbolique commence par la lettre S suivie d'un nombre entier égal à la valeur minimale de la limite d'élasticité, garantie pour la gamme d'épaisseur la plus faible. La norme NF EN 10025-2 donne les équivalences suivantes par rapport aux anciennes nuances définies par les anciennes normes NF EN 10025 et NF A 35-501 (tableau III.3).

Tableau III.3. Equivalences des nuances entre les normes NF EN 10025-2, NF 10025 et NF A 35-501[34]

Nuance selon NF EN 10025-2	Nuance selon l'ancienne norme NF EN 10025	Nuance selon l'ancienne norme NF A 35-501
S235JR	S235JR	E 24-2

III .1.4.1. Désignation numérique normalisée

La désignation numérique est constituée par cinq chiffres. les trois premiers chiffres à gauche ont une signification définie par la norme NF EN 10027-2. Les deux derniers chiffres à droite sont arbitraires, la signification de l'ensemble doit donc être recherchée dans la norme de produit. Ce mode de désignation est très peu utilisé dans les documents contractuels et autres spécifications de projet qui préfèrent se référer à la désignation symbolique normalisée (tableau III.4). Toute fois, la connaissance des anciennes normes facilite la lecture exacte des différentes nuances (tableaux III.5 et III.6).

Tableau III.4. Désignation symbolique des aciers de Construction
symboles précisant les exigences relatives à la température de transition de la résilience

Symbole	Température d'essai (°C)	énergie minimal (J)
JR	20	27
JO	0	27
J2	-20	27

Tableau III.5. Equivalence des normes [35].

Qualités selon les Nouvelles normes européennes			Qualités équivalentes selon les anciennes normes nationales							
norme	Designation symbolique	Désignation numerique	France	Allemg	Italia	Ru	espagne	USA	USA	jaopn
EN10025	NF A 35- 501	DIN 17100	UNI 7070	BS 4360	UNE 36080	ASTM	ASTM	JIS 3101	ASTM	JIS 3101
S235JR S235JRG1 S235JRG2	1.0037 1.0036 1.0038	E24-2 E24-2NE	St37-2 USt37- 2 RSt37- 2	Fe360B	40A 40B	AE235B	A283C	A570Gr33	A570Gr33	

Tableau III.6. Correspondance entre les nuances E24 – 2 [36]

Europe En 10025	France NF A35- 501 (1987)	<i>Allmagne</i> <i>DIN</i> <i>17100</i> <i>(1980)</i>	Belgique NBNA 21101 (1976)	Espagne UNE 36080 (1978)	<i>Italie</i> <i>Uni7070</i> <i>(1982)</i>	<i>Royaume</i> <i>U</i> <i>BS4360</i> <i>(1987)</i>	<i>Etat-Unis</i> <i>ASTM</i> <i>Receuil</i> <i>(1987)</i>	URSS	Gost980- 71
									Gost6713 -75
									Gost5058 -65
									Gost1928 2-73
S235JR	E24-2	St37-2 Ust37 -2	AE235 B	A360 B	Fe360B	40A	A283 C A507 Gr33	St 3Kp, 18Kp	

III.2. Définition de microscope optique

Un microscope métallographique optique permet l'observation des échantillons, avec des grossissements qui variables. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation des surfaces, et des coupes

III.2.1. Caractérisation microstructurale

III.2.1.1. Attaque chimique

Pour mettre le grain en évidence, on réalise une attaque chimique sur l'échantillon avant et après recuit:

III.2.1.2. Méthode

Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants. On dépose quelques gouttes d'acide sur l'échantillon, puis on attend quelques secondes. Ensuite, on rince à l'eau pour enlever l'acide, puis, à l'éthanol pour enlever les résidus d'eau et d'acide et éviter ainsi l'oxydation de l'échantillon.

III.2.1.3. Les microstructures (avant et après laminage)

On réalise l'attaque chimique sur nos échantillons déformé avant et après laminage (les figures III.1 et III.2).

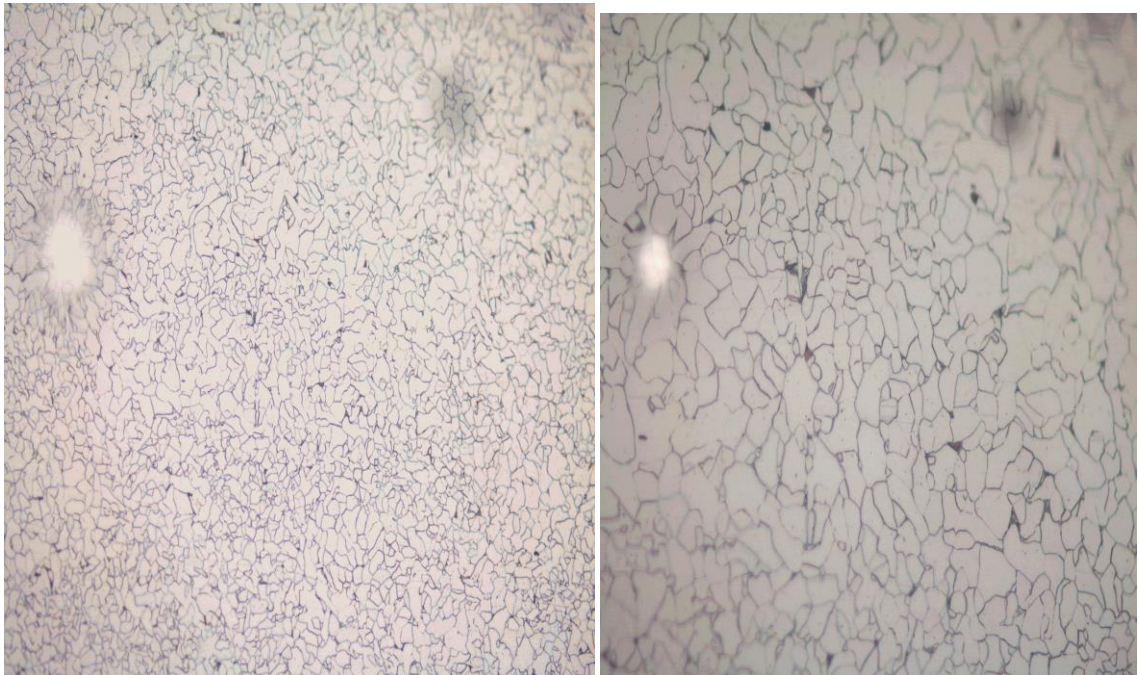


Figure III.1. Microstructures de l'acier avant laminage.

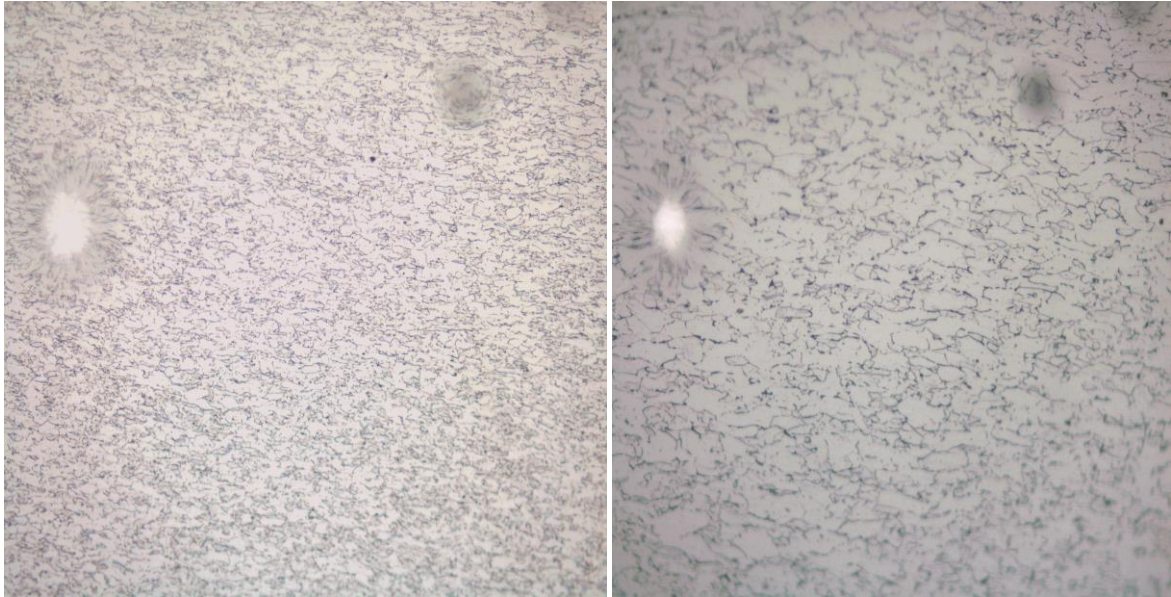


Figure III.2. Microstructures de l'acier après laminage.

III.3. les essais mécaniques

III.3.1. Les essais de traction

Le but des essais mécaniques est d'obtenir des valeurs qui caractérisent les propriétés du matériau ou, qui permettent d'apprécier son comportement lorsqu'il est soumis à une contrainte. Ces valeurs pourront ensuite être utilisées dans des calculs de résistance des matériaux [37].

III.3.2. Description générale d'une machine de traction

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage [9].

III.3.3. Grandeurs mesurées

L'essai fournit un diagramme donnant la force appliquée à l'éprouvette en fonction de son allongement (Figure III.3), et cela d'habitude pour une vitesse de traverse constante. Dans le cas général, on observe:

- une partie rectiligne correspondant au domaine d'élasticité ;
- le domaine de déformation plastique uniforme ;
- un maximum correspondant à la charge maximale supportée par l'éprouvette, appelée couramment charge de rupture ;
- le domaine de striction dans lequel les déformations se localisent dans une zone limitée dont la section diminue rapidement ;
- et finalement la rupture de l'éprouvette. La norme NF A 03-151 fournit les définitions des caractéristiques mécaniques que permet de déterminer l'essai de traction.

-L'allongement rémanent A_x est la variation de la longueur entre repères de l'éprouvette soumise d'abord à une charge unitaire prescrite puis déchargée. La charge unitaire est, à tout instant de l'essai, le quotient F/S_0 de la charge F par la section initiale S_0 de l'éprouvette. L'allongement est exprimé en pourcentage de la longueur initiale entre repères L_0 .

-L'allongement rémanent après rupture est la variation de la longueur entre repères $L_u - L_0$ mesurée après rupture de l'éprouvette en rapprochant soigneusement les deux fragments (L_u est la longueur entre repères après rupture d'éprouvette). Cette variation doit être mesurée à 0,25 mm près. Dans certains cas, cette mesure est rendue difficile par la forme des surfaces de rupture, notamment pour les ruptures en sifflet.

-L'allongement pour-cent après rupture A est l'allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture $L_u - L_0$, exprimé en pourcentage de la longueur initiale entre repères L_0 :

$$A=100\frac{L_u-L_0}{L_0} \quad \text{III.1}$$

-La *striction* est la réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette se produisant au cours de l'essai. La section après rupture S_u est l'aire de la section minimale après reconstitution de l'éprouvette. Le *coefficient de striction* Z est le rapport de la variation ultime de section transversale $S_0 - S_u$ produite par l'essai à la section initiale S_0 :

$$Z=100\frac{S_0-S_u}{S_0} \quad \text{III.2}$$

-La résistance à la traction R_m est la charge unitaire qui correspond à la charge maximale supportée par l'éprouvette :

$$R_m = F_m/S_0 \quad \text{III.3}$$

-La charge unitaire à la limite apparente d'élasticité s'appelle aussi, par abréviation, limite apparente d'élasticité R_e (ou parfois limite d'écoulement). Elle correspond à la charge F_e pour laquelle, pour la première fois, l'allongement de l'éprouvette continue à augmenter sans que la charge augmente, ou alors que celle-ci diminue:

$$R_e = F_e/S_0$$

III.4

- La limite supérieure d'écoulement R_{eH} est la valeur de la charge unitaire au moment où l'on observe effectivement une chute de l'effort (succédant immédiatement au domaine d'élasticité).

- La limite inférieure d'écoulement R_{eL} est la plus faible valeur de la charge unitaire pendant l'écoulement plastique uniforme en négligeant cependant les éventuels phénomènes transitoires

- La charge unitaire à la limite d'allongement rémanent R_r , par abréviation limite d'allongement rémanent, est celle à laquelle correspond, après suppression de la charge, un allongement rémanent prescrit, souvent 0,2 %; on écrit par alors $R_r, 0,2$.

- La charge unitaire à la limite conventionnelle d'élasticité, par abréviation limite

Conventionnelle d'élasticité R_p , est la charge unitaire à laquelle correspond un allongement

Non proportionnel légal à un pourcentage prescrit de la longueur initiale entre repères: souvent 0,2 %; on écrit alors $R_p 0,2$ [39].

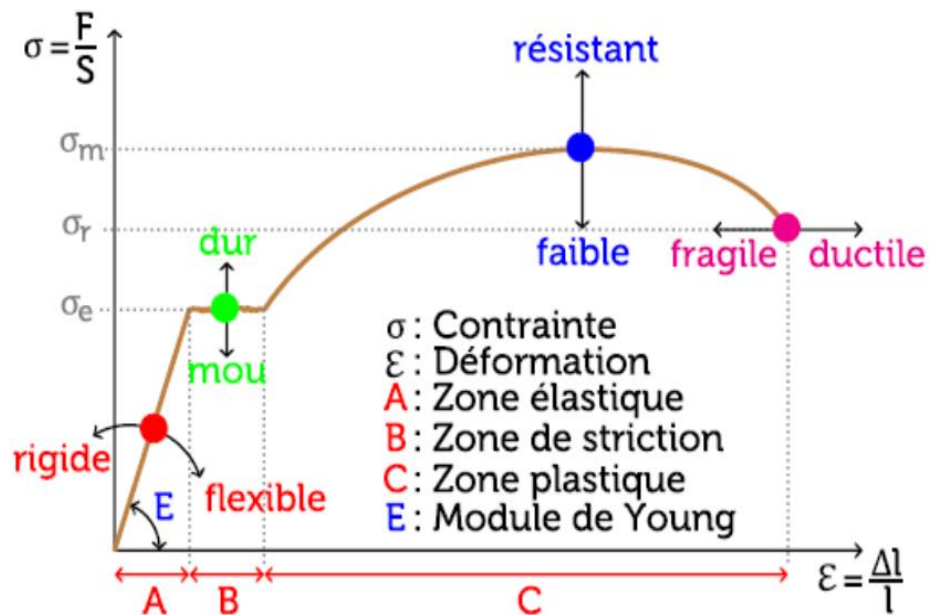


Figure III.3. Courbe de traction

III.3.4. Expérience

Les essais de traction ont été réalisés sur la machine électromécanique de traction du laboratoire centrale LAF (Laminage A Froid) de Le complexe sidérurgique d'El HADJAR à Annaba (figures III.4 et III.10), contrôlée en vitesse de déformation constante (dont la vitesse maximale déplacement de la traverse est de 450 mm/min) d'une capacité de charge maximale avec une précision de 0, 25 % sur la valeur indiquée de la force.

Le découpage s'effectue à froid à l'aide d'une scie pour éviter tout échauffement qui pourrait modifier les propriétés et caractéristiques du matériau.



Figure III.4. La machine de traction.

III.3.4.1. Usinage des éprouvettes de l'essai de traction

Nous avons préparé six éprouvettes plats (05 avant et 05 après laminage prélevées du le sens longitudinale de le même bobine (voir figures III.5 et III.9). Leurs dimensions des éprouvettes sont données au tableau III .7.

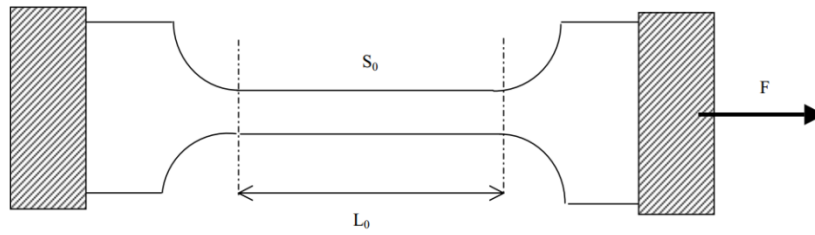


Figure III.5. Eprouvettes de traction

Tableau III.7: Symbole et désignation

Symbole	Désignation	Unité
L_0	longueur utile initiale de l'éprouvette	mm
S_0	section initiale de l'éprouvette	mm ²
L	longueur utile de l'éprouvette (fonction de l'effort exercé)	mm
F	force appliquée à l'extrémité de l'éprouvette	N

Tableau III .8 . Géométrie d'une éprouvette de traction déformée avant Laminage

éprouvette	Avant rupture			
	e_0 (mm)	b_0 (mm)	L_0 (mm)	S_0 (mm ²)
01	3.84	25.48	56	97
02	3.90	25.54	56	99
03	3.88	25.09	56	97
04	3.90	25.32	56	98
05	3.89	25.45	56	99



Figure III.9. Type d'éprouvette expérimentale de traction.



Figure III.10. Éprouvette pendant l'essai machine de traction.

III.3.4.2. Les résultats expérimentaux de l'essai de traction (avant et après laminage)

Tableau III .9. Les résultats expérimentaux de l'essai de traction avant laminage

Avant Laminage	N° d'éprouvette	R_e (Mpa)	R_m (Mpa)	A(%)
	01	347.10	392.23	37.5
	02	329.00	392.23	37.5
	03	317.25	386.42	40
	04	318.93	389.00	35.71
	05	329.00	389.04	35.71

Tableau III .10 . Les résultats expérimentaux de l'essai de traction déformé après
Laminage

Après Laminage	N° d'éprouvette	R_e (Mpa)	R_m (Mpa)	A(%)
	01	728	749	4.5
	02	808	829	3.5
	03	816	828	3.5
	04	805	818	4.0
	05	776	784	3.9

III.3.4.3. Les courbes expérimentales de l'essai de traction après et avant laminage

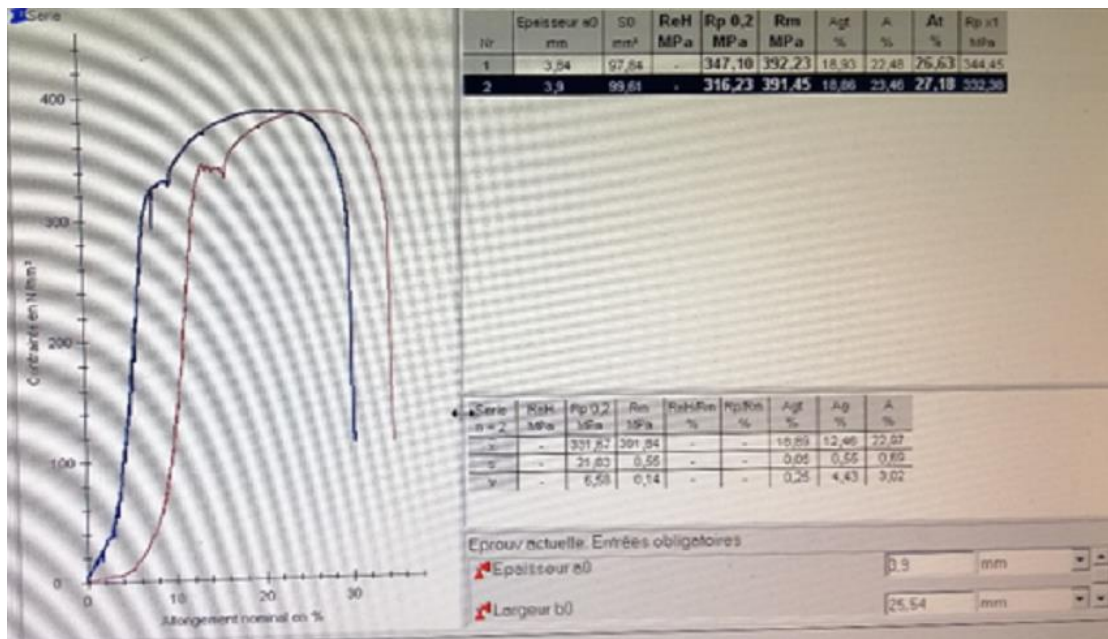


Figure III.11.a. Courbe de traction déformée avant laminage de l'éprouvette

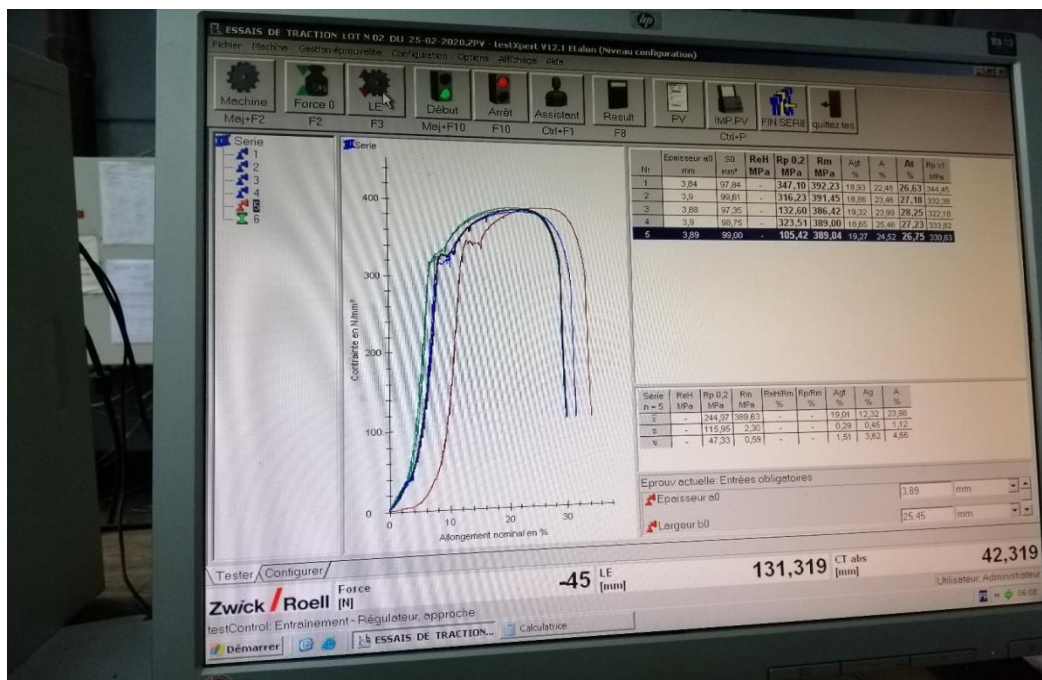


Figure III.11.b. Courbe de traction déformée après le recuit de l'éprouvette

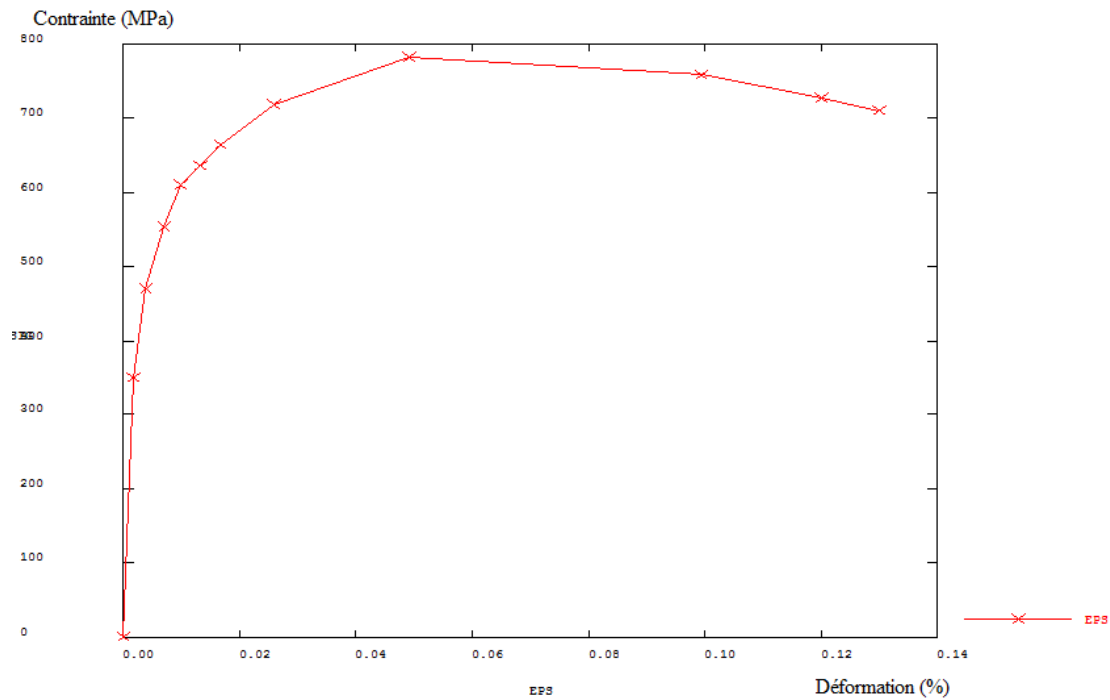


Figure III.12. Courbe de traction déformée après laminage tracée par Castem2013.

III.4. Essais de Dureté :

L'essai de dureté est largement utilisé sur les métaux. Il caractérise la résistance qu'oppose le matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui.

Ainsi, pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal sera d'autant plus grande que la pénétration du corps sera faible. Il existe trois principaux types d'essais de dureté, qui diffèrent essentiellement par la forme du pénétrateur : l'essai Brinell, l'essai Vickers et l'essai Rockwell :

– Dans l'essai Brinell, le pénétrateur est une bille en acier extra-dur de diamètre D . On la pose sur l'échantillon à étudier et on exerce sur elle une force F pendant un temps donné t . La dureté est ensuite calculée comme le rapport entre F (exprimée en Kgf) et la surface S (exprimée en mm^2) de la calotte sphérique ainsi formée : $HB = F/S$. La surface S peut être aisément calculée à partir du diamètre d de l'empreinte.

Il est évident que la valeur HB obtenue doit être accompagnée des caractéristiques de l'essai : la force appliquée F , le temps d'application t , et le diamètre de la bille D . La valeur de la charge peut atteindre $3000Kg$, et le diamètre D de la bille est en général de 5 ou 10 mm .

– Dans l'essai Vickers (figure 1.15), le pénétrateur est une pyramide en diamant à base carrée dont l'angle au sommet est de 136° . L'empreinte formée est donc pyramidale. Si S est la surface latérale de cette empreinte (exprimée en mm^2), d sa diagonale (en mm) et F la force appliquée (en Kgf), alors la dureté est : $H_V = F/S \approx 1,8544F/d^2$.

La charge utilisée est en général comprise entre 5 et 120Kg. Toutefois, il est possible de faire des essais dits de micro dureté avec des charges n'excédant pas 100g si l'on veut étudier une zone très locale du matériau. Ces essais sont alors réalisés et analysés sous microscope

– Dans l'essai Rockwell, le pénétrateur est soit une bille, soit un cône de diamant d'angle au sommet 120° , avec une extrémité sphérique de 0,2 mm de diamètre. On ne mesure plus la surface de l'empreinte, mais la profondeur. On applique en général une pré charge d'environ 10Kg avant l'essai, et on mesure l'évolution de la profondeur de l'empreinte lors du passage à la

Charge totale. La valeur de la dureté est notée HR , avec un indice supplémentaire donnant le type de bille ou cône utilisé et la charge F utilisée. Par exemple, HRA correspond à un cône et une charge de 60Kg, et HRB à une bille de diamètre 1,59mm (1/16 de pouce) et une charge de 100Kg.

Pour déterminer la dureté d'un matériau, il est indispensable de faire plusieurs mesures et d'adopter une valeur moyenne. Parfois, les mesures successives sont réalisées le long d'une droite, par exemple dans l'épaisseur d'une pièce préalablement coupée. On parle alors de profil de dureté. Entre deux empreintes, il convient de laisser suffisamment de distance, pour éviter que la déformation du métal lors de l'essai précédent ait une influence sur le résultat de l'essai courant.

L'essai Brinell est peu sensible à l'état de surface car il conduit à des empreintes relativement larges. Par contre, il n'est pas possible de l'utiliser correctement sur des métaux très durs. Les essais Vickers et Rockwell peuvent être utilisés sur tout type de métal, mais sont sensibles à l'état de surface [40].

III.4.1. Expérience

Un test de dureté permet de savoir si un matériau est dur. Pour cela, on va définir sa dureté grâce à la pénétration d'un poinçon dans une surface plane du matériau considéré. Dans notre cas, on fait des tests de Brinell sur une machine de ZWICK/ROELL (figure III.13 et 14)



Figure III.13. La machine de la dureté

III.4.2. le Polissage

La première étape avant un test de dureté consiste à traiter l'échantillon de manière à permettre une bonne visibilité des résultats. Ainsi, on commence par enrober l'échantillon, puis on le polit. Pour cela, nous avons utilisé des papiers de verre d'un grain allant de 800 à 4000, afin de poncer les défauts initiaux du matériau. En effet, pour visualiser la marque que le Duromètre laisse dans le matériau, il est hautement préférable de ne pas avoir de rayures ou d'impuretés qui pourraient fausser la lisibilité. À l'issue de ce polissage, l'échantillon étudié ne présente plus de reliefs, et réfléchit la lumière (même au microscope, le métal ne présente que peu de défauts), on a atteint le « poli miroir ».

Un test de dureté permet de savoir si un matériau est dur ou mou. Pour cela, on va définir sa dureté grâce à la pénétration d'un poinçon dans une surface plane du matériau considéré. Dans notre cas, on fait des tests de Vickers, c'est-à-dire que le poinçon est une pointe pyramidale en diamant (l'autre test de dureté est la dureté Brinell, où le poinçon est une bille d'acier trempé). Si le matériau résiste bien au poinçonnage, il est dit dur, sinon il est mou. Lors de nos tests de dureté, nous avons réglé une charge de 40 kg. Cette charge est suffisante pour observer aisément la marque laissée par le poinçon, sans que les résultats ne soient faussés par une éventuelle traversée de l'échantillon par le poinçon.



Figure III.14 : Machine de traction pendant l'essai avant laminage.

Tableaux III.11. Le résultat d'essai de dureté avant et après laminage.

Échantillon		1	2	3	4	5	Moy
HB	Avant Laminage						
	Laminage	70	72	71	69	68	70
	Après Laminage	97	98	98	99	97	87,8

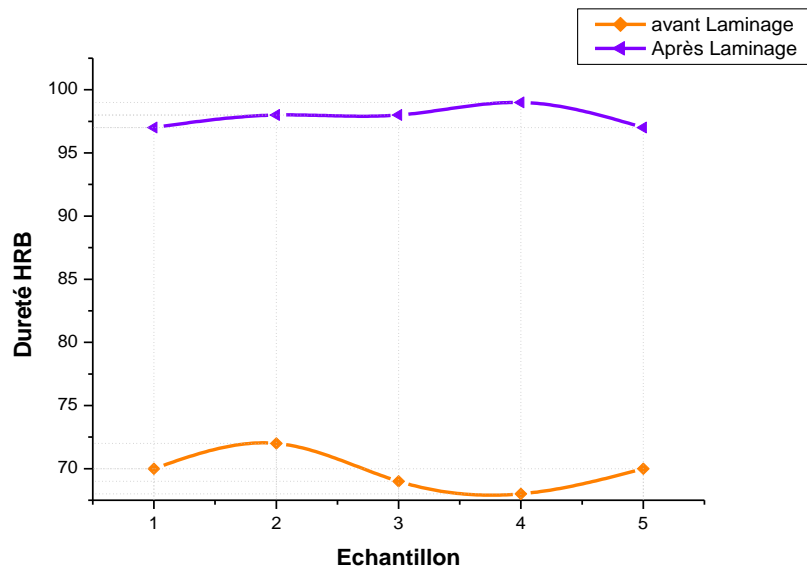


Figure.III.15. comparaison de la dureté (HRB) avant et après laminage.

III.5. Réduction des épaisseurs des tôles laminées

Tableau III.12. Le taux de réduction en épaisseur de tôles laminées à froid

cage	0	1	2	3	4	5
Vitesse	0	548	781	923	1178	1300
Epaisseur r	3 .80	3.45	3.00	2.50	2.15	1.50
Taux réduction	0	9.2	12.9	16.6	14.0	9.0

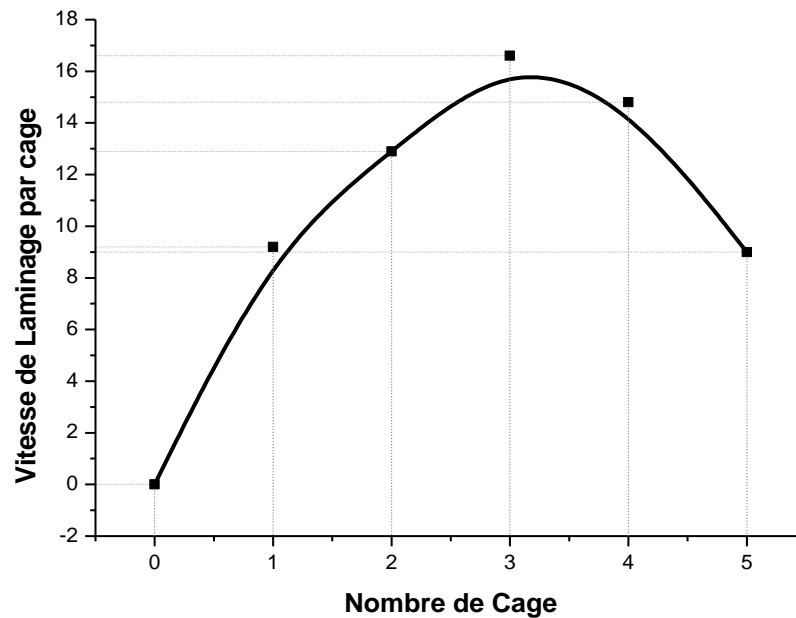


Figure III.16. Variation de la vitesse de laminage par cage.

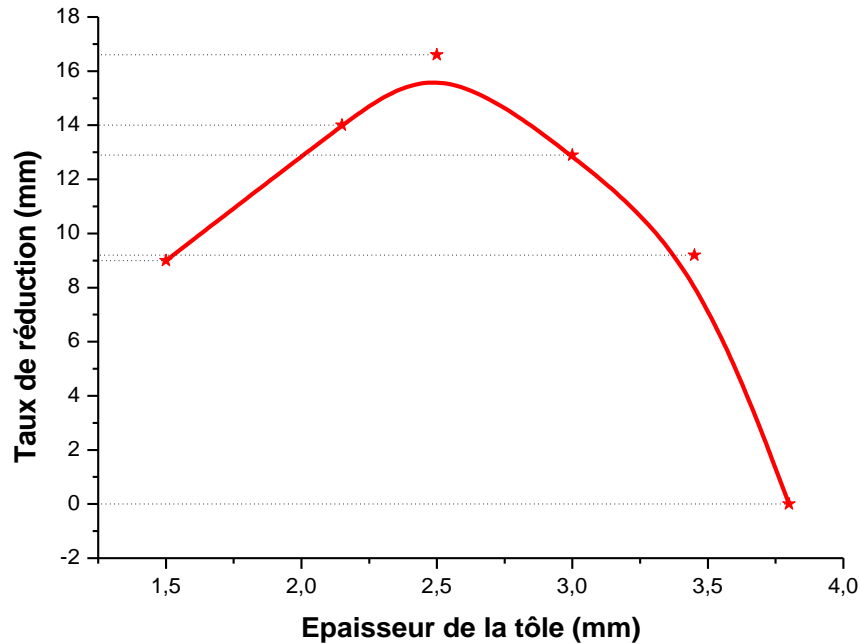


Figure III.17. Taux de réduction des épaisseurs pendant le laminage.

III.6. Discussion des résultats

L'évolution des efforts de chargement en déformation à froid, en termes de structure, l'accroissement de la vitesse de déformation se traduit, à taux de déformation donné, par un écrouissage global plus important et par un affinement plus prononcé des grains recristallisés.

Pouvons avancer dans ce qui suit une analyse comparative de nos résultats:

Pour tous les échantillons (avant et après laminage); on remarque que les caractéristiques mécaniques de résistance après laminage (résistance à la rupture R_m , limite élastique R_e et la dureté) sont importantes et plus grandes (voir tableau III.10) avec une diminution des propriétés de ductilité (A_n) (figures III.10) par rapport au d'avant laminage (figures III.9) avec une croissance des propriétés de ductilité (tableau III.9).

Ceci peut s'expliquer par le processus de déformation au sens longitudinal de laminage, qui entraîne le durcissement du métal.

- Pendant le procédé de laminage à froid la tôle subit progressivement des pressions le long des épaisseurs sur toute la largeur, celles-ci engendrent des déformations plastiques dues au dépassement de la limite d'élasticité de cet acier. Ces déformations ont pour conséquence un écrouissage du métal ou durcissement par déformation.

De plus l'opération de formage qui continue, entraînent des concentrations des contraintes le long des joints des grains ce qui augmente la fragilité et cela se traduit par une détérioration des

caractéristiques de l'acier, ceci est concrétisé par une augmentation des propriétés de résistance (R_e , R_m et HRB) et une diminution des propriétés de ductilité (A).

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. Ce phénomène a une amplitude limitée et, lorsque la déformation imposée excède une déformation critique – la limite d'élasticité –, les mécanismes mis en jeu à l'échelle microscopique pour accommoder la déformation macroscopique appliquée sont différents. La déformation se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable. Heureusement, les réseaux cristallins sont « imparfaits », c'est-à-dire qu'ils contiennent des défauts d'agencement des atomes, les dislocations. La présence de ces défauts – dits linéaires – et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie à mettre en œuvre. Dans un matériau métallique non soumis à une quelconque déformation (à l'équilibre), la densité de ces défauts est déjà importante ($\rho = 10^{10}$ à 10^{11} dislocations/m² à température ambiante). Donc l'effet de l'écrouissage est d'accroître les propriétés de résistances (Durcissement).

Néanmoins, leur nombre va rapidement croître avec la déformation plastique conduisant au durcissement de l'acier ; c'est le phénomène d'écrouissage (voir fig. III.12 et III.15). On imagine bien que ce mécanisme a des limites, ne serait-ce que pour assurer la solidarité du réseau cristallographique. À la technique des traitements thermiques par recuit ce mécanisme conduit à l'élimination (dislocations) et donc à l'adoucissement du matériau ; ces mécanismes ont pour noms restauration et recristallisation. Cette restauration produit généralement un effacement partiel ou total de l'écrouissage accumulé par la déformation). Donc après l'opération de recuit et afin de conférer la meilleure ductilité possible, l'acier récupère ses propriétés adéquates presque de références. Par contre la croissance de l'allongement permet le retour du phénomène de ductilité (voir figures III.11.a et III.11.b).

Les traitements de relaxation pour libérer les tensions internes (contraintes résiduelles) bloquées dans les tôles déformées présentant microstructures dont les grains sont allongés (figure III.2) Restaurer les caractéristiques mécaniques appropriées: (le terme de restauration désigne les phénomènes de réarrangements thermiquement activés au niveau de la microstructure (figure III.1) -dislocations- qui s'opèrent en présence de traitements thermiques de recuit ;

La limite entre la phase élastique et la phase plastique est appelée limite d'élasticité. Pour les aciers présentant un palier Lüders comme dans les figures (III.11.a et III.11.b) cette limite est facile à déterminer. Le recuit de la normalisation (traitement thermique) souvent pratiqué: celle-

ci comporte un chauffage au-dessus du point de transformation, suivi d'un refroidissement à l'air. Il en résulte un adoucissement et l'élimination d'une grande partie des contraintes, mais la structure et les propriétés ne sont pas toujours bien définies puisque la vitesse de refroidissement est fonction de la dimension de l'éprouvette.

Le pourcentage de réduction plus élevé entraîne des efforts plus importants conduisant à l'augmentation de la déformation plastique. Cette augmentation de la déformation plastique implique aussi des forces de contact plus élevées entre bande et l'outillage, augmentant ainsi la friction aux interfaces. Une plage de pourcentage de réduction pour les bandes en acier (figure III.17). Le pourcentage de réduction peut varier suivant le nombre de passes (tableau III.12).

La vitesse de laminage a une influence sur les efforts de traction. En général, une augmentation de la vitesse engendre une diminution de la force de laminage (figure III.16). La force sur le diminue aussi de son côté. Accordent cette diminution à une baisse de la friction causée par un épaissement du film d'huile entre le tube et l'outillage.

III.7. Conclusion du chapitre III

L'objectif de notre étude est la caractérisation du procédé de laminage à froid des tôles en acier, qui permet d'obtenir des bandes minces, en réduisant progressivement les épaisseurs.

Et comme l'acier est un paramètre essentiel qui régit le procédé de laminage à froid, il est donc nécessaire de sélectionner les propriétés mécaniques adéquates du matériau utilisé (E24-2) et de vérifier que cette nuance de fabrication mécanique répond aux exigences conventionnelles (Propriétés de ductilité et propriétés de résistance équilibrées). En outre la bonne connaissance du matériau utilisé est indispensable pour la réalisation d'une structure satisfaisante qui donne une garantie conception-dimensionnement. Les propriétés mécaniques du matériau déformées après laminage, sont améliorées après recuit de normalisation. Donc après cette opération de recuit l'acier reprenne une microstructure améliorée par des nouveaux grains et confère la meilleure des caractéristiques mécaniques en récupérant presque ses propriétés presque de références.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le laminage proprement dit n'est qu'une succession de déformations (les passes) qui vont engendrer un écrouissage du métal et de temps d'attente pendant lesquels la structure de l'acier pourra évoluer. Nous allons, dans un premier temps, décrire le phénomène d'écrouissage ainsi que les différents mécanismes

À l'état laminé à froid, la tôle n'est plus apte à subir des déformations à froid supplémentaires (emboutissage, par exemple). L'opération de recuit a pour objet de régénérer la microstructure par recristallisation, ce qui adoucit le métal et modifie l'anisotropie cristallographique : on obtient ainsi de bonnes propriétés plastiques adaptées au procédé de mise en forme ultérieure.

Au cours du laminage à froid, la géométrie de la déformation est imposée : allongement dans la direction du laminage, amincissement dans la direction normale au plan de laminage et pratiquement pas de déformation dans la direction transverse. Du point de vue microscopique, les grains s'allongent dans la direction de laminage tandis que, dans la direction perpendiculaire au plan de laminage, la taille des grains diminue.

On notera enfin que le laminage à froid est procédé de mise en forme des métaux. Les opérateurs de laminoirs à froid sont confrontés à de multiples impératifs. D'un côté, leurs clients veulent resserrer les tolérances d'épaisseur et de planéité et améliorer sans cesse la qualité de surface des produits. De l'autre, leur outil de production doit être extrêmement flexible pour fabriquer des produits de plus en plus différenciés alors que de hauts niveaux de productivité et de rendement sont les clés de leur compétitivité sur un marché mondialisé. L'industriel doit donc disposer d'une solution d'automatisation avancée permettant l'intégration totale et transparente de l'ensemble de l'appareil productif.

Références Bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. L. Throne, J. Beine, « Thermoformen »; Hanser Verlag Munich Vienna, (1999).
- [2] A. Illig, « Thermoformen in der Praxis »; Hanser Verlag Munich Vienna, (1997).
- [3] P. Montmitonnet, « Laminage »; Objectifs et modélisation, Techniques de l'Ingénieur, M3065 (2002).

- [4] Kékéli K., Simulation numérique de la planéité des tôles métalliques formées par laminage, 27 Novembre 2014, p. 19-20.

- [5] C. Bataille, Laminage des produits longs - Définitions et paramètres. Techniques de l'ingénieur, M7900, 2003.
- [6] P. Montmitonnet, Laminage - Objectifs et modélisation Techniques de l'Ingénieur, M3065 (2002).
- [7] P. Fabrègue, Métallurgie du laminage à chaud, Techniques de l'ingénieur. M7860, 2000.
- [8] zaoui m., influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées, cas des soudures épaisses, p.90.
- [9] J. Farhi, Coulée continue de l'acier. Généralités. Données physiques et métallurgiques. Techniques de l'ingénieur. M 7 810, 1989.

- [10] F. Montheillet et L. Briottet, Endommagement et ductilité en mise en forme. Techniques de l'ingénieur, Vol M3 032, pp. 1-19, 1998.
- [11] H. Bunge et C. Esling, Texture et anisotropie des matériaux. Techniques de l'Ingénieur, vol. M605, 1997.
- [12] P. Montmitonnet, Laminage à chaud. Théorie du laminage, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, vol. M7840, 1991.
- [13] J. Beynon, Tribology of hot metal forming. Tribology International, vol. 31, pp. 73-77, 1998.

- [14] Anouar Halloumi, Modélisation mécanique et thermique du procédé de laminage asymétrique, these de doctorat à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2011, pages: 3-10.

- [15] F. O. Neves, « Numerical and Experimental Analysis of tube Drawing with Fixed Plug», J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng., Vol XXVII, No. 4, (2005), p.(426-431)
- [16] J.P .Bomget , «Complément au projet d'étirage» ;Annexe au mémoire de maîtrise de Jean-Philippe Bomget, Alfiniti, 06-KZ-021, (2007), 32p.
- [17] M. Furugen ,T. Mase ,T. Kojima, K. Tawara, M.Tsukamoto, K. and T. Morikawa ,« Development of a Tube Drawing Process using Oil Lubrication and Pressurized Oil Lubrication», Third International Conference on Steel Rolling: Technology of Pipe and Tube and Their Application.; Tokyo, Japon; Code 8185, (1985),8 page.
- [18] R. Shivpuri, D. Bhaskararao, S. Murkherjee and, S.D., Kini , « Investigation of Ecology Friendly Lubrication in High Speed Drawing ofSSID Tubes»; CIRP Annals ; Manufacturing Technology, Volume 50, Issue 1, 2001, Pages (169-172), 4p.
- [19] J. Paré, « Théorie de l'étirage à froid de l'aluminium», Rapport interne, Alfiniti, (1999), 8p
- [20] Boutoutane B., Etude des avaries des cylindres de travail de laminage a froid, mémoire de Master soutenue 2014/2015, Universite badji mokhtar Annaba, page : 10.
- [21] Document Internet, Traitement thermomécanique, <http://thesis.univ-P.biskra.dz/1315/4/chapitre%20I.pdf>.
- [22] B. Lodej , K. Niang , P. Montmitonnet , J.L. Aubin ,«history of the metal deformation in cold pilgering of tubes»; J. Mater. Processing Technology 177, 188-191,(2006).
- [23] J.L.Vanegas , K. Mocellin ,«Modélisation numérique du laminage à pas de pèlerin et Optimisation»; de Carlan Y., Logé R.
- [24] T. Bénévise, L. P .Olier, «Rôle des transformations de phase sur l'optimisation de la mise en forme à froid de tubes ODS», de Carlan Y., Bossu D., Rouesne E., Logé R., Matériaux (2010), Nantes.
- [25] P. Fabrègue, « Métallurgie du laminage à chaud» ; Techniques de l'ingénieur. M7860, (2000)

- [26] JONAS (J.J.). – in Mathematical modelling of hot rolling of steel. Proceeding of the International Symposium in Hamilton, edited by S. Yue, p. 99 (1990).
- [27] YAMAMOTO (S.) et col. – Proc. of Thermomechanical processing of microalloyed austenite, Pittsburgh, p. 613 (1981).
- [28] SELLARS (C.M.). – in Thermec 88, Tokyo, p. 448 (1988).
- [29] MCQUEEN (H.J.) et JONAS (J.J.). – in Treatise on materials science and technology, vol. 6. Édité par Arsenault (R.J.) Academic Press, New York, p. 393.
- [30] TEGART (W.J.). – in Recrystallization 92. Éds Fuentes et Gil Sevillano. San Sebastian, Trans. Tech. Publications p. 1.
- [31] J. ESCOFFET , P.GUYON « Laminage à chaud des produits plats sur train à bandes». M 7 940 (1993).
- [32] J. Farhi , « Généralités. Données physiques et métallurgiques» ;Coulée continue de l'acier; Techniques de l'ingénieur. M 7 810, (1989).
- [33] P. Montmitonnet, Laminage à chaud. Théorie du laminage, Techniques de l'Ingénieur» ; traité Matériaux métalliques, vol. M7840, (1991).
- [34] Guy MURRY, Jean-Pierre Pescatore, in: Structural steels, Technical Engineering, Construction treated C 2 501.
- [35] Technique de l'ingénieur - volume M4 – Métallurgie
- [36] Martin (R.), Papazian (L.) and Ferron (A.) .- Properties of plastic hardening and anisotropy of metals. Application to the formability by drawing cold thin sheets. Memoirs Techn. CETIM (F), No. 23 (1976).
- [37] Document usine N°2, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de traction – NF 10002-1 (1990).
- [38] Manfred A.Hirt et Rolf Bez – Construction métallique V10 - EDITION Presses polytechniques et universitaires ROMANDES (2001). Page 66, 70,71.
- [39] TIEN (J. K.) et ANSELL (G.S.). – Alloys and microstructural design. Academic Press (1976).
- [40] M.T. HANNACHI, Evaluation of mechanical behavior of welded induction of steel pipes International review of mechanic engineering (I.R.E.M.E), 1970 - 8734(ID 2083) Novembre 2009.