

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

ETUDE DES AVARIES DES CYLINDRES DE TRAVAIL DE LAMINAGE A FROID

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : MECANIQUE AVANCEE

PRESENTE PAR : BOUTOUTANE BRAHIM

DIRECTEUR DU MEMOIRE : ALI RACHEDI MAHIEDDINE Pr

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :	M.	BEY .K	Pr
EXAMINATEURS :	MM.	HAIAHEM .A KHADRI .Y CHEMAMI .A/N BOUARICHA .A AIT SAID .A	Pr MCA MCB MCB MAA

Ann ée : 2014/2015

Dédicaces

Je dédie ce travail à l'âme de mes parents qui m'ont élevé et instruit.

A ma femme pour son soutien continu et encouragement.

A mes enfants, en souhaitant qu'ils soient instruis et atteignent les hauts
grades.

A mes frères et sœurs, ma familles.

A mes collègues à tous les niveaux.

Remerciements

Je remercie vivement Monsieur le Professeur Mahieddine Ali Rachedi directeur de mémoire de m'avoir pris en charge et encadré avec enthousiasme au sein de son équipe de recherche, il n'a pas épargné d'effort, pour mon suivi, ses conseils et orientations étaient très bénéfiques pour moi et ce à partir du choix du sujet jusqu'à sa finalisation.

Pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury, je remercie chaleureusement Mr le Professeur Kamel Bey responsable de notre formation.

Je remercie vivement Mr le Professeur Amar Haiahem, pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury de soutenance.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs Amor Bouaricha, Youcef Khadri et Abdennacer Chemami pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Un grand merci à Messieurs A. Gouri, S. Bouguerra et A. Ouamar dirigeants au sein des laminoirs pour leur soutien, prise en charge et contribution à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie également tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude et plus particulièrement Mr Y.Achachera.

Article :	Page
Dédicace	1
Introduction.....	2
Chapitre I : Le laminage à froid et ses aléas.....	3
1. Le laminage:.....	3
2. Description d'un laminoir à froid:.....	4
2.1. L'Organisation du Laminage à froid :	5
2.2. Le décapage :	6
2.3. Le laminoir (tandem).....	6
2.4. Le recuit :	6
2.5. Le skin passage :	7
3. Types de laminoirs à froid :	7
3.1. Le Laminoir tandem à cinq cages et paramètres de laminage:	9
3.2. Le contact Cylindre-Tôle ou foyer de déformation :	10
3.3. Aspect théorique du laminage et foyer de déformation:.....	11
3.4. Les cylindres de travail.....	22
3.4.1. Propriétés des aciers pour les cylindres de laminage à froid :	22
3.4.2. Fabrication des cylindres de travail :	23
3.4.3. Matériaux utilisés dans la fabrication des cylindres de travail:.....	23
3.4.4. Procédé de fabrication des cylindres de travail :	24
3.4.4.1. Coulée par Centrifugation:.....	24
3.4.4.2. Processus CPC :	25
3.4.4.3. Processus HIP :	26
3.4.4.4. Processus ESR :	27
3.4.4.5. Usinage à l'outil:.....	28
3.4.5. Contrôles et Détection des défauts de Cylindres :	28
Chapitre II : Etude tribologique du contact Tôle – Cylindre:.....	
1. Le frottement:.....	32
2. L'usure:.....	34
3. La lubrification:.....	34
3.1. Le rôle principal du lubrifiant dans le laminage à froid:.....	34
3.2. Formulation technologique des lubrifiants du laminage à froid:.....	35
3.3. Nature du lubrifiant :	36
3.4. Caractéristiques physico-chimiques des huiles et émulsions:.....	36
4. Les avaries des cylindres de travail du laminage à froid:.....	37
4.1. Les tensions :	38
4.2. L'usure :	38
4.2.1. Usure par abrasion:.....	39
4.2.2. Usure par adhésion:.....	40
4.2.3. Usure par corrosion, usure chimique:.....	42
4.3. Corrosion de contact:.....	43
4.4. Sur contraintes:.....	45
4.5. Fluage superficiel:.....	46

Table des Matières

4.6. Fatigue:.....	47
4.6.1.Les lubrifiants et la fatigue de surface:.....	48
4.7. Erosion :.....	49
4.8. Fatigue thermique :.....	50
Chapitre III : Analyse Statistique des Avaries des Cylindres de	
1. Les données des avaries des cylindres de travail du laminoir à froid au niveau de ArcelorMittal Algérie:... ..	53
2. Fréquences de changement des cylindres de travail/année 2008-2009 et 2010:.....	54
3. Motifs et Causes de changement des cylindres dans les différentes cages des 4 premiers mois Année 2010 :.....	56
4. Tableau de suivi des ratios de consommation des cylindres de travail du laminage à froid des Années 2013 2104 et les premiers mois de 2015.	58
5. Récapitulatif des avaries des cylindres de travail dans le laminage à froid:.....	60
6. Représentation graphique montrant l'évolution des ratios de consommation des cylindres LAF :	
7. Suivi détaillé des cas d'éclatements des cylindres LAF en 2014:.....	61
8. Hiérarchisation des Causes par Ordre d'Importance selon Méthode de Pareto	64
9. Résultats obtenus :.....	66
Chapitre IV : Conclusion et recommandations :	
1. Conclusion :.....	69
2. Recommandations pour l'élaboration d'un cahier des charges :.....	69
 Bibliographie :	 72

Introduction

Le cylindre est l'outil dont le rôle est indispensable dans le processus de laminage, la qualité de surface du produit laminé dépend d'une manière significative des propriétés et caractéristiques fonctionnelles de cet outil.

Les avaries des cylindres de travail du laminage à froid présentent des soucis majeurs chez les lamineurs, le fait qu'ils sont considérés les outils essentiels rentrant dans la production des produits plats.

Ces avaries ont des impacts directes sur la qualité des produits laminés, la non qualité d'un cylindre induit forcément à la non qualité du produit fini destiné pour les clients internes ou externes.

Les arrêts de production qui en découlent des ces avaries, sont souvent le cas, accidentels si les défaillances des cylindres ne sont pas détectées et prévenues à temps, les conséquences peuvent être plus graves sur toute la chaîne de production car le processus de laminage est un processus continu, donc les défauts peuvent se cumuler et se multiplier et peuvent se compliquer durant l'écoulement de la bande laminée.

Le contact dynamique cylindre-tôle (métal-métal) est un phénomène très complexe, l'entraînement de la tôle et sa déformation plastique sous l'effet du frottement par deux cylindres en mouvement qui se déforment eux même élastiquement, l'usure, la lubrification et le refroidissement, les vibrations, la résistance du matériau des cylindres,..... font partie de la complexité de ce phénomène.

Les lamineurs dans un laminoir à froid cherchent par conséquent pour le bon fonctionnement de leur processus de production à établir un paramétrage adéquat et stable, qui doit s'accompagner avec une qualité plus performante en matière de la fourniture des cylindres de travail.

La finalité recherchée à travers nos analyses sur les avaries des cylindres de travail à froid est d'arriver à leurs donner des explications avec des approches scientifiques, qui va permettre aux lamineurs de s'en servir afin de réussir à ce que les causes soient éliminés le maximum possible, car l'usure prématuré ainsi que les pertes en cylindres génèrent des couts importants, il est à noter qu'un cylindre en acier forgé coute plus de Deux (02) Millions de Dinars. L'élimination et la détection anticipée, des causes possibles contribuent à concrétiser des gains pour l'entreprise.

Chapitre I

Le laminage à froid et ses aléas

1. Le laminage :

Les feuilles et les bandes à partir de l'acier ou métaux non ferreux sont produits dans le processus de laminage souvent le cas entre deux cylindres parallèles. On doit faire une distinction entre le laminage à chaud et le laminage à froid des produits plats.

Le terme **laminage à chaud** désigne le processus de laminage à des températures au delà de celle de la température de recristallisation du métal dont stock de laminage (tel que brames, billettes, et fil) est Composé, pour l'acier de l'ordre de 720 à 1260°C pour le métal, pour l'Aluminium est de l'ordre de 250-500°C.

L'avantage du laminage à chaud est ce que le produit à laminer est plus doux à des hautes températures, et peut être déformable avec le moindre effort. L'acier va être dans la phase austénitique plus que l'état de ferritique (ie : les atomes de Fer vont être ordonnés sous forme de face cubique centrée plutôt qu'une forme centrée cubique. Dans l'état austénitique les degrés de déformation (ie : les ratios géométrique de l'entrée vers les dimensions à la sortie) de l'ordre de 1 :250 sont possibles (par exemple le cas d'une brame typique a une épaisseur (Hauteur) de l'ordre de 240 mm, son épaisseur finale sera selon formule de l'ordre de 0,8 mm.

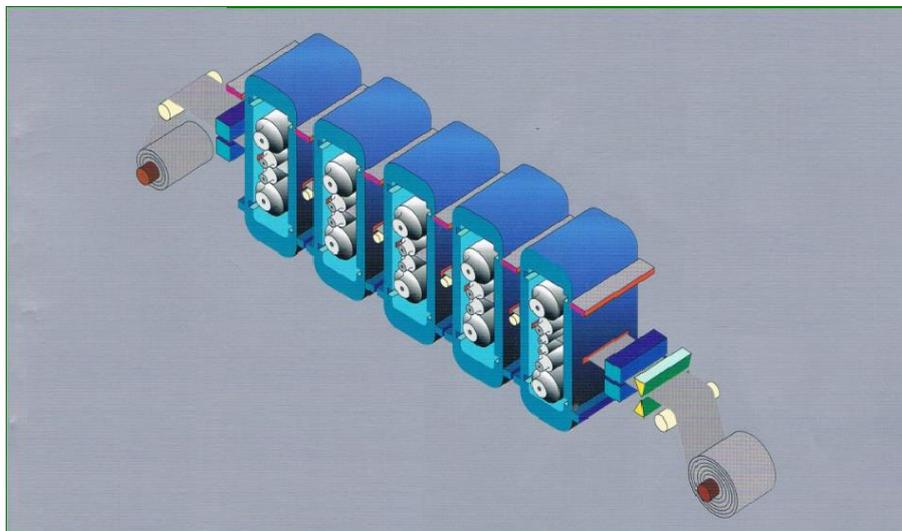


Fig 1 : représentation Schématique d'un laminoir à froid à 5 cages

[1] : aléas : Probabilité qu'un phénomène accidentel produise en un point donné des effets donnés, au cours d'une période déterminée

Par contre le terme **laminage à froid** désigne un processus de laminage pour les produits plats, qui selon **Euronorm 79-82** conduit à une réduction d'une section

transversale d'au moins 25% sans préchauffement, le laminage à froid donne de fines épaisseurs de bandes laminées avec une grande précision, et une meilleure qualité de surface, et possibilité d'avoir un recuit adéquat et meilleures caractéristiques de déformation par rapport au laminage à chaud.

2. Description d'un laminoir à froid (LAF):

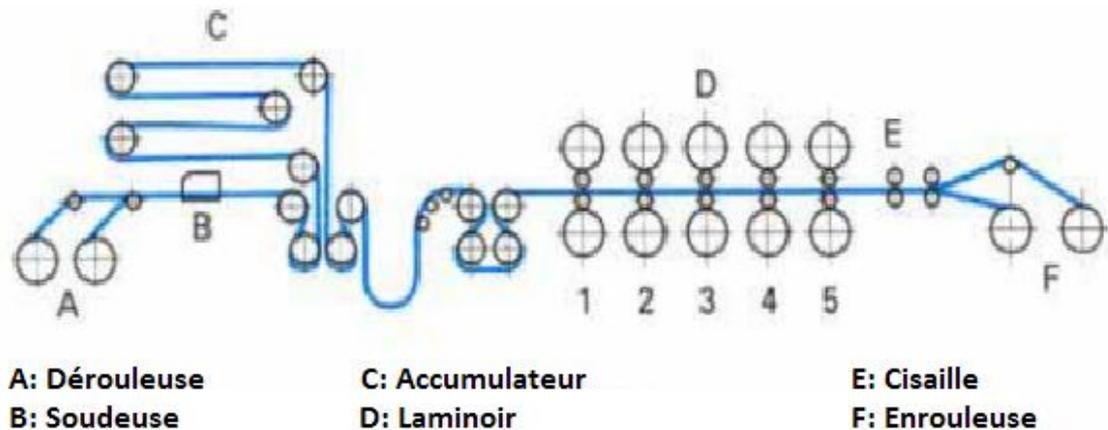


Figure 2 –Schématisation d'une ligne de production de Laminage à froid

Au début des années 70 est apparu le laminage ininterrompu appelé continu, réalisé à partir de bobines décapées, soudées bout à bout à l'entrée du laminoir (voir en dessus figure 2).

La première installation de ce genre, mise en service en 1969, à la Nisshin Steel est un train tandem Constitué de trois cages Sendzimir multicylindres.

Le premier train quarto de laminage ininterrompu a été le 5 cages fer blanc de Nippon Kokan à Fukuyama, qui date de 1971. Il a été suivi notamment par le 5 cages fer blanc de National Steel à Weirton (États-Unis) en 1975, le 5 cages tôle mince de Novo-Lipetzki (Russie) en 1981 et le 4 cages tôle mince de Cockerill Sambre, Ferblatil (à Liège), rénové en train entièrement continu en 1988.

Les installations de laminage continu se caractérisent essentiellement par :

- la suppression des engagements et dégagements de bandes
- la possibilité d'exercer une forte traction à l'entrée de la première cage, et donc d'augmenter le taux de réduction de cette cage.

Le laminage à froid ne fait pas que du laminage à froid, mais met en œuvre un ensemble de procédés qui permettent de passer de la bande laminée à chaud à une large gamme de produits finis destinés à des marchés très variés.

Dans l'ordre de la fabrication, on distingue le décapage, le laminage à froid proprement dit, le recuit, les procédés de revêtement, les opérations de finissage voir Fig 1 « Cycle des opérations de l'unité de laminage à froid ».

Lorsque l'acier passe par le processus de laminage à froid, il est pressé sur une épaisseur pré-ordonnée de finition supplémentaire.

2.1. L'organisation du laminage à froid :

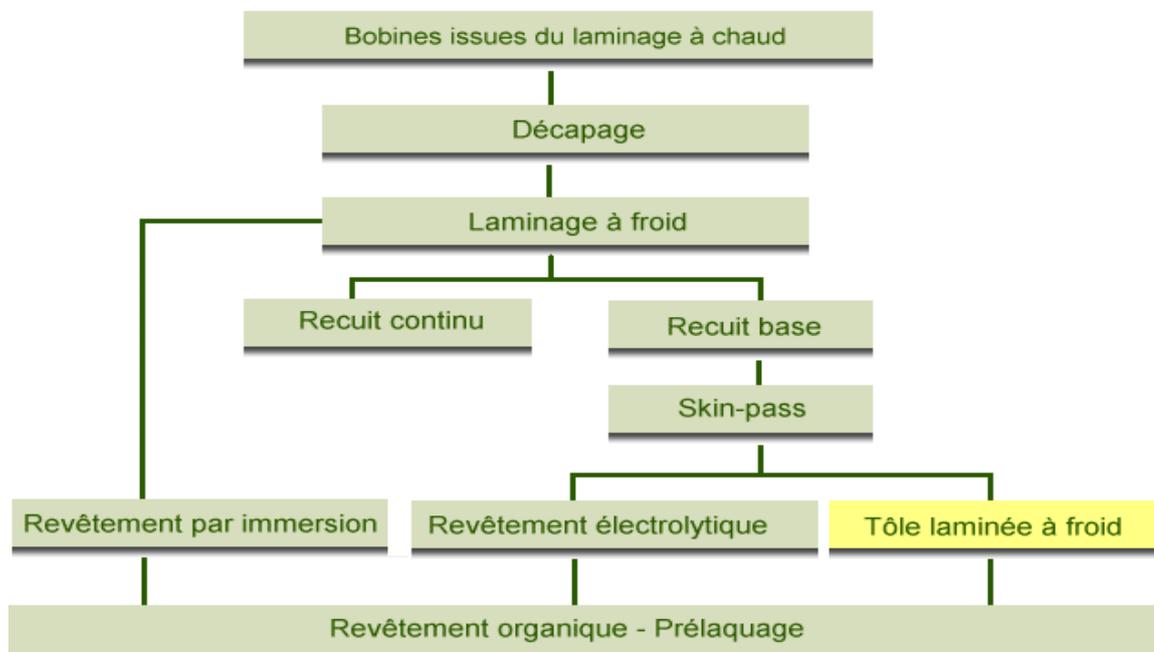


Fig 3 : Organisation d'un laminoir à froid

Pour remplir ces objectifs, le lamineur est confronté aux contraintes technologiques du laminoir, et plus particulièrement l'élasticité des éléments constitutifs de la cage du laminoir et les limitations en puissances des moteurs d'entraînement.

L'élasticité du système implique un certain "cédage" de cage engendré par les forces de laminage.

Le cycle des opérations de l'unité de laminage à froid (voir Fig. 1) s'applique aux bobines laminées à chaud et comporte quatre étapes principales :

2.2. Le décapage : L'opération de décapage pour le décalaminage n'est nécessaire que pour la galvanisation des produits laminés à chaud afin de retirer la calamine du laminage à chaud.

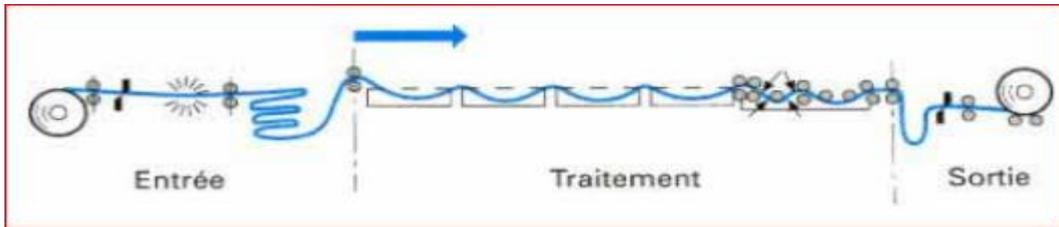


Figure 6 – Schéma d'une ligne continue de décapage

Le décapage des bobines non recuites laminées à froid s'effectue par activation. Les deux procédés sont effectués dans l'acide chlorhydrique et sont suivis d'un rinçage.

Les autres opérations du laminoir à froid de tôle non revêtue concernent le dégraissage avant recuit de la bande laminée avec une huile à haut indice de saponification ainsi que le parachèvement des produits : inspection de surface, coupe de feuilles à longueur, refendage de bobines, conditionnement, etc.

2.3. Le laminage (tandem) : dont le rôle est de réduire l'épaisseur de la bande à la valeur désirée.

2.4. Le recuit : destiné à régénérer la structure cristalline du métal laminage à froid, sous des températures pouvant atteindre les 830°C dans un processus continu pour but d'avoir comme résultat attendu ; c'est l'homogénéité des propriétés de la tôle. Au cours du laminage à froid, celui-ci produit un durcissement et une perte de ductilité du métal. Il est devenu dur et cassant, et impropre à une utilisation. Ce recuit de recristallisation a pour objet de conférer à l'acier une taille de grain permettant l'obtention des caractéristiques mécaniques finales du produit.

Deux procédés sont utilisés :

Le recuit conventionnel en four « cloche » ou recuit base :



Fig 4: four de recuit ArcelorMittal Algérie
unité LAF



Fig 5 : vue de l'intérieur four de recuit
ArcelorMittal Algérie unité LAF

Le recuit se fait dans des fours cloches dans lesquels les bobines sont empilées (voir Fig 4) sur des bases. A l'intérieur de cette cloche circule un gaz protecteur (mélange azote-hydrogène ou hydrogène pur).

Le four proprement dit vient coiffer cet ensemble et réalise un cycle.

- Chauffage lent (5 à 10 heures pour
- atteindre 710°C environ)
- Maintien (10 heures environ)
- Refroidissement lent pour revenir au
- voisinage de la température ambiante.

Dans le cas du recuit continu, le but poursuivi est thermique rapide, homogène et uniforme afin d'obtenir une bande continue dans toute l'installation.

On trouvera sur une installation de recuit continu :

Des sections entrée et sortie (accumulateurs) qui évitent tout arrêt de la ligne

- Des fours qui peuvent comprendre jusqu'à cinq zones distinctes
- Le chauffage qui permet à la bande d'atteindre la température de recristallisation (620°C à 850°C suivant les produits)
- Le maintien est la zone dans laquelle la température est maintenue constante pour permettre la croissance du grain
- Le refroidissement lent qui permet de contrôler la texture du métal
- Le refroidissement rapide pour préparer l'acier au sur-vieillissement en gelant une quantité maximale de carbone en sursaturation
- Le sur-vieillissement qui précipite le carbone en solution et évite tout vieillissement ultérieur
- Le refroidissement final qui amène l'acier à température ambiante

2.5.le skin-passage :

Pour les aciers comportant du carbone et de l'azote (éléments interstitiels), le métal après recuit présente un palier de limite d'élasticité. Le skin-pass a pour objectif d'effacer le palier de limite d'élasticité et de fixer les caractéristiques mécaniques.

Il imprime également la rugosité nécessaire à l'utilisation et améliore la planéité.

À noter que sur un recuit continu, le skin-pass fait partie de la ligne de fabrication.

3.Types de laminoirs à froid :

la nomenclature et les descriptions des principaux types de laminoirs, leurs appellations donnent une première indication concernant l'usage prévu des cylindres. Pour rendre les choses plus claires et simples, nous commençons par les nombres :

2	3	4	5	6	6	12	20
---	---	---	---	---	---	----	----

Deux hauts laminoirs	Trois hauts laminoirs	Quatre hauts laminoirs	Cinq hauts laminoirs	Six hauts laminoirs	Six Rouleaux laminoirs	Douze enrouleurs (cluster) laminoirs	Vingt Enrouleur (cluster) laminoirs
----------------------	-----------------------	------------------------	----------------------	---------------------	------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------

Tableau 1 : Différents types de laminoirs à froid

Disant que les laminoirs à base de deux, trois et Quatre sont abandonnés dans l'industrie de la sidérurgie, car devenus moins performants devant les laminoirs à Cinq cages et plus.

Le cas échéant comme notre laminoir froid du Site ArcelorMittal Algérie à Annaba est celui à Cinq Cages (Tandem) aussi appelés Laminoir de **Taylor** ayant l'origine du père technicien Américain.

L'idée de base c'était de faire plier une faible, flexible cylindre centré à travers la force de laminage en continu de la tôle, comme nous le savons aujourd'hui ceci est une tentative qui a aboutit à la technologie moderne utilisée actuellement dans le laminage.

Soit des cages isolées équipées de dérouleuses / enrouleuses. Ces laminoirs se nomment alors des « réversibles » également connus sous procédé « **Sendzimir** ». On effectue plusieurs passes alternativement dans un sens et dans l'autre.

Voir Image :

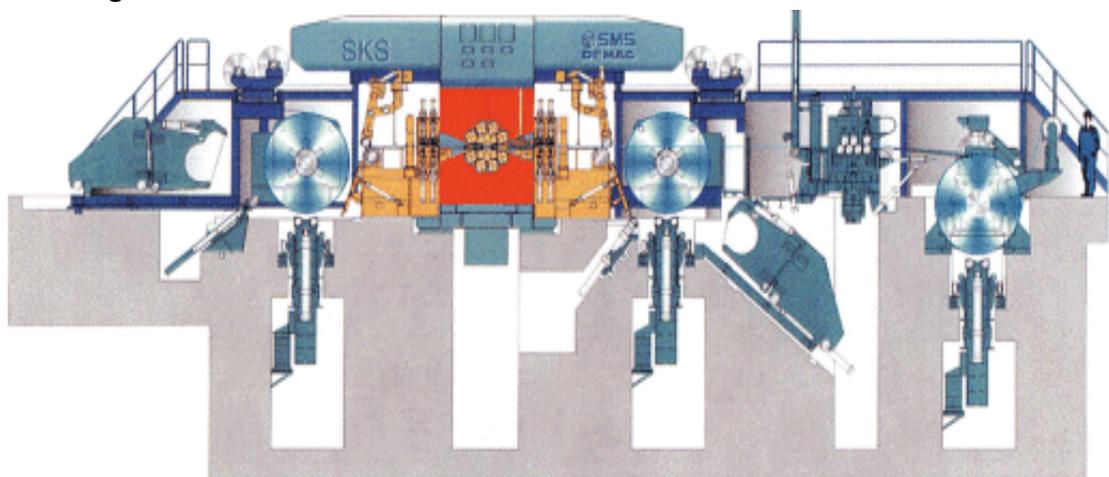


Fig7: Procédé de laminoir à froid du type connu sous « Sendzimir ».

Soit le plus souvent, des laminoirs « tandem », où la bande est en prise simultanée dans plusieurs cages, ce qui permet des tractions élevées, et des productivités très supérieures au laminoir réversible.

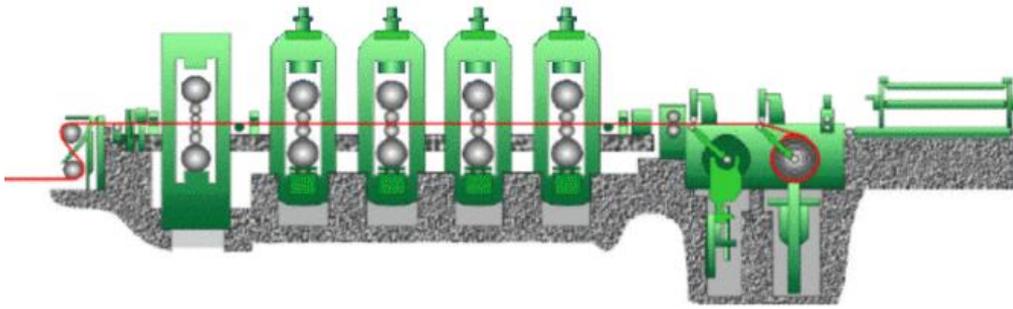


Fig 8 : Procédé de laminoir à froid du type connu sous « Tandem »



Fig 9 : Laminoir Tandem à 5 Cages au niveau ArcelorMittal Algérie

3.1. Le laminoir tandem à cinq cages :

Dans le but de répondre aux exigences de production le laminage continu requiert la mise en Oeuvre d'une fonction permettant de changer le réglage (point de fonctionnement) du laminoir sans arrêter ce dernier. Une meilleure compréhension et une introduction au concept du « parallélisme plan » requiert que ce qui mène à dire que la réduction d'épaisseur dans le laminage requiert une force, cette force se transmet à travers les paliers des cylindres et les cylindres se déforment en fonction de ces forces exercées.

l'institut Coréen des recherches sidérurgiques dans le domaine du laminage à froid (Tandem à Cinq cages) est arrivé à définir les principaux paramètres de laminage qui sont considérés typiques et qui peuvent être valables pour le cas de notre laminoir AMA:

Nombre de cages	5
Largeur (mm)	600 - 1880
Epaisseur à l'entrée (mm)	1,5 – 5,0
Epaisseur à la sortie (mm)	0,18 – 2,0
Réduction Maxi	90%
Force de laminage	10 – 15 Kgf/mm ²

3. Le contact cylindres-tôle et foyer de déformation :

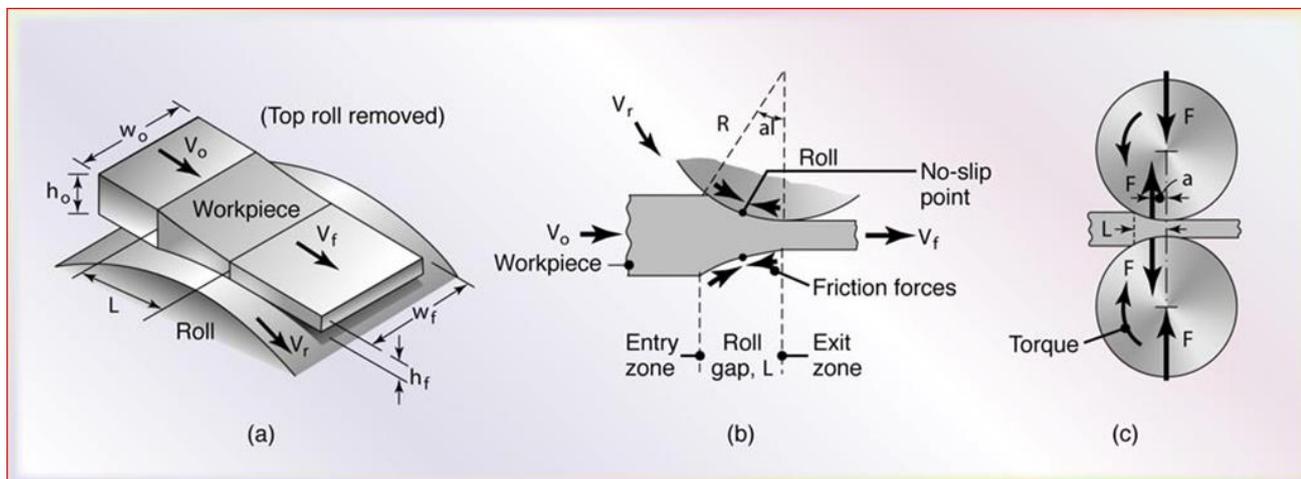


Figure 10 : (a) Illustration schématique du laminage d'un produit plat (b) forces de frottement agissant sur les surfaces de la bande. (C) Force des cylindres F, et effort de Torsion T appliqués sur les cylindres de travail, W largeur de la bande qui augmente durant le laminage.

Réductions des épaisseurs par cage :

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.

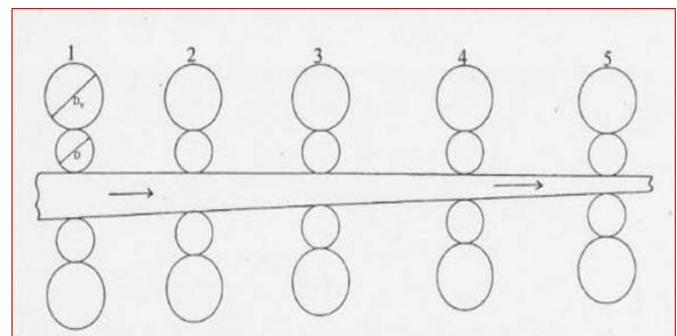
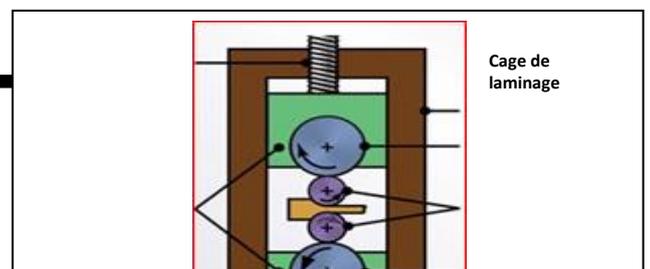


Figure 11 : diagramme schématique du flux et des réductions par cages

Comme illustré dans la figure à droite :



- Une cage de laminage Quarto qui se compose essentiellement de :
- une paire de Cylindres de travail
 - une paire de Cylindres d'Appui
 - Mécanisme de serrage des cylindres à système
 - Hydraulique (le cas de AMA).



Figure 12 : la cage quarto du train de laminage tandem

3.3. Aspect théorique du laminage et foyer de déformation:

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 :

$$B_0 = B_1 = B \text{ finale} \dots \dots \dots (1)$$

$$H_0 - H_1 = \Delta H \text{ (mm)} \dots \dots \dots (2)$$

$$CB = \Delta H / 2 \text{ (mm)} \dots \dots \dots (3)$$

$$\cos \alpha = OC / OA = (R - \Delta H / 2) / R = 1 - (\Delta H / D) \dots \dots \dots (4)$$

$$AC = Ld = R * \sin \alpha \dots \dots \dots (5)$$

$$Ld = AC = \sqrt{(AB)^2 - (BC)^2} \text{ (mm)} \dots \dots \dots (6)$$

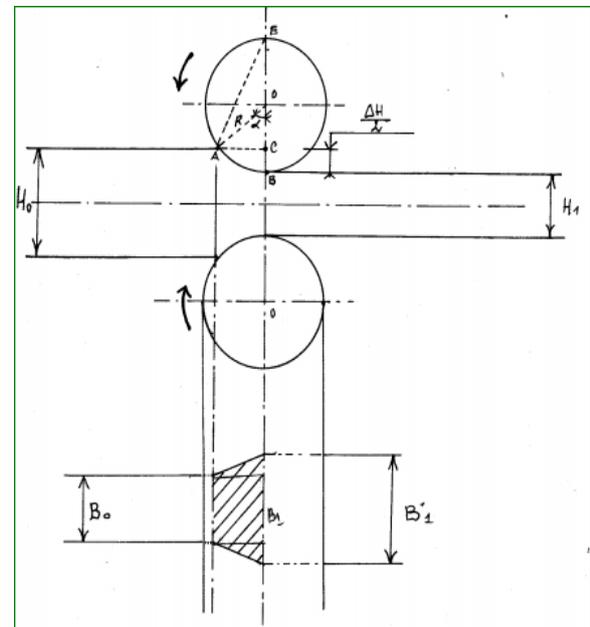


Fig 13 : représentation théorique du Contact Cylindres de travail-Tôle (Foyer de déformation)

$$AB/BC=BE/AB \text{ donc } (AB)^2=BC*BE.....(7)$$

$$\text{Donc } AB= \sqrt{(BC)(BE)} \text{ (mm)(8)}$$

$$AB=\sqrt{(DH/2)(2R)} = \sqrt{R * \Delta H} \text{ (mm)(9)}$$

$$Ld=\sqrt{(AB)^2 - (BC)^2} = \sqrt{(R * \Delta H) - (\Delta H/2)^2} \text{ (mm)(10)}$$

Pour le laminage à froid les épaisseurs des bandes à laminier sont très faibles, les réductions absolues DH_i sont aussi beaucoup plus faibles.

$$(\Delta H/2) \text{ est très faible donc } (\Delta H/2)^2 \text{ tend vers } 0 \text{(11)}$$

$$(\Delta H/2)^2 \ll R*\Delta H \text{ ce qui donne } Ld = \sqrt{R * \Delta H} \text{ (mm)(12)}$$

La surface du foyer de déformation F_c :

$F_c = l*(B_0+B_1)/2$ (13), mais dans notre cas l'élargissement est considéré comme négligeable,

$$\text{Donc } F_c= B*Ld \text{ (mm}^2\text{).....(14)}$$

Dans ce cas les valeurs de la longueur du foyer de déformation (Ld) et la surface F_c sont obtenus sans avoir tenu compte de l'aplatissement des cylindres de travail au cours du processus de laminage.

Condition d'engagement du Métal :

F étant la force de propulsion (écoulement)
 U force d'inertie.

$$\Sigma \text{ forces}/x= 0 \text{ ce qui donne(15)}$$

$$2T\cos\alpha-2N\sin\alpha+F-U=0.....(16)$$

$$\text{Soit } T=N*\mu.....(17)$$

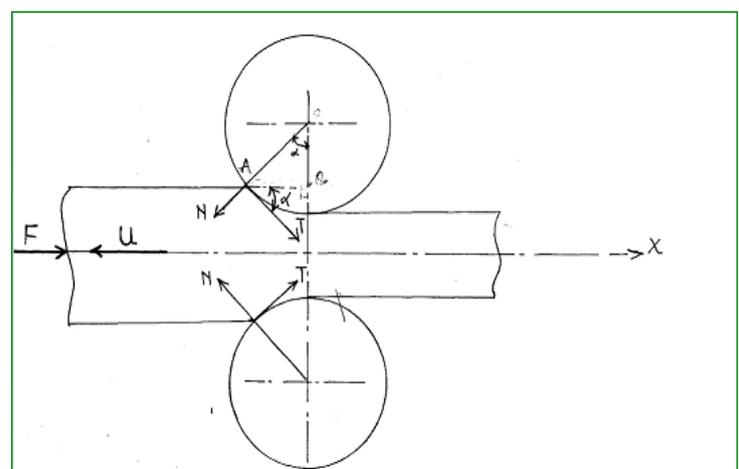


Fig 15 : Conditions d'engagement du Métal et $\mu = \frac{F}{2N\cos\alpha}$

dans notre cas l'engagement dans la

première cage S'effectue sans propulsion

d'où $F=0$,(18)

et l'inertie Sera également nulle

d'où $U=0$ (19)

donc

$\mu = \operatorname{tg}\alpha$ d'où $\alpha = \operatorname{arctg}\mu$(20)

soit $\operatorname{arctg}\mu = \varphi$ (20) ou $\alpha \leq \varphi$ telle est la condition d'engagement

Détermination de l'angle d'entraînement :

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{\Delta H_i}{R}} \quad (\text{rd}) * 180/3,14 \quad (\text{degré}) \dots\dots\dots(21)$$

ΔH_i : est la réduction absolue.

R : le rayon du cylindre de Travail (mm).

Détermination des paramètres géométriques du foyer de déformation en tenant compte de l'aplatissement des cylindres de travail:

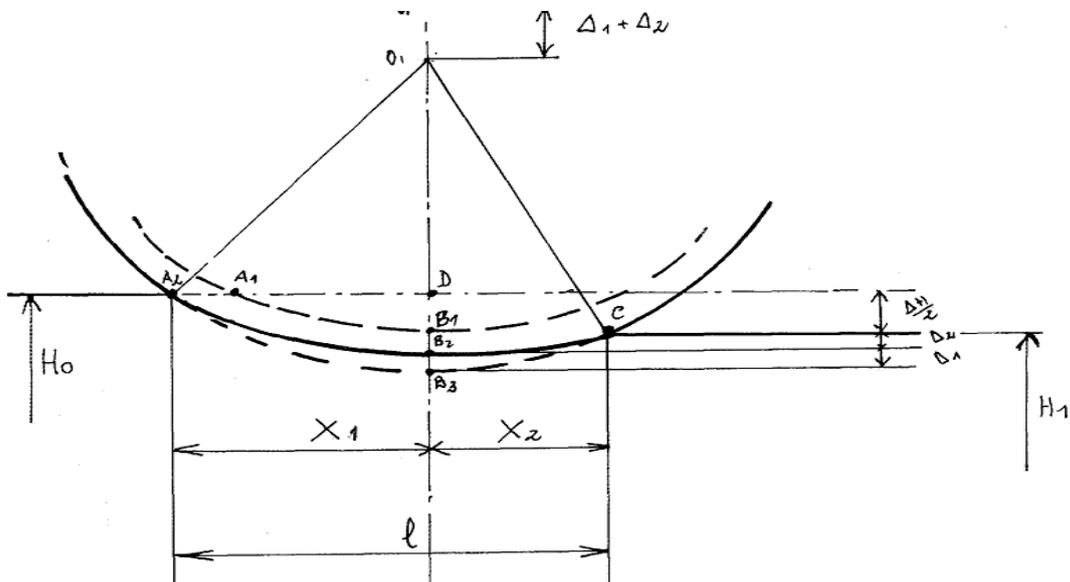


Fig 16 : Aplatissement du cylindre de travail en contact avec la tôle

$$l=X_1+X_2 \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(22)$$

$$X1 = \sqrt{(OA2)^2 - (OD)^2} = \dots\dots\dots(23)$$

$$\sqrt{(R)^2 - (R - B3D)^2} \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(24)$$

$$X1 = \sqrt{(R)^2 - (R - B1B3)^2} \quad (\text{mm}) \dots\dots(25)$$

$$B3D = DH/2 + \Delta1 + \Delta2 \dots\dots\dots(26)$$

$$B1B3 = +\Delta1 + \Delta2 \dots\dots\dots(27)$$

$(B3D)^2$ et $(B1B3)^2$ sont négligeables
Par rapport aux autres termes.

$$l = X1 + X2 = \approx \sqrt{(\Delta H/2 + \Delta1 + \Delta2)2R} + \sqrt{(\Delta1 + \Delta2)2R} \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(28)$$

$$l = \sqrt{2R(\Delta1 + \Delta2) + R\Delta H} + \sqrt{(\Delta1 + \Delta2)2R} \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(29)$$

$$\text{soit } X2 = \sqrt{(\Delta1 + \Delta2)2R} \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(30)$$

$$l_{app} = \sqrt{R\Delta H + X2^2} + X2 \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(31)$$

posons $X2 = X^2$

$$l_{app} = X + \sqrt{R\Delta H + X^2} \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(34)$$

$$\text{d'après TSELIKOV } X = Pm.R.C \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(35)$$

où

Pm: pression spécifique (kgf/mm²)

R : rayon du cylindre de travail. (mm)

C : Constante du matériau (mm²/kgf)

D'où

$$l_{app} = Pm.R.C + \sqrt{R\Delta H + (Pm.R.C)^2} \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots(36)$$

$$C = 8 \cdot \frac{1-v^2}{\pi.E} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{kgf} \dots\dots\dots(37)$$

pour les cylindres en acier.

Détermination des Contraintes d'écoulement :

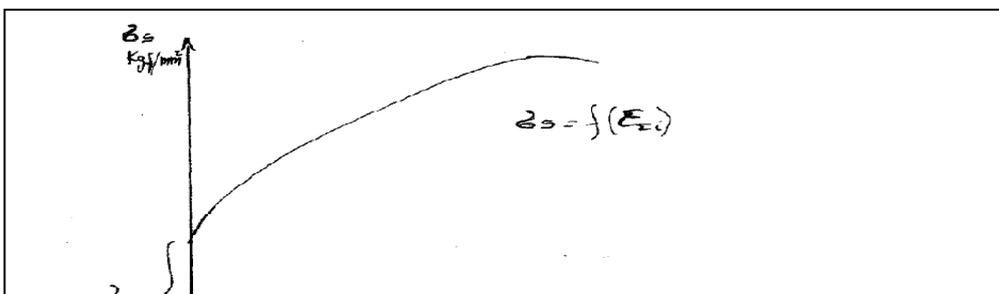


Fig 17 : Courbe Contraintes et déformations du métal laminé en écoulement

Etant donné que le tandem est constitué de Cinq cages pour chaque passe la valeur de la limite d'écoulement varie d'une passe à une autre et en fonction du taux de déformation accumulé celle-ci correspond à :

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + A (100 \varepsilon \Sigma i)^n \quad (\text{kgf/mm}^2) \dots\dots\dots(38)$$

où :

σ_s : limite d'écoulement en kgf/mm²

σ_{s0} : limite d'écoulement du métal avant laminage à froid en kgf/mm²

A: coefficient d'écrouissage.

$\varepsilon \Sigma i$: taux de déformation accumulé rapporté dans tous les cas à l'épaisseur initiale

H_0 où :

$$\varepsilon \Sigma i = \frac{H_0 - H_i}{H_0} \dots\dots\dots(39)$$

η = coefficient qui représente le degré ou l'ordre de la fonction

$$\sigma_s = f(\varepsilon \Sigma) \dots\dots\dots(40)$$

La courbe $\sigma_s = f(\varepsilon \Sigma)$ est de la forme

$$y = ax^n + b \dots\dots\dots(41) \text{ ou}$$

$$b = \sigma_{s0} \text{ en } (\text{kgf/mm}^2) \dots\dots\dots(42)$$

et

$a=A$ coefficient angulaire

η : degré qui détermine l'allure de la courbe représentative de la fonction $\sigma_s = f(\varepsilon \Sigma)$

Détermination du Coefficient de frottement:

$$f = K \left(0,07 - \frac{0,1 V_i^2}{2(V_{i+1}) + 3V_i^2} \right) \dots\dots\dots(43)$$

Ou K=coefficient d'émulsion

V_i = vitesse circonférentielle des cylindres de travail dans une cage «i»

Le coefficient de frottement est un facteur très important.

Il influe d'une façon directe dans le processus du laminage surtout lors de la prise du métal.

Détermination de la pression spécifique:

La pression spécifique est le paramètre énergétique principal conçu pour la déformation plastique du métal, c'est pourquoi il faut la calculer d'une manière précise, car si on applique une pression supérieure à celle exigée par le processus : nous aurons d'une part le non respect des normes dimensionnelles des produits laminés et d'une autre une surconsommation d'énergie, par contre si on détermine une valeur de la pression inférieure à celle exigée par le processus , nous n'aurons pas la déformation plastique suffisante du métal, et de ce fait dans les deux cas le produit laminé sera pratiquement déclassé ou non conforme.

La valeur de la pression spécifique est donnée par l'expression suivante:

$$P_m = A [B^{k_i \mu_i} \cdot e^{m_i} - k (\beta \mu_{i+1})] \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad \dots\dots\dots(44)$$

$$A = \frac{1,15 \beta q_{i+1} - q_{i+1}}{m_i} \quad \text{kgf/mm}^2 \quad \dots\dots\dots(45)$$

$$\beta = \frac{1,15 \beta_i - q_i}{1,15 \beta_{i+1} - q_{i+1}} \quad \dots\dots\dots(46)$$

A : facteur qui détermine l'état de contrainte et de traction par rapport à l'état de surface m_i

m_i : état de surface

$$m_i = f \frac{l_d}{H_m} \dots\dots\dots(47)$$

f: coefficient de frottement

l_d : longueur du foyer de déformation (mm)

H_m : épaisseur moyenne d'une bande pour une passe considérée.

$$H_m = \frac{H_i + H_{i+1}}{2} \quad (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots(48)$$

σ_i et σ_{i+1} : contraintes d'écoulement avant et après une passe en (kgf/mm²)

q_i et q_{i+1} : traction unitaire avant et après une passe en (kgf/mm²)

$$k_i = \frac{1}{H_{i+1} \mu_i} \quad \dots\dots\dots(49)$$

où μ_i : coefficient d'allongement

$$\mu_i : \frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{B_{i-1} \cdot H_{i-1}}{B_i \cdot H_i} = \frac{H_{i-1}}{H_i} \quad \dots\dots\dots(50)$$

étant donnée que le processus de laminage n'est pas accompagné d'élargissement : ΔB .

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

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

P_m : pression spécifique kgf/mm^2

B : largeur de la bande mm

l_{app} : longueur du foyer de déformation d'après Tselikov en mm .

Détermination du moment de laminage :

Pour un cylindre de travail $M_{lam} = P \cdot \Psi \cdot l_{app} \quad (T.m) \dots\dots\dots(52)$

Pour l'ensemble des deux cylindres :

$$M_{lam} = 2 \cdot P \cdot \Psi \cdot l_{app} \quad (T.m) \dots\dots\dots(53)$$

$$M = P_v \cdot a \quad (T.m) \dots\dots\dots(54)$$

P_v : projection verticale de la pression P

$$P_v = P \cdot \cos\varphi \dots\dots\dots(55)$$

où φ est un angle infiniment

$$\text{Petit} \Rightarrow \lim_{\varphi \rightarrow 0} \cos\varphi = 1 \dots\dots\dots(56)$$

$$\Rightarrow P_v \approx P \Rightarrow M = P \cdot a \quad \dots\dots\dots(57)$$

a étant le bras de levier.

à son tour $a = \Psi \cdot l_{app}$

Ψ : coefficient de proportionnalité ou coefficient

Du bras de levier.

l_{app} : longueur du foyer de déformation en tenant compte de l'aplatissement des cylindres de travail

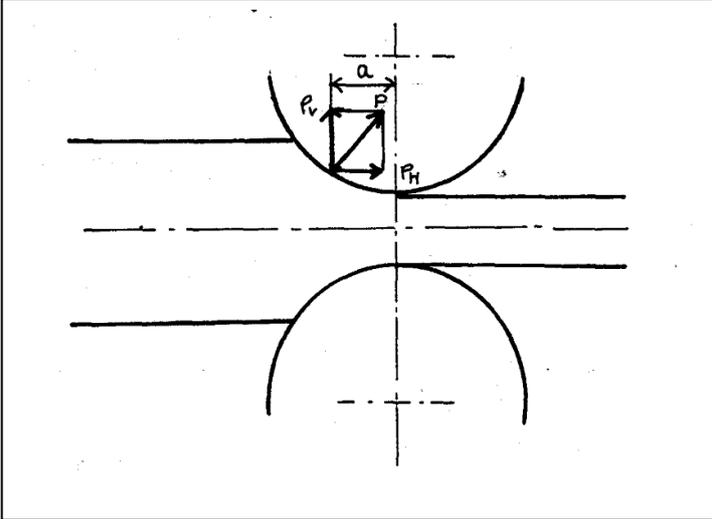


Fig 18 : pressions exercées sur cylindres et moment résultant

Détermination de la puissance du moteur électrique de la commande d'un cylindre de travail:

$$N = \frac{M \cdot \eta}{0,975} \quad \text{en (kw)} \dots\dots\dots(58)$$

η : nombre de tours du cylindre de travail (tr/mn)

$M\Sigma$: Moment sommaire = $M_{lam} + M_f + M_{mv} + M_{dyn} + M_t$ (T.m)(59)

M_{lam} : moment de laminage (T.m)

M_f : moment de frottement (T.m) = $M_{fp} + M_{ftr}$ (60)

M_{fp} : moment de frottement dans les paliers des cylindres

M_{ftr} : moment de frottement dans la transmission du laminoir.

Pour déterminer (calculer) le moment de frottement dans les paliers des cylindres de travail :

$$M_{fp} = P_L \mu_p d_p \left(\frac{D_{tr}}{D_{ap}} \right) (T.m) \quad \text{.....(61)}$$

μ_p : coefficient de frottement dans les paliers pour le cas présent de paliers à rouleaux coniques $\mu_p = 0,004$.

d_p : Diamètre intérieur du palier (mm)

D_{tr} : diamètre du cylindre de travail (mm)

D_{ap} : diamètre du cylindre d'appui (mm)

Pour déterminer (calculer) le moment de frottement dans la transmission du laminoir :

$$M_{ftr} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) (M_{lam} + M_{fp}) \approx (0,08 \div 0,18) \cdot (M_{lam} + M_{fp}) \quad \text{.....(62)}$$

ou η : coefficient de rendement du mécanisme.

Détermination du moment de marche à vide :

Généralement le moment de marche à vide M_{mv} est évalué à : $M_{mv} \approx (2 \div 5)\%$ du moment nominal = $0,2 M_{lam} \Rightarrow M_{mv} = 0,2 M_{lam}$ (T.m)(63)

Détermination du moment dynamique:

Dans notre cas et sachant qu'il s'agit de laminage dans un train continu irréversible, il n'y a donc pas lieu de moment dynamique pour surmonter l'inertie des de travail et des mécanismes de transmission lors d'inversement du sens de laminage $M_{dyn} = 0$.

Détermination du moment provoqué par l'action des forces de traction :

Soit la force de traction T en (T)

$$T = (q_i F_i - q_{i+1} \cdot F_{i+1}) \quad (T) \dots\dots\dots(64)$$

Soit le bras de levier R le rayon du cylindres de travail (mm)

$$\text{Le moment } M_{tr} = T.R = (Q_i - Q_{i+1}).R \quad (T.m) \dots\dots\dots(65)$$

Mais pour un cylindre de travail

$$M_{tr} = \frac{T}{2} \cdot (Q_i - Q_{i+1}).R \quad (T.m) \dots\dots\dots(66)$$

Détermination de n : nombre de tour / min:

A partir de la relation :

$$V_c = \frac{\pi.D.n}{60} \quad \text{m/s nous pouvons déduire n comme : } n = \frac{60.V_c}{\pi.D} \quad \text{tr/min} \dots\dots\dots(67)$$

V_c : vitesse circonférentielle du cylindre de travail en m/s

D : diamètre du cylindre de travail en mm

60 : nombre de secondes en une minute

$$V_{ci} = \frac{V_{mi}}{1+S} \quad \text{m/s} \dots\dots\dots(68)$$

V_{mi} vitesse de sortie du métal de chaque cage m/s

S : avancement du métal.

Mode de détermination de l'avancement $S = R\gamma^2/H_s$

H_s : épaisseur de la bande à la sortie de la cage (mm)

R : rayon de cylindre de travail en mm

γ : angle neutre au cours d'une passe considérée.

Mode de détermination de l'angle neutre :

a) 1^{er} cas :

$$\sin \delta_i = \frac{h_{sortie}}{\sqrt{R\Delta H}} \left(\frac{h_{neutre}}{h_{sortie}} - 1 \right) \approx \delta \quad \dots\dots\dots(69)$$

$\frac{h_{neutre}}{h_{sortie}}$ rapport entre l'épaisseur de la bande dans la section neutre et l'épaisseur de la bande à la sortie du foyer de déformation et est donné par la relation suivante :

$$\delta_i = \left\{ \frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_1 \delta_{i-1}) (\xi_2 \delta_{i+1}) (h_0/h_1)^2}}{\xi_2 \delta_{i+1}} \right\}^{1/3} \dots\dots\dots(70)$$

$$\delta_i = \frac{2 f_i \cdot l_{di}}{\Delta H_i} \dots\dots\dots(69)$$

a l'entrée de la cage :

$$\xi_1 = 1 - \frac{q_i}{1,15 \delta_{s_i}} \dots\dots\dots(71)$$

a la sortie de la cage :

$$\xi_2 = 1 - \frac{q_{i+1}}{1,15 \delta_{s_{i+1}}} \dots\dots\dots(72)$$

q_i et q_{i+1} étant respectivement les tractions unitaires avant et après la passe

δ_{s_i} et $\delta_{s_{i+1}}$ étant respectivement les limites d'écoulement du métal (bande) avant et après la passe.

b) 2^{eme} Cas :

$$\sin \chi_i = \frac{\sin \alpha_i}{2} - \frac{1 - \cos \alpha_i}{2 \mu_i} \approx \delta \text{ (rd)} \dots\dots\dots(73)$$

$$\alpha_i : \text{angle d'entraînement} = \sqrt{\frac{\Delta H_i}{R}} \text{ (rd)} \cdot 180/3,14 \text{ (degrés)} \dots\dots\dots(74)$$

ΔH_i : réduction absolue (mm) et R le rayon du cylindre de travail (mm)

μ_i : coefficient d'allongement.

Détermination des vitesses de laminage V_m et leurs distribution à travers les cages :

Les vitesses linéaires de laminage sont déterminées à partir du système suivant :

- 1) Déterminer le nombre de tours du moteur électrique à partir de la puissance nominale du moteur électrique à la dernière passe :

$$N_s = \frac{P_s \cdot \eta_s}{0,975} \cdot K_w \dots\dots\dots(76)$$

$$n = N.0,975/M_z \text{ en tr/min} \dots\dots\dots(77)$$

2) Déterminer la vitesse circonférentielle du cylindre de travail V_c en (m/s) à la dernière passe :

$$V_c = \frac{\pi.D.n}{60} \text{ m/s}$$

3) A partir de V_c et en calculant l'avancement à la dernière cage S_5
 $S_5 = \gamma^2_5 . R/h_5 \dots\dots\dots(78)$

on détermine la vitesse de laminage à la dernière (5^{eme}) cage.

Si on ajoute aux trois relations citées ci-dessus la loi de la constante du volume et sachant l'épaisseur d'entrée à la première cage et celle de sortie à la dernière cage nous pouvons déterminer toutes les autres vitesses d'après la lois suivante :

$$V_{c1} . (1+S_1).F_1 = V_{c2} . (1+S_2).F_2 = \dots\dots\dots = V_{c5} . (1+S_5).F_5 = \text{Constante} \dots\dots\dots(79)$$

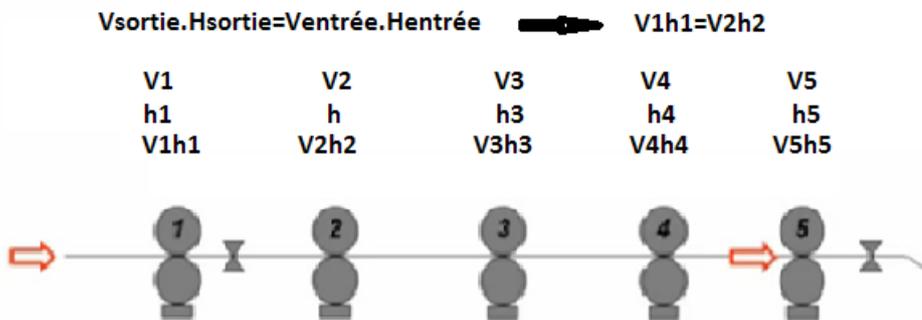
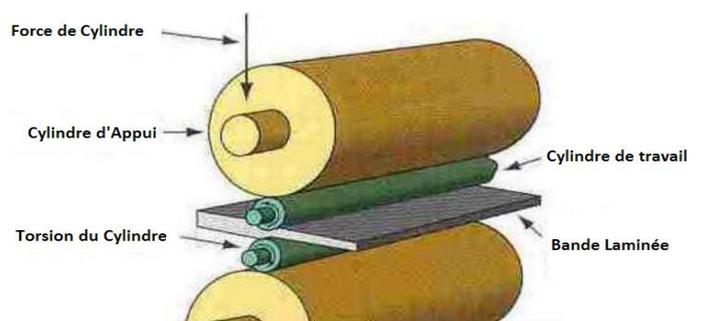


Fig 19: illustration de la constance du flux à la sortie des cages de

3.4. Les cylindres de travail :

Le cylindre de travail de laminage à froid est considéré Parmi les outillages d'usure



le cylindre constitue un poste important du coût de la phase laminage, de ce fait une attention particulière s'impose et ce à partir du suivi des paramètres de laminage ainsi que les données de suivi des cylindre depuis sa première mise en service dans le train de laminage jusqu'à sa mise hors service.

Fig 20: Schéma illustrant les cylindres de travail d'un train de laminage

3.4.1. Propriétés des aciers pour les cylindres de laminage à froid :

Les métaux ferreux comme les non ferreux généralement diffèrent en plusieurs priorités spécialement celles qui influent sur la résistance à l'usure, ces priorités dépendent de la composition chimique ainsi que le traitement thermique.

L'aptitude du choix des matériaux appropriés pour certaine exigences technologiques imposant une connaissance de ces dépendances. Ces éléments influences dans la majorité des cas sur les caractéristiques. L'influence de certains éléments sur les caractéristiques de l'acier sont représentés sur le tableau suivant :

Élément d'Alliage		L'augmentation	La diminution
Carbone	C	Résistance, Dureté, trempabilité	Point de fusion, soudabilité, forgeabilité, ductilité
Silicium	Si	Elasticité, résistance	soudabilité
phosphore	P	La fragilité à froid, la résistance à haute température	Ductilité, résistance au choc
Soufre	S	Fragmentabilité, essoufflement	résistance au choc
Manganèse	Mn	Résistance, trempabilité	usinabilité
Chrome	Cr	Dureté, Résistance	Ductilité,
Nickel	Ni	Résistance, Endurance	Expansion thermique
Molybdène	Mo	Dureté, Résistance, point de rendement, formation de carbure,	Ductilité, usinabilité
Cobalt	Co	Dureté, Résistance, point de rendement, formation de carbure	Ductilité, Forgeabilité
Vanadium	V	Dureté, Endurance	Sensibilité à la surchauffe

Tableau 2 : montre l'effet de chaque élément d'alliage sur le comportement du matériaux

3.4.2. Fabrication des cylindres de travail :

Parmi les éléments constituant le train de laminage à bandes, les cylindres de travail sont les plus importants puisque ce sont eux qui contrôlent la réduction et la forme

du produit laminé. Ils diffèrent par leurs compositions chimiques, par leurs processus de fabrication et le type de laminage ou ils sont utilisés.

Les cylindres de travail sont généralement obtenus à partir d'un processus de moulage:

Un moulage statique, dans le cas d'un seul matériau. > Moulage par centrifugation, avec deux coulées.

Les cylindres de travail à haute teneur en chrome et les aciers rapides se substituent de plus en plus aux fontes nodulaires ou aux fontes blanches pour des raisons de productivité. Ces cylindres sont bimétalliques avec une âme en acier (ou éventuellement, quoique de moins en moins, pour des problèmes de rigidité, en fonte nodulaire) et une périphérie en acier à outils. Ils sont aussi fabriqués à une échelle commerciale en recourant à de nouvelles méthodes, telles que les techniques CPC (Continuos Pouring process for Cladding), ESR (Electroslag Remelting) et HIP (Hot Isostatic Pressing).

3.4.3. Matériaux utilisés dans la fabrication des cylindres de travail:

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

 NORM	C [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Si [%]	Hardness ≤ 700 HV after removal of x mm Ø
ST 2327	0.80	1.90	0.30	0.00	0.45	30 - 40
DHQ 1	0.80	2.10	0.34	0.00	0.75	50
DHQ 3/4	0.80	3.00	0.55	0.00	0.75	70
DHQ 8	0.75	4.00	0.55	0.00	0.75	<110
HP 14	0.80	3.00	0.55	0.50	0.75	100

Tableau 3: Composition chimique de quelques types d'aciers rentrant dans la fabrication de cylindres de travail à froid

3.4.4. Procédé de fabrication des cylindres de travail :

Les cylindres conventionnels ne peuvent pas satisfaire de nos jours toutes ces exigences, particulièrement avec les conditions de travail de plus en plus sévères. Les cylindres de travail doivent être fabriqués avec un matériau dur et résistant, capable de supporter la pression de contact due à la force de laminage, les fortes gradients thermiques cycliquement répétés et, en même temps les cylindres doivent aussi posséder une haute résistance à l'usure, dans le but de maintenir la qualité superficielle du produit laminé et augmenter la productivité du train.

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

3.4.4.1. Coulée par centrifugation:

Permet d'obtenir une bonne liaison sans mélange entre les deux nuances des cylindres composites, ainsi qu'une structure de solidification exempte de dendrites et de porosités dans le matériau de l'enveloppe en acier à outils. Dans ce procédé, les deux constituants du bimétal sont élaborés successivement par centrifugation. Les épaisseurs d'acier à outils sont voisines de 100mm.

C'est un processus utilisé habituellement en Europe et en Amérique du nord pour la fabrication des cylindres en acier rapide, alors qu'au Japon entre 30 % et 40 % des cylindres rapides sont réalisés par cette méthode.

La figure (ci-dessous) montre une esquisse du processus de la coulée par centrifugation horizontale, bien qu'elle puisse aussi être effectuée en position vertical. De cette manière, il a été obtenu des cylindres composés, constitués par un noyau et des cols en fonte nodulaire et une couche extérieur, appelée aussi table de travail du cylindre, en acier rapide, de telle sorte que sa dureté et sa résistance à l'usure soient élevées alors que le noyau et les cols sont relativement plus ductiles et moins résistants. De toute manière, il s'agit d'un processus de fabrication assez complexe, qui exige un contrôle strict de ses paramètres.

La machine de coulée par centrifugation a une haute productivité et peut atteindre la coulée d'un cylindre toute les deux heures.

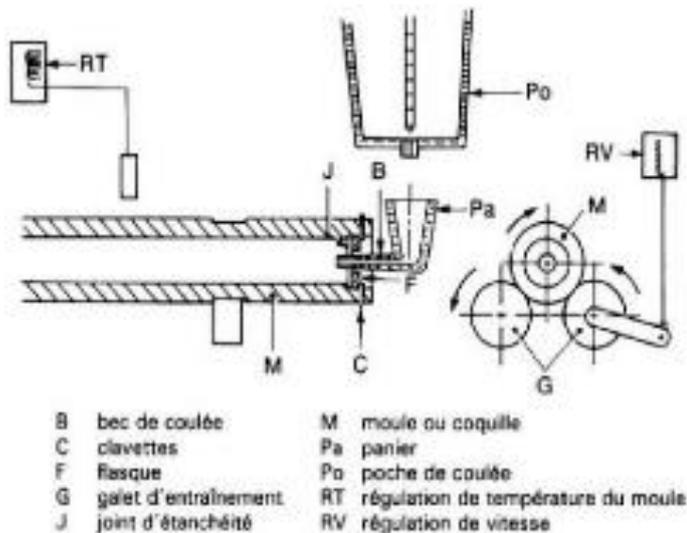


Figure 21 Banc de centrifugation horizontale.

3.4.4.2. Processus CPC :

Il s'agit d'un processus développé au Japon pour la fabrication des cylindres en acier rapide, ou entre 60 et 70 % de ces cylindres sont actuellement fabriqués par cette technique. Un axe en acier dur, a été préchauffé au moyen d'une bobine à induction et ensuite le bouillon d'acier rapide est versé, il occupe l'espace existant entre le moule extérieur en cuivre (voir figure ci-dessous).

Une seconde bobine à induction agite le métal et permet l'union, suite à quoi la région superficielle de l'axe devrait fondre. Dans ce cas, l'obtention d'une bonne union entre le noyau et la couche extérieure, nécessite de bien contrôler ce processus.

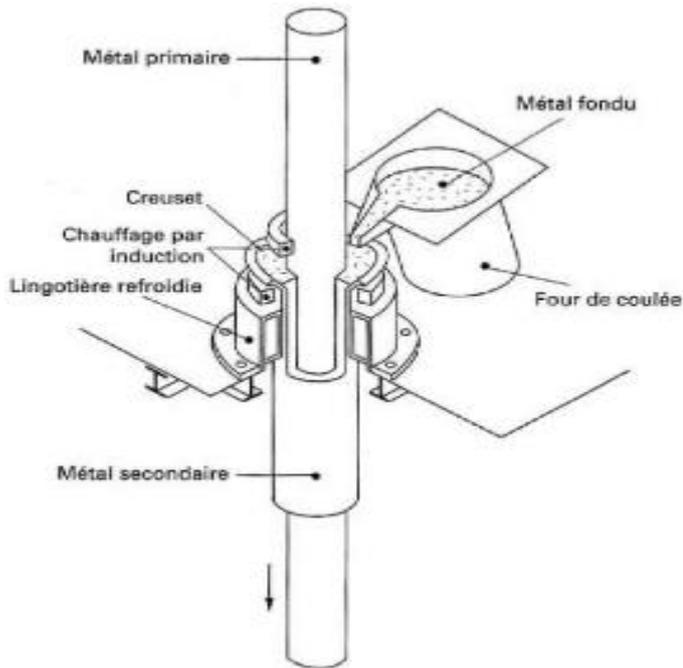


Figure 22 : Représentation schématique du processus CPC

3.4.4.3. Processus HIP :

Ce processus est utilisé pour fabriquer de petits cylindres monoblocs. Un axe en acier résistant a été utilisé ; il est introduit dans le moule, et rempli ensuite avec de l'acier rapide en poudre (normalement une poussière pulvérisée contre un gaz inerte ou l'eau) pour former la couche extérieure. Celle-ci est consolidée en appliquant simultanément une haute pression (au-dessus de 100MPa) et une température (1000°C) [9] (figure I.3.3). Ainsi, on obtient un cylindre avec une bonne intégrité et une granulométrie (10-20µm).

Le principal problème est la limitation dans la taille maximale du cylindre obtenu par ce processus. Il n'existe actuellement dans le monde aucune installation HIP qui pourrait avoir une capacité suffisante pour produire des cylindres pour train à bandes laminées à chaud.

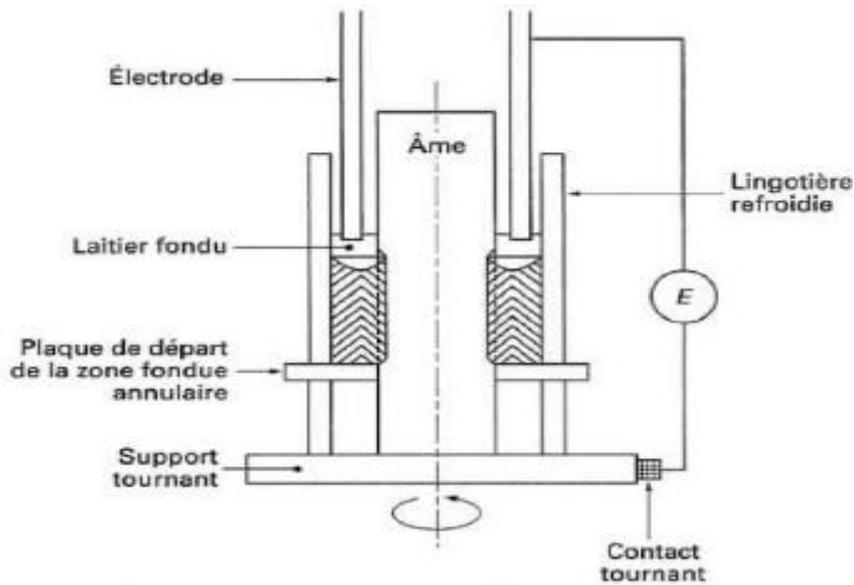


Figure 23: Processus HIP.

3.4.4.4. Processus ESR :

Ce processus est semblable au CPC, mais le chauffage par induction est remplacé par un processus ESR. L'électro-scorie fondue préchauffe et nettoie l'axe solide. Le système agite le métal ajouté qui se situe sous la scorie, en aidant à effectuer l'union. La figure ci dessous montre la conception générale du système de revêtement ESR.

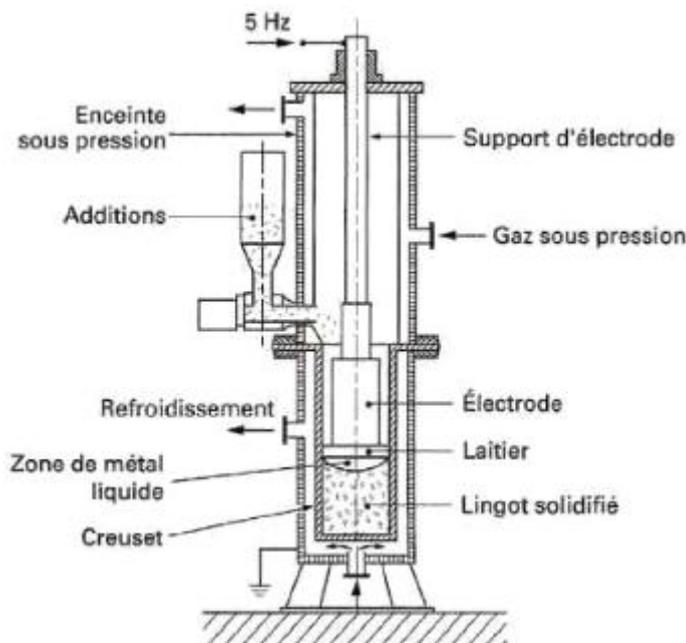


Fig 24 :Schéma du procédé de refusions sous laitier et sous pression (Système ESR).

3.4.4.5. Usinage à l'outil:

La fabrication d'un cylindre de laminage nécessite, le plus souvent, des opérations d'usinage complexes et précises, et le volume de copeaux enlevé par rapport au volume total de la pièce peut être grand.

La réalisation des cannelures nécessite par exemple l'emploi de nouvelles technologies. L'usinage par le laser et le faisceau d'électrons est largement utilisé. La figure (1.3.5) montre une des procédés d'usinage d'un cylindre de laminage.

Le traitement thermique constituant une étape essentielle pour l'obtention des propriétés d'emploi des cylindres.

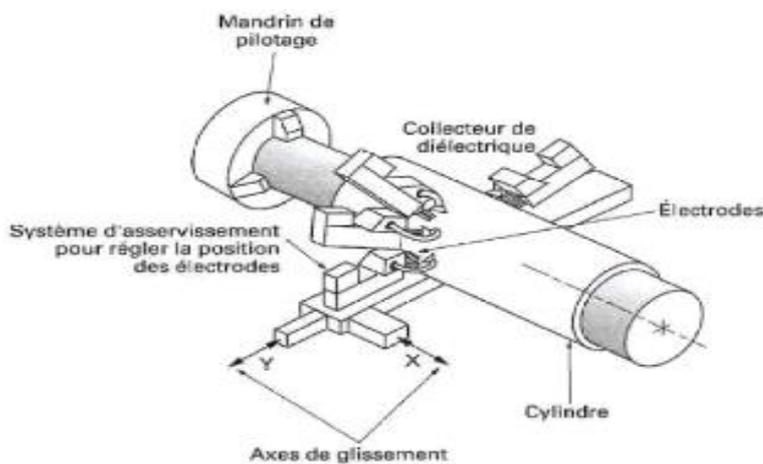


Figure 25: Schéma du dispositif Spark-Tec pour réaliser des textures par électroérosion sur un cylindre de laminage.

3.4.5. Contrôles et détection des défauts de cylindres :

De nombreux travaux sont effectués actuellement, afin de pouvoir appliquer aux bandes laminées à froid les techniques développées pour la détection de défauts sur cylindres. Les méthodes utilisées se basent généralement sur des méthodes optoélectroniques.

L'inspection des bandes étant effectuée à la sortie du finisseur. La présente recherche opte pour une approche différente consistant à inspecter la surface des cylindres de travail dans les cages du train à bandes dans le but de détecter directement les causes de nombreux défauts (oxydes, incrustations, ...) et de procéder au remplacement des cylindres dès leur apparition.

Plusieurs types de contrôles non destructifs doivent être pris en considération avant que l'incident soit produit, on cite parmi les plus utilisés au laminage:

- **Le Contrôle Visuel** : quelques défauts apparents peuvent être détectés facilement sans qu'il est nécessaire d'utiliser des moyens techniques connus.

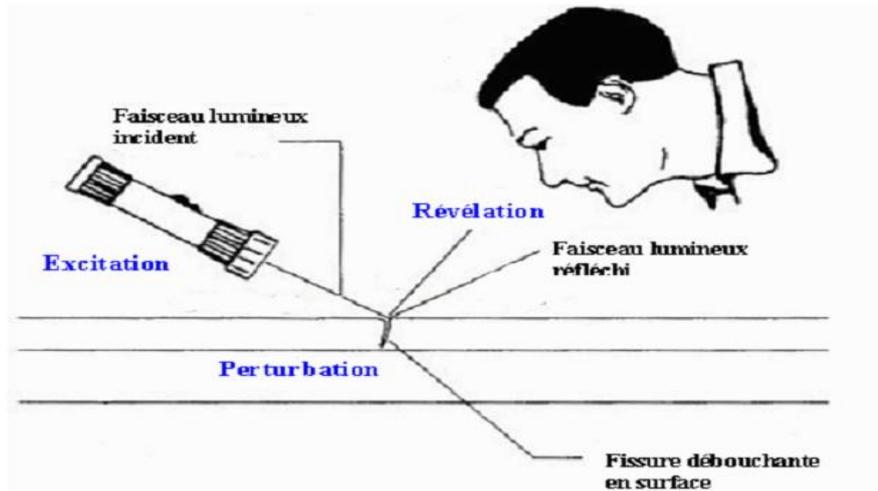


Fig 26: contrôle Visuel d'éventuelles fissures sur cylindres

Ultra son (onde longitudinale) : détection des fissures sous couches superficielles aux surfaces des cylindres.

Détection des défauts de fissures par la sonde Ultrason :

L'**ultrason** est une onde mécanique et élastique, diffusée par les gaz, les liquides, les tissus mous (chair, organes) ou les solides

La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre 16 000 et 10 000 000 Hertz, trop élevés pour être perçus par l'oreille humaine.



Fig 27 : Appareil de Détection ultrason utilisé au niveau de AMA

courants de Foucault: détection des fissures superficielles

par définition On appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un

déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. Ils sont une conséquence de l'induction électromagnétique.

Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.

Chapitre II

Etude tribologique du contact Tôle - Cylindre

1.Le frottement :

Le laminage dépend de manière critique du frottement et de la lubrification, tant pour le contrôle du procédé que pour la qualité du produit fini. Des recherches ont été développées (Pechiney et Usinor) sur les deux grands domaines de la lubrification : mécanique de la formation du film lubrifiant entre surfaces rugueuses déformables, et formation des films limites,.

Beaucoup de choses, en laminage, se ramènent donc au régime de lubrification et au frottement qui lui correspond.

Le frottement doit être maintenu bas, sans quoi la force et le couple augmentent, mais pas trop bas si l'on veut éviter le patinage (insuffisance d'entraînement de la tôle par les cylindres) : souvenons-nous que le frottement, qui est le moteur de cette opération, est indispensable pour laminier.

Le frottement doit d'autre part être aussi constant que possible. Toutes les théories de laminage exigent la connaissance du coefficient de frottement dans le foyer de contact. Cette connaissance pose cependant de nombreux problèmes car, non seulement, il semble que ce coefficient de frottement ne soit pas constant le long de l'arc de contact, mais que, en plus, il Varie avec :

- Le lubrifiant utilisé
- La vitesse du laminage
- La pression
- La température des cylindres, de la tôle et du lubrifiant
- L'état de surface des cylindres et de la tôle
- La nature du matériau laminé.

La plupart des théories sont basées sur l'hypothèse selon laquelle le coefficient de frottement μ reste constant le long de l'arc de contact, (étant généralement choisi de manière à ce que l'effort de laminage calculé s'identifie à l'effort mesuré.

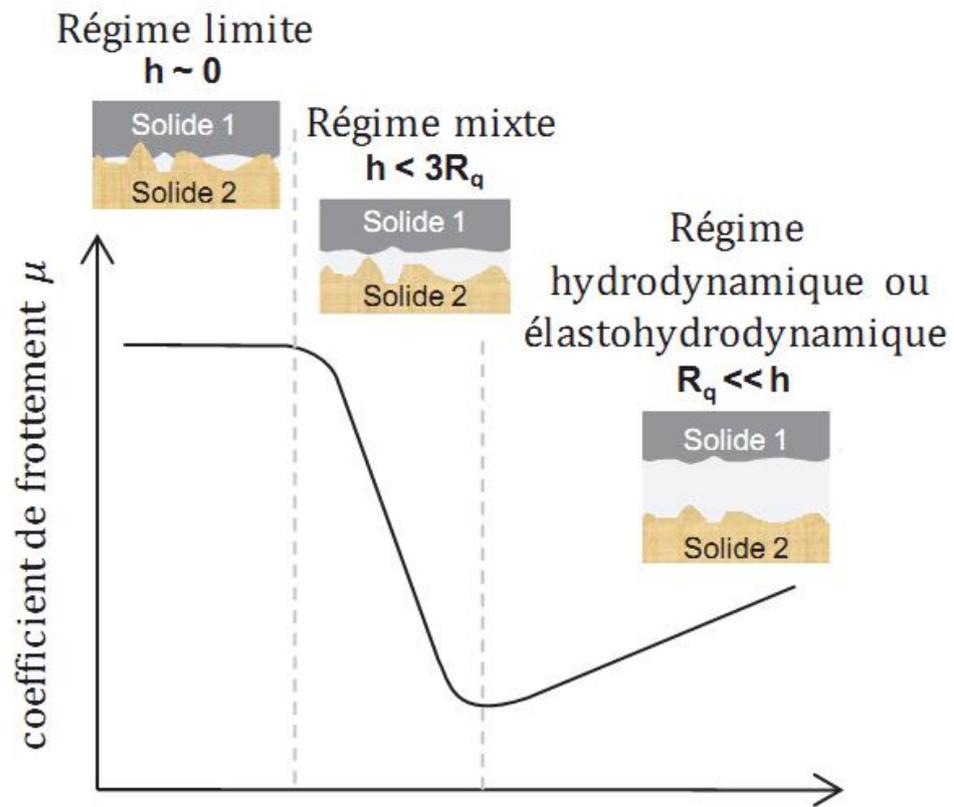


Figure 28 : Représentation schématique des différents régimes de lubrification sur une courbe de Stribeck. Le passage d'un régime à un autre dépend des conditions de vitesse et de pression ainsi que de la viscosité du lubrifiant qui déterminent l'épaisseur de film entre les deux surfaces antagonistes.

Striebeck a mesuré l'évolution du coefficient de frottement μ en fonction des paramètres contrôlant la lubrification et les épaisseurs de film lubrifiant : la charge appliquée (qui définit la pression de contact), la vitesse de glissement et la viscosité du lubrifiant. Dans une représentation logarithmique, cette courbe se divise en trois zones distinctes qui révèlent trois principaux régimes de lubrification, caractérisés par l'épaisseur relative du film de lubrifiant par rapport à la rugosité des surfaces : le régime hydrodynamique, le régime limite et le régime mixte.

Aux fortes pressions et faibles vitesses, le régime est qualifié de régime limite. L'épaisseur de film est proche de zéro et la charge est principalement supportée par les aspérités présentes à la surface des deux solides en contact. Le lubrifiant permet quand même de refroidir le contact et d'apporter de nouvelles molécules qui peuvent s'adsorber sur les surfaces. Les valeurs du coefficient de frottement μ sont levées et déterminées par les propriétés des surfaces ainsi que par les propriétés physico-chimiques des molécules adsorbées.

Aux faibles pressions et fortes vitesses, le régime hydrodynamique (HD) prévaut. Le film lubrifiant séparant les surfaces est suffisamment épais pour empêcher tout contact entre les aspérités des deux surfaces solides et c'est lui qui va supporter la pression à l'interface. La viscosité du lubrifiant intervient également dans la représentation de « Striebeck » car plus il est visqueux, plus le film lubrifiant a tendance à être épais.

La rugosité des surfaces est l'un des paramètres qui régit au premier ordre le passage d'un régime à l'autre.

2.L'usure :

Nous avons deux facteurs qui sont considérés comme prépondérants :

- l'abrasion et la fatigue thermique. L'abrasion provoque une usure continue de la surface du cylindre.
- Par contre le phénomène de fatigue, amène des détériorations localisées de la surface, se propageant à partir de microfissures et allant jusqu'à l'arrachage (écaillage) de parcelles de métal.

Les tentatives effectuées en vue de réduire l'usure ont été axées sur l'amélioration de la Qualité des cylindres. Ce n'est que récemment que des études ont été faites en vue de développer de nouvelles techniques de refroidissement des cylindres conduisant à une réduction des tensions d'origine thermique. D'autre part, des essais sont effectués en vue de lubrifier les cylindres tant dans le laminage des produits longs que dans celui des produits plats.

3.La lubrification :

L'utilisation d'un lubrifiant lors du laminage à froid peut, en principe, avoir un effet bénéfique sur les mécanismes d'usure. L'interposition d'un film entre les surfaces frottantes atténue, en effet, l'usure par abrasion, d'autre part, ce film constitue un écran thermique réduisant le flux de chaleur échangé entre la bande et le cylindre et donc diminue l'amplitude des tensions thermiques.

3.1. 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 profile 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.

3.2. Formulation technologique des lubrifiants du LAF :

Les lubrifiants sont complexes et contiennent de 7 -15 composants chimiques additifs. Les esters et les huiles minérales sont en partie majoritaires.

Les esters et les huiles minérales sont la base des lubrifiants et sont important dans la lubrification en régimes élasto-hydrodynamiques. Les acides gras sont importants dans les régimes limites. Les antioxydants protègent les lubrifiants contre l'oxydation et la polymérisation sont émulsifiants pour les mélanges des solutions au niveau des réservoirs contiennent des additifs à base de Phosphore : agents forts dans la formation de la couche limite contiennent des additifs à base de Soufre : additifs résistant à de fortes pressions contre le colmatage et l'adhésion des particules les une aux autres.

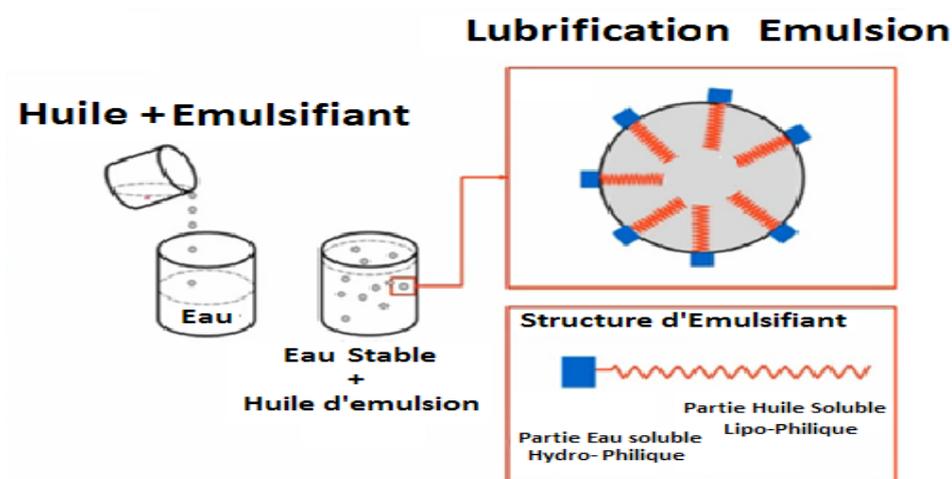


Fig 29: Schématisation de la structure des microparticules d'émulsifiant

La plupart des théories sont basées sur l'hypothèse selon laquelle le coefficient de frottement μ reste constant le long de l'arc de contact, (μ étant généralement choisi de manière à ce que l'effort de laminage calculé s'identifie à l'effort mesuré.

Contrairement à la théorie classique, dans les théories modernes, on suppose plus volontiers que la loi du frottement est du type "couche limite" qui se rapproche du frottement semi-fluide. Tout se passe comme s'il existait une couche entre outil et métal, parfaitement adhérente et plus tendre que le métal, la contrainte d'écoulement dans cette couche est notablement plus faible que celle du métal.

3.3. Nature du lubrifiant :

L'objectif de ces études est donc de mettre au point une technique de lubrification particulièrement appropriée au laminage à froid.

Dans tous les cas, le lubrifiant utilisé est de l'huile, nous avons 4 types d'huile objet d'investigations :

- huile végétale ou animale
- huile minérale
- huile compound
- huile synthétique à base d'ester.

L'huile est projetée au moyen d'une rampe distincte des rampes de refroidissement, ceci en vue de réduire la consommation d'huile et de disposer d'une plus grande souplesse dans le réglage de la lubrification. Afin d'obtenir une bonne répartition du lubrifiant suivant la longueur de la table, la projection se fait, soit sur le cylindre de travail, soit sur le cylindre d'appui mais de telle sorte que le lubrifiant doive traverser la zone de contact entre les cylindres de travail et d'appui avant d'atteindre l'emprise.

Mode d'application

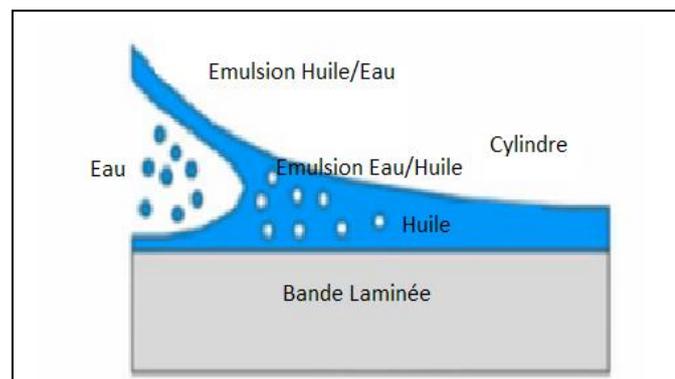
Différents modes d'application peuvent être envisagés : parmi ceux la projection directe sur les cylindres d'huile pulvérisée mécaniquement ou par apport d'air comprimé.

3.4. Caractéristiques physico-chimiques des huiles et émulsions :

La principale caractéristique des huiles de laminage est l'indice de saponification qui mesure la teneur en corps gras. C'est le nombre de milligrammes de potasse nécessaires pour neutraliser les acides gras libres et saponifier les esters contenus dans 1 g d'huile (100 à 140 pour le laminage de tôle mince, 190 pour le fer-blanc soit près de 100 % de corps gras).

Les principales caractéristiques des émulsions sont :

- la stabilité qui mesure l'aptitude de l'émulsion à ne pas se séparer en ses deux phases huile et eau.
- la taille des particules qui influe sur la stabilité de l'émulsion et sur son pouvoir



lubrifiant. Elle varie sous l'influence de la température, de l'agitation et de la pollution par le fer. Pour le laminage de tôle mince avec émulsion re-circulée, la taille souhaitable est 2 à 4 μ m avec une faible dispersion.

— la teneur en fer, exprimée en ppm masse (mg de fer par litre), doit être maintenue faible (inférieure à 40 mg/L) pour obtenir une bonne propreté après recuit (norme Ford : moins de 7 mg de carbone par m² de surface de bande).

Fig30 : Schématisation du mélange de Refroidissement et Emulsion

4. Les avaries des cylindres de travail du laminage à froid :

Le problème de l'usure des cylindres se pose à tout moment dans la production d'un laminoir. L'usure, en effet, conditionne les changements de cylindres et a donc une influence directe sur la productivité et les frais de fonctionnement.

D'autre part, elle peut altérer la qualité du produit laminé en détériorant l'état de surface et la forme du profil de la tôle.

La dégradation de l'état de surface des cylindres dans un laminoir à froid suit un chemin très complexe. Plusieurs phénomènes peuvent, en effet, intervenir (1) :

- Abrasion par glissement entre les cylindres de travail et la bande dans l'arc de contact (foyer de déformation), qui peut être accélérée par la présence d'oxydes.
- Abrasion par glissement dans la zone de contact entre les cylindres de travail et d'appui(2)
- Fatigue issue de la variation des tensions d'origine thermique exercées à la surface des cylindres ;
- Fatigue due aux tensions appliquées dans la fente de laminage et dans la zone de contact des cylindres de travail et d'appui
- Forces hydrostatiques créées à l'intérieur de l'arc de contact par la pénétration de l'eau de refroidissement dans les microfissures à la surface des cylindres ;
- Corrosion chimique.

Les termes comme Fatigue et déformation de Surface souvent représentent les limites de l'utilisation des cylindres de travail et d'appui dans le laminage.

L'avarie le plus souvent enregistré est la déformation de surface, ceci inclue une ample gamme de déformations :

- La Fatigue : provoque la déchirure du matériau laminé (bande), ce type de fatigue peut avoir comme cause à l'origine l'usure par abrasion, ou la formation de micro écaillage.

- Grippage avec transfert de matière entre le cylindre d'appui et celui de travail et fissuration due aux incidents de laminage.
- Marquages des déformations Plastiques.

4.1. Les tensions

Fatigue :

L'usure superficielle causée par la fatigue n'arrive pas instantanément mais un grand nombre de cycles peut provoquer la cause. le contact de Hertz : est une description, due à Heinrich Rudolf Hertz (dont le nom est également associé à l'unité SI de fréquence, le Hertz), de la contrainte au sein de deux objets en contact. La description du contact de Hertz, obtenue en 1880[1] et publiée en 1881[2], s'applique au contact de deux sphères de rayons différents.

La théorie de Hertz donne une idée sur la complexité du système de pressions exercées sur les couches superficielles. Au niveau de la surface l'avarie de fatigue a son origine dans l'application des contraintes de cisaillement, Ceci mène à la plasticité des aires soumis zones aux tensions au niveau de la couches inférieures des cylindres lorsque le frottement entre les cylindres d'appui et de travail est important.

Une telle plasticité favorisera la naissance de fissurations (craquements) ce phénomène dépend du niveau de rapports des tensions induites par le contact et des contraintes résiduelles.

En considérant la vulnérabilité des contrôles non destructifs pour mesurer la couche de travail des cylindres, les cylindres sont la rectifiés d'une façon expérimentale en considérant les risques de propagation des fissures.

4.2. L'usure :

L'usure est causée principalement par l'abrasion : celle-ci augmente sous une haute pression superficielle de contact aussi bien que par la vitesse d'écoulement de la bande laminée. Cette usure peut être accélérée par la présence de particules abrasives générées à partir de l'arrachement de carbures à partir des cylindres de travail.

Un autre type d'usure est la corrosion qui demande de prendre en considération une attention particulière avec des regards vers l'état de surface.

Les mécanismes de l'usure peuvent aussi générer de très importantes contraintes internes de contacts en relation avec le profile de l'usure.

L'usure et l'augmentation de la contrainte interne expliquent en grande partie la rupture au bord des cylindres.

Le grippage :

Le Grippage avec écaillage de particules entre surfaces des cylindres d'appui et cylindres de travail en contact en cours de laminage, le passage de la bande laminée avec des

épaisseurs variables autour du cylindre de travail provoque une hausse remarquable de température de la surface de contact avec le cylindre d'appui due au grippage sous de fortes pressions, la conséquence donne lieu à :

- Une augmentation des contraintes, qui à l'origine peut être due à un défaut métallurgique, une fissuration ayant comme sens (direction) perpendiculaire au plan radial.
- Une augmentation de la tension de cisaillement superficielle qui provoque la naissance de microfissures ayant direction inclinée par rapport à la surface. L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois se révéler plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs.

4.2.1. Usure par abrasion :

Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage : des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc. L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure. Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier ...

Prévention :

L'abrasion est une usure typique des systèmes télescopiques : tiges de vérins, broches de machines outils, certains paliers ... Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses. Il est essentiel que les particules abrasives et les **débris d'usure** soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

Aspect des dégâts :

Les surfaces présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue. La vitesse n'intervient que si l'échauffement modifie les caractéristiques du matériau.

Éventuellement, des particules arrachées de la pièce la plus tendre peuvent être transférées mécaniquement sur la plus dure mais sans y adhérer très solidement, comme fait le plomb lorsqu'il « beurre » une lime, la rendant inopérante.

Nature du phénomène

L'usure peut résulter des protubérances d'une des pièces ou des particules qui circulent dans l'interface.

Les débris émis par les surfaces acquièrent une dureté bien supérieure à celle des matériaux en présence, provoquant une abrasion à trois corps. L'abrasion modifie profondément les couches superficielles qui deviennent comparables à celles obtenues par laminage. Les surfaces durcissent et résistent mieux à l'abrasion elle-même.

Les caractéristiques de l'ambiance modulent l'abrasion mais influent en général assez peu si la vitesse d'usure est grande.

Prévention :

L'abrasion est une usure typique des systèmes télescopiques : tiges de vérins, broches de machines outils, certains paliers ... Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses. Il est essentiel que les particules abrasives et les **débris d'usure** soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

4.2.2. Usure par adhésion

Aspect des dégâts :

Le matériau d'une pièce est transféré et solidement soudé sur l'autre. Les pièces peuvent être immobilisées par un grippage, dont la forme n'est reconnaissable qu'au début, avant que les surfaces ne soient complètement défigurées.

Contrairement à ce qui se passe dans le cas de l'abrasion, de brusques changements de régime d'usure peuvent résulter de légères modifications des paramètres. Pour des surfaces non lubrifiées, le coefficient de frottement n'est pas multiplié par plus de vingt mais le taux d'usure peut varier d'un facteur un million.

Nature du phénomène

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement par soudage en phase solide. Les métaux, s'ils sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

- Si l'interface est moins solide que les pièces, les jonctions se cisailent par rupture adhésive, l'usure est modérée ou quasi nulle.
- Si l'interface est plus solide qu'une des pièces, il y a rupture cohésive, usure sévère, voire grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme de particules qui, écrouies et oxydées, peuvent contribuer à l'abrasion.

On sait calculer ou mesurer la force d'attraction entre deux matériaux mais pas la force de décohésion une fois le contact établi. La séparation par décohésion ne se fait pas d'un coup mais se propage comme une fissure ; le frottement vient de la force requise pour cisailer les jonctions.

Le grippage épidermique, conséquence extrême du frottement par soudure, est facilité par divers facteurs comme :

- l'accumulation de matière devant les aspérités du frotteur qui augmente l'aire réelle du contact,
- la mise à nu des structures cristallines sans possibilité de re-pollution,
- l'accumulation de reliefs dans un sens parallèle à la direction du déplacement,
- l'échauffement.

L'effet de la charge est double : l'échauffement et la rupture des films d'oxydes favorisent l'usure adhésive, comme pour les engrenages lourdement chargés. La vitesse a deux effets opposés : elle facilite la formation de films d'huile, mais en même temps elle la limite par l'échauffement qui diminue l'adsorption des films superficiels protecteurs et la viscosité des lubrifiants. L'ambiance modifie les propriétés des surfaces, entre autres par la formation d'oxydes. C'est dans le vide que les risques de grippage sont les plus élevés.

Prévention

Il faut choisir des couples de matériaux n'offrant aucune possibilité de filiation cristalline résistante. En fonction des circonstances, on peut essayer d'autres couples. Les données de l'ambiance (milieu chimique, lubrifiant, ...) sont ici très importantes.

Pour les métaux ferreux, les structures martensitiques, perlitiques ou encore bainitiques conviennent mieux que les structures continues ferritiques ou austénitiques. Les traitements thermiques de durcissement sont favorables : trempe, cémentation, nitruration, carbonitruration ...

La fonte secrète son propre manteau protecteur en graphite, mais doit être usinée correctement. Ainsi, la finition par pierrage des chemises de moteurs impose des choix difficiles : avec les outils au carbure de silicium, de minuscules arêtes tranchantes coupent le métal d'une façon très franche. Les lamelles de graphite affleurent, la qualité frottant

est bonne, mais l'outil ne reste tranchant que grâce à l'usure qui amène à sa surface de nouvelles arêtes : il faut donc le reprofiler régulièrement.

Les outils diamantés ont une durée bien supérieure mais leurs arêtes plus ou moins émoussées refoulent le métal plus qu'elles ne le coupent : la pression chasse le graphite et forme une couche de métal écroui. Une telle surface dite « manteau de tôle » (en allemand Blechmantel), « peau en écailles de poisson » (en anglais fishscale skin), frotte mal, surtout quand le glissement prend les écailles « à rebrousse-poil ». Elle augmente la consommation d'huile, mais reste cependant tolérable si les segments sont métallisés au molybdène.

Deux surfaces à stries aléatoires perpendiculaires au sens de la marche ne peuvent frotter que par cisaillement, quelles que soient leurs structures cristallines, ce qui répartit l'usure et augmente les portées. Dans le cas contraire l'état de surface ne s'améliore pas, l'échauffement est concentré sur des zones étroites et le contact est prolongé, ce qui favorise le grippage. Les surfaces bombées, comme les dents d'engrenages, ne sont par contre jamais assez polies.

L'utilisation de métaux de duretés trop voisines augmente l'aire de contact et les risques de grippage. Une haute limite d'élasticité, une différence de dureté d'au moins 100 Hv et des structures différentes limitent l'adhésion. Le matériau le plus dur doit être le mieux poli pour ne pas limer l'autre mais aussi pour limiter la déformation des aspérités. Les matériaux monophasiques grossiers résistent moins bien que les polyphasiques à grains fins.

On peut faciliter le frottement par cisaillement entre les pièces avec des métaux mous déposés en faible épaisseur sur un support dur (coussinets minces), des sels métalliques apportés par traitement (sulfinisation, phosphatation) ou des lubrifiants, surtout avec des additifs « extrême pression » formant in situ des sels organométalliques adhérents.

4.2.3. Usure par corrosion, usure chimique

La corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle interagit avec le frottement.

Aspect des dégâts

Les pièces sont rongées et portent de nombreuses piqûres ou crevasses. L'usure est aggravée par les contraintes mécaniques et le frottement. La corrosion attaque de façon différentielle les constituants des matériaux polyphasiques. Elle peut par exemple éliminer le plomb d'un cuproplomb, le métal est devenu alors poreux en surface au point

de se désagréger. Dans une fonte grise elle peut détruire la perlite et laisser en place le graphite et la cémentite.

Nature du phénomène :

Les surfaces réagissent avec les ambiances agressives, les lubrifiants altérés ... L'attaque chimique ou électrochimique est en général d'abord rapide, puis ralentie par la formation de films plus ou moins protecteurs qui peuvent passiver les matériaux et stopper, au moins provisoirement, le processus.

Le frottement peut accélérer la corrosion s'il élimine des films d'oxydes ou de sels peu résistants, inversement la corrosion peut détruire les qualités frottantes des surfaces. Les films superficiels durs peuvent améliorer la résistance à l'usure mais s'ils se détachent, ils risquent de favoriser l'abrasion.

On provoque une corrosion volontaire et contrôlée avec les lubrifiants contenant des additifs « extrême pression » qui couvrent les pièces de composés mous faciles à cisailier et donnant un très faible taux d'usure : chlorures, sulfures, phosphates ... mais l'attaque chimique peut se poursuivre si ces additifs sont trop actifs ou ionisés par de l'eau de condensation.

Les effets chimiques sont très importants lors de l'usure des polymères, qui sera envisagée plus loin.

Prévention :

Il faut utiliser des matériaux appropriés au milieu, exempts de fissures et de porosités, éviter la formation de couples électrochimiques. Les additifs détergents avec réserve d'alcalinité sont intéressants, de même que les antioxydants (pour l'huile) et les anticorrosifs.

4.3. Corrosion de contact

La corrosion de contact est connue sous des noms très divers : traditionnels (poudre rouge), français (corrosion-frottement, frottement-fatigue, usure induite en petits débattements) ou anglais (fretting corrosion). Le terme « corrosion de contact » est en fait mal adapté car il donne une fausse idée de la réalité ; « **usure induite en petits débattements** » est plus correct mais n'informe nullement sur le déroulement des dégradations.

Aspect des dégâts :

Strictement limitée aux zones de contact, cette forme d'usure est propre à des mécanismes ou assemblages soumis à de petits déplacements tangentiels rapides ou à des vibrations sous forte charge. Les surfaces commencent généralement par se colorer, puis elles se creusent de cavités remplies des débris émis. On observe aussi, très souvent, des criques de fatigue.

La corrosion de contact s'attaque particulièrement aux pièces de haute qualité : moteurs d'avions, clavetages et cannelures, manchonnages et emmanchements, roulements, mors de machines de fatigue, portées de culasse sur bâtis de moteurs ... On peut dire qu'il s'agit d'une usure « de luxe ». Elle touche aussi les lames de ressorts et les assemblages : têtes de rivets, voisinage des points de soudure, liaisons boulonnées ... Le phénomène est commun, difficile à éviter, et il ne s'arrête jamais de lui-même.

Nature du phénomène :

La complexité du phénomène a fait apparaître diverses théories concurrentes pour expliquer l'émission de particules et la formation d'oxydes. Rapidement, les théories de Bowden et Merchant sur l'usure adhésive amenèrent à prendre en compte la formation de jonctions au niveau des contacts des aspérités des surfaces.

Ces aspérités, dénudées par la rupture des couches d'oxydes subissent des pressions et des températures très élevées.

Le soudage par imbrication des systèmes cristallins est suivi de flexions alternées des jonctions. Des débris naissent de la rupture des microsoudures ou des joints de grains. Écrouis, broyés, mais incapables de s'échapper, ils s'oxydent rapidement et s'agglomèrent, provoquant une abrasion de plus en plus intense contre laquelle il n'existe pas de remède miraculeux. Le coefficient de frottement baisse considérablement à cause de la poudre mais cela n'arrête nullement le désastre.

La théorie du délaminage, introduite par Suh en 1973, apporte un autre point de vue sur l'ensemble des formes d'usure et plus particulièrement sur la corrosion de contact. Elle repose sur l'évolution des dislocations qui se produisent dans les sous-couches lors des déformations plastiques. Il en résulte la formation de fissures, surtout lorsque le matériau est affecté par la présence d'inclusions. Lorsque ces fissures se rejoignent, des particules peuvent être arrachées. Cartier, Caubet et Racine avaient fourni les bases de cette théorie en 1970. La théorie du délaminage a permis de mieux comprendre l'émission de particules plates.

Moreau a montré en 1980 que dans certains tribocontacts avec frottement oscillant, les déformations plastiques pouvaient provoquer un endommagement par fatigue sans pour autant que l'on assiste à l'émission de débris et à l'apparition d'oxydes.

Il semble qu'il existe un seuil d'endommagement irréversible au-delà duquel la durée de vie des pièces est diminuée, même si l'on a réussi à empêcher la corrosion de contact.

Prévention :

Il faut éviter l'adhésion par des matériaux compatibles et en plus lutter contre l'oxydation par des revêtements de métaux mous et nobles (cuivre, argent, or, nickel, molybdène) ou des traitements (sulfinuzation, nitruration, pour l'aluminium grenailage et oxydation anodique). Pour les métaux ferreux on doit préférer les structures martensitiques. Parmi les solutions éprouvées on note le frottement fonte sur fonte (le graphite assurant une bonne protection), les revêtements de phosphate ou de lubrifiants solides du style Molykote, ou l'acier laminé à froid sur lui-même.

L'introduction entre les surfaces d'un troisième corps approprié peut être une solution intéressante. La lubrification retarde seulement la corrosion de contact, en diminuant l'oxydation qui transforme les débris en abrasifs. Le bisulfure de molybdène dans la graisse graphitée peut donner de bons résultats, ainsi que d'autres lubrifiants solides, des poudres d'oxydes, etc.. Choisir des huiles fluides ou des graisses inoxydables avec des savons d'aluminium, en évitant les dopes.

4.4. Sur contraintes :

Le passage d'un curseur sur une surface engendre un ensemble complexe de contraintes, entre autres :

- des tensions, immédiatement à l'arrière du curseur
- des compressions sous la moitié avant du curseur,
- un cisaillement maximal à une certaine profondeur.

Seules les premières peuvent causer les accidents brutaux examinés ici, les secondes peuvent provoquer du fluage et les troisièmes des phénomènes de fatigue étudiés plus loin.

Aspect des dégâts

Des fissures disposées en arc de cercle comme des écailles de poisson, marquent la surface des cylindres . Leur direction générale est perpendiculaire au mouvement. Elles se forment à partir de défauts superficiels, par exemple une rayure ou une inclusion, puis s'enfoncent dans le matériau, tendant à devenir parallèles à la surface.

Nature du phénomène :

Les contraintes de traction accompagnant le passage d'un glisseur sont capables de fissurer la zone arrière du contact, si elles dépassent la résistance à la rupture du matériau.

De telles fissures apparaissent déjà dans les contacts statiques. Ainsi, une bille d'acier pressée sur un plan en verre ne provoque aucune dégradation dans la zone centrale pourtant soumise aux plus fortes pressions mais elle cause, un peu à l'extérieur du cercle de contact, une fissuration de forme générale tronconique dont l'angle répond à la loi d'AUERBACH. La fissuration est grandement facilitée en présence d'efforts tangentiels et si ces derniers sont suffisants pour entraîner le glissement, alors on trouve toute une série de ruptures successives le long de la zone frottante.

Ceci remet en cause l'affirmation selon laquelle, pour résoudre des problèmes de frottement dans des conditions très sévères, il faut faire appel à des matériaux très durs

Les déchirures par surtension des bandes laminée sont bien corrélées avec les calculs de contraintes maximales de tension et les propriétés de résistance à la traction des matériaux. L'examen des surfaces indique parfois si les fissures sont apparues après un grippage ou si elles l'ont provoqué.

Prévention

Utiliser des matériaux résistants à la traction, diminuer les pressions et le frottement, éviter les contraintes résiduelles de tension dans les zones frottantes, éviter les défauts de surface.

4.5. Fluage superficiel**Aspect des dégâts**

On remarque des écoulements de matière sans grand relief et très étalés.

Nature du phénomène

Le matériau flue sous l'effet d'un état de contraintes de compression triaxiales, ce qui peut se produire même s'il est relativement fragile, comme par exemple de l'acier cémenté.

Prévention

Diminuer les pressions et le frottement, utiliser des matériaux très résistants à la compression.

4.6. Fatigue :

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles. Une pièce peut être atteinte irrémédiablement tout en gardant jusqu'au dernier moment une apparence intacte. Il existe cependant un certain nombre de manifestations extérieures qui permettent, dans certains cas, un suivi des pièces en service.

Aspect des dégâts

Il y a en fait deux sortes d'avaries distinctes :

- la fatigue superficielle par écrouissage

Elle est due aux contraintes maximales de traction ou de compression : le premier signe visible est une apparence brunie, un éclat lustré du métal et la disparition des marques d'usinage. L'incubation est assez courte, survenant même dans des contacts peu chargés, puis de petites piqures se forment, alignées le long des aspérités initiales.

L'accident typique est le pitting, ou piquage, des engrenages : le point de cisaillement maximal étant situé à la surface, des fissures se développent perpendiculairement à la direction du glissement, prenant parfois la forme d'un V pointant dans la direction du mouvement. Elles ne sont véritablement dangereuses que si le métal est apte à les propager.

Des micro écailles ou « pits », de quelques centièmes de mm dans la direction de la surface et en profondeur, sont émises.

- la fatigue profonde ou écaillage

Après un long temps de vieillissement se produit une émission brutale de particules dont la surface atteint quelques mm², la profondeur quelques dixièmes de mm, et dont la taille est sans rapport avec la structure du métal. L'usure s'étend par le bord des zones écaillées, découvrant progressivement les sous-couches dont l'aspect est poli.

Nature du phénomène :

Les aspérités recevant des pressions cycliques se dégradent par fatigue, même lorsqu'elles sont séparées par un lubrifiant. Les pièces bombées qui reçoivent des contraintes bien plus fortes que les pièces planes s'usent beaucoup plus.

L'endommagement créé par les déformations plastiques, en surface ou en profondeur selon les conditions, provoque des transformations métallurgiques (par exemple, il transforme la martensite en troostite plus fragile) et l'amorçage de fissures. Dans le cas du pitting, l'émission des micros écailles est relativement rapide. Dans le cas de la fatigue profonde, amorcée à partir du point de cisaillement maximal, les défauts étalés sous la surface font que cette dernière se comporte comme un véritable placage.

Lors du contact de deux corps bombés, en effet, le cisaillement est maximal à une certaine profondeur sous la surface. Dans les contacts roulants, cette zone de cisaillement profond se déplace sous la surface, créant un endommagement progressif à partir de défauts localisés ou de joints de grains. Dans un premier temps, rien ne paraît à la surface mais vient un moment où se créent des fissures normales à la surface. L'écaillage se produit alors par flambage brutal de la peau de la pièce. Les cavités ont des bords rugueux et un fond lisse qui témoigne du frottement des couches superficielles sur le substrat, avant qu'elles ne se détachent.

Les détériorations par écaillage concernent au premier chef les roulements et les engrenages. Elles dépendent de nombreux paramètres : vitesse de glissement, rugosités, nature et microstructure des matériaux, duretés, contraintes de Hertz, inclusions, lubrifiant et additifs. Parfois, les contraintes dues à la flexion ou à la torsion peuvent accélérer le processus.

Prévention

Il faut avant tout diminuer les contraintes de contact par une géométrie appropriée, réduire le frottement en évitant absolument l'adhésion. On doit aussi utiliser des matériaux avec aussi peu de défauts que possible, comme les aciers dégazés ou refondus sous vide dont sont faits aujourd'hui les roulements. On choisira des traitements augmentant la dureté et engendrant des contraintes résiduelles de compression :

nitruration, cémentation, trempe superficielle, par exemple. La profondeur traitée doit dépasser le point de plus fort cisaillement, sinon le remède peut être pire que le mal.

4.6.1. Lubrifiants et fatigue de surface

La viscosité intervient au niveau du coefficient de frottement et donc des contraintes, mais bien d'autres effets sont dus à la réactivité physicochimique avec les matériaux.

- effet des additifs sur l'amorçage des fissures paraffine chlorée à 51 % de chlore : le meilleur effet est obtenu à 0,1 %, le pire vers 2 %.

Phosphite de diphényle : meilleur effet bénéfique autour de 1,25 %, de plus en plus néfaste à partir de 2 %.

Iso-butylène soufré, polysulfure de ditertiododécyle : se comporte mieux que le précédent. Effet bénéfique à faible concentration, 0,1 %, effet néfaste maximum vers 0,25 %. Les produits chlorés ou phosphorés engendrent un phénomène proche de la corrosion à partir d'une certaine concentration, pour les produits soufrés il y a combinaison avec le matériau.

- effet des lubrifiants sur la propagation des fissures

La présence d'huile a un effet bénéfique sur la propagation des fissures en réduisant la variation des contraintes, mais elle peut aussi multiplier par 10 cette propagation à cause d'autres effets : ouverture des fissures par pression hydraulique, pollution par des produits provoquant une corrosion, eau dissoute entraînant une fragilisation par l'hydrogène, etc. Globalement, le lubrifiant accélère la propagation des fissures de fatigue, les additifs ne semblent pas agir notablement sur ce phénomène.

4.7.Erosion :

Aspects des dégâts

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux.

Lors des chocs, il y a ébranlement du matériau de la surface et bris du système cristallin, les dégâts sont fonction de l'énergie cinétique, donc de la masse et du carré de la vitesse de la particule. L'enlèvement de matériau croît très vite avec la vitesse, comme la cinquième puissance pour les gouttes.

Le comportement est très différent selon la nature du matériau.

Si ce dernier est ductile, on trouve des rides annulaires très écrouies et cassantes et la vitesse d'usure passe par un maximum pour des angles d'incidence de 20 à 30°.

S'il est très dur et fragile, on ne trouve que des craquelures et l'usure augmente continûment avec l'angle d'incidence.

Nature du phénomène

L'érosion diffère de l'abrasion car elle est corrélée avec l'énergie cinétique des particules qui, frappant les surfaces à grande vitesse, créent des petits cratères par déformation plastique du matériau sous l'effet du cisaillement. La perte de matière résulte de la coupe ou des déformations alternées des aspérités formées par les impacts successifs.

Quand l'angle d'impact est faible, le phénomène de coupe est important, la résistance du matériau dépend très étroitement de sa dureté. S'il est grand, l'usure est due à la déformation des surfaces et le phénomène est beaucoup plus complexe : un matériau moins dur mais plus tenace peut fort bien résister.

Prévention :

La résistance est liée au paramètre $R^2/2E$ qui indique la quantité d'énergie absorbée avant fissuration. On peut traiter les surfaces ou les revêtir de métaux ou alliages durs mais le mieux est d'empêcher les impacts par tous les moyens possibles.

En érosion par impact comme en abrasion sous faibles contraintes, l'emploi de certaines matières plastiques ou élastomères est possible, par exemple des polyuréthanes spéciaux utilisés sous forme de revêtements. Dans tous les autres cas c'est la dureté superficielle du matériau qui intervient : il faut opposer à l'abrasif une surface plus dure que lui et peu fragile.

4.8.Fatigue thermique :

C'est une dégradation par alternance d'échauffements et de refroidissements, qui touche des pièces comme les cylindres de laminoirs, les matrices de forge ... mais aussi les surfaces rectifiées dans de mauvaises conditions.

Aspect des dégâts :

La fissuration finale a un aspect caractéristique de mosaïque, dit de « faïençage ». Les fissures sont plus ou moins polygonales et suivent les joints de grains et s'enfoncent dans les matériaux perpendiculairement à la surface.

Nature du phénomène

Les contraintes par flash thermique font alterner très vite compressions et tractions. Les premières déforment plastiquement les surfaces, les secondes descellent les grains par cisaillement, surtout si les joints sont oxydés. Le faïençage peut exister avant ou après frottement. Les contraintes résiduelles de traction, ou les contraintes de traction provoquées par le frottement, facilitent la dégradation.

Prévention :

Il faut utiliser des surfaces présentant un bon compromis entre la dureté et l'allongement à la rupture et introduire par traitement des contraintes de compression, à condition que ces dernières ne s'estompent pas dans le temps. La résistance à l'oxydation doit être bonne.

Naturellement, on diminue les risques de faïençage en diminuant les chocs thermiques par tous les moyens classiques.

Chapitre III

Analyse statistique des avaries des cylindres de laminage

1. Les données des avaries des cylindres de travail du laminoir à froid ArcelorMittal Algérie:

Les enregistrements quotidiens dans la vie des lamineurs du LAF ont permis de constituer une base de données qui permet aux d'avoir la traçabilité des informations, et de les répertorier d'une manière convenable. La notification des données et son archivage est de la responsabilité de l'organisation, qui à la tête la direction des opérations qui à son tour ventile et affecte à la demande les inquiétudes faisant l'objet d'éventuelles recherches, de causes, développement et recherches dans le cadre de l'amélioration continue des conditions et des paramètres des différents processus de production et ce dans chaque unité de production.

Nous avons pu avoir l'accès aux différentes données relatives au processus du laminage des produits plats au niveau du site ArcelorMittal Algérie, et ce grâce au niveau de veille de son encadrement technique, qui dans le cadre de son organisation interne a confié au département du process la responsabilité de l'amélioration continue et de remédier aux différents problèmes d'ordres techniques qui peuvent surgir lors du processus de production au niveau des laminoirs des produits plats, que ce soit le laminoir à chaud ou le laminoir à froid qui partagent des paramètres communs.

Les données récupérées sont relatives aux fréquences de changement des cylindres de laminage à froid qui nous ont permis de les présenter d'une manière permettant de centrer nos efforts intellectuels sur les indications récurrentes qui montrent d'une manière significative les causes principales qui provoquent les défaillances des cylindres de travail au niveau du laminoir à froid (Tandem).

Les données relatives aux années 2008, 2009 et 2010 sur les consommations des cylindres de travail de laminage à froid au niveau du site ArcelorMittal Algérie en fonction de la production mensuelle des bandes laminées.

Nous avons signalé dans les paragraphes relatifs à la tribologie que l'usure des cylindres de travail des trains de laminage à froid se traduit par une modification de sa géométrie se répercutant sur les dimensions et l'état de surface du produit laminé, qui devront rester dans les tolérances admises exigées par le processus du laminage à froid.

Les chiffres (voir tableau N°) relatifs aux années 2008, 2009 et 2010 ainsi que ceux des années 2013 et 2014 de l'unité LAF ArcelorMittal Algérie indiquent que la consommation en matière de cylindres de travail peut varier de 3 mm mini et 11 mm maxi soit une moyenne annuelle des supérieure à 7 mm à la production de 1000 tonnes de la tôle laminée à froid.

Le souci du lamineur à froid est d'instaurer un suivi de prêt des coûts à la tonne engendrés par la casse et les défauts et avaries, et qui peuvent enregistrer des montants très exorbitants en matière de cylindres de travail.

Ces chiffres montrent l'intérêt de constituer un groupe de travail mixte regroupant utilisateurs et représentant de fournisseurs fabricants de cylindres dans l'optique d'une recherche du moindre coût d'exploitation.

Au cours de cette recherche nous avons traité la première partie concernant le suivi de l'usure des cylindres après avoir mesuré les différentes consommations mensuelles ramenées à la tonne des différents produits laminés à froid.

En deuxième partie nous avons abordé les principaux défauts et avaries par types d'usure dans les différentes positions des cages du train de laminage.

Enfin, la dernière partie, traite les éventuels remèdes et recommandations à adopter pour arriver à diminuer les différentes formes de l'usure des cylindres de travail à froid au niveau du tandem LAF.

2. Fréquences de changement des cylindres de travail/année 2008-2009 et 2010:

Année	Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	Moy
2008	Produit Enfourné (to)	25294	24111	21823	17721	16873	17569	9522	1353		11487	9848	8591	14927
	Fréquence (mm)	192	142	120	142	95	107	56	5		51	48	36	90,36
	Ratio mm/1000 to	7,59	5,89	5,5	8,01	5,63	6,09	5,88	3,7		4,44	4,87	4,19	5,6
2009	Produit Enfourné (to)	8889	7125	14091	11061	14551	11151	11702	13146	10517	15905	10197	9988	11527
	Fréquence (mm)	54	35	58	66	81	88	70	110	108	158	70	89	82
	Ratio mm/1000 to	6,07	4,91	4,12	5,97	5,57	7,89	5,98	8,37	10,27	9,93	6,86	8,91	7,1
2010	Produit Enfourné (to)	12814	14605	20286	16194	21463								15975
	Fréquence (mm)	121	133	172	112	172								134,5
	Ratio mm/1000 to	9,44	9,11	8,48	6,92	8,01								8,49

Tableau 4: Fréquences de changement des cylindres de travail/année 2008-2009 et 2010:

Les managers du laminoir ont remarqué que les fréquences de changement des cylindres sont exagérées, de ce fait ils se sont fixé des objectifs pour rendre la consommation de cylindres à un niveau de 5mm au lieu de 7mm/1000 tonnes.

Malgré que les efforts se sont concentrés sur la réduction des consommations par rapport aux années 2008 à 2010, nous constatons que ces dernières années, les consommations sont devenues plus exagérées, d'où l'importance d'alerter.

Historique et Moyenne des Réalizations	7	Objectifs	5	Gain	2
---	----------	------------------	----------	-------------	----------

Arriver à atteindre un niveau de consommation en matière de cylindre de travail à froid de 5mm/1000 to, veut dire avoir un gain d'environ de 30% sur le cout d'acquisition des cylindres en plus du gain en productivité le fait de pouvoir éviter des arrêts prolongés ou fréquents causés par les accidents imprévus des cylindres.

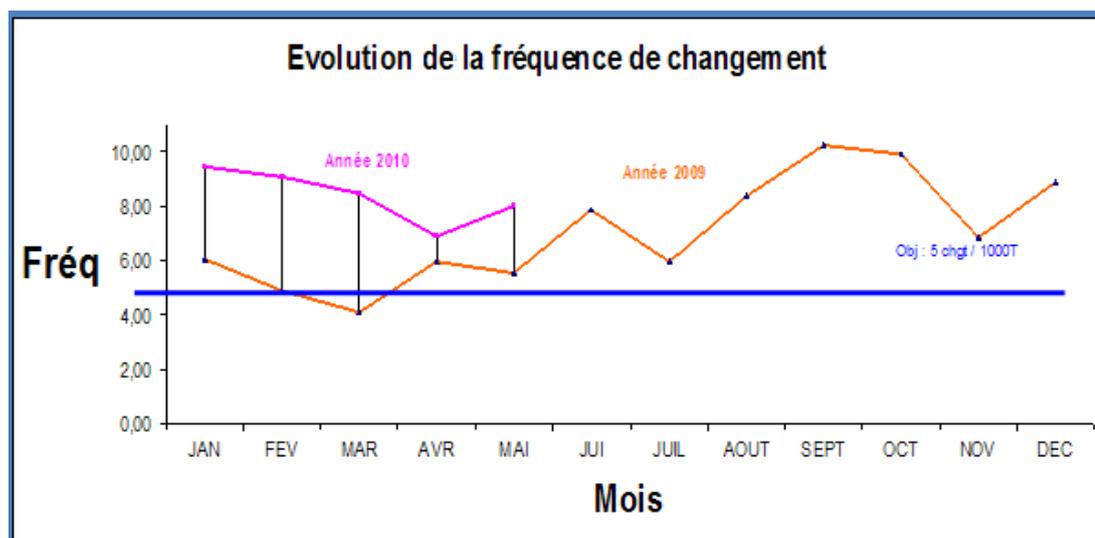


Fig 31: Evolution des fréquences de changement des cylindres de laminage à froid AMA 2009- 2010

3. Motifs et causes de changement des cylindres dans les différentes cages des 4 premiers mois Année 2010

Global	Cages N°					04 premiers mois de l'année 2010		
Motif Changt	1	2	3	4	5	total	%	% Cumulé
Cangement normal	18	32	28	45	27	150	22,59	22,59
Empreinte	0	3	11	28	99	141	21,23	43,83
Défaut en Profondeur	3	13	57	17	28	118	17,77	61,6
Changement de Produit	1	1	2	23	65	92	13,86	75,45
Rupture Bande	0	7	19	20	41	87	13,1	
Griffure à chaud	0	1	7	6	30	44	6,63	
Eclatement	0	0	5	0	1	6	0,9	
Ondulation	0	0	1	1	3	5	0,75	
Bruit anormal	0	3	0	1	0	4	0,6	
profil	0	0	0	1	3	4	0,6	
Fissure	0	0	0	2	1	3	0,45	
Sillons	0	0	0	1	2	3	0,45	
Cassé	0	1	1	0	0	2	0,3	
Canal	0	0	1	0	1	2	0,3	
ME	0	0	1	0	0	1	0,15	
Empoise calé	0	0	0	1	0	1	0,15	
THI	0	0	0	0	1	1	0,15	
Ecaillé	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	22	61	133	146	302	664	100	

Tableau 5 : Motifs et causes de changement des cylindres dans les différentes cages des 4 premiers mois Année 2010

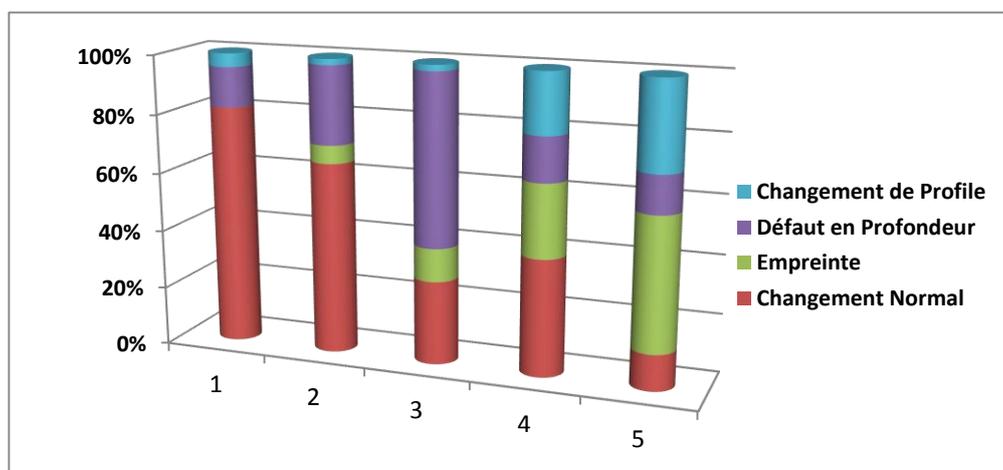


Fig 32 : Graphique illustrant les principales causes de changement de Cylindres par cage des 4 premiers mois 2010.

Changement Accidentel	Cages N°					total	%	% Cumulé
	c1	c2	c3	c4	c5			
Motif								
Empreinte	0	3	11	28	99	141	33,41	33,41
Défaut en Profondeur	3	13	57	17	28	118	27,96	61,37
Rupture de Bande	0	7	19	20	41	87	20,62	81,99
Griffure à Chaud	0	1	7	6	30	44	10,43	
Eclatement	0	0	5	0	1	6	1,42	
Ondulation	0	0	1	1	3	5	1,18	
Bruit anormal	0	3	0	1	0	4	0,95	
profil	0	0	0	1	3	4	0,95	
Fissure	0	0	0	2	1	3	0,71	
Sillons	0	0	0	1	2	3	0,71	
Cassé	0	1	1	0	0	2	0,47	
Canal	0	0	1	0	1	2	0,47	
Mauvais Engagement	0	0	1	0	0	1	0,24	
Empoisse calé	0	0	0	1	0	1	0,24	
THI	0	0	0	0	1	1	0,24	
Ecaillé	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	3	28	103	78	210	422	100	
Nbre de Chgt/1000T	0,047	0,438	1,612	1,221	3,286	6,6		

Tableau 6 : Cumul des Motifs et Causes de changement des cylindres dans les différentes Cages du Tandem LAF des Années 200_,2009 et 2010

Les données du tableau ci-dessus montrent les principales causes et défauts enregistrés durant l'exercice des années 2008 2009 et 2010, ce qui attire l'attention des lamineurs au niveau du LAF, le taux élevé des fréquences de changement accidentel qui représente plus de 73% des cas, en première position à travers les accidents mentionnés dans le tableau ci-dessus celles relatives aux empreintes marquées sur les cylindres de travail, en deuxième position ce sont les défauts en profondeur au sein du cylindre, en troisième position ce sont les défauts accidentels relatifs à la rupture de la bande, qui est considéré plus dangereux relativement aux deux premiers défauts, du fait que les conséquences et impacts sur tout l'équipement des cages de laminage tandem, et les répercussions qui peuvent surgir par la suite telles que fatigues et usures.

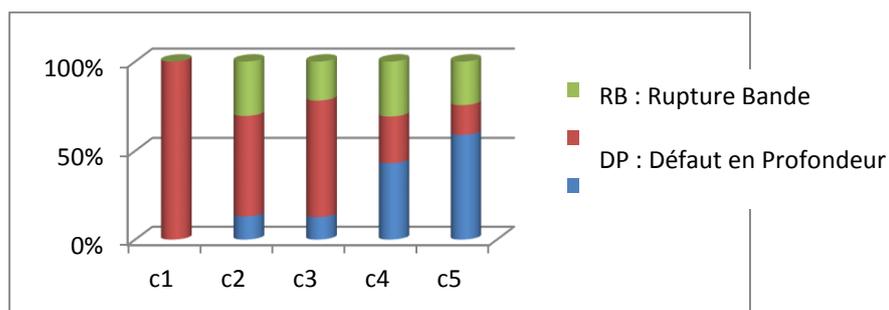


Fig 33 : Graphique illustrant le Changement Accidentel et Causes par Cage

4. Tableau de suivi des ratios de consommation des cylindres de travail du laminage à froid des Années 2013 2104 et les premiers mois de 2015.

Periode	Année	Consom.(mm)	Production(T)	Ratio
Jan	2013	133,65	10 577	12,64
Fév	2013	25,85	904	28,60
Mars	2013	137,30	13 274	10,34
Avril	2013			
Mai	2013			
Juin	2013			
Juillet	2013			
Août	2013	36,15	4 456	8,11
Sept	2013	47,95	6 055	7,92
Oct	2013			
Nov	2013			
Déc	2013			
Cumul 2013		380,90	35 266	10,80
Jan	2014	48,85	4 644	10,52
Fév	2014	127,00	7 398	17,17
Mars	2014	37,20	3 084	12,06
Avril	2014	95,26	9 619	9,90
Mai	2014	61,10	4 787	12,76
Juin	2014	62,27	4 971	12,53
Juillet	2014	28,70	2 263	12,68
Août	2014	0,00	-	
Sept	2014	0,00	-	
Oct	2014	40,85	9 037	4,52
Nov	2014	14,65	1 682	8,71
Déc	2014	77,40	7 300	10,60
Cumul 2014		593	54 785	10,83
Jan	2015	48,70	9 145	5,33
Fév	2015	43,10	5 393	7,99
Mars	2015			
Cumul 2015		92	14 538	6,31
cumul général		1 066	104 589	10,19

Tableau 7: Suivi des consommations en mm des cylindres de travail à froid Années:2013,2014, Janvier et Février 2015.

Période	DEFAUTS	RUPTURE DE BONDE	FISSURE / ECLATEMENT	CHANGEMENT NORMAL	EMPREINTE	GRIFURE A CHAUD	EBAUCHE RUPTURE DE BONDE	DEFAUT EN PROFONDEUR	ACCOUPLLEMENT	PERMUTATION	CHANGEMENT DE PRODUIT	Impaires	Repris	rugosité	Ondulation	PROFILER	MAUVAIS DEGAGEMENT
Total	TOT Cons.	316,51	194,55	178,25	129,05	115,05	101,80	93,79	39,75	25,10	24,46	10,49	8,25	7,05	4,70	3,80	1,95
	TOT NB	343	34	416	271	256	31	191	45	63	41	4	18	19	14	18	6
janv-13	Cons.(mm)	38,80	30,80	7,55	17,10	11,00	1,30	17,00	0,00	5,25	1,50		2,55		0,40	0,40	0,00
janv-13	Nombre	78	4	24	42	32	3	34	0	12	6		6		2	2	0
févr-13	Cons.(mm)	0,00	0,00	0	3,95	2,25	2,40	6,30	0,00	0,15	0,00	10,15	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00
févr-13	Nombre	0	0	0	18	8	2	12	0	2	0	3	0	2	0	0	0
mars-13	Cons.(mm)	4,00	50,55	19,05	13,50	15,35	16,55	3,45	4,80	6,75	0,00	0,00	1,20	0,00	2,10	0,00	0,00
mars-13	Nombre	10	2	50	34	30	7	10	4	12	0	0	2	0	6	0	0
avr-13	Cons.(mm)	27,40	2,75	19,25	12,40	13,15	0,45	5,85	2,30	4,70	1,60				0,00	0,00	0,00
avr-13	Nombre	54	1	53	34	38	2	16	5	13	4				0	0	0
mai-13	Cons.(mm)	7,75	4,06	9,62	13,45	10,95		6,66	2,30		0,61						
mai-13	Nombre	20	2	27	20	20		23	5		1						
juin-13	Cons.(mm)																
juin-13	Nombre																
juil-13	Cons.(mm)																
juil-13	Nombre																
août-13	Cons.(mm)	8,95		5,65	4,30	6,85	3,10	1,05	1,10	3,90	0,80					0,45	
août-13	Nombre	17		11	6	14	1	2	1	11	4					2	
sept-13	Cons.(mm)	8,10	23,10	8,65	2,70	0,50		4,30			0,60						
sept-13	Nombre	14	2	23	11	2		12			2						
oct-13	Cons.(mm)																
oct-13	Nombre																
nov-13	Cons.(mm)																
nov-13	Nombre																
déc-13	Cons.(mm)																
déc-13	Nombre																
janv-14	Cons.(mm)	22,85	0,80	3,3	6,10	4,65		0,75	10,40								
janv-14	Nombre	18	1	10	12	6		4	7								
févr-14	Cons.(mm)	70,05	3,60	13,05	9,15	8,05		17,40	0,20		1,60	0,34	1,05	0,80	0,40	0,40	0,90
févr-14	Nombre	49	2	28	15	19		30	2		4	1	4	2	2	2	4
mars-14	Cons.(mm)	17,45	3,95	1,7	3,80	2,40		0,60	5,20	0,20	1,70					0,20	
mars-14	Nombre	12	1	6	10	7		2	3	1	2					1	
avr-14	Cons.(mm)	24,01	20,00	16,25	8,50	4,45	2,10	12,45		2,60	2,00			1,65	1,00		1,05
avr-14	Nombre	17	8	41	20	9	3	18		6	4			4	2		2
mai-14	Cons.(mm)	7,25	19,00	7,1	9,25	5,75		1,85			9,50				0,80	0,60	
mai-14	Nombre	13	1	18	11	18		7			7				2	1	
juin-14	Cons.(mm)		15,55	5,3	7,45	1,40	26,05		5,30	0,45			0,75				
juin-14	Nombre		3	16	10	4	6		3	4			2				
juil-14	Cons.(mm)	3,00	2,59	9,33	2,00	6,00		2,33			3,45						
juil-14	Nombre	4	2	13	1	6		4			5						
oct-14	Cons.(mm)		13,65	10,55	3,20	4,95	42,60	4,80	0,60	1,10				1,60		0,40	
oct-14	Nombre		3	25	6	9	2	11	1	2				7		4	
nov-14	Cons.(mm)	2,25		3,4	0,55		7,25							1,20			
nov-14	Nombre	6		8	1		5							2			
déc-14	Cons.(mm)	35,15	3,45	13,45	1,05	8,00		8,05	4,65				1,05	1,20		1,35	
déc-14	Nombre	12	1	12	2	12		4	6				2	2		6	
janv-15	Cons.(mm)	11,00	0,70	18,4	8,15	6,30		0,95	0,45		1,10		1,65				
janv-15	Nombre	10	1	35	14	14		2	1		2		2				
févr-15	Cons.(mm)	28,50		6,65	2,45	3,05			2,45								
févr-15	Nombre	9		16	4	8			7								

Tableau 8: reflétant des données sur les motifs de changement des cylindres de travail relatives aux années 2013 2014 & 2015.

5. Récapitulatifs des avaries des cylindres de travail dans le laminage a froid :

Défauts de cylindres	Consommation en MM	Nombre de changement de Cylindres
Rupture de bande	316,51	343
Fissure / éclatement	194,55	33,6
Changement normal	178,25	416
Empreinte	129,05	270,95
Griffure a chaud	115,05	256
Ebauche rupture de bande	101,8	31
Défaut en profondeur	93,79	191
Accouplement	39,75	45
Permutation	25,1	63
Changement de produit	24,46	41
Impaire	10,49	4
Repris	8,25	18
Rugosité	7,05	19
Ondulation	4,7	14
Profile	3,8	18
Mauvais dégagement	1,95	6

Tableau 9 : Classement par ordre décroissant des causes des Avaries de cylindres dans la période 2013-2014 et premiers Mois 2015.

Le classement des avaries des cylindres par ordre décroissant nous montre que les plus importantes causes sont la rupture de la bande laminée ensuite les fissures et les écaillages, ces accidents génèrent des conséquences plus graves sur le produit en laminage ainsi que sur les trains, sans oublier les pertes de production.

6. Représentation graphique montrant l'évolution des ratios de consommation des cylindres LAF :

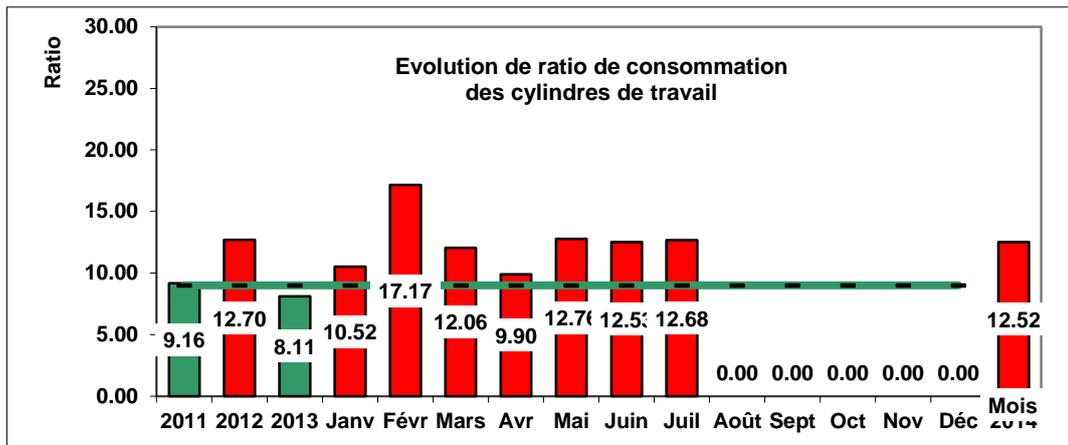


Fig 34 : montrant les consommations des Cylindres de Travail du Laminoir à Froid au Cours des Années 2011 2012 2013 ET 2014

Le graphique ci-dessus montre et vulgarise clairement les fortes consommations des cylindres de travail au niveau LAF. Il est à noter que durant les exercices 2008, 2009 et 2010 nos collègues au niveau du LAF se sont engagé à réduire les ratios pou les ramener à 5 mm/1000 t.

Les premières conclusions à tirer à ce propos la dégradation des performances dans cette unité est la moyenne des consommations qui dépasse les 10 mm.

Ceci nécessite à tirer la sonnette d'alarme afin de trouver les causes qui mènent ces dégradations année par année, et de penser d'une manière scientifique à ce que les consommations ne soient excessives en arrêtant l'hémorragie de défaillance de ces cylindres, en fait participer à la réduction des couts de production.

7. Suivi détaillé des cas d'éclatements des cylindres LAF en 2014:

Date	N°cage	Coté	Ø	Dim	Eq	OB
14/01/2014	5	Sup	569	1,40*970	A	Eclatement à vide
15/01/2014	3	Sup	570,2	0,65*1000	A	Eclatement à vide
02/04/2014	1	Inf	553,05	0,75*1020	A	Eclatement au cours de laminage
17/04/2014	1	Inf	551,85	1,25*1250	B	Eclatement au cours de laminage
29/04/2014	4	Inf	545,95	0,32*1000	B	Eclatement au cours de laminage
03/05/2014	2	Sup	532	1,35*1250	A	Eclatement au cours de laminage
11/06/2014	5	Inf	564,45	0,64*1000	B	Eclatement au cours de laminage

Tableau 9 : récapitulatif de l'historique des défauts d'éclatements sur des cylindres de travail à froid avec dates d'incidents

Photos prises sur cylindres de laminage lors des incidents enregistrés relatifs au tableau ci dessus:



Fig 35 : Photos prises de l'incident sur cylindres de travail du 14/01/2014



Fig 36 : Photos prises de l'incident sur cylindres de travail du 29/04/2014



Fig 37 : Photos prises de l'incident sur cylindres de travail du 14/04/2014

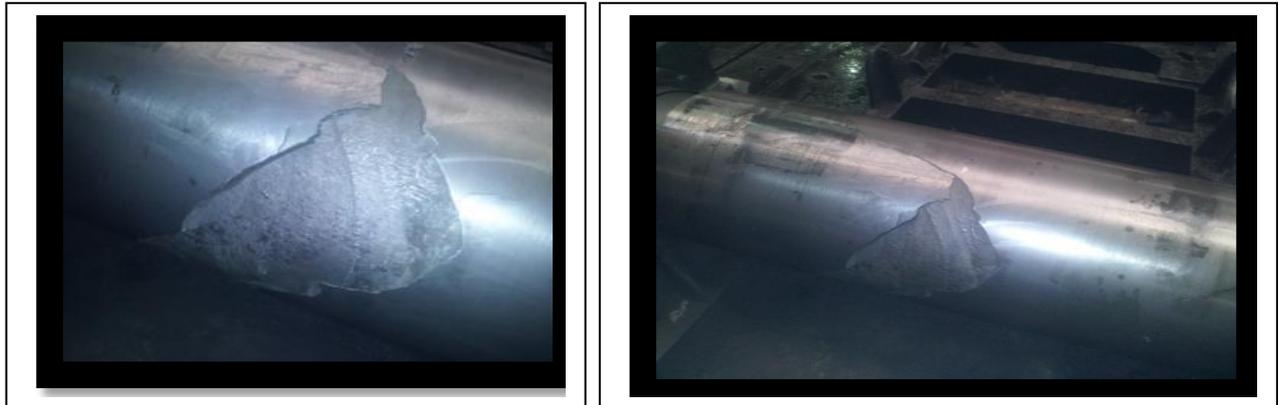


Fig 38 : Photos prises de l'incident sur cylindres de travail du 02/04/2014



Fig 39 : Photos prises de l'incident sur cylindres de travail du 02/04/2014

8. Hiérarchisation des causes par ordre d'importance selon méthode de Pareto

La méthode de Pareto permet de hiérarchiser les problèmes en fonction du nombre d'occurrences, ainsi de définir des priorités dans le traitement des problèmes.

Cas d'utilisation : Cet outil est basé sur la loi des 80/20. Autrement dit cet outil met en évidence les 20% de causes sur lesquelles il faut agir pour résoudre 80 % du problème. Il sera utile pour déterminer sur quels leviers on doit agir et par priorité pour améliorer de façon significative la situation cible.

Identification du Problème :

Parmi les causes détectées lors de notre analyse statistique des données relatives aux causes des défaillances des cylindres de travail, la cause qui engendre les fissures et les éclatements des cylindres.

Objectif :

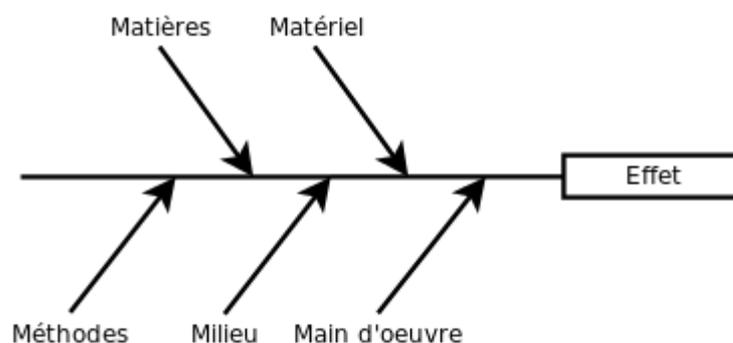
- Identifier & classer par famille les causes possibles entraînant les fissures et éclatements sur les cylindres de travail du tandem.
- Déterminer les causes racines les plus probables.
- Comprendre le phénomène.

Démarches de la méthode d'Ishikawa (5 M):

Elle sert à la Classification par famille des causes possibles ⇒ Impact direct

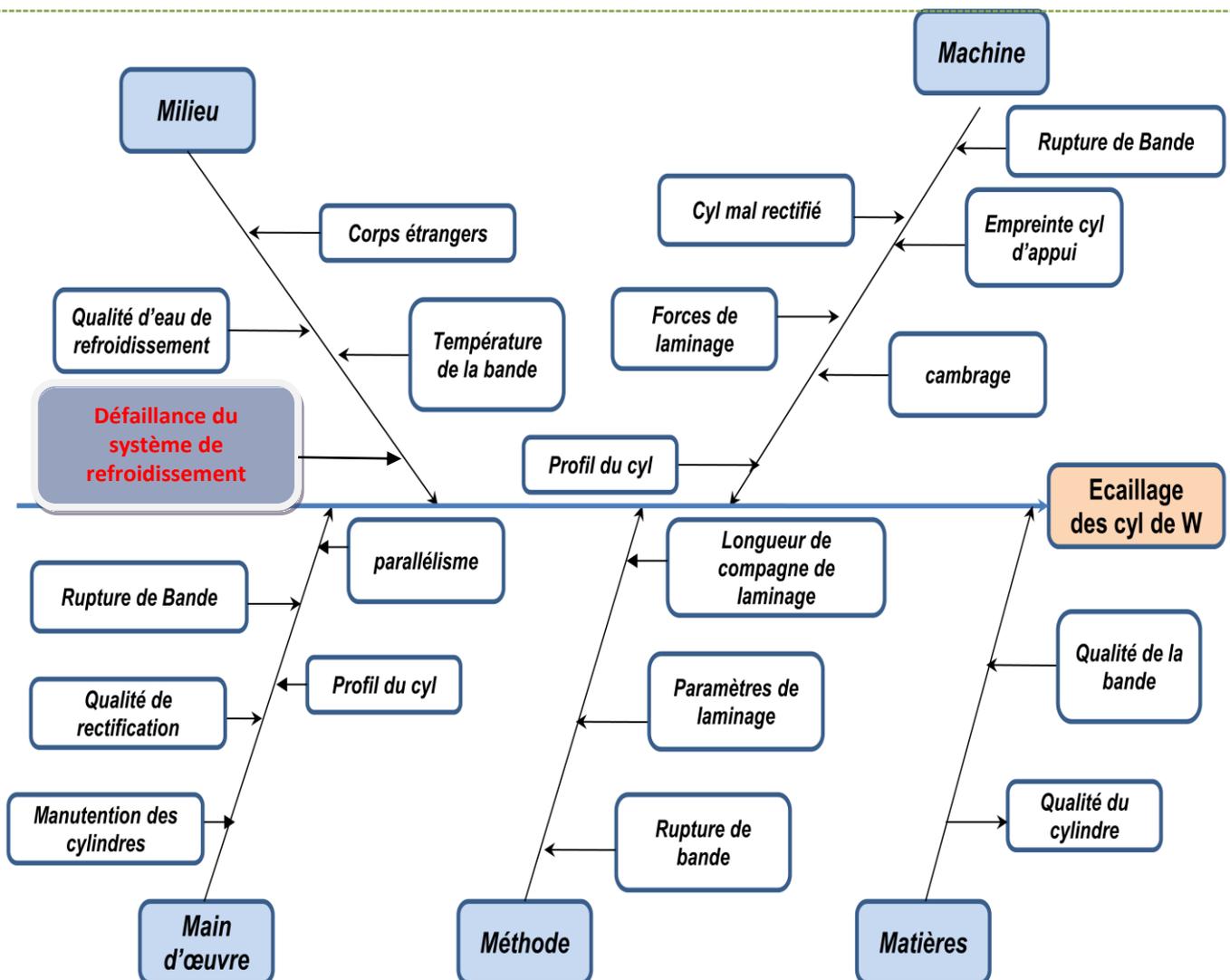
Démarche à suivre : celle utilisée en pratique de gestion et arborescence des causes des défaillances dans les milieux industriels qui a donné une satisfaction particulière parmi les managers de notre entreprise AMA.

Cette méthode choisie est celle d'Ishikawa ou la méthode des Cinq (05) M, ou M représente l'initiale des principales causes qui représentent :



1. Matière : les matières et matériaux utilisés et entrant en jeu, et plus généralement les entrées du processus.
2. Matériel : l'équipement, les machines, le matériel informatique, les logiciels et les technologies.
3. Méthode : le mode opératoire, la logique du processus et la recherche et développement.
4. Main-d'œuvre : les interventions humaines.
5. Milieu : l'environnement, le positionnement, le contexte.
6. Chaque branche reçoit d'autres causes ou catégories hiérarchisées selon leur niveau de détail.
7. Le positionnement des causes met en évidence les causes les plus directes en les plaçant les plus proches de l'arête centrale.

Diagramme Ishikawa sur les Causes d'écaillage des Cylindres de Travail



9. Résultats obtenus :

L'une des plus importantes étapes c'est la ou on doit focaliser sur les principales causes pouvant être le motif directe des incidents survenus sur les cylindres à travers le recueil des données et le recours aux paramètres qui ont accompagné les incidents récurrents, le retour d'expérience la vigilance et l'esprit d'analyse ainsi que la présence d'esprit de raisonnement. Tout cela avec la réunion des efforts des lamineurs et les spécialistes des cylindres et du processus de production (exploitation) et grâce à la collaboration des équipes impliquées, nous nous sommes convenus de convaincre les équipes de la maintenance de donner de l'importance à la cause liée au système de refroidissement des cylindres et des cages de laminage Tandem.

Les recherches menées dans la piste de la défaillance du système de refroidissement ont pris la peine de prendre en compte de faire fonctionner les système de refroidissement qui peut fonctionner indépendamment du fonctionnement de laminage donc à travers des tests à vide, il a été observé le blocage (bouchage) de plusieurs buses de pulvérisation placées à proximité des cylindres et qui servent à refroidir toute la table de travail ou en d'autre terme la partie en contact permanent avec la tôle laminée, le frottement ainsi que la pression due aux déformations plastiques de la bande en contact avec le cylindre provoque une hausse de température qui dépasse celle admise par le plan de passe du laminage, le disfonctionnement du système de refroidissement rend un déséquilibre de la répartition thermique d'une cage à l'autre comme ce disfonctionnement pourra être au sein du même cylindre et dans la même cage.

Il est à noter que le mauvais filtrage de l'eau ainsi que les huiles, participe à créer des bouchons à travers les conduites ou au niveau des buses de refroidissement, de ce fait une veille exceptionnelle à propos de ce phénomène mérite d'être, et ce afin de participer à éliminer l'une des principales causes pouvant provoquer des pertes énormes en matière de cylindres de travail.

De ce fait nous rappelons quelques conseils à retenir relatifs au refroidissement des cylindres de laminage à froid.

Les exigences de refroidissements varient tellement d'un laminoir à l'autre, cependant voici les principes fondamentaux d'un refroidissement adéquat.

- le système de refroidissement doit assurer un volume constant d'eau.
- Assurer un mélange équilibré de l'huile d'émulsion avec de l'eau afin d'assurer un régime exigé (mixte) en matière de lubrification des cylindres de travail.
- La conception des conduites de refroidissement doivent être conçu pour couvrir le maximum possible la table de travail. Elle doit être le plus simple possible. Nous ne conseillons pas, l'usage des buses reste délicat, car elles ont une tendance à se boucher facilement avec les petits débris présents dans le circuit de refroidissement générés le long des cages du laminoir tandem.

- Il est important que le système de refroidissement soit arrêté lorsque les cylindres ne tournent pas, lors d'un arrêt du tandem ou du train de laminage car refroidissement localisé crée des tensions internes.
- Si pour une raison quelconque le laminage a commencé sans le système de refroidissement en route, ou si le système est défaillant, en aucun cas mettre en route celui-ci jusqu'à la fin de passage de la bande. Les cylindres atteignant une température trop élevée doivent refroidir d'eux-mêmes.
- Quand le système de refroidissement est défaillant et que le laminage entraîne une chauffe trop importante du cylindre, à ce moment si quelqu'un se rappelle de mettre en marche le refroidissement celui risque une fissure ou éclatement dûs au choc thermique trop important.

Enfin les lamineurs doivent consacrer leurs efforts pour chercher d'autres pistes d'amélioration en définissant d'autres causes provoquant les avaries des cylindres de travail du laminage à froid.

Conclusion et recommandations

1. Conclusion:

La philosophie du système de gestion de la qualité est fondée sur le principe de l'amélioration continue, ceci est applicable pour tout processus.

Partant de ce principe, dans ma position professionnelle je me retrouve qualifié à porter le plus à l'organisation pour laquelle je tiens un engagement, qui va permettre de contribuer à travers mes interactions dans le cadre de cette modeste recherche.

L'enveloppe considérable consacrée à l'achat des cylindres de laminage, m'a obligé de penser à sa réduction dans l'immédiat, et ceci à partir du traitement des bases de données des opérations relatives à l'élaboration des bilans issus des analyses des causes les plus graves qui sont à l'origine des avaries présentes dans le processus du laminage des produits plats d'une manière générale, et spécialement celui du laminage à froid.

Les analyses effectuées sur les données relatives à l'usure des cylindres m'ont permis de classer par ordre décroissant des causes probables dans un ordre décroissant.

L'éclatement des cylindres représente une majeure partie de la classe A que constitue les multiples avaries recensées par les lamineurs.

En fait, je croie personnellement que notre contribution dans ce sujet délicat et d'actualité va aider nos lamineurs à :

- améliorer le temps de laminage disponible.
- améliorer la qualité et la mise au mille par suppression des défauts de surface dus aux marques sur les cylindres.
- diminuer la consommation de cylindres.
- améliorer les conditions de travail du personnel.
- Réduire les couts de production directs et indirects

Il est important aussi de partager les difficultés qu'affrontent les lamineurs lors des préparatifs relatifs à l'expression des besoins, l'élaboration d'un cahier des charges

2. Recommandations pour l'élaboration d'un cahier des charges

Sur la base des éclaircissements présentés à travers notre présent document, nous recommandons aux lamineurs et techniciens responsables du suivi des cylindres de :

- R éunir leurs efforts et coop érer ensemble afin d'éliminer toute cause susceptible d' être à l'origine d'une usure excessive ou pr énaturé é des cylindres.
- Ne pas hésiter à demander de l'expertise des techniciens spécialistes des cylindres, et du processus de laminage et d'échanger avec eux afin de permettre de développer de meilleures solutions selon le contexte local des données du laminoir.

- Etre proactif et répondre convenablement aux demandes et questionnaires des fournisseurs fabricants de cylindres, car les techniques évoluent dans le domaine de fabrication des cylindres.
- Mettre en place les moyens de contrôle les plus adaptés et d'actualité.
- Rendre plus efficace les systèmes de refroidissement et de lubrification.
- Revoir les paramètres de laminage en fonction des évolutions techniques diverses.
- Evaluer continuellement les performances des cylindres par fabricant dans le but d'améliorer la qualité des cylindres et faire améliorer les fabricants.
- Elaborer un cahier des charges ou spécification technique qui contient le maximum de détails, que doit respecter tous les fournisseurs consultés dans le cadre des appels d'offres lancés.

Les facteurs dictant le choix des cylindres :

L'achat des cylindres de travail constitue une lourde responsabilité d'où la nécessité de préciser le maximum de détails pouvant aider à se prononcer sur le choix de cylindre approprié à l'installation.

Les détails remplis mènent à des exigences que doit remplir le cylindre.

Selon ces exigences les fabricants doivent proposer de fournir les cylindres appropriés

Les détails qu'exige Akers [*] dans son document professionnel sous la forme suivante:

Le laminoir: le type de laminoir, le refroidissement, le type de paliers.

Procédé de laminage : le produit laminé, les dimensions du produit laminé, le type du métal laminé, analyse du métal laminé, vitesse de laminage, température de laminage, le rapport de réduction par passe, le nombre de tours/min, le couple (s'il faut calculer les efforts mécaniques appliqués aux cylindres) et la production prévisionnelle annuelle.

Les Cylindres: la position des cylindres dans le laminoir, les diamètres maximal et minimal absolus de la table du cylindre, les tolérances du diamètre de table et, le cas échéant, la tolérance pour le pairage des cylindres (il convient de joindre un plan du cylindre et un dessin de disposition des cannelures, le cas échéant), le diamètre et la longueur de la table, la longueur hors tout, la dureté des tourillons au niveau des paliers, la dureté de table souhaitée (de préférence en unités Vickers dans le cas des laminoirs à froid. Si l'on donne la dureté Shore, veuillez indiquer s'il s'agit de « standard calibration » ou « roll calibration », Shore C ou Shore D), dans le cas où il y a

[*]Akers : est un groupe Suédois fabricant de cylindres, fondé en 1580.

un alésage central, est-il employé pour le refroidissement du cylindre en service? Est-il possible de fournir les cylindres sans les alésages centraux?

Les cylindres employés précédemment : les nuances et analyse, la dureté de la table, la dureté des tourillons (portée de paliers), la performance : tonnage par montage, le kilométrage laminés, tonnage par rectification à la meule, épaisseur de matière enlevée à chaque réparation en mm, les difficultés rencontrées avec les cylindres précédents (bris, écaillage, fissurations thermiques, etc.).

Enfin, je considère que c'est important de reconnaître personnellement que les recherches sur les avaries des cylindres de travail du laminage à froid est de grande importance, ma petite expérience dédiée à ce sujet n'est qu'une goutte.

Je souhaite reprendre ce sujet avec plus de soins et approfondissement si les conditions me permettront dans mes prochains sujets de recherches.

Bibliographie

- Revue Métallurgie (cahier d'informations Techniques) 83^e N° 10 Octobre 1986 Usure des Cannelures page 739.
- Cylindres de Bofos –Akers, document Technique industriel, ref N° 8212 2' 3904 BLOMOUIST PRODUCENTLAM AB/BOFORS AKERS 2025/TOFTERS Imprimé en Suède.
- Circulaire d'Informations Technique (CIT) N° 10 année 1978.
- The Basics about Cold Rolls Professional handbook, Auteur: Horst Kleinrensing 3rd Edition May 2014 Steinhoff GmbH & Cie OHG.
- « Analyse du régime de laminage à froid à l'aide de l'ordinateur Mitra », A.Gouri PFE 1985 Université de Annaba.
- «Laminage à froid des produits plats» Référence M7950 | Date de publication : 10 oct. 1994 | Jean-Claude CALMON, Jean CENAC site Web :<http://www.construiracier.fr/tout-sur-lacier/la-fabrication-de-lacier/le-laminage-a-froid/>
- « Laminage à froid des produits plats » édition : Techniques de l'Ingénieur »<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/elaboration-des-metaux-ferreux-42367210/laminage-a-froid-des-produits-plats-m7950/>.
- « Les cages de laminage » site : <http://www.construiracier.fr/tout-sur-lacier/la-fabrication-de-lacier/le-laminage-a-froid/les-cages-de-laminage/>.
- recherche technique acier, Transformation (laminage) Réglage d'un train tandem à froid couple C. Fromholz, P. Masson IRSI D édition 1998.
- « COUPLAGE TÔLE/CYLINDRE ET MÉTHODES NUMÉRIQUES UTILISÉES » auteur « Sami Hamadé », Mines Paris Tech, P3M Physique des matériaux, mécanique et modélisation numérique année 2011/ 2012 encadré par Encadrement : MM. Y. Tillier et P. Montmitonnet.
- "Failure analysis of rolls of cold rolling mill in steel plant", A. K. RAY, K. K. MISHRA & P. N. CHAUDHARY, National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur - 831 007. PROCEEDINGS : COFA-1997 ©NML JAMSHEDPUR; pp. 37-46.
- Memoire Online - Analyse des contraintes résiduelles dans les cylindres de laminage - Soufyane BELHENINI.mht site web Université de Sidi Bel Abbès - Ingénieur en construction mécanique 2006 site web : <http://www.memoireonline.com/>.
- http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Nature_et_comportement_des_surfaces_frotta..._du_15/03/2015.
- http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Usure_des_surfaces
- <https://www.youtube.com/watch?v=79r5DD6mVbA>
- <http://univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/Tribologie.pdf>
- <https://www.youtube.com/watch?v=zThvH0I7sdQ>
- [http://www.researchgate.net/publication/50297239 Tribologie du laminage froid de tles Tribology in metal forming](http://www.researchgate.net/publication/50297239_Tribologie_du_laminage_froid_de_tles_Tribology_in_metal_forming)
- <http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/8511.pdf>
- <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=3742&context=eispapers>