

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université de BADJI MOKHTAR –Annaba-



جامعة باجي مختار – عنابة.

Faculté Science de L'ingénieur
Département de Métallurgie et Génie des Matériaux

MEMOIRE DE MAGISTER

OPTION : Mise en forme des métaux

Thème

**Etude du défaut d'écaillage sur les cylindres de
travail du train finisseur du laminoir à chaud
ARCELOR MITTAL ALGERIE**

DIRECTEUR DE MEMOIRE:

Dr. MEBAREK Abdelmalek

présenté par :

Mr. BOUGUERRA Salouha

Devant le jury

Président :

Pr S. Chabour

université BAJI MOKHTAR – Annaba

Rapporteur :

Dr A. Mebarek

université BAJI MOKHTAR – Annaba

Membre :

Pr M. Zahzouh

université BAJI MOKHTAR – Annaba

Dr M. Zaaf

université BAJI MOKHTAR – Annaba

Dr A. Boudebane

université BAJI MOKHTAR – Annaba

Promotion : 2014/2015

Remerciements

*Louange à Dieu, mon créateur, de m'avoir donné toute la force nécessaire pour accomplir ce modeste travail, Puis Je voudrais témoigner toute ma gratitude à Monsieur **MEBAREK.A** mon encadreur pour sa confiance, sa disponibilité et le grand intérêt qu'il a toujours manifeste pour ce travail, Sa rigueur Scientifique, ses encouragements et son soutien.*

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

*Mes plus vifs remerciements s'adressent à madame **Ghoudelbourg Abir** et à ma belle sœur **Bouguerra Imen** pour leur aide et leur soutien.*

*Je ne sais comment exprimer ma reconnaissance à Messieurs **Fromm Laurant** et **Alain Puissant** pour leur aide et leurs encouragements, J'avoue que les résultats présents dans ce manuscrit n'auraient pu l'être sans leur aide précieuse et leur contribution à l'enrichissement du présent travail.*

*Ce travail doit beaucoup aux personnes de l'équipe du LAC à leur tête **Remichi.A** et **Mechtri.A** et de laboratoire central d'**Arcelor Mittal**.*

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants de département de métallurgie et génie des matériaux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

*J'adresse mes remerciements à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, je cite monsieur **Gouri.A**, **Ouama.A**, **tounsi.M**, **Mami.A**, **Boutoutane.B**, **Sigurd.V**, **Achachra.Y**.*

Merci !

Sommaire :

-	Introduction	I
-	Partie bibliographique :	
-	Chapitre I: Description du laminoir à chaud Arcelor mittal Algérie.	01
	I.1 - Complexe sidérurgique d'Arcelor mittal Algérie	01
	I.2 – Introduction	02
	I.3 – Parc à brames.....	02
	I.4 – Atelier de rectification des cylindres	02
	I.5 – Fluides	03
	I.6 – Train à chaud	03
	I.6 .1 – Zone fours	03
	I.6 .2 – Zone quarto réversible	04
	❖ Laveuse à brames	04
	❖ Brise oxyde	04
	❖ Dégrossisseur	04
	I.6 .3 – Zone finisseuses	04
	❖ Cisaille volante	04
	❖ Décalamineuse secondaire	04
	❖ Train finisseuse	04
	❖ Douche de refroidissement	04
	I.6 .4 – Zone bobineuse	05
-	Chapitre II : Mode d'élaboration des cylindres	06
	II .1 – Fusion	06
	II .2 – Moulage	07
	II .3 – Traitement thermique	08
	II .4 – Rectification	08
	II .5 – Contrôle et inspection	09
-	Chapitre III : Type de cylindres et facteurs dictant le choix des cylindres	10
	III .1 – Type de cylindre	10
	III .1 .1 – Définition	10
	III .1 .2 – Cylindres moulés	11
	❖ Nuances de cylindres moulés	12
	III .1 .3 – Cylindres en fonte	14
	III .1 .4 – Cylindres en fonte à trempe nette	15
	❖ Les nuances cc-c	16
	❖ Les nuances cc-Ni-NiR	16
	❖ Les nuances tt-cc-Ni	16
	III .1 .5 – Cylindre en fonte à haute teneur en chrome	18

III .1 .6 - Cylindre en fonte à haute teneur en chrome et Nickel....	19
III .1 .7 – Cylindre en fonte à trempe indéfinie monoblocs	21
III .1 .8 – Cylindre en fonte à trempe indéfinie coulés statiquement composites	23
III .1 .9 – Cylindre en fonte à trempe indéfinie nodulaire	26
III .1 .10 – Quelques types de cylindres MKB	28
III .2 – Facteurs dictant le choix du cylindre	29
III .2 .1 – Laminoir	29
III .2 .2 – Procédé de laminage	29
III .2 .3 – Cylindres	29
III .2 .4 – Cylindres employées précédemment	29
- Chapitre IV: Défauts d'écaillage sur cylindre, définition et origines	30
IV .1 – Ecaillage en éclat.....	32
IV .2 – Eclat de longue de chat	33
IV .3 – Interface couche externe / cœur (lien relatif aux éclats) ...	35
IV .4 – Interface couche externe / cœur (insuffisance de la profondeur de la couche externe)	36
IV .5 – Ecaillage des extrémités du cylindre	37
IV .6 – Bandes de crique à feu	38
IV .7 – Lignes de crique à feu	38
IV .8 – Faïençage de crique à feu	39
IV .9 – Le défaut standard de surcharge de choc	40
IV .10 – Le défaut standard de fracture de flexion	40
IV .11 – Le défaut standard de couple de laminage	41
- Chapitre V : Introduction à la mécanique de la rupture.....	42
V .1 – Mécanique linéaire de la rupture	42
V .2 – Différents modes de la rupture	42
V .2.1 – Rupture fragile	42
❖ Rupture transgranulaire	43
❖ Rupture intergranulaire	45
V .2.2 –Rupture ductile.....	47
V .2.3 –Rupture par fissuration progressive	48
❖ Rupture par fatigue	48
- Partie expérimentale :	
I- Problématique	49
II- Forces agissantes sur les cylindres	49
III- Statistiques des faits accidentels sur les cylindres de travail	51
IV- paramètres influant sur les cylindres de laminage à chaud	53

IV.1 : influence de la température	55
IV.1.1 Impact direct	55
A- Un chargement thermique	55
B- Un chargement physico-chimique	56
IV.1 .2- Impact indirect	59
A- Profil de température de la bande	59
Zone 1 : Sortie four	60
Zone 2 : Sortie Quarto	62
Zone 3 : Entrée Finisseuse	63
Zone 4 : Sortie Finisseuse	64
Conclusion	65
IV.2 : Influence de la qualité des cylindres	67
IV.2.1 Cas cylindre MKB	67
Aspect macrographique des cylindres endommagés ...	68
Résultat d'analyses	69
Interprétation des résultats	70
Conclusions	71
IV.2.2.Cas des cylindres DAVY ROLL	71
Investigations en laboratoire	71
Interprétations des résultats	72
Conclusion	73
IV.2.3 Cas du cylindre INNSE CYLINDRI	74
Interprétations des résultats	76
Conclusion des essais.....	76
IV. 3 : Influence des chocs mécaniques.....	77
IV.3.1 Analyse des courbes d'extension	78
IV.3.2. solution proposée	79
IV.3.3-Chocs mécanique dû aux ébauches	81
IV.4 : Influence du cambrage et profile des cylindres	82
IV.4.1-Impact du cambrage.....	82
IV.4.2-Impact du profil des cylindres.....	84

Sommaires des figures, tableaux et planches :

- Partie bibliographique :

1- Tableau des figures :

figures	Nom de figures	pages
1	<i>Vue d'ensemble du complexe</i>	1
2	<i>Parc à brame</i>	2
3	<i>Vue de la rectifieuse</i>	2
4	<i>Four poussant</i>	3
5	<i>Dégrossisseur</i>	4
6	<i>Train Finisseur</i>	5
7	<i>Bobineuse</i>	5
8	<i>atelier de fusion chez Marichal Ketin-Belgique</i>	6
9	<i>Atelier de fonderie des cylindres Marichal Ketin-Belgique</i>	7
10	<i>Traitement thermique des cylindres .</i>	8
11	<i>Rectification .</i>	9
12	<i>Inspection ultrasonique.</i>	9
13	<i>Ecaillage en éclat</i>	32
14	<i>Eclat langue de chat</i>	33
15	<i>Eclat langue de chat</i>	34
16	<i>Eclat langue de chat</i>	34
17	<i>Interface couche externe/cœur</i>	35
18	<i>Interface couche externe /cœur</i>	36
19	<i>Ecaillage des extrémités du cylindre</i>	37
20	<i>Bande de crique à feu</i>	38
21	<i>Lignes de crique à feu</i>	39
22	<i>faïençage de crique à feu</i>	39
23	<i>la rupture par clivage à différentes échelles.</i>	43
24	<i>Types de rupture fragile transgranulaire (à clivage) : Rivières</i>	44
25	<i>Types de rupture fragile transgranulaire (à clivage) : Languettes</i>	44
26	<i>Propagation de la fissure par clivage</i>	45
27	<i>Aspect de rupture inter granulaire à l'échelle microscopique</i>	46
28	<i>rupture par fissuration ductile</i>	47
29	<i>exemple de rupture progressive</i>	48

2- tableaux :

tab	Nom de tableaux	pages
1	<i>composition chimique et caractéristique mécanique des cylindres en fonte utilisés</i>	17
2	<i>composition chimiques et caractéristique des différents types de cylindres en fonte au Cr et Ni</i>	20
3	<i>.composition chimique et caractéristiques mécaniques des cylindres en fonte à trempe indéfinie monobloc</i>	22

4		25
5	<i>compositions chimiques et caractéristiques mécaniques des cylindres en fonte à trempe indéfinie nodulaire</i>	27

3- tableaux des planches :

planches	Nom de planches	pages
1	<i>Structure des cylindres en fonte Bofors-Akers</i>	12
2	<i>structure des cylindres en fonte à trempe indéfinie Bofors-Akers</i>	15
3	<i>Structure des cylindres en fonte à trempe nette</i>	18
4	<i>Structure des cylindres en fonte au Cr et Ni</i>	21
5	<i>structures des cylindres en fonte à trempe indéfinie monoblocs</i>	23
6	<i>courbes de dureté des cylindres en fonte à trempe indéfinie moulés statiquement composite</i>	26
7	<i>cylindres en fonte haut chrome amélioré</i>	28
8	<i>cylindres en fonte à trempe indéfinie micro-alliée</i>	29
9	<i>cylindres en fonte haut chrome</i>	30

- Partie expérimentale :

1- tableau des figures :

fig	Nom de figures	pages
1	<i>Schéma représentatif des forces de cambrage avec toutes les forces dans la cage du laminoir</i>	50
2	<i>Consommation des cylindres Annaba par rapport au groupe T1 2011</i>	51
3	<i>photos de quelques cylindres écaillés</i>	53
4	<i>défaut de crique à feu sur cylindre de travail quarto</i>	57
5	<i>influence des additifs dans l'eau de refroidissement sur la dégradation des cylindres de travail</i>	58
6	<i>essai de fatigue thermique – corrosion sur quelques type de matériaux utilisés dans la fabrication des cylindres</i>	58
7	<i>ZONE1 M1 avec Indication Curseur de Mesure</i>	61
8	<i>ZONE1 M1 Points de Mesure Critiques</i>	61
9	<i>ZONE2 M1 avec Indication Curseur de Mesure</i>	62
10	<i>ZONE2 M2 avec Indication Curseur de Mesure</i>	62
11	<i>ZONE3 M1 avec Indication Curseur de Mesure</i>	63
12	<i>ZONE3 M2 avec Indication Curseur de Mesure</i>	63
13	<i>ZONE 4 M 1 avec Indication Curseur de Mesure</i>	64

14	<i>ZONE 4 M 2 avec Indication Curseur de Mesure</i>	64
15	<i>mesure de profile de température de la bande entrée train finisseur.</i>	65
16	<i>Photos d'écaillage cylindres MKB</i>	68
17	<i>analyse structurale d'un échantillon de cylindre MKB</i>	69
18	<i>structure (graphite) de cylindre MKB écaillé</i>	70
19	<i>structure sans attaque chimique d'un échantillon</i>	72
20	<i>structure avec attaque chimique d'un échantillon Davy roll écaillé</i>	73
21	<i>photographie du cylindre écaille INNSE Cylindri.</i>	74
22	<i>Microstructure de l'échantillon écaillé AVEC attaque chimique grossissement 150X et 300X.</i>	75
23	<i>Microstructure de l'échantillon INNSE écaillé sans attaque chimique. Grossissement x150</i>	75
24	<i>Courbes d'extension des cages 5 et 6 pendant le calibrage avec seddage</i>	78
25	<i>Pression de cambrage en queue de bobine avant modification</i>	80
26	<i>Pression de cambrage en queue de bobine après modification</i>	80
27	<i>Relation entre la consommation des cylindres et le taux d'ébauche dans les laminoirs à chaud</i>	81
28	<i>cambrage positif</i>	83
29	<i>Graphe de force de cambrage d'une bande laminée à 1,9 mm d'épaisseur</i>	84
30	<i>Paramètres de laminage de la bande N°1 avant écaillage du 04/12/2011</i>	89
31	<i>Paramètres de laminage de la bande N°2 avant écaillage du 04/12/2011</i>	90
32	<i>Paramètres de laminage de la bande pendent l'écaillage du 04/12/2011</i>	91
33	<i>Paramètres de laminage de la bande N°1 avant écaillage du 06/12/2011</i>	92
34	<i>Paramètres de laminage de la bande N°2 avant écaillage du 06/12/2011</i>	93
35	<i>Paramètres de laminage de la bande pendent l'écaillage du 06/12/2011</i>	94

2- tableaux :

tab

Nom de tableau

pages

1	<i>Cylindres écaillés en 2010 et T1 de 2011</i>	52
2	<i>Tableaux de mesure des Températures zone défournement</i>	60
3	<i>Tableaux de mesure des températures zone sortie réversible</i>	62
4	<i>Tableaux de mesure des températures zone entrée finisseuses</i>	63
5	<i>Tableaux de mesure des températures zone sortie finisseuses</i>	64
6	<i>Tableaux de mesure profile de température en fonction du temps de défournement</i>	65
7	<i>statistiques des cylindres écaillés du fournisseur MKB</i>	68
8	<i>analyse chimique d'un échantillon de cylindre MKB écaillé</i>	69
9	<i>analyse chimique d'un échantillon de cylindre DAVY ROLL écaillé</i>	71
10	<i>analyse chimique d'un échantillon de cylindre INNSE écaillé</i>	74
11	<i>gamme initiale des profils des cylindres</i>	85
12	<i>gamme des profils des cylindres (première modification)</i>	85
13	<i>gamme des profils des cylindres (deuxième modification)</i>	86
14	<i>gamme des profils des cylindres (troisième modification)</i>	86
15	<i>paramètres de laminage d'une bobine avec la gamme de profil initiale des cylindres</i>	87
16	<i>paramètres de laminage d'une bobine avec la gamme de profil modifiée des cylindres</i>	88

3- tableau des planches :

planche	Nom de planche	pages
1	<i>paramètres influant sur l'écaillage des cylindres dans le laminage à chaud</i>	54
2	<i>Paramètres influant sur température des cylindres dans le laminage à chaud</i>	55
3	<i>analyse par ultra-son d'un cylindre présentant des criques à feu</i>	57
4	<i>variation des forces de laminage et de cambrage d'une bande laminée à chaud</i>	66
5	<i>paramètres influant sur la qualité des cylindres dans le laminage à chaud</i>	67
6	<i>paramètres influant sur les chocs mécaniques dans le laminage à chaud</i>	77

7	<i>modification d'arrêt de la fonction de cambrage en queue de ba les cages 4, 5 et 6</i>	79
8	<i>paramètres influant sur les forces de cambrage des cylindres dans le laminage à chaud</i>	82
9	<i>Vue de calcul des forces de cambrage du train finisseur</i>	83

ملخص:

في وحدة الدرفلة يتعرض الدرفيل أثناء استعماله إلى تآكل ناجم عن احتكاكه المستمر مع صفائح الحديد ، هذا التآكل يمكن تداركه بعد تصحيحه و تنعيمه.
المشكلة الظاهرة في وحدة الدرفلة على الساخن لمركب الحديد و الصلب أرسلور ميتال الجزائر هو تحطم مفاجئ للدرفيل بالخصوص في القفص 5 و 6 الشيء الذي يرفع نسبة استهلاك هذا الأخير.
الهدف من هذا البحث يتمثل في احتواء كل مصادر هذا التحطم و تدارك الأخطاء.
طريقتنا تركز على الاختيار الأفضل لبعض المسببات الهامة لهذا التكرار، دراستها و طرح الحلول الواجب اتخاذها و مراقبتها للقضاء على هذه الظاهرة.
هذه المسببات التي تم اختيارها هي:

- حرارة الصفائح.
- نوعية الدرفيل.
- الصدمات الميكانيكية.
- قوة رد الانحناء.

درسنا تأثير كل هذه المسببات كل واحد على حدة و اقترحنا الحلول المناسبة التي تمت تجربتها و التأكد من نجاعتها.
النتائج المتحصل عليها كانت في غاية الأهمية أدت إلى تخفيض استهلاك الدرفيل.
نسبة استهلاك الدرفيل انقلت من نسبة 16 ملم/1000 طن إلى 6 ملم/1000 طن ، هذه النسبة تقارب إلى حد كبير معدل الاستهلاك في جميع وحدات الدرفلة لمجمع أرسلور ميتال.
على أساس إنتاج سنوي 500000 طن للوحدة الدرفلة، هذه الأخيرة يمكنها توفير حوالي 2 مليون دولار بفضل هذه البحوث.

Summary :

The mill roll undergoes normal wear linked to the roll-strip friction. This wear is generally offset by a correction.

The problem that appeared in hot rolling mill (ArcelorMittal-Algerie) is a sporadic break of work rolls of the finishing mill (stands 5 and 6). This induces an overconsumption of the latters.

The objective of this work is to establish the probable causes of this accidental break and to remedy it.

Our approach was to target appropriately certain rolling parameters and to study the influence of their adjustment and control of the occurrence of these defects. The selected parameters are:

- The strip temperature.
- The roll quality.
- The mechanical shocks.
- The bending.

We analyzed the impact of each factor and have proposed solutions and tested their effectiveness.

The results are a significant improvement of the studied rolls consumption.

The roll consumption ratio has increased from 16mm/kt to 6mm /kt, which approaches the average, roll consumption of the international group ARCELORMITTAL. Based on a projected annual output of 500.000 tons, The HSM-ANNABA would hope to generate additional income of more than \$ 2 million.

Résumé :

Le cylindre du laminoir subit une usure normale liée au frottement cylindre-bande. Cette usure est généralement compensée par une rectification.

Le problème apparu au laminoir à chaud (ArcelorMittal-Algérie) est un écaillage sporadique des cylindres de travail du train finisseur (cages 5 et 6). Ce qui induit une surconsommation de ces derniers.

L'objectif de ce travail consiste à fixer les causes probables de cet écaillage accidentel et à y remédier.

Notre démarche a consisté à cibler judicieusement certains paramètres de laminage et d'étudier l'influence de leur ajustement et leur contrôle sur l'apparition de ces défauts. Les paramètres choisis étant :

- La température de la bande.
- La qualité du cylindre.
- Les chocs mécaniques.
- Le cambrage.

Nous avons analysé l'impact de chacun de ces facteurs et nous avons proposé des solutions et testé leurs efficacités.

Les résultats obtenus sont une amélioration très importante de la consommation des cylindres étudiés.

Le ratio de consommation des cylindres est ainsi passé de 16mm/kt à 6mm/kt .Ce qui correspond à la moyenne de consommation des cylindres du groupe international ARCELORMITTAL. Sur la base d'une production annuelle projetée de 500.000 tonnes, le LAC-ANNABA pourra espérer engendrer un revenu supplémentaire de plus de 2 millions de dollars.

INTRODUCTION

L'arrêt d'un laminoir à chaud pour remplacer un cylindre de travail produit un manque à gagner, en plus des coûts exorbitants du cylindre à changer. Le remplacement d'un cylindre intervient dès que la qualité de la surface de la bande (bobine) n'est plus satisfaisante. Or la qualité de surface de la bande est le miroir de celle du cylindre. L'augmentation de la productivité du laminoir passe donc par l'augmentation de la durée de vie des cylindres.

Le cylindre du laminoir subit une usure normale liée au frottement cylindre-bande. Cette usure est généralement compensée par une rectification.

Le problème apparu au laminoir à chaud (ArcelorMittal-Algerie) est un écaillage sporadique des cylindres de travail du train finisseur (cages 5 et 6). Ce qui induit une surconsommation de ces derniers.

L'objectif de ce travail consiste à fixer les causes probables de cet écaillage accidentel et à y remédier.

Ce mémoire est composé de deux grandes parties :

1-La première partie consiste en une étude bibliographique qui comprend cinq chapitres :

-Une description du laminoir à chaud (LAC) du complexe ARCELORMITTAL situé à ELHADJAR-ANNABA.

-Une présentation des différents modes d'élaboration des cylindres de travail du train finisseur.

-Les différents types de cylindres utilisés à travers le monde et les facteurs dictant leur choix sont présentés dans ce chapitre.

-Dans ce chapitre sont présentés les différents défauts apparaissant sur les cylindres.

-Ce chapitre comprend une présentation sommaire des différents modes de rupture existants.

2- La seconde partie correspond à l'étude expérimentale où est présentée l'influence de différents paramètres sur l'apparition du défaut d'écaillage. Ces paramètres sont :

- Etude de l'impact de la température de la bande.
- Influence de la qualité du cylindre.
- Influence des chocs mécaniques : de martelage (choc entre jeux de cylindres de même cage) et d'ébauches ou avaries (choc bande bourrée contre cylindre)
- Influence du cambrage.

Partie

bibliographique

Chapitre I : Description du laminoir à chaud Arcelor- Mittal-Algerie

I.1 - Complexe sidérurgique d'Arcelor -Mittal- Algerie :

Le complexe est situé sur la daïra d'Ehadjar , relevant de la wilaya de Annaba .

La figure 1 suivante présente une vue d'ensemble de ce complexe.

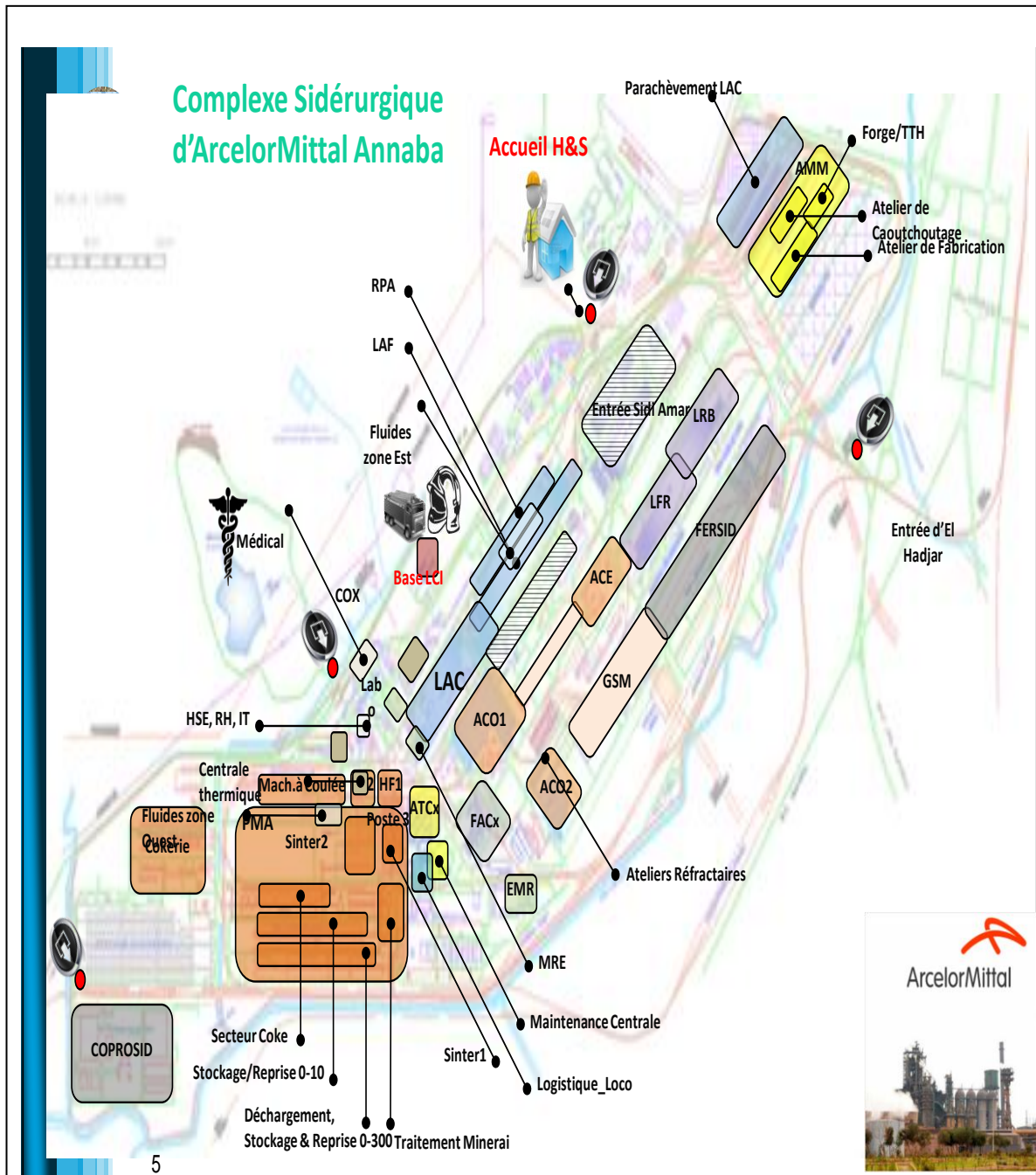


Fig. 1. Vue d'ensemble du complexe

I.2 - Introduction :

La division laminoir à chaud (LAC), fait partie de la direction des produits plats, qui comprend aussi le laminoir à froid (LAF) et le revêtement et parachèvement (RPA).

Le laminoir à chaud est composé de 04 secteurs :

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

I.3 - Parc à brames :

Le PAB s'occupe de la réception des brames, stockages et l'alimentation du train à chaud. La figure 2 montre une vue de ce parc.



Fig.2 .Parc à brame

I.4-Atelier de rectification de cylindres:

L'ARC est un atelier qui alimente le train à chaud en matière de cylindres d'appuis et de travail en cages quarto et finisseuses, pinch-roll bobineuses et couteaux cisailles tout en leurs assurant une bonne préparation (rectification et révision des empoises). La figure 3 montre une vue de la rectifieuse.



Fig.3. Vue de la rectifieuse

I.5 - Fluides :

Le secteur fluide alimente le laminoir à chaud en matière d'eau industrielle et potable, Gaz naturel, Oxygène, Azote et Vapeur.

I.6 - Train à chaud (TAC) :

Le laminoir à bandes à chaud modernisé en 2010 est capable de laminier les aciers ordinaires et quelques aciers spéciaux tels que BS1-2 destinés pour l'emboutissage ou X48-52-60 destinés pour la fabrication des pipe-lines en épaisseur allant de 1.5 mm jusqu' à 15 mm et des largeurs de 650 mm à 1350 mm.

Le train à chaud est composé de quatre zones :

1/ zone Fours poussant, 2/ Zone Quarto, 3/ Zone Finisseuses, 4/ Zone Bobineuses.

I.6.1 - Zone Four Poussant :

Dans deux fours poussant de capacité de 240 t/h, les brames sont chauffées à une température supérieure à 1250 °c pour assurer :

- Un adoucissement de l'acier en vue de son laminage (diminution de la résistance à la déformation).
- Une structure homogène (grains austénitiques et composition chimique homogène).
- Une dissolution des nitrures et des carbures.



La figure 4 montre une vue du four poussant.

Fig.4. Four poussant

Le chauffage des brames dans le four est réparti dans 07 zones différentes :
Zone préchauffage supérieur, Zone préchauffage inférieur, Zone de chauffage supérieur,
Zone de chauffage inférieur, Zone d'égalisation, Zone de maintien.

I.6.2 - Zone Quarto réversible :

❖ *Laveuse à brames :*

Destinée à éliminer la couche de calamine primaire à l'aide d'un jet d'eau de pression de 140 bars, composé de 02 rampes supérieurs et 02 rampes inférieurs.

❖ *Brise oxyde :*

Sert à briser mécaniquement la calamine et permet ainsi de réduire la largeur (≈50mm maximum) et l'épaisseur (≈12%) des brames en une seule passe . Elle est composée de 02 cages (verticale et horizontale) et d'une décalamineuse (jet d'eau de 140 bars) qui sert à écarter la calamine brisée.

❖ *Dégrossisseurs :*

Le dégrossisseur réversible sert à réduire l'épaisseur et la mise en largeur de la brame pour en faire une ébauche d'environ 25-40mm, qui sera ensuite laminé dans le train finisseur .Une vue du dégrossisseur est présentée par la figure 5.

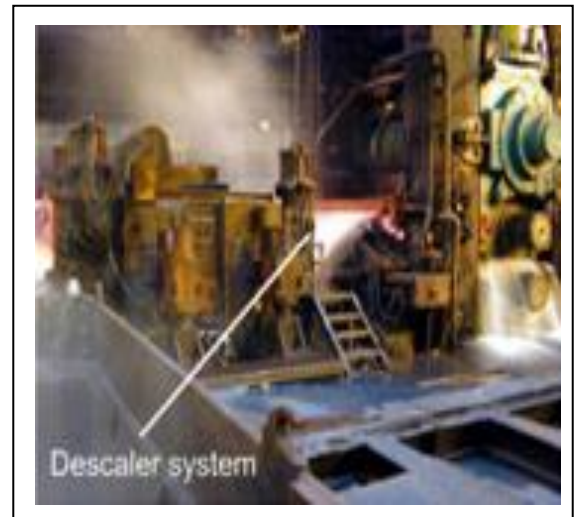


Fig.5. Dégrossisseur

I.6.3 - Zone Finisseuse : Elle est composée de :

❖ *Cisaille volante :* Environ à 6m en amont du train finisseur se trouve une cisaille à tambour rotatifs et à lames courbes en alliage spécial, pour couper les élongations en forme de queue de poisson de la tête et de la queue de l'ébauche. Les systèmes d'aboutage automatisés sont capables de détecter la forme à ébouter de façon à limiter les pertes en matériau.

❖ *Décalamineuse secondaire:* le décalaminage sert à enlever la couche d'oxyde qui se forme sur l'acier. La décalamineuse travaille avec deux rampes de gicleurs de chaque côté, projetant l'eau à une pression de l'ordre de 140 bars pour une bonne amélioration de la surface de l'ébauche et l'augmentation de la durée de vie des cylindres de travail.

- ❖ *Train finisseur* : c'est un train à six cages quarto pour réduire l'épaisseur jusqu'à 1.5-15 mm. Il est équipé des systèmes HGC, AGC et cambrage et doté de jauges de largeur, épaisseur, profil et planéité. La figure 6 montre une vue du train finisseur.



Fig.6.Train Finisseur

**I .6 .4
Bobineuse :**
La dernière étape

dans le procédé de laminage à chaud est la mise en bobine. La bande est guidée par des guides latéraux et par un rouleau pinceur vers le mandrin de la bobineuse, où elle est prise par les rouleaux enveloppeurs et appliquée légèrement sur le mandrin. L'installation est composée de 03 bobineuses dont le troisième est à réglage et contrôle totalement hydraulique.

Une vue de la bobineuse est présentée par la figure 7.



Fig.7. Bobineuse

Chapitre II : Mode d'élaboration des cylindres.

La fabrication des cylindres nécessite la combinaison de nombreuses méthodes et expériences hautement spécialisées. Il existe très peu d'éléments utilisés dans l'industrie et en construction mécanique nécessitant la concentration sur une même pièce de tant de valeurs et de perfection. Un gros cylindre pesant cinquante tonnes ou plus nécessitera environ huit à dix semaines de production effective impliquant l'emploi de machines et équipements lourds et coûteux. Un seul léger défaut comme par exemple une crique ou une porosité interne, d'où résultera son rebut, représente une très grosse perte pour le fondeur de cylindres ce qui explique les soins et les contrôles très spéciaux apportés à tous les stades de la fabrication.

Les cylindres de laminage sont généralement obtenus par le procédé de fonderie :

II .1 – fusion :

Les matériaux utilisés comprennent la fonte brute, divers éléments d'alliages et des matériaux recyclés soigneusement triés. Les compositions des charges varient en fonction des

qualités de cylindre et sont fondues selon les différents paramètres dans les fours à induction électriques. Les caractéristiques métallurgiques précises sont indiquées dans les fiches techniques ^[1]. La figure 8 présente une vue de l'atelier de fusion du constructeur de cylindres Marichal Ketin en Belgique.



Fig.8.atelier de fusion chez Marichal Ketin-Belgique

II .2 – moulage :

Deux méthodes fondamentales sont utilisées : le moulage en coquille et le moulage au sable. Chacune de ces méthodes présente une certaine gamme d'applications. Une vue des ateliers de fonderie du constructeur Marechal Ketin en Belgique est présentée par la figure 9.



Fig.9. Atelier de fonderie des cylindres Marichal Ketin-Belgique

La mesure de température à l'état liquide et du processus de solidification se fait avant chaque coulée.²

I.3 – traitement thermique :

L'objectif recherché par ce traitement thermique est :

- Obtenir une microstructure et une dureté désirée avec une austénité résiduelle inférieure à 5% .
- Réduire les contraintes résiduelles à un niveau acceptable .

L'allure du traitement thermique généralement utilisé est présentée par la figure 10 .

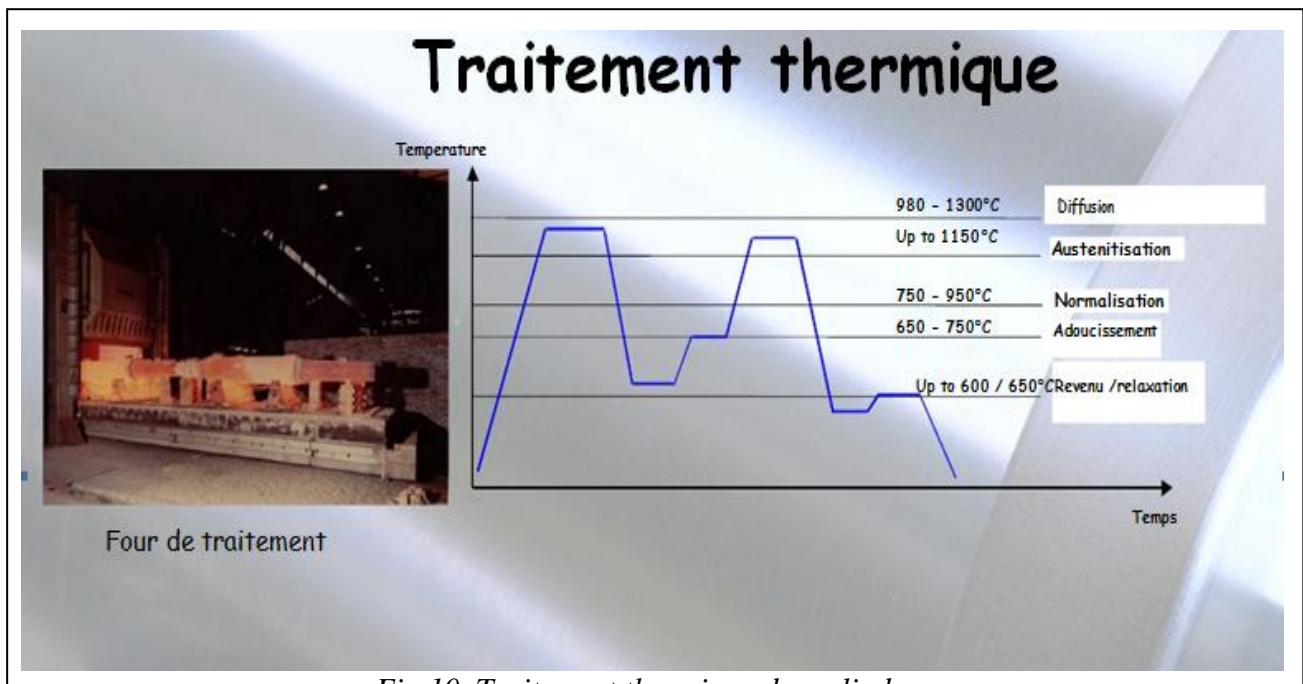


Fig.10. Traitement thermique des cylindres .

II.4 – Rectification :

La finition des cylindres est effectuée sur des machines-outils à commande numérique. L'extrême précision de l'exécution garantit au client une qualité exceptionnelle. La figure 12 présente une vue des trois opérations entrant dans la rectification :

- Rectification rugueuse.
- Contrôle intermédiaire.
- Rectification finale.

¹ Marichal Ketin Agora Liège BELGIEUM 2011

Machines de finition



Contrôles intermédiaires



Rectification finale

Fig.11. Rectification .

II .5 – Contrôle et inspection :

On utilise à cet effet un contrôle aux ultrasons . L'objectif étant :

- L'évaluation de la liaison entre cœur et couche de travail.
- L'évaluation des microfissures dans la couche de travail.
- La détection des porosités et inclusions dans la couche de travail.
- La mesure de la profondeur de la couche de travail.

Une vue de l'inspection ultrasonique est présentée par la figure 13.

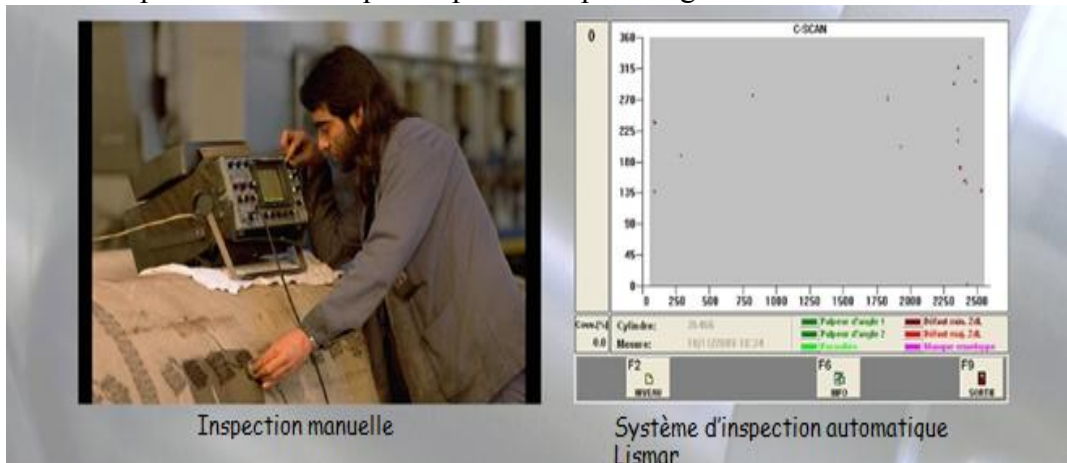


Fig .12.
Inspection ultrasonique.

Chapitre III : types des cylindres et facteurs dictant le choix des cylindres.

III .1 – types de cylindres.

III .1 .1 – Définition.

Les cylindres de laminage sont les outils essentiels de ce procédé de mise en forme. Ils sont soumis à de fortes sollicitations cycliques tant mécaniques que thermiques. L'optimisation de leur durée de vie est donc particulièrement cruciale car leur détérioration influe de manière pénalisante sur la qualité de surface des produits ainsi que sur les arrêts des

installations industrielles. Dans un souci multiple d'augmenter la durabilité des outils, la qualité des produits et de réduire les coûts, il est nécessaire de contribuer à la maîtrise de ces dégradations et en particulier à celle de l'usure.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes qualités des cylindres de travail. Ils sont différents par leurs compositions chimiques, par leur procédé de fabrication et le type de laminage où ils sont utilisés.

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

- > Un moulage statique, dans le cas d'un seul matériau (une seule coulée).
- > Moulage par centrifugation, avec deux coulées.

Du dégrossisseur au train finisseur et selon le mode d'utilisation nous pouvons trouver les qualités suivantes :

- Les cylindres en acier haut chrome
- Les cylindres en acier semi rapides
- Les cylindres en fonte à trempe indéfinie (ICDP)
- Les cylindres en fonte haut chrome (13 % Cr)
- Les cylindres en fonte haut chrome (18 % Cr)

Nous présentons l'annexe 2 , les différentes caractéristiques de ces qualités de cylindres fournies par l'un des fournisseurs des cylindres à ARCELORMITTAL ANNABA^{1 2} .

III .1 .2 – cylindres moulés :

Les cylindres moulés peuvent se diviser en deux groupes principaux : les cylindres en fonte et les cylindres en acier . La différence entre ces deux groupes réside essentiellement dans la teneur en carbone, mais les définitions varient d'un pays à l'autre. Pour des raisons pratiques, le constructeur Bofors-Akers applique la règle suivante :

- Fonte : contenant plus de 2.5 % C.
- Acier : contenant moins de 2.5 % C.

La grande majorité des cylindres moulés Bofors-Akers sont réalisés en fonte. Ce groupe peut être divisé à son tour en sous groupes de différentes manières. Les fontes conventionnelles, que l'on emploie pour d'autres usages que pour la fabrication des cylindres, peuvent se diviser comme suit :

- Fonte grise : le carbone se présente sous forme de graphite (figure 2.2 .1 de la planche 1).
- Fonte blanche : le carbone se présente sous forme de carbures (cémentite). (figure 2.2 .2 de la planche 1).

Ces deux types de fonte possèdent des propriétés physiques et mécaniques très différentes l'une de l'autre et ces propriétés sont d'une grande importance : la fonte grise est plus douce et plus ductile, tandis que la fonte blanche est plus dure et plus fragile.

² Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904

Dans le cas des fontes employées pour la fabrication de cylindres, ce sont la composition du métal et la vitesse de refroidissement qui déterminent le type de microstructure obtenu.^[2]

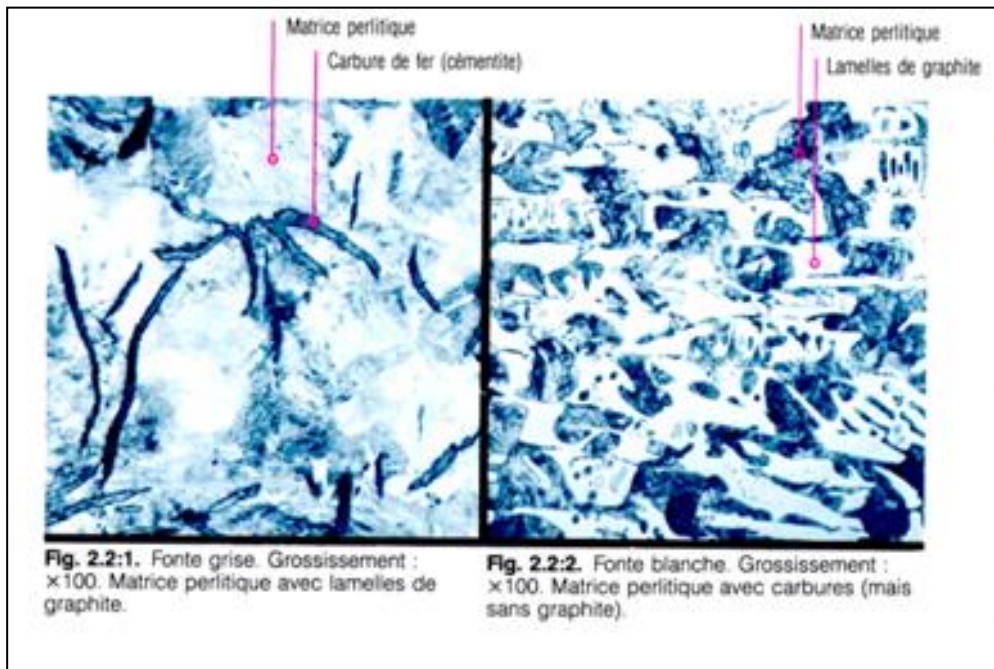


Planche 1. Structure des cylindres en fonte Bofors-Akers

❖ Nuances de cylindres moulés :

Les nuances de cylindres moulés Bofors-Akers ont une appellation systématique comptant jusqu'à six symboles. Le tableau ci-dessous décrit brièvement ce système. L'application de nuance consiste en un symbole provenant de chacune des colonnes appropriées de tableau.

1	2	3	4	5	6
-	CC-	-	-	00	-
H-	Cr-	Mo-	C		A
	Cr-	P-	R		B
	Ni-	Ac-			C
	IC-	Ni-			D
	SG-	P-			E
	SG-	Mo-			L
	IC-	P-			
	CS-	Cr-			
	SB-				
	GS-				

Colonne 1 : traitement thermique.

- **Pas de symbole** : le cylindre n'a pas subi de traitement thermique.
- **H-** = le cylindre a été traité thermiquement.

Colonne 2 : type de métal

² Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904

- **CC-** = fonte à trempe nette (clear chill).
- **Cr-** = fonte à haute teneur en chrome.
- **Cr-Ni** = fonte au nickel à haute teneur en chrome.
- **IC-** = fonte à trempe indéfinie (indefinite chill).
- **SG-** = fonte nodulaire (fonte à graphite sphéroïdal).
- **SG-IC-** = fonte à trempe indéfinie à cœur nodulaire.
- **CS-** = Acier coulé.
- **SB-** = Acier sauvage (steel base).
- **GS-** = Acier graphitique.

Colonne 3: caractéristiques spéciales de structures ou d'alliages.

- **Pas de symbole** = pas de caractéristiques spéciales.
- **P-** = structure perlitique.
- **Ac-** = structure bainitique (aciculaire).
- **Ni-** = fonte alliée au nickel.
- **Mo-** = fonte alliée au molybdène.
- **P-Mo** = fonte perlitique alliée au molybdène.
- **P-Cr-** = fonte perlitique alliée au chrome.

Colonne 4 : méthode de fabrication.

- **Pas de symbole** = coulée monobloc.
- **C** = Coulée composite (compound).
- **R** = cylindre coulé par centrifugation.

Colonne 5 : Dureté.

- **00 (nombre à 2 chiffres)** = dureté en unité Shore C.

Colonne 6 : teneur en carbone - caractéristiques spéciales.

- **Pas de symbole** = pas de caractéristiques spéciales.
- **A-E** : désigne la teneur en carbone des cylindres CS et SB.
- **L** : désigne une teneur en carbone extra-basse pour les cylindres SG-P.

Exemple d'application de nuances de cylindres en fonte :

- **H-SG-P-Mo-45** : fonte nodulaire perlitique alliée au molybdène, coulée monobloc et traitée thermiquement pour une dureté superficielle de 45 Shore C.
- **H-IC-R80** : fonte à trempe indéfinie, coulée par centrifugation, traitée thermiquement et présentant une dureté superficielle de 80 Shore C. ^[2]

III .1 .3 – cylindre en fonte :

Les fontes utilisées dans la fabrication des cylindres (concerne le métal de la couche superficielle) peuvent se diviser selon les sous-groupes suivants :

- Fonte sans graphite :
 - Nuance en fonte coulée en coquille (trempe nette) avec moins de 2% de Cr, Bofors-Akers (fig . 2.4 .1 de la planche 2).

² Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904

- Nuance en fonte à haute teneur en chrome avec plus de 10% de Cr, Bofors-Akers Cr (fig . 2.4 .2 de la planche 2).

Le domaine de fonte avec graphite peut se diviser, à son tour, selon que l'on a :

- Fonte avec graphite en lamelles :
 - Nuance en fonte à trempe indéfinie, Bofors-Akers IC (fig . 2.4 .3 de la planche 2).
- Fonte avec graphite sphéroïdal : Nuances en fonte nodulaire, Bofors-Akers SG (fig . 2.4 .4 de la planche 2). Les nuances en fonte nodulaire peuvent à leur tour se diviser en sous-groupes.
 - Nuance en fonte à trempe indéfinie, Bofors-Akers IC (fig : 2.4 :3de la planche 2).
- Fonte avec graphite sphéroïdal : Nuances en fonte nodulaire, Bofors-Akers SG (fig : 2.4 .4 de la planche 2). Les nuances en fonte nodulaire peuvent à leur tour se diviser en sous-groupes.

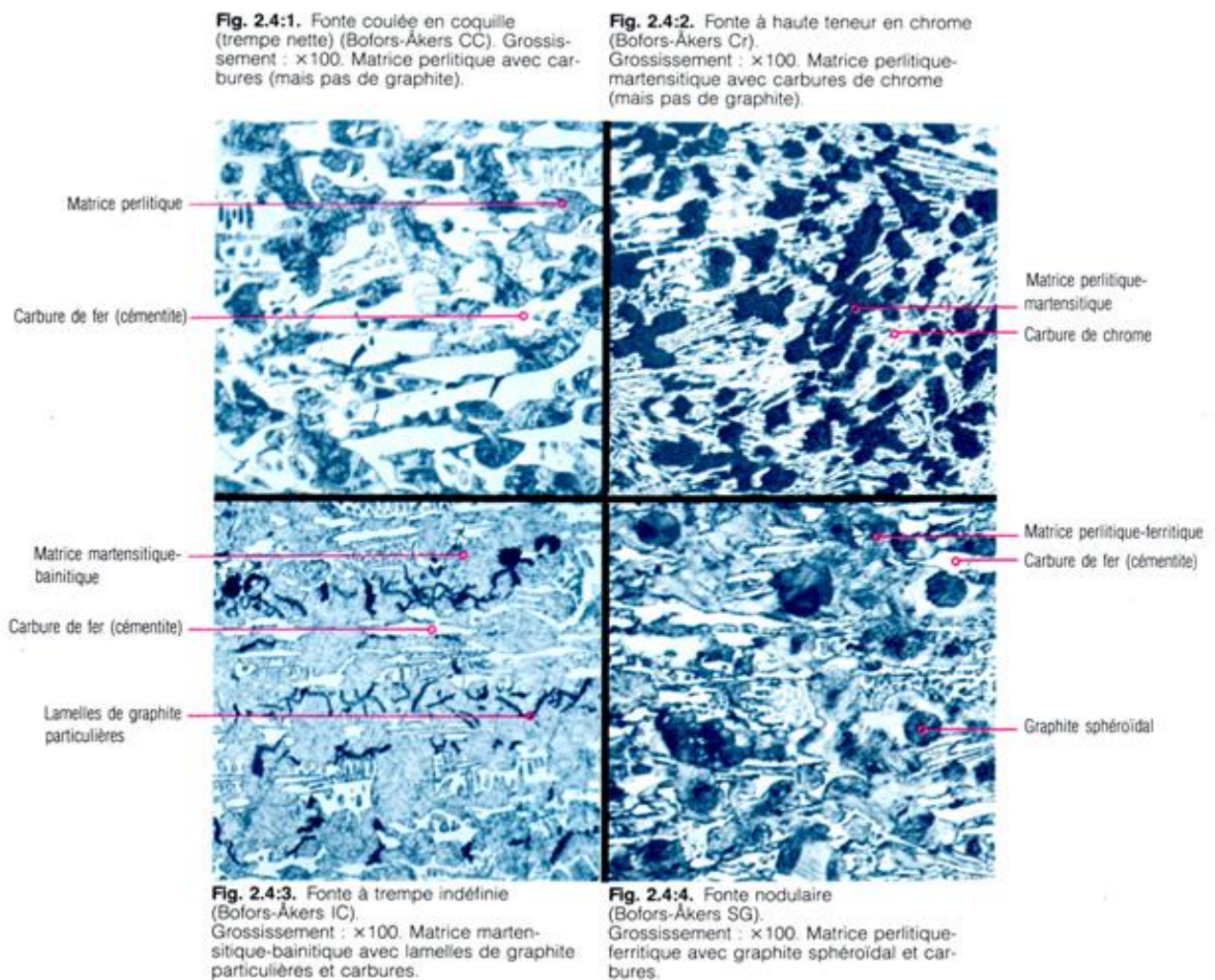


Planche 2. structure des cylindres en fonte à trempe indéfinie Bofors-Akers

III .1 .4 - Cylindres en fonte à trempe nette :

Les cylindres en fonte à trempe nette ont une couche superficielle exempte en graphite. On les emploie essentiellement pour le laminage à chaud des barres, des petits profilés et des tubes.

Le nom de ce type de cylindre est basé sur le fait que les cylindres ne contiennent pas de graphite dans la couche superficielle. Les propriétés de la couche superficielle (que l'on appelle « trempe ») sont influencées dans une large mesure par la teneur élevée en carbures (environ 50%). Les cylindres de ce type peuvent être coulés statiquement composites ou par centrifugation (pour les cylindres de calandre, on utilise une nuance monobloc CC-Ni. Celle-ci est décrite de manière plus approfondie dans le catalogue Bofors-Akers « Cylindres pour l'industrie du papier ». Le cœur est constitué de fonte grise avec graphite lamellaire dans une matrice perlitique.^[2]

- ❖ **Les nuances CC-C** : sont des variétés faiblement alliées de la fonte à cylindres employée depuis le 18^e siècle et elles ont une structure constituée de carbures dans une matrice perlitique.
- ❖ **Les nuances CC-Ni-C, CC-Ni-R et CC-Mo-C** (figures 4.3.2 et 4.3.4 de la planche 3) : contiennent une forte proportion d'éléments formateurs de carbures (C, Cr, Mo). La structure contient un peu plus de carbures et la matrice est plus fine du fait des teneurs supérieures en nickel et en molybdène. Les cylindres de ce type sont coulés statiquement composites ou réalisés par centrifugation.
- ❖ **Les nuances H-CC-Ni- C et H-CC-Ni-R** (figure 4.3.3 et 4.3.5 de la planche 3) : possèdent une teneur encore plus élevée en chrome et nickel favorisant la formation d'une matrice bainitique-martensitique (dans les nuances les plus douces) ou d'une matrice totalement martensitique (dans les nuances les plus dures). Les cylindres de ce type sont coulés statiquement composites ou réalisés par centrifugation.

Les cylindres en fonte trempée à trempe nette présentent une meilleure résistance à l'usure qui augmente avec la dureté. Cependant l'augmentation de la dureté accroît également les risques de fissurations thermiques. Les nuances les plus dures sont plus onéreuses du fait qu'elles contiennent davantage d'alliages et impliquent des frais d'usinage plus élevés. Certaines limitations affectent les profondeurs de trempe maximales qu'il est possible d'obtenir dans les cylindres composites, notamment dans le cas des nuances les plus dures.^[2]

Le tableau 1 présente les compositions chimiques et les caractéristiques mécaniques de différentes nuances de fontes utilisées.

² Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904

Nuance de cylindres	Gamme de diamètres	Profondeur de trempe max.	Composition chimique de la couche superficielle(%)				
			mm	C	Si	Mn	P	S
CC-Ni-R73	2	50	3	0	0	1	1
	6	50	,2	,:	,:	,6	,2
	0-	50	-	-	-	-	-
	6		3	0	0	2	1
	0		,	,:	,:	,	,
	2		6	,:	,:	4	6
	6		3	0	0	1	2
	0-		,	,:	,:	,	,
	4		4	,:	,:	6	0
	5		-	-	-	-	-
CC-Ni-R80	0		3	0	0	2	4
	2		,	,:	,:	,	,
	6		7	,:	,:	4	0
	0-		3	0	0	1	2
	4		,	,:	,:	,	,
	5		4	,:	,:	7	5
	0		-	-	-	-	-
			3	0	0	2	5
			,	,:	,:	,	,
			7	,:	,:	5	0
CC-C63	2	40	3	0	0	0	0
	5	40	,	,:	,:	,	,
	0-	40	2	,:	,:	3	3
	8		-	-	-	-	-
	0		3	0	0	0	0
	0		,	,:	,:	,	,
	2		6	0	,:	5	6
	5		3	0	0	0	0
	0-		,	,:	,:	,	,
	8		4	,:	,:	4	3
CC-Mo-C68	0		-	-	-	-	-
	0		3	0	0	0	0
	2		,	,:	,:	,	,
	5		7	,:	,:	6	6
	0-		3	0	0	0	0
	5		,	,:	,:	,	,
	5		4	,:	,:	2	3
	0		-	-	-	-	-
			3	0	0	0	0
			,	,:	,:	,	,
CC-	2	30	3	0	0	0	1
			7	,:	,:	5	6

Ni-	5	25	,	:	:	,	,	
C73	0-	25	5	:	:	7	2	
H-	5		-	.	.	-	-	
CC-	5		3	(	(	1	1
Ni-	0		,	:	:	,	,	
C80	2		9	:	:	4	6	
H-	5		3	(	(	0	3
CC-	0-		,	:	:	,	,	
Ni-	4		2	:	:	8	0	
C85	5		-	.	.	-	-	
	0		3	(	(	1	5
	2		,	:	:	,	,	
	5		7	:	:	6	0	
	0-		3	(	(	0	3
	4		,	:	:	,	,	
	5		2	:	:	8	0	
	0		-	.	.	-	-	
			3	(	(	1	5
			,	:	:	,	,	
			7	:	:	6	0	
Dureté de la couche superficielle			Propriétés mécanique du cœur					
			Résistance à la traction	Résistance à la flexion	flèche	Résistance à la torsion		
Shore C	brine Il		N/mm ²	N/mm ²	m	N/mm ²		
71-75	530-		175-215	345-	~1,	~315		
78-82	570		175-215	390	5	~315		
83-87	610-		175-215	345-	~1,	~315		
	(650)			390	5			
	(660)			345-	~1,			
	-			390	5			
	(700)							
61-65	430-		175-215	345-	~1,	~315		
66-70	470		175-215	390	5	~315		
66-70	480-		175-215	345-	~1,	~315		
	520			390	5			
	480-			345-	~1,			
	520			390	5			
71-75	530-		175-215	345-	~1,	~315		
78-82	570		175-215	390	5	~315		
83-87	610-		175-215	345-	~1,	~315		
	(650)			390	5			
	(660)			345-	~1,			
	-			390	5			
	(700)							

Tableau 1. composition chimique et caractéristique mécanique des cylindres en fonte utilisés

Fig. 4.3:1. Exemples de courbes typiques de dureté.

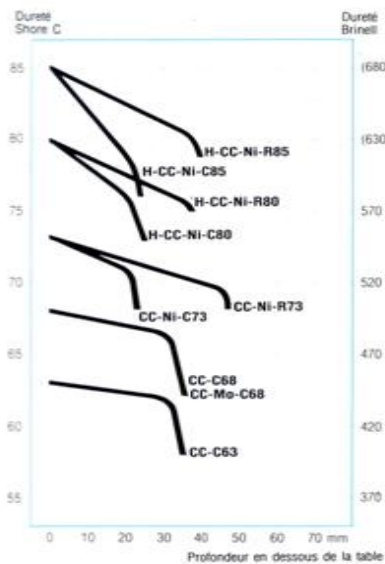


Fig. 4.3:2. CC-Ni-R73. Grossissement : x50. Matrice perlitique avec carbures.

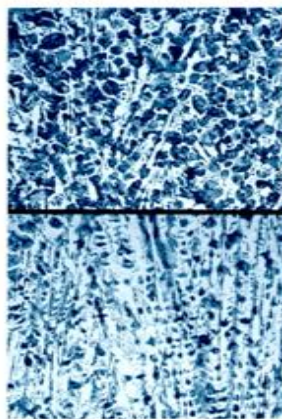


Fig. 4.3:4. CC-C68. Grossissement : x50. Matrice perlitique avec carbures.

Fig 4.3:3. H-CC-Ni-R85. Grossissement : x50. Matrice bainitique-martensitique avec carbures et un peu de perlite.

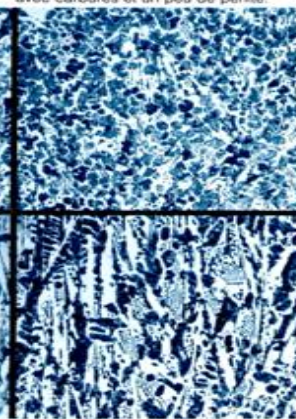


Fig. 4.3:5. H-CC-Ni-C80. Grossissement : x50. Matrice martensitique-bainitique avec carbures.

Planche 3. Structure des cylindres en fonte à trempe nette

III .1 .5 – cylindres en fonte à haute teneur en chrome :

Les cylindres en fonte à haute teneur en chrome ont une couche superficielle en fonte possédant une teneur en chrome élevée et complètement exempte de graphite. Ils sont employés essentiellement pour le laminage à chaud et à froid de produits plats et le laminage à chaud des barres et de petits profilés.

Ce type de cylindre doit son nom au fait que le teneur en chrome est élevée : elle se situe, en effet, entre 12 et 22%. Les propriétés de la couche superficielle sont influencées à la fois par la teneur importante en carbure de chrome (environ 30%) et par les propriétés de la matrice. Les cylindres de ce type mesurant moins de 1000 mm de diamètre sont coulés par centrifugation, tandis que les cylindres plus grands sont coulés statiquement composites. Le cœur consiste en une fonte grise spéciale avec lamelles de graphite dans une matrice perlitique. On peut aussi obtenir des cylindres en fonte à haute teneur en chrome coulés par centrifugation avec cœur en fonte nodulaire perlitique.

La structure consiste en carbures de chrome très durs (mais sans graphite libre) dans une matrice qui varie entre la perlite globulaire pour les nuances les plus douces et la martensite revenue pour les nuances les plus dures. Les carbures ont un grain fin et sont répartis uniformément dans la matrice : ils ont une dureté de l'ordre de 1650-2200 Vickers (les cylindres en fonte à haute teneur en chrome sont souvent employés dans les applications où l'on utilise, soit des cylindres en fonte en trempe indéfinie, soit des cylindres en acier forgé. Il convient de noter que la fonte à trempe indéfinie contient un carbure de fer (cémentite) qui est plus doux (1400 Vickers) et que l'acier forgé ne contient qu'un petit pourcentage de carbures. Ceci donne aux fontes à haute teneur en chrome une excellente résistance à l'usure par abrasion. Les propriétés de la matrice sont aussi importantes. Sa résistance à l'usure doit être suffisante pour empêcher les carbures de se détacher et elle doit résister aux marquages durant le laminage.

Les cylindres n'ont pas de chute de dureté. [2]

III .1 .6 - Cylindres en fonte à hautes teneurs en chrome et nickel :

Les cylindres en fonte à hautes teneurs en chrome et nickel ont une couche superficielle de fonte graphitique contenant un pourcentage moyennement élevé de chrome et nickel. Ces cylindres sont employés essentiellement pour le laminage à chaud des produits plats.

Les propriétés de la couche superficielle sont influencées à la fois par la forte teneur en carbure de chrome, par la teneur en graphite et par les propriétés de la matrice. Les

² Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904

cylindres sont coulés par centrifugation. Le cœur est constitué de fonte grise spéciale avec lamelles de graphite dans une matrice perlitique.^[2]

La structure consiste en carbures de chrome très durs et en graphite dans une matrice de martensite revenue. Par ailleurs, ce que l'on a indiqué ci-dessus concernant les cylindres en fonte à haute teneur en chrome et également applicable dans ce cas.

Les cylindres n'ont pas de chute en dureté. Le tableau 2 présente les compositions chimiques et les propriétés mécaniques de nuances de cylindres. La planche 4 présente des exemples de microstructures de ces nuances de fontes.

Nuance de cylindres	Gamme de diamètres mm	Profondeur de trempe max. mm	Composition chimique de la couche superficielle. %					
			C	Si	Mn	Cr	N	Mo
H-Cr-R60	26	70	2,0	0,0	0,0	1,1	1,1	0,0
H-Cr-R65	0-1	70	6,1	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
H-Cr-R70	0-0		3,0	0,0	0,0	8,1	2,0	1,1
	0-2		2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
	6-0		0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
	1-0		6,0	0,0	0,0	8,1	0,0	2,0
	0-0		0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
	0-0		3,0	0,0	0,0	6,1	2,0	1,1
	0-2		0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	5,0
	6-0		2,0	0,0	0,0	2,0	1,1	0,0
	0-1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
	0-0		6,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
	0-0		0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,0
	0-0		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

					9			
			0	0	5	0	0	
			2	2	0	5	0	
			5	0	5	0	2	
			-	-	-	-	-	
			3	3	1	7	1	
			5	0	5	5	0	
H-Cr-Ni-R85	260-850	70	2	2	0	6-9	5,0-7,5	0.2-1.0
			5	0	5			
			-	-	-			
			3	3	1			
			5	0	5			

Dureté de la couche superficielle			Propriétés mécanique du cœur	
Shore C	brine Il		Résistance à la traction N/mm ²	Résistance à la flexion N/mm ²
58-62	(400)		250-350	450-
63-67	-440		250-350	550
68-72	450-		250-350	450-
	490			550
	500-			450-
	540			550
	71-75	530-	250-350	450-
73-77	570	250-350	550	
78-82	550-		250-350	450-
	600			550
	60-			450-
83-87	10-			550
	(650)			
	(660)	250-350	450-	
	88-92	-	250-350	550
58-62	(690)	250-350	450-	
	(700)			550
	-			450-
63-67	(730)			550
	(400)			
	-440			
	63-67	450-	250-350	450-
	73-77	490	250-350	550
78-82	550-	250-350	450-	
	600			550
	610-			450-
	(650)			550
83-87	(660)-(690)	250-350	450-550	

Tableau 2. composition chimiques et caractéristique des différents types de cylindres en fonte au Cr et Ni

Fig. 4.5:1. Exemples de courbes typiques de dureté.

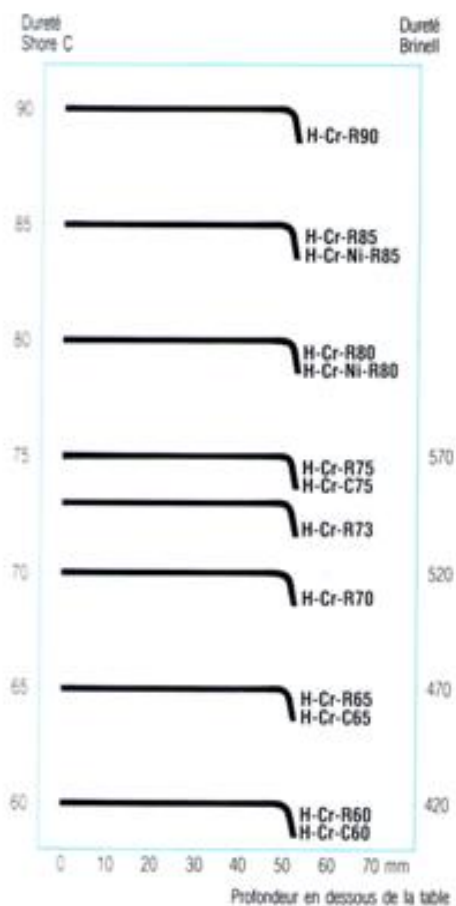


Planche 4. Structure des

III .1 .7 - Cylindres en fonte à trempe indéfinie monoblocs :

Les cylindres en fonte à trempe indéfinie ont une couche superficielle avec du graphite en lamelles. Ce type de cylindre est employé essentiellement pour le laminage à chaud des petits profilés.

L'appellation de ce type de cylindre est basée sur le fait que la profondeur de trempe est plus difficile à définir. Le métal de surface est en quelque sorte à un stade intermédiaire entre la fonte blanche et la fonte grise, une partie du carbone formant du graphite et le reste des carbures. La qualité de graphite augmente progressivement en profondeur à partir de la surface du cylindre tandis que la dureté diminue. Le graphite a une forme irrégulière, une représentation tridimensionnelle montrerait quelque chose comme une longue hélice torsadée portant une multitude de pales.

Les cylindres monoblocs à trempe indéfinie ont une structure constituée de graphite (pourcentage plus élevé dans les nuances plus douces) et peu de carbures dans une matrice perlitique, à l'exception de la nuance la plus dure qui a une matrice bainitique-martensitique. La profondeur de trempe est difficile à définir et la dureté décroît graduellement au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre du cylindre.^[2]

Le tableau 3 présente la composition chimique et les propriétés mécaniques de ces nuances de cylindres. La planche 5 présente des exemples de microstructures relatives à ces nuances.

Nuance	G	Composition chimique de la couche superficielle. %					
		C	Si	Mn	Cr	N	Mo
IC-53	3	3	0,1	0,1	0	1	0,1-0,5
IC-56	0	0	0,1	0,1	0	1	0,1-0,5
IC-58	0-1	0	0,1	0,1	4	1	0,1-0,5
	0	3	0,1	0,1	1	3	
	0	4	0,1	0,1	1	6	
	3	3	0,1	0,1	0	1	
	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
	0-1	1	0,1	0,1	5	3	
	1	-	0,1	0,1	-	-	
	0	3	0,1	0,1	1	3	
	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
	0	5	0,1	0,1	2	8	
	3	3	0,1	0,1	0	1	
	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
	0-	1	0,1	0,1	5	5	

² Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904

		1	-	.	.	-	-		
		0	3	.	0	1	4		
		0	,	.	.	,	,		
		0	5	.	.	2	0		
	IC-61	3	3	0	0	0	1	0,1-0,5	
	IC-63	0	,	.	.	,	,	0,1-0,5	
	IC-66	0-	1	.	.	6	7	0,1-0,5	
		7	-	.	.	-	-		
		0	3	.	0	1	4		
		0	,	.	.	,	,		
		3	5	.	.	3	2		
		0	3	0	0	0	2		
		0-	,	.	.	,	,		
		7	1	.	.	7	0		
		0	-	.	.	-	-		
		0	3	.	0	1	4		
		3	,	.	.	,	,		
		0	5	.	.	4	5		
		0-	3	0	0	0	2		
		7	,	.	.	,	,		
		0	2	.	.	8	0		
		0	-	.	.	-	-		
			3	.	0	1	4		
			,	.	.	,	,		
			6	0	.	5	5		
	H-IC-65	3	3	0	0	0	2	0,1-0,5	
		0	,	.	.	,	,	0,1-0,5	
	IC-68	0-	2	.	.	8	0	0,1-0,5	
	H-IC-68	7	-	.	.	-	-		
		0	3	.	0	1	4		
		0	,	.	.	,	,		
		3	6	0	.	5	5		
		0	3	0	0	0	2		
		0-	,	.	.	,	,		
		7	2	.	.	9	0		
		0	-	.	.	-	-		
		0	3	.	0	1	4		
		3	,	.	.	,	,		
		0	6	.	.	6	5		
		0-	3	0	0	0	2		
		7	,	.	.	,	,		
		0	2	.	.	9	0		
		0	-	.	.	-	-		
			3	.	0	1	4		
			,	.	.	,	,		
			6	.	.	6	5		
	Dureté de la couche superficielle			Propriétés mécanique du cœur					
				Résistance à la traction	Résistance à la flexion	flèche	Résistance à la torsion		
	Shore C	brine Il	N/mm ²	N/mm ²	m	N/mm ²			
51-55		330-	195-245	440-	~1,	~360			
54-58		370	195-245	490	2	~370			
56-60		360-	195-245	440-	~1,	~380			
		400		490	2				

	380-		440-	~1,	
	420		490	2	
59-63	410-	195-245	440-	~1,	~390
61-65	450	195-295	490	2	~390
64-68	430-	225-315	440-	~1,	~390
	470		540	2	
	460-		440-	~1,	
	500		540	2	
64-68	460-	225-315	440-	~1,	~390
66-70	500	225-315	540	2	~390
66-70	480-	225-315	440-	~1,	~390
	520		540	2	
	480-		440-	~1,	
	520		540	2	

Tableau 3.composition chimique et caractéristiques mécaniques des cylindres en fonte à trempe indéfinie monobloc

Fig. 4.7:1. Exemples de courbes typiques de dureté.

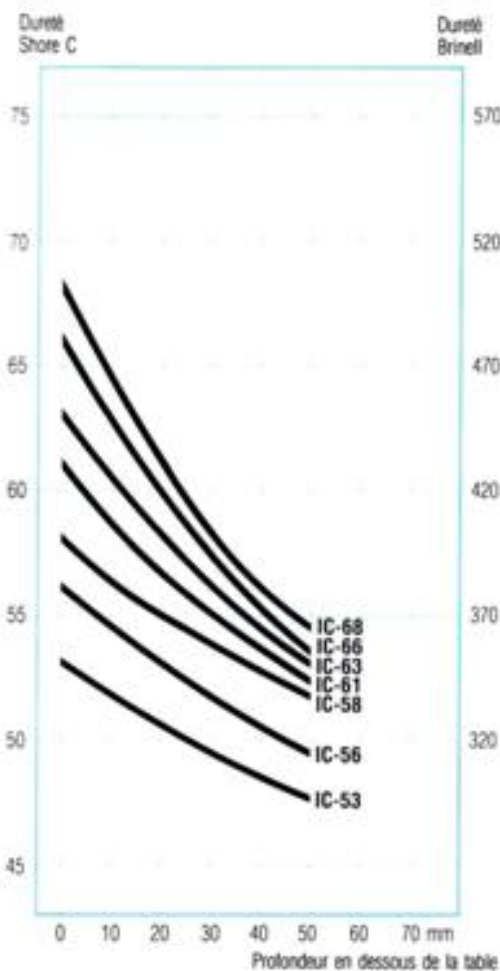


Fig. 4.7:2. Couche superficielle, IC-58. Grossissement : x500. Matrice perlitique avec graphite lamellaire et carbures.

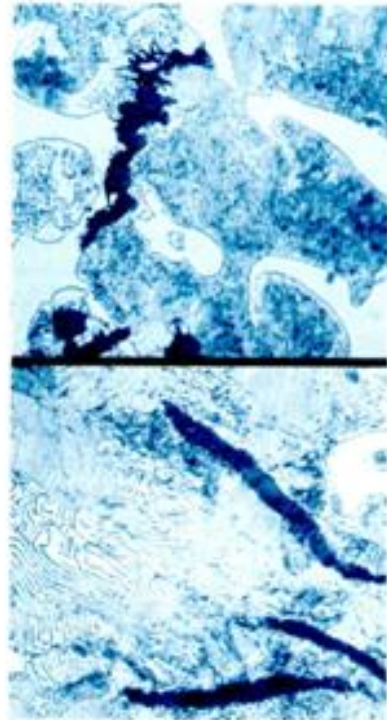


Fig. 4.7:3. Coeur de cylindre, IC-58. Grossissement : x500. Matrice perlitique avec graphite lamellaire et carbures.

Planche 5.structures des cylindres en fonte à trempe indéfinie monoblocs

III .1 .8 - Cylindres en fonte à trempe indéfinie coulés statiquement composites ou par centrifugation :

Les cylindres en fonte à trempe indéfinie ont une couche superficielle de fonte à graphite lamellaire. Ce type de cylindre est employé essentiellement pour le laminage à chaud des produit plat.

L'appellation de ce type de cylindre est basée sur le fait que la profondeur de trempe est plus difficile à définir dans les cylindres monoblocs. Le métal de surface est à une sorte d'état intermédiaire entre la fonte blanche et grise, une partie du carbone formant du graphite et le reste des carbures. la quantité de graphite augmente progressivement en profondeur à partir de la surface du cylindre tandis que la dureté diminue. Le graphite est de forme irrégulière ; une représentation tridimensionnelle montrerait quelque chose comme une longue hélice torsadée portant une multitude de pales.

Le cœur de ces cylindres est de la fonte grise (avec du graphite lamellaire dans une matrice perlitique). lorsqu'il faut des cylindres ayant une plus grande résistance du cœur et des tourillons , on emploie des cylindres H-SG-IC-C.

La couche superficielle des cylindres en fonte à trempe indéfinie coulés statiquement composites ou par centrifugation à une structure consistant en graphite et carbures dans une matrice qui va progressivement d'un mélange de perlite et bainite , dans les nuances plus douces jusqu'à la martensite dans les nuances les plus dures, en passant par la bainite. Les pourcentages de graphite, de carbures et de martensite qui ont une grande influence sur les caractéristiques des cylindres sont déterminés dans une large mesure par la composition chimique.

Les cylindres en fonte à trempe indéfinie manifestent une excellente résistance à l'usure semblable à (et dans certains cas meilleure que) celle des cylindres en fonte à trempe nette. Leur résistance aux fissurations thermiques est excellente, notamment dans les nuances les plus douces. Les profondeurs de trempe maximales sont plus importantes que dans les cylindres en fonte à trempe nette. ^[2]

Le tableau 4 présente la composition chimique et les propriétés mécaniques de quelques nuances de ces cylindres. La planche 6 présente les variations de la dureté en fonction de la profondeur pour quelques nuances de cylindres.

Nuance de cylindres	G a m e d e	Profondeur de trempe max.	Composition chimique de la couche superficielle. %

² Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904

	di a m è t r e m m	mm	C	;	l	C	N	M
H-IC- C66	50	80	3	:	0	1	3	0
H-IC- C68	0-1	80	1	:	:	0	5	2
H-IC- C71	60		3	:	:	1	5	0
	0		,	:	:	,	,	,
	0		4	:	:	5	0	5
	5		3	:	0	1	3	0
	0		,	:	:	,	,	,
	0-1		1	:	:	1	5	2
	6		-	:	:	-	-	-
	0		3	:	:	1	5	0
	0		,	:	:	,	,	,
	0		4	:	:	6	0	5
	5		3	:	0	1	3	0
	0		,	:	:	,	,	,
	0-1		1	:	:	1	5	2
	6		-	:	:	-	-	-
	0		3	:	:	1	5	0
	0		,	:	:	,	,	,
	0		4	:	:	7	0	5
H-IC- C73	5	50	3	:	0	1	3	0
H-IC- C76	0-8	50	1	:	:	0	5	2
H-IC- C77	0		-	:	:	-	-	-
	0		3	:	:	1	4	0
	2		,	:	:	,	,	,
	7		5	:	:	4	5	5
	5-		3	:	0	1	3	0
	8		,	:	:	,	,	,
	0		1	:	:	1	5	2
	0		-	:	:	-	-	-
	2		3	:	:	1	4	0
	7		,	:	:	,	,	,
	5-		5	:	:	8	5	5
	8		3	:	0	1	4	0
	0		,	:	:	,	,	,
	0		1	:	:	6	0	2
			-	:	:	-	-	-
			3	:	:	2	5	0
			,	:	:	,	,	,
			5	:	:	1	0	5
H-IC- C80	2	50	3	:	0	1	4	0
H-IC- C82	7	50	,	:	:	,	,	,
H-IC- C85	5-8	50	1	:	:	3	5	2
	0		-	:	:	-	-	-
	0		3	:	:	1	5	0
	2		,	:	:	,	,	,
	7		5	:	:	8	0	5
			3	:	0	1	4	0

	620	215	390	1	3	
		175	350	,	4	
		-	-	5	5	
		215	390	~	~	
				1	3	
				,	4	
				5	5	
78-82	610-	175	350	~	~	~70
80-84	(650)	-	-	1	3	~70
83-87	(630)	215	390	,	4	~70
	-	175	350	5	5	
	(670)	-	-	~	~	
	(660)	215	390	1	3	
	-	175	350	,	4	
	(700)	-	-	5	5	
		215	390	~	~	
				1	3	
				,	4	
				5	5	
85-89	(680)-(720)	175-215	350-390	~1,5	~345	~70

Tableau : 4. composition chimique et caractéristiques mécaniques des cylindres en fonte à trempe indéfinie coulés statiquement composite

Fig. 4.9:1. Exemples des courbes typiques de dureté.

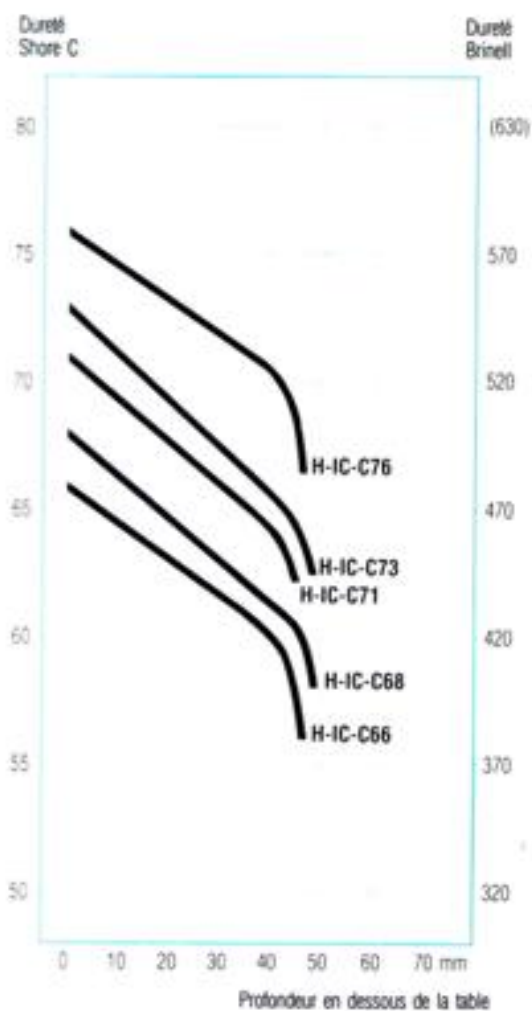
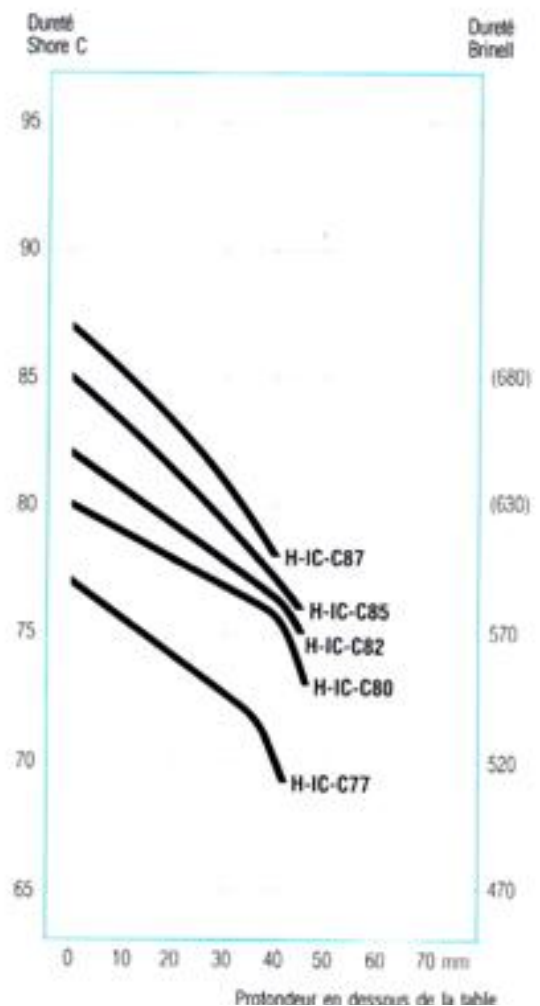


Fig. 4.9:2. Exemples de courbes typiques de dureté.



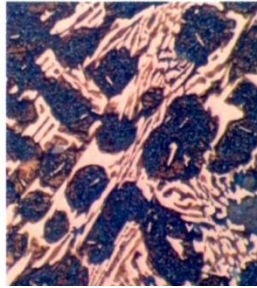
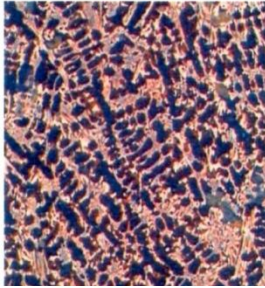
	0							
	0		5			9	5	5
H-SG- IC- C79	4	50	3		0	1	3	0
	0							
	0-		2			6	6	3
	1		-			-	-	-
	0		3		0	1	4	0
	0							
	0		5			9	5	5
Dureté de la couche superficielle		Propriétés mécanique du cœur						
		Résistance à la traction	Résistance à la flexion	flèche	Résistance à la torsion		Résistance à la fatigue (traction-compression)	
Shore C	brinell	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²		N/mm ²	
65-69	460-	390	590	~	~		~175	
68-72	490	-	-	2	6		~175	
72-76	485-	440	685	,	6		~175	
	520	390	590	0	5			
	520-	-	-	~	~			
	570	440	685	2	6			
		390	590	,	6			
		-	-	0	5			
	440	685	~	~				
				2	6			
				,	6			
				0	5			
77-81	580-	390	590	~	~		~175	
	620	-	-	2	6			
		440	685	,	6			
				0	5			

Tableau 5. compositions chimiques et caractéristiques mécaniques des cylindres en fonte à trempe indéfinie nodulaire

III .1 .10 – quelques types de cylindres MKB (Marichal Ketin Belgique):

Les planches 7, 8,9 présentent la composition chimique, la microstructure et les propriétés mécaniques de quelques types de cylindres fabriqués par la firme MKB.

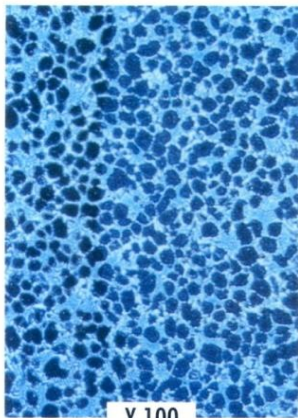
MKB VEGA - Microalloyed Indefinite Chill Double Pour COMET 70 - High Chromium iron



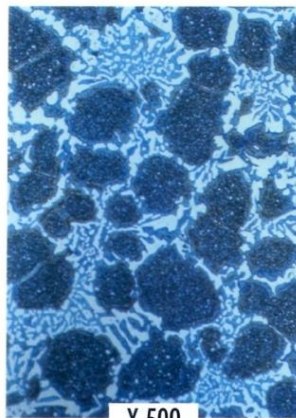
SPECIFICITY

The high Chromium iron grade COMET 70 is characterized by a Chromium content in the range of 12 to 16 % and a carbon content ranging from 2.1 to 2.6 %. This grade has, according to the requested hardness, a pearlitic or martensitic matrix and contains about 20 to 25% of Chromium carbides (M_7C_3) which lead to its good wear resistance. By comparison to indefinite chill iron, the tensile properties are doubled, this led to big improvements regarding the appearance of fire cracks

MKB COMET - High Chromium iron



X 100



X 500

SPECIFICITY

The high Chromium iron grade is characterized by a Chromium content in the range of 16 to 19 % and a carbon content reaching from 2.7 to 2.9 %. This grade has a martensitic matrix and contains about 25 to 30 % Chromium carbides (M_7C_3) which lead to its good wear resistance. By comparison to indefinite chill iron, the tensile properties are doubled in the order of 800 MPa instead of 400 MPa, this led to big improvements regarding the appearance of fire cracks. According to its applications, Cr & Mo content as well as heat treatment may be adjusted.

MECHANICAL PROPERTIES

1MPa = 1 N / mm² (= 0.1 kgf / mm²)

• Tensile strength Rt	700 / 800	MPa
• Young modulus E	210000 / 220000	MPa
• Compressive yield strength Rc ^{0.2%}	1600 / 1800	MPa
• Compressive strength Rc	2000 / 2800	MPa
• Ductility (compression)	5 / 10	%

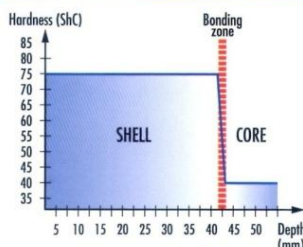
PHYSICAL PROPERTIES

• Thermal expansion (25-400°C) α	12.7 / 12.9	10 ⁻⁶ 1/°C
• Thermal conductivity λ	16 / 20	W/m.K
• Specific heat Cp	460 / 480	J/Kg.K

HARDNESS

• Shore	65 / 90	ShC
• Vickers	500 / 800	HV
• Equotip	715 / 850	LE

HARDNESS IN DEPTH



CHARACTERISTICS

Wear resistance	★★★
Sticking - roll oxidation	★★
Fire cracks	★★★
Slippage	★★
★★★ very good ★★ good ★ weak	

CORE MATERIAL COMBINATION

- Pearlitic nodular graphite iron
- Lamellar graphite iron

CHEMICAL ANALYSIS [%-wt]

C (Carbon)	2.5 / 2.9
Si (Silicon)	0.4 / 0.6
Mn (Manganese)	0.9 / 1.1
Ni (Nickel)	1.2 / 1.4
Cr (Chromium)	16.0 / 19.0
Mo (Molybdenum)	1.2 / 1.4
P (Phosphorus)	< 0.05
S (Sulphur)	< 0.030

Carbide % 25 / 30

Cr/C ratio 6

APPLICATIONS

- Work rolls for front finishing stands of Hot Strip Mills
- Work rolls for Hot Skin-pass Mills
- Work rolls for Heavy Plate Mills
- Work rolls for Cold Rolling Mills
- Work rolls for the rolling of checkered and corrugated plates

Planc

MKB MARICHAL KETIN

SA DES FONDERIES
J. MARICHAL KETIN & CIE
Rue Ernest Solvay 372
B-4000 Liège (Sclessin)
Belgium

Planche 9.cylindres en fonte haut chrome

III.2 Facteurs dictant le choix du cylindre.

III .2 .1 – Laminoir :

- Type de laminoir.
- Refroidissement.
- Type de paliers.

III .2 .2 - Procédé de laminage :

- Produit laminé.
- Dimensions de produit laminé.
- Type de métal laminé.
- Analyse de métal laminé.
- Vitesse de laminage.
- Réduction par passe.
- Tr/min. et couple (s'il faut calculer les efforts mécaniques appliqués aux cylindres).
- Production (tonnes/an).

III .2 .3 – Cylindres :

- Position des cylindres dans le laminoir.
- Diamètre maximal et minimal absolus de la table de cylindre.
- Tolérances du diamètre de la 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).
- Diamètre et longueur de la table.
- Longueur hors tout.

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

III .2 .4 - Cylindres employés précédemment :

- Nuances et analyse.
- Dureté de table.
- Dureté de tourillons (portée de palier).
- Performance :
 - tonnes par montage.
 - Kilomètres laminés.
 - tonnes par rectification à la meule.
 - épaisseur de matière enlevée à chaque réparation, en mm.

Chapitre IV : Défaut d'écaillage sur cylindre. Définition et origine .

IV .1. Ecaillage en éclat :

❖ Définition :

Nous présentons dans ce qui suit quelques cas d'écaillage sous forme de col qui proviennent de l'effet de la fatigue. Nous remarquons que l'écaillage part de la profondeur et remonte à la surface extérieure du cylindre (figure 14) .

On peut voir l'intensité variable des sens de fatigue dans les zones profondes des écailles indiquant la direction de la propagation à partir du cœur vers la surface du cylindre.

Ces écailles surgissent à partir des couches (flocons) de graphites constituant le noyau des cylindres de travail et sont principalement localisés dans le centre du cylindre.

❖ Origine :

Les fortes charges cycliques sont à l'origine la cause de l'écaillage dues à une importante réduction appliquée sur les bandes ayant des matériaux durs pour l'obtention de faibles épaisseurs.

Au delà de la limite de fatigue, de nombreuses microfissures commencent à se former provoquant un affaiblissement progressif du noyau du matériau .Dans une seconde étape, ces microfissures se rejoignent et se propagent vers et à travers la coquille à la surface du cylindre en donnant lieu à un large et typique écaillage. Des hautes tensions extensibles résiduelles qui sont thermiquement induites dans le noyau lors de la fabrication vont favoriser ce type de dommages.



Fig.13. Ecaillage en éclat

Longtemps avant l'écaillage catastrophique, la première étape de la faiblesse du noyau peut facilement être détectée à l'aide des tests ultrasoniques, la réduction de l'écho des parois indiquera l'affaiblissement du noyau du

cylindre .Le matériau du noyau possède alors une force insuffisante de fatigue pour résister aux charges spécifiques de laminage, ceci est souvent considéré parmi les avaries de cylindres de travail.^[3]

IV .2. Eclat langue de chat.

❖ Description

Dans la première étape, une ou plusieurs fissures sous pression sont formées dans une zone de surcharge au niveau ou près de la surface du cylindre, une telle fissure est souvent orientée parallèlement à l'axe du cylindre mais se propage dans un sens non radial. Dans la phase suivante une fatigue sous forme de langue de chat se propage progressivement dans une direction circonférentielle plus ou moins en parallèle à la surface du cylindre.

Le sens de la propagation des fissures est opposé au sens de rotation du cylindre.

La propagation se développe à l'intérieur de la surface de travail (foyer de déformation) du cylindre, en augmentant progressivement en profondeur et en largeur, suivie d'une large écaille superficielle en recouvrant la surface du cylindre (Figures 15, 16,17).

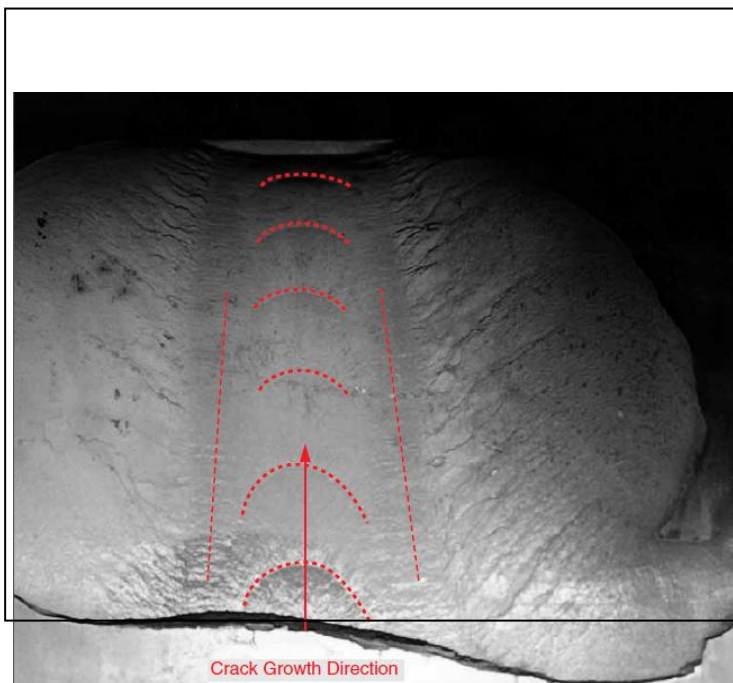
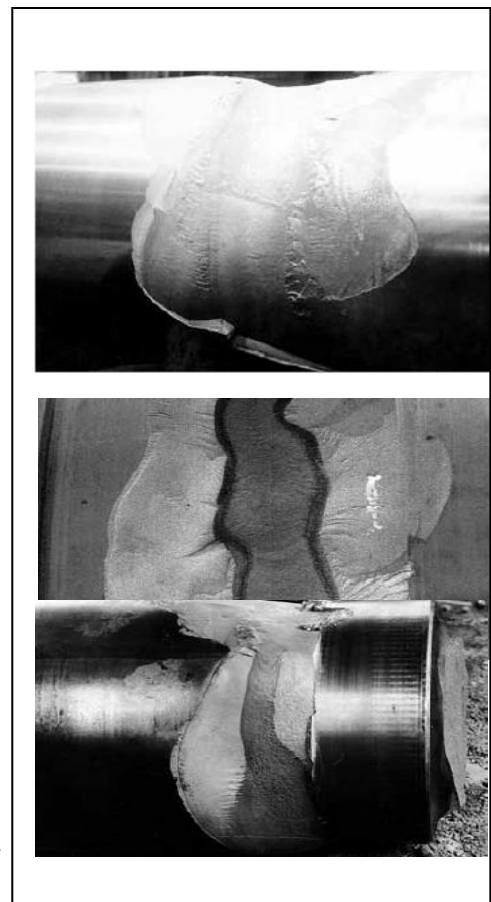


Fig.14. Eclat langue de chat



³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

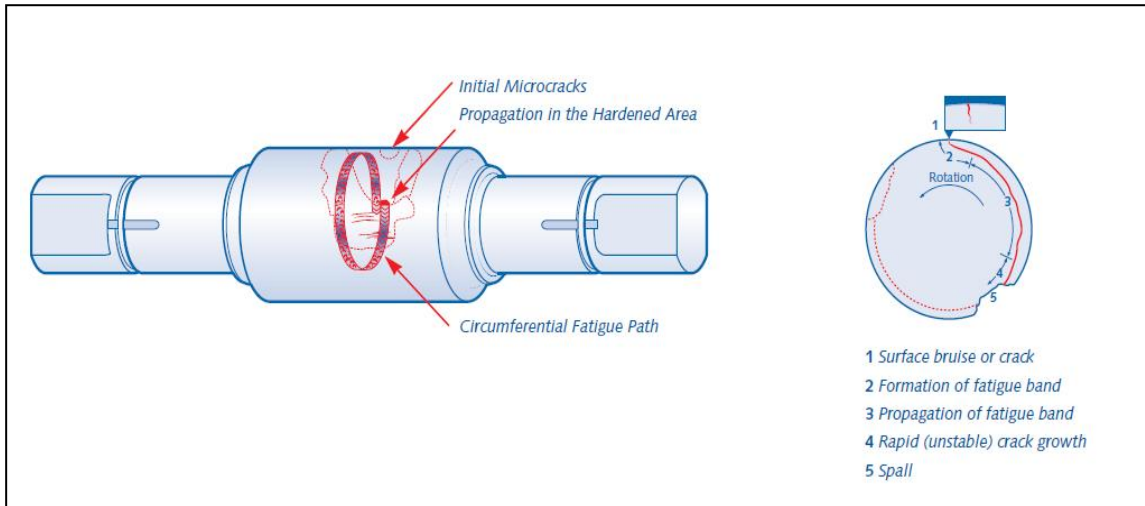


Fig.15. Eclat langue de chat

❖ Origine :

De fortes charges internes aux bords des arrêtes, des pavés ronds ou le pliage (dédoublage ou pincement) de la queue de la bande, provoquent l'excès de la force de déchirement de la coquille et donnent naissance à la fissure, compte tenue de la fatigue du matériau, qui donnera lieu ensuite à la propagation des fissures provoquant l'éclatement spontané et massif du cylindre de travail.

Les portées des profils sur les deux cylindres de travail et d'appui à travers de longues campagnes donnent lieu à des surcharges localisées et donnent des profils incorrects.

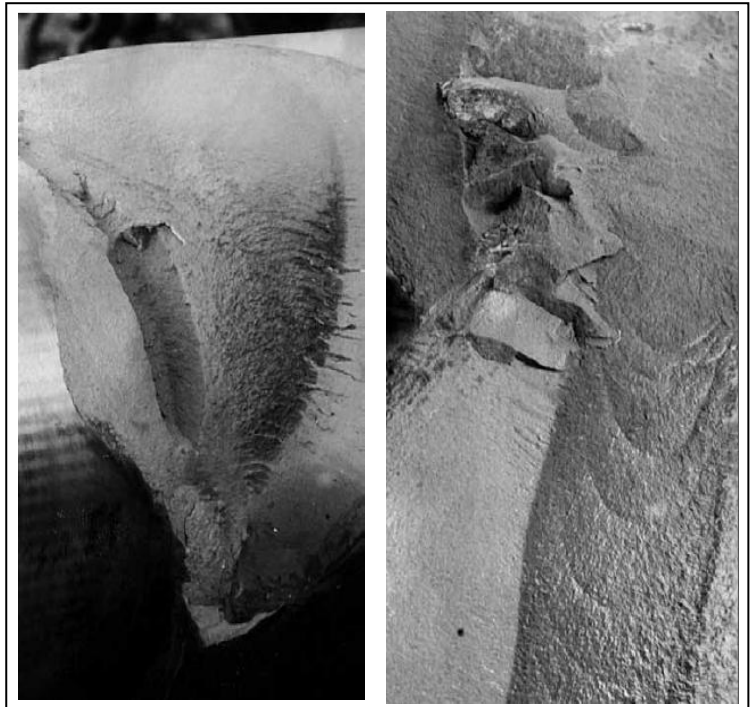


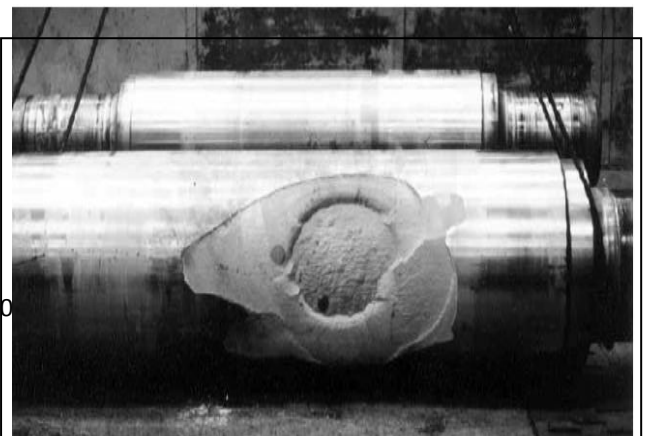
Fig.16.Eclat langue de chat

L'usage continu des allures des cylindres, les cylindres d'appui sans reliefs d'extrémité, les accidents qui surgissent au cours du laminage, les corps étrangers, contribue à la formation des premières fissures au niveau des cylindres de travail, et ceci est considéré parmi les défauts des opérations de laminage.^[3]

IV .3. Interface Couche externe/Cœur (lien relatif aux éclats)

❖ Description :

Une large zone de la couche externe sépare du cœur en suivant la faiblesse de liaison d'interface pour atteindre une zone de forte liaison métallurgique. A ce stade, la fracture se



³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 20

propage rapidement vers la surface du cylindre résultant dans un large éclat (écaille)(Figure 18).

❖ Origine :

Le but derrière la coulée des cylindres est d'atteindre une parfaite liaison métallurgique entre la couche externe et le cœur du métal.

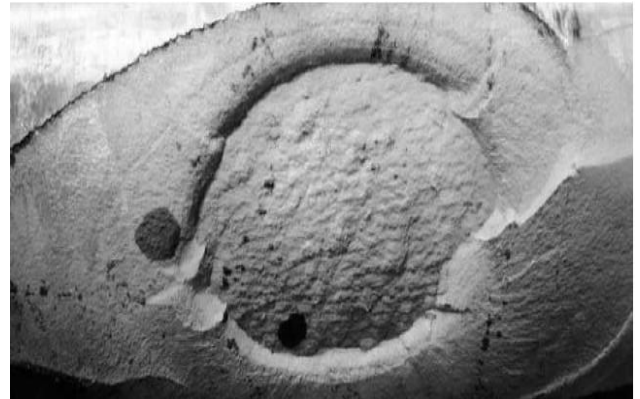
Pendant le cycle de la production du cylindre et pour une raison quelconque le lien est rompu entre la couche externe et le cœur, ce qui génère la faiblesse de la force de liaison tel que :

-Couche d'oxyde résiduelle entre la couche externe et le cœur.

-La Présence du flux ou du laitier au niveau de l'interface.

Fig.17. Interface couche externe/cœur

-Excès de carbure, micro porosités, des écailles de graphite ou des inclusions non métalliques tels que les sulfures.



Les autres raisons de séparation entre couche externe et cœur peuvent être :

-La surcharge locale excessive durant l'accident du laminage, ce qui initialise une séparation locale qui continue à grandir due à une propagation de fissure sous l'effet de la fatigue suivant l'interface couche externe/cœur jusqu'à l'atteinte d'une taille critique, ce qui donne naissance à un important écaillage secondaire spontané. Ce genre de dégâts peut avoir lieu même s'il n'y a pas de défaut métallurgique dans la zone de liaison.

- Excessives efforts de tension radiale dans la zone de liaison due aux conditions de température anormales (défaillance dans le système de refroidissement, colmatage, etc.).

Ceci est normalement un défaut de cylindre si les défauts de liaison sont présents.^[3]

IV.4. Interface Couche externe/Cœur (insuffisance de la profondeur de la couche externe) :

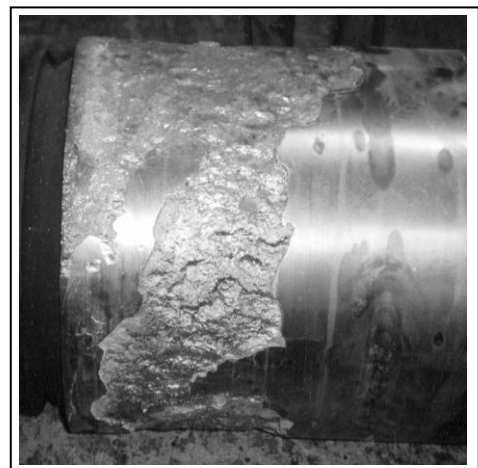
❖ Description

L'interface entre la couche externe et le cœur du métal est complètement soudée mais la profondeur de la croute est insuffisante pour atteindre le diamètre de ferrailage du cylindre(Figure 19).

Le matériau du cœur qui contient plus de graphite et moins d'alliage est plus doux que celui de la couche externe apparait en gris comme couleur. Comme l'interface suit le front de la solidification de la croute, les zones douces du cœur apparaissent au niveau de la surface du cylindre, vont être inégales et discontinues.

❖ Origine:

La profondeur de la croute dépend d'un certains nombres de facteurs qui contrôlent le processus de la coulée par centrifugation tel que le poids du métal, la température de la coulée, et la notion du temps, c'est quand l'un des paramètres critiques ne se réunissent pas donc la profondeur nécessaire ne peut être obtenue. Ceci est un défaut de cylindre.^[3]



³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

/cœur

IV .5. Ecaillage des extrémités du cylindre :

❖ Description:

La surface et/ou sous surface fissures ainsi que les écailles associés forment sur la table de travail du cylindre approximativement à 100-300mm de l'extrémité de la table de travail dans une direction circonférentielle (Figure 20).

Ces fissures sont étendues vers le bord libre de la surface de la table de travail. Dans les cas extrêmes ces fissures peuvent aller dans les rayons du cou du cylindre.

Cette fissure d'extrémité peut se coller sur le corps du cylindre ou s'éclater en large éclat.

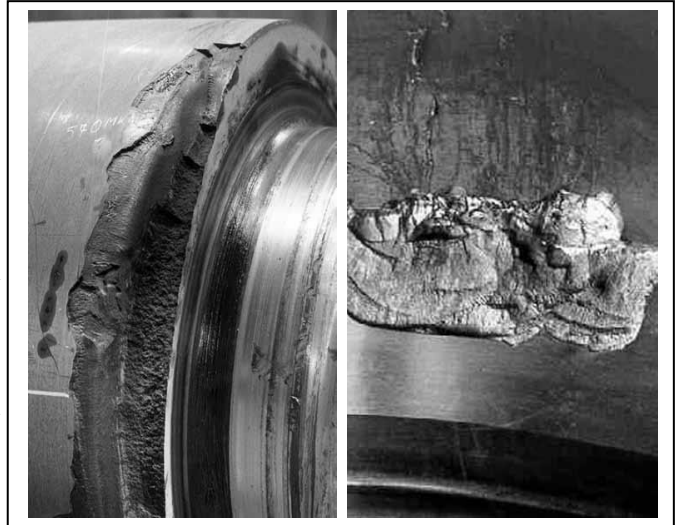


Fig.19. Ecaillage des extrémités du cylindre

❖ Origine

Une pression excessive sur l'extrémité de la table de travail du cylindre renforcée par l'allure positif du cylindre de travail, le manque du relief de l'extrémité du cylindre d'appui, faible épaisseur (forme) de la bande laminée, bord épais ou faux paramétrage induisent une surcharge locale qui provoque l'excès de force de déchirure du matériau du cylindre.

Une forme excessive d'usure due à la longue compagne cause des surcharges localisées au niveau des extrémités de la table de travail, qui favorisent la fissure initiale. Le laminage continu propage la fissure en sortant du bord libre, la défaillance alors nait.

Ceci est un défaut de laminage.^[3]

³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

IV.6. Bandes de crique à feu :

❖ Description

Relativement à la largeur de la bande et à l'arc du foyer de contact entre le cylindre et la bande laminée, l'apparition de ces fissures est du type mosaïque usuel, mais de plus grande taille de maille qu'un modèle de fusion conventionnel (Figure 21).

❖ Origine:

Dans le cas d'un arrêt, la bande laminée peut rester en contact avec le cylindre de travail pour une durée importante. La température de la surface du cylindre augmente rapidement au niveau de la zone de contact, la chaleur ensuite pénètre profondément dans le corps du cylindre. L'effet thermique induit dépasse l'effort de rendement du matériau du cylindre.

Quand la bande laminée est enlevée et le cylindre sera élingué, la surface du cylindre se refroidit et due à la contraction de cette zone localisée, la surface commence à se fissurer, la gravité de la fissure dépend de la durée d'exposition du contact et le taux de refroidissement.

Ceci est un défaut de laminage ^[3]

Fig.20. Bande de crique à feu



IV.7. Lignes de crique à feu

❖ Description

De la bande circonférentielle sur la table de travail du cylindre, le cylindre montre des fissures orientées longitudinalement qui se propagent dans des plans radiaux (Figure 22).

❖ Origine:

Ce type de Fissure de surchauffe peut être initié en raison d'un manque de refroidissement, pour un bouchage instantané des buses de pulvérisation, due à la prononciation de la pénétration de chaleur dans le corps de cylindre, ces fissures de surchauffe sont beaucoup plus profondes que celles issues du coulé.

Ceci est un défaut de laminage. ^[3]

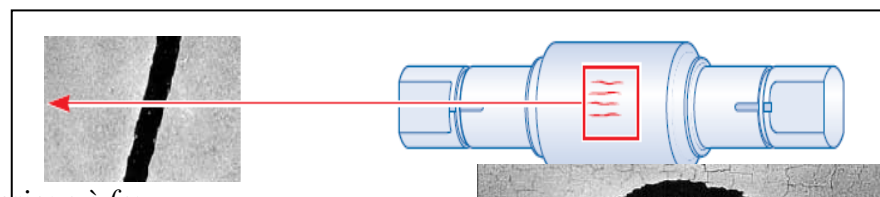
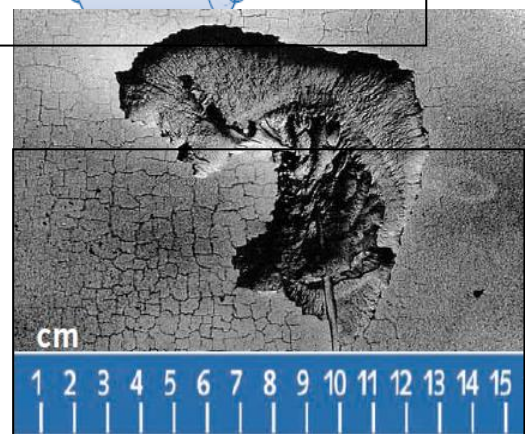


Fig.21. Lignes de crique à feu

IV.8. faïençage de crique à feu

❖ Description



³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

Le cylindre montre dans des zones locales des criques à feu, parfois avec des indentations ou même l'effritement local (Figure 23).

❖ Origine

Ces fissures surviennent lorsque la combinaison des contraintes mécaniques et thermiques dans ces zones locales passe au-dessus de la limite d'élasticité du matériau du cylindre, et sont exagérées lors du refroidissement ultérieur. *Fig.22. faïençage de crique à feu*

Les incidents de laminage tel que une contusion à l'impact, soudage de la bande, bord (rives) de la bande ou sertissage d'extrémité arrière (pincement) sont les raisons possibles de ce type de dommages.

La combinaison des criques à feu et les fissures de pression rend ce dommage très dangereux car il peut induire une fatigue de ruban ou même éclatement immédiat. Ceci est un défaut de laminage ^[3]

IV.9. Le défaut de standard surcharge de choc

❖ Description

Le standard subit une défaillance d'une section transversale commençant généralement par le bas adjacent au cylindre. Le côté de fracture suit le rayon, puis continue dans le côté du cylindre, et coupe (cisailles) une partie de la face d'extrémité du cylindre.

❖ Origine:

Dans des conditions de charge de choc, la charge maximale peut excéder la résistance à la flexion ultime de la matière de noyau et la rupture se produit, généralement à la surface de la section transversale la plus sollicitée. Dans le cas où un cylindre a été mal traité par une chute ou par une utilisation incorrecte de la table lors des changements de cylindre, les tourillons de cylindre seront soit fissurés ou tombés en panne plus souvent par une fracture. Le fait qu'un morceau de cylindre est fixé au standard indique une panne de détournement. Ceci est un défaut de laminage.

IV.10. Défaut standard de fracture de flexion

❖ Description

Les lignes de fracture commencent à partir de l'extérieur et répartis sur toute la section transversal, en particulier à partir de la zone de filet et très souvent après la propagation des fissures de fatigue.

❖ Origine:

Cet échec résulte de charges de flexion élevées qui dépassent soit la résistance à la flexion ultime ou la force de la fatigue du standard. Il est généralement limité à 2-Hi cylindre de travail de tout grade dans les colonnes de laminoir à chaud.

³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

Ce type de fissure (rupture) peut être causé par:

- Des charges élevées de laminage combinées avec un design de cylindre faible,
- Accidents de laminage avec des forces de flexion extrême,
- Mauvaise qualité de cylindre concernant la force du standard,
- un effet d'entaille suite à un rayon de filet trop petit, des rainures circonférentielles, des fissures de fatigue induite par la corrosion, etc.

Ceci est soit un défaut de laminage ou de cylindre ^[3]

IV.11. Défaut standard de couple de laminage

❖ Description

Le visage de fracture est incliné à l'axe de cylindre et peut montrer une fracture de cisaillement complète, qui constitue bien souvent une fissure sous forme de cône. Ce type de fracture se produit à la fin de conduite lancé de la section la plus faible, ce qui est souvent l'évidement de bague fendue, se propageant au centre de neck, ou de la racine du rayon de la fin bêche.

❖ Origine:

Le couple sur l'extrémité de conduite a dépassé la résistance à la torsion de la matière standard. La force du standard sera également affectée par l'effet d'entaille de rayon forte, c.à.d. dans l'évidement de bague fendue, ou d'autres éleveurs de stress tels que les forages radiaux. La charge peut être normale pour le design et le fonctionnement de laminoir, auquel cas la matière de cylindre nécessite la mise à niveau ou la charge peut être en excès de fonctionnement standard de laminoir, qui est, à son tour, supérieure à la résistance à la torsion de matière de cylindre.

Les surcharges sont expérimentées à travers une variété de circonstances:

- un décrochage de laminage suite à un «collage de brame »,
- Accidents de laminage tels que soudage de bande
- Un montage d'arbre de conduite incorrect, soit par le laminage, ou par l'usinage incorrect de l'extrémité de conduite.

Ceci est normalement un défaut de laminage. ^[3]

³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

³ Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002

Chapitre V : introduction à la mécanique de la rupture :

V .1 - Mécanique linéaire de la rupture :

Les matériaux fragiles présentent généralement une rupture brutale et une déformation plastique très limitée. La résistance à la rupture de ces matériaux est contrôlée par la propagation des défauts qu'ils contiennent. Le comportement à la rupture est donc déterminé par les conditions d'élaboration, la microstructure ainsi que la composition. La mécanique linéaire de la rupture permet de caractériser le comportement à la rupture par ténacité qui décrit l'aptitude d'un matériau à résister à la fissuration.

Pour les matériaux présentant une plasticité importante, les méthodes de mesures de la mécanique linéaire de la rupture ne sont plus valables.

Le mode de rupture de type fragile peut survenir quand les sollicitations ont lieu dans les circonstances suivantes :

- Basses températures,
- Grandes vitesses de chargement, et
- Défauts préexistants ou créés pendant le service.

Les ruptures brutales dont il s'agit peuvent être classées en deux catégories :

- Les ruptures fragiles liées à l'absence de ductilité du matériau sollicité sous une certaine température (Température de paroi minimum admissible) comme les aciers doux, et

Les ruptures ductiles sans prévenir, c'est-à-dire à très faible déformation plastique. Ce peut être le cas pour des matériaux à haute limite d'élasticité où il n'existe pas de dépendance très nette entre la ténacité et la température c'est-à-dire où la rupture en charge est liée à la propagation quasi instantanée d'une fissure à partir d'un défaut préexistant.^[4]

V .2 - différents modes de la rupture :

V .2 .1 - Rupture fragile (rupture par fissuration rapide) :

- Dans la plupart des matériaux à comportement fragile, les défauts initiaux sont la principale cause de rupture.

La prise en compte de défauts initiaux s'inscrit dans une stratégie de conception de structures contenant des défauts. Cette technique est appliquée dans le domaine de l'automobile ou sont utilisés des matériaux tels que les céramiques techniques ou des fontes à graphite sphéroïdal. Dans tous les cas la prise en compte de la nocivité des défauts pour la conception et la maintenance des structures devient nécessaire.

Bien que contrôlés, les matériaux à comportement fragile renferment des inclusions, des porosités, des retassures, ... dont la présence est liée à la structure même du matériau et /ou au mode d'obtention. Ces défauts initiaux risquent ainsi de donner lieu à un amorçage et à la propagation catastrophique d'une fissure.

L'ors qu'il s'agit de rupture fragile, celle-ci se produit par clivage sans prévenir, le plus souvent sans déformation plastique, et les morceaux peuvent se réassembler parfaitement. Elle est soit inter granulaire, soit transgranulaire.^[4]

⁴ Notions Pratiques de Mécanique de la Rupture B.Barthelemy et Ed.Eyrolles

⁴ Notions Pratiques de Mécanique de la Rupture B.Barthelemy et Ed.Eyrolles

❖ La rupture transgranulaire

- La rupture suit des plans cristallographiques (plans de clivage).
- Faciès de rupture cristallin (aspect brillant).

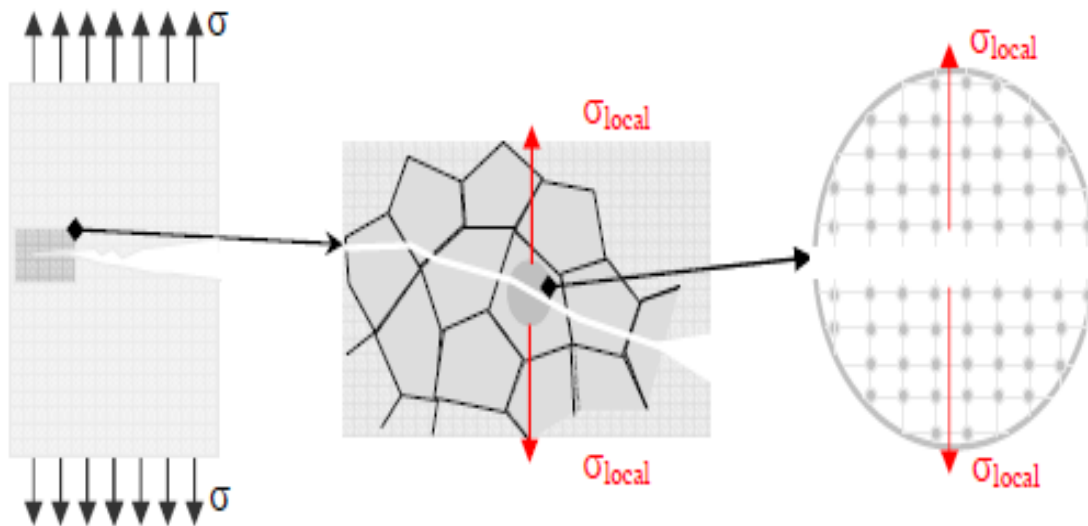


Fig. 23 : la rupture par cliv

age à différentes échelles.

- Echelle macroscopique : La surface de rupture est perpendiculaire à la direction de sollicitation.
- Echelle mésoscopique : Une rupture transgranulaire, la fissure suit des plans et directions cristallographiques dans chaque grain.
- Echelle microscopique : Rupture des liaisons interatomiques dans une direction perpendiculaire au plan de rupture.

L'interaction de la fissure avec les défauts microstructuraux ou hétérogénéités du métal conduit à des microreliefs très caractéristiques : surfaces de clivage sous forme de traces et marches appelés *rivières* et *languettes* observées par fractographie.

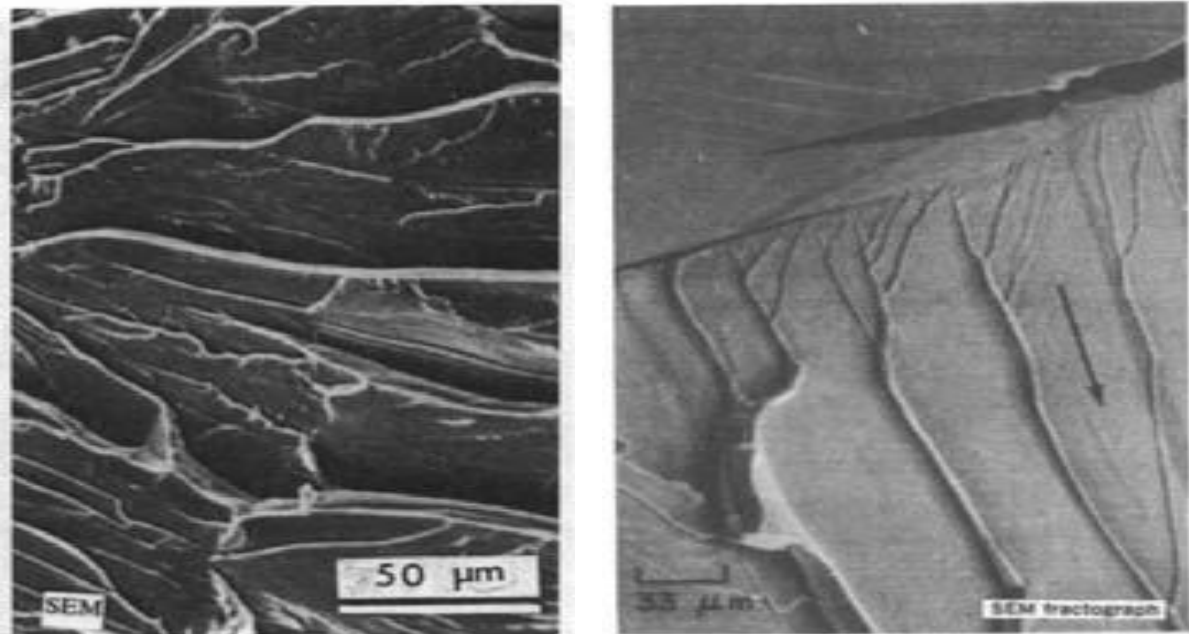


Fig.24 : Types de rupture fragile transgranulaire (à clivage) : Rivières

Les rivières se forment :

- par l'interaction du plan de clivage et de dislocation vis ;
- par jonction de deux plans de clivage voisins, et convergent vers la direction du sens de propagation de la fissure.

Lors d'un franchissement d'un joint de grain, soit les rivières se multiplient, soit il y aura un réamorçage dans le grain voisin et ceci selon la désorientation de la fissure qui est fonction de la taille du grain.

La contrainte d'amorçage est élevée (le processus se déclenche par déformation plastique hétérogène : bande de glissement ou macles ; elle est essentiellement :

- Fonction de la taille du grain d (comme $d^{-1/2}$)
- Peu fonction de la température ;
- Diminue avec l'augmentation de la vitesse de sollicitation.

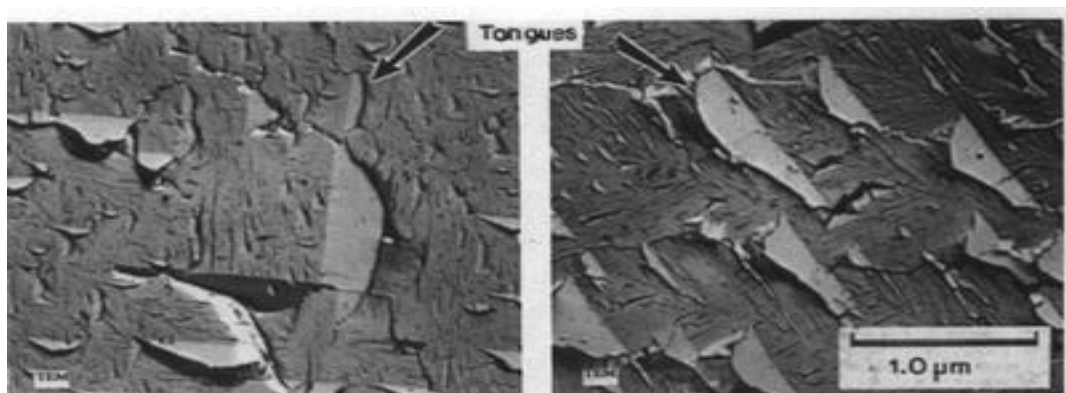


Fig.25 : Types de rupture fragile transgranulaire (à clivage) : Languettes

La rupture à basse température se fait par clivage et elle ne peut survenir que si la limite d'élasticité est atteinte.

La rupture fragile transgranulaire se manifeste surtout dans les structures de cristaux :

- Cubiques centrés (C.C.) tels que les *aciers à carbone* et les cristaux ;
- Hexagonaux compacts (H.C.) tels que le *Zinc* et le *Magnésium*.

Les structures de cristaux cubiques à faces centrées (C.F.C.) sont peu sujettes au clivage.

A plus basses températures, dans les structures de cristaux C.C. ou H.C., l'agitation thermique qui facilite le mouvement des dislocations est moindre, ce qui bloque les dislocations et augmente la limite d'élasticité (augmentation de la résistance intrinsèque du matériau). La zone plastique devient très petite en taille et par suite le déchirement ductile devient un clivage. La température à laquelle se produit le clivage varie selon le matériau et peut être plus élevée que 0°C.

- Propagation de la fissure par clivage :
Les atomes se séparent les uns des autres à une contrainte E/15.

La zone plastique est très limitée.

Le profil idéal montre que la contrainte théorique au voisinage de la fissure tend vers l'infini. Pratiquement, les défauts métallurgiques et l'apparition de la zone plastique limite cette contrainte à une valeur élevée mais finie. ^[5]

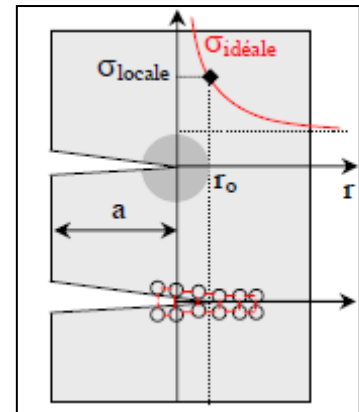


Fig.26 : Propagation de la fissure par clivage

❖ La rupture inter-granulaire

- Caractérisée par une décohésion inter granulaire ;
- La rupture suit les joints des grains.

Mécanismes :

Elle survient par accumulation d'impuretés ou d'inclusions (présence de seconde phase au joint du grain ou ségrégation d'un élément chimique), qui sont à l'origine d'une fragilité introduite, par exemple la fragilité au revenu.

Caractéristiques :

La rupture présente deux aspect à l'échelle microscopique :

- Aspect lisse, si la rupture suit les joints des grains) avec déformation plastique réduite ;
- Aspect de cupules.

Ainsi, les critères de rupture adoptés :

- Critère de contrainte critique (rupture inter granulaire);
- Critère d'allongement critique (rupture ductile). ^[5]

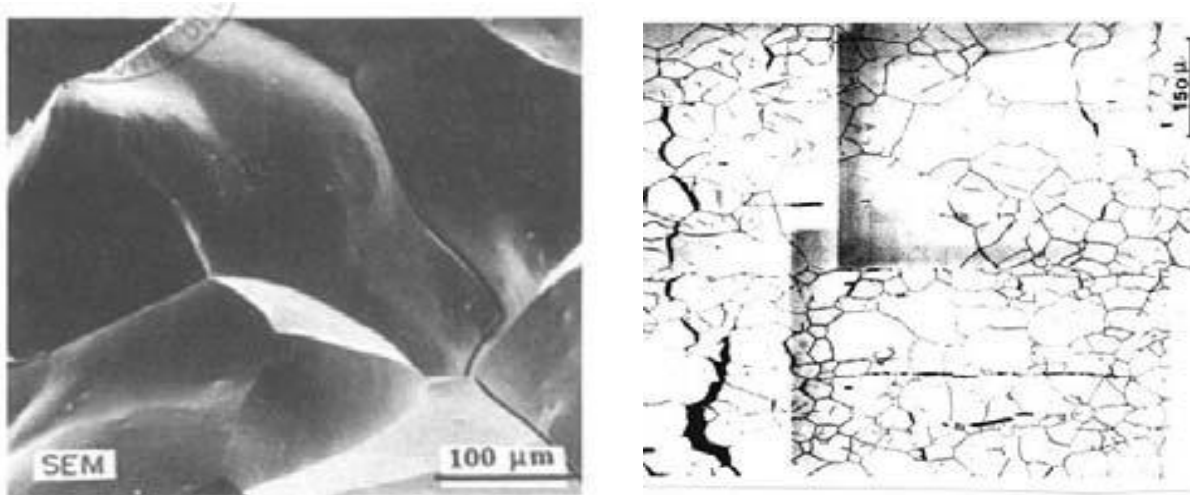


fig.27 : Aspect de rupture inter granulaire à l'échelle microscopique

- La rupture suit les facettes du grain par détérioration du joint de grain.
- La deuxième phase est négligeable en taille devant la phase principale est composé des éléments très fragiles.
- Aspect de cupules.
- Rupture par fluage.

La rupture inter granulaire se manifeste sous deux formes :

- Rupture fragile à basses températures quand les éléments d'impuretés ségrégués au joint du grain diminuent l'énergie de cohésion de ces joints ;
- Rupture inter granulaire par fluage aux températures moyennes et élevées ($\geq 1/3 T$ fusions). Les défauts qui conduisent à ce type de rupture sont initialement des cavités puis leurs multiplications ou décohésion (points triple).^[5]

H																				He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne			
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar			
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U															

	élément fragilisant		renforce la ségrégation		semble augmenter la cohésion des joints
	coségrège avec les éléments fragilisants		inhibe la ségrégation		

V .2 .2 - Rupture ductile (rupture par fissuration ductile) : ^[5]

Mécanisme :

Se manifeste essentiellement par la présence des inclusions ou précipités. La rupture résulte de la naissance des cavités, l'allongement de ces cavités dans le sens de déformation et coalescence de celles-ci par striction ou cisaillement qui conduisent à la rupture finale.

Conditions :

Les défauts responsables de l'amorçage dans la rupture ductile sont :

- Éléments d'addition dans les alliages,
- Inclusions,
- Précipités (par traitement thermique),
- Les joints de grain (points triples).

Caractéristiques :

A l'échelle macroscopique, on voit des microreliefs appelés cupules. Un autre aspect pourrait être observé qui ressemble celui du "bois pourri"

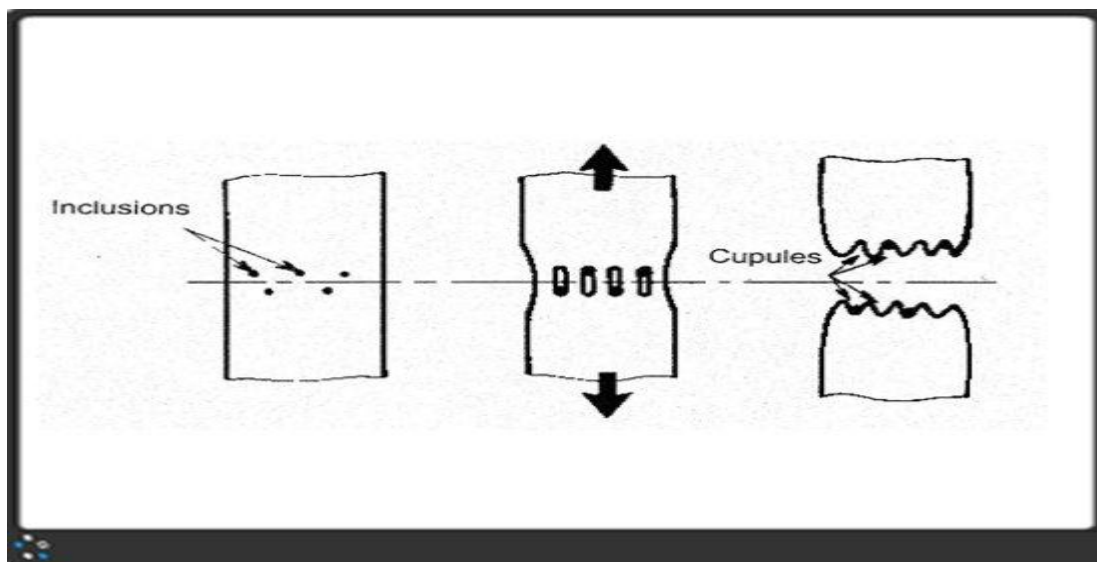


Fig
28
rupture
par
fissu
rati

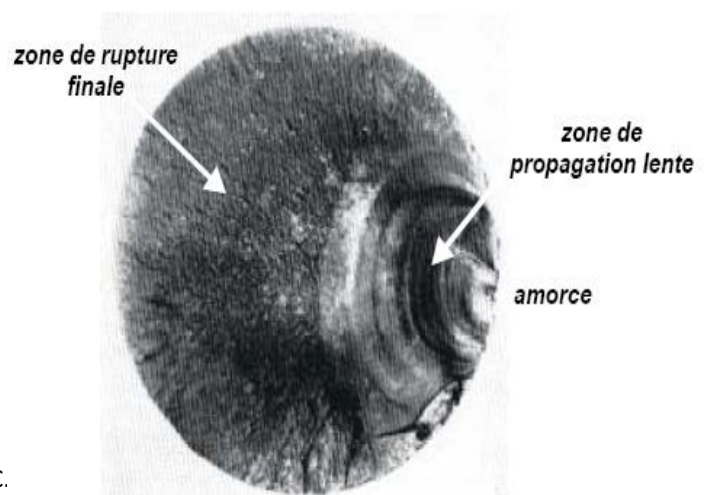
on ductile

V.2.3 Ruptures par fissuration progressive⁵

- Rupture par fatigue

Elle se manifeste en trois stades :

- 1 - stade d'amorçage ou d'initiation
- 2 - stade de propagation lente
- 3 - stade de rupture finale



rupture de fatigue d'unetige de piston
de 25cm de diamètre

⁵ Mécanisme de Rupture et de Croissance de Fissres C.

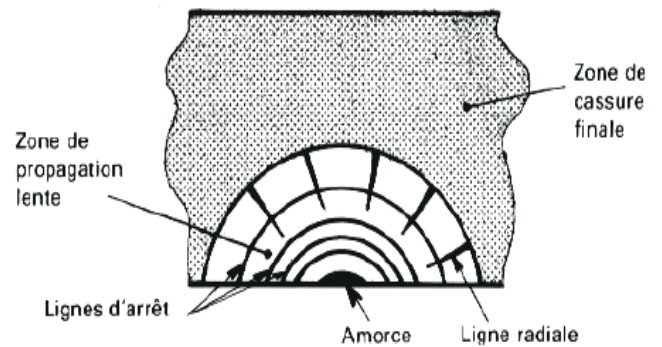
Fig.29 exemple de rupture progressive

Échelle macroscopique :

- une zone lisse à grains fins
(Région de propagation par fatigue,
Souvent transgranulaire)
- une zone ductile, semi-fragile ou fragile
(Région de rupture instantanée finale)

Échelle microscopique :

Apparition de stries de fatigue,
correspondant aux cycles de sollicitation
(Consolidation en extrémité de fissure à chaque arrêt de la contrainte)



Partie
expérimentale

I- Problématique : Durant les années 2010 et 2011, le laminoir à chaud d'ARCELORMITTAL ALGERIE a enregistré une très grande consommation des cylindres de travail du train finisseur notamment dans les cages 5 et 6 dont 70% sont à caractère accidentel et spécialement suite au défaut décaillage.

L'objectif de ce travail consiste à fixer les causes probables de cet écaillage accidentel et à y remédier.

Nous avons analysé l'impact de différents paramètres de laminage sur l'endommagement de nos cylindres.

L'ajustement et le contrôle de ces paramètres de laminage pris en considération permettront de ramener la consommation des cylindres du laminoir à chaud à une valeur très proche de la moyenne du groupe ArcelorMittal.

II- Forces agissantes sur les cylindres : il est très intéressant de connaître toutes les forces qui peuvent agir sur le cylindre pendant le laminage et définir lesquelles ont plus de sollicitation et plus d'impact.

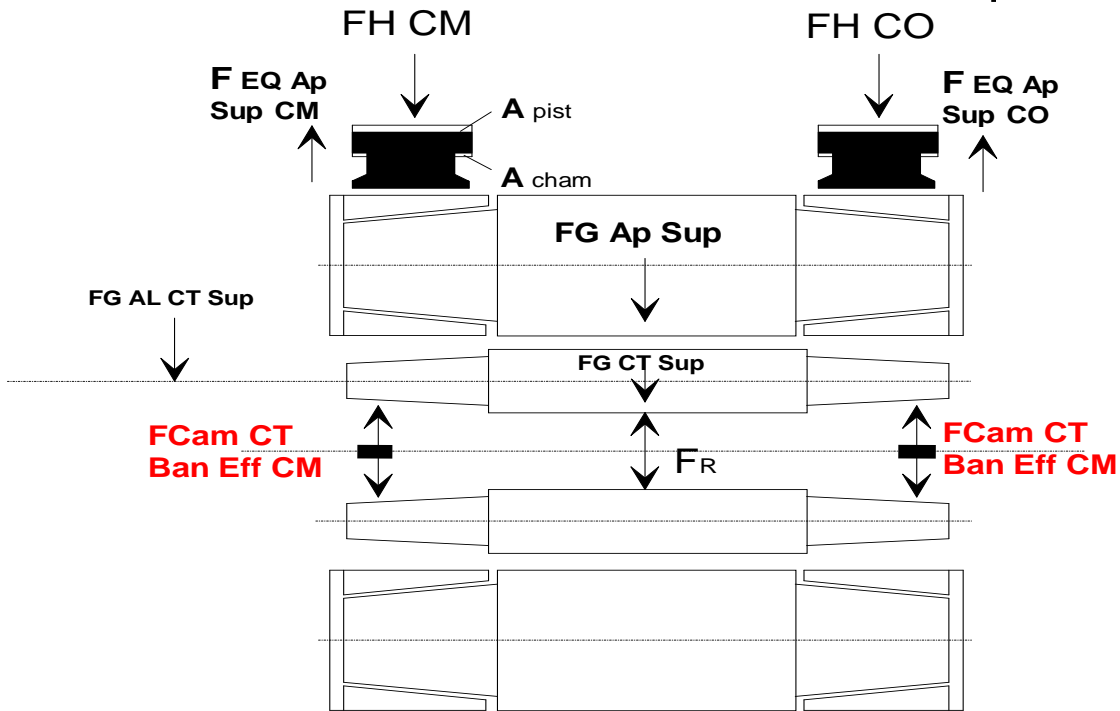
La figure (1) représente toutes les forces agissantes dans une cage de train de laminage et spécialement des forces dites forces de cambrage, force hydraulique de serrage.

D'autres forces interviennent de fait du contact cylindres-cylindres ou cylindres bande.

On rajoute aussi d'autres contraintes de type thermique et chimique suite au contact de cylindres avec la bande à laminier à des températures élevées de l'ordre de 1000 °c et l'eau de refroidissement d'une manière cyclique.

Coté
moteur

Coté
Opérateur



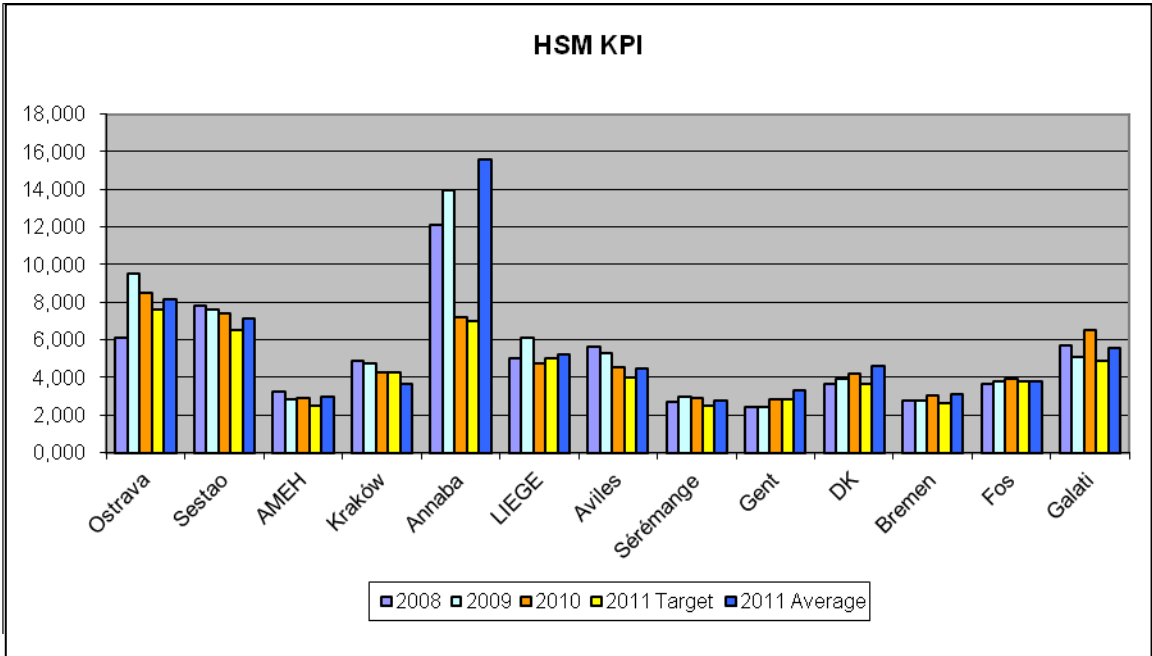
Fig(1) Schéma représentatif des forces de cambrage avec toutes les forces dans la cage du laminoir

- F.....force
- CM.....Coté moteur
- CO..... Coté Opérateur
- Ap Sup.....Cylindre d'appuis superieur
- CT Sup.....Cylindre de travail superieur
- G_Al.....indice de force de gravité des allonges
- G.....indice de force de gravité
- H.....indice de force hydraulique
- R.....indice de force de cylindre
- Eq.....indice de force d'équilibrage
- Apist.....air coté piston
- Acham.....air coté chambre
- Cam CT.....Cambrage cylindres de travail
- BanEff.....Effect de la bande

III- Statistiques des faits accidentels sur les cylindres de travail :

La figure (2) montre une comparaison graphique de la consommation des cylindres d'arcelor mittal- Algerie durant les années de 2008 à 2010 ainsi que le premier trimestre de l'année 2011 où elle a dépassé les 15 mm/kt , bien que la moyenne du groupe ne dépasse pas les 6mm/kt

Fig.2: Consommation des cylindres Annaba par rapport au groupe T1 2011



Dans le tableau 1, on trouve tous les cylindres écaillés pendant l'année 2010 et le premier trimestre de l'année 2011 qui ont fait l'objet de notre étude.

Dans le train finisseur, on utilise deux types de cylindres : les cylindres haut chrome (18% de Cr) dans les cages 1, 2, 3 et 4 et les cylindres à trempe indéfinie (ICDP) dans les cages 5 et 6.

La totalité des cylindres écaillés sont des cylindres en fonte à trempe indéfinie placés dans les cages 5 et 6.

L'écaillage de ces cylindres est de type sporadique comme il est montré sur la figure 3.

MOIS	NoMBRE	No CYLINDRES	CAGE	Ø CYLINDRES	MM PERDU	DEFAULTS
JANVIER	0	0	0	0,00	0,00	-

FEVRIER	1	3176	F3	657,60	7,60	Ecaillage
MARS	1	83474	F6	704,60	54,60	Ecaillage
AVRIL	1	83705	F6	707,00	57,00	Ecaillage
		2962	F4	677,10	27,10	Ecaillage
MAI	3	83416	F5	679,70	29,70	Ecaillage
		2961	F5	688,00	38,10	Ecaillage
JUIN	2	2688	F5	690,00	41,10	Ecaillage
		83706	F5	698,17	48,17	Ecaillage
JUILLET	1	83283	F3	671,00	21,00	Ecaillage
AOUT	1	2959	F5	678,85	28,95	Ecaillage
SEPTEMBRE	0	0	0	0,00	0,00	0
OCTOBRE	0	0	0	0,00	0,00	0
NOVEMBRE	1	83290	F5	661,50	11,50	Ecaillage
		3100	F5	662,31	13,31	Ecaillage
		74507	F5	681,91	1,91	Ecaillage
DECEMBRE	6	83433	F6	687,61	37,61	Ecaillage
		2579	F5	655,35	5,35	Ecaillage
		83414	F5	690,58	40,58	Ecaillage
		83640	F5	693,80	43,80	Ecaillage

MOIS	NOmbRE	Nº CYLINDRES	CAGE	Ø CYLINDRES	MM PERDU	DEFAUTS
	4	83395	F5	663,18	13,18	Ecaillage
		83451	F5	659,37	9,37	Ecaillage
JANVIER		3068	F5	711,14	61,14	Ecaillage
		74503	F5	651,82	1,82	Ecaillage
FEVRIER	1	2633	F5	708,78	58,78	Ecaillage
	CAF	109952	F5Sup	1367,58	97,58	Ecaillage
MARS	3	4440	F6	719,06	69,06	Ecaillage
		92330	F5	701,27	51,27	Ecaillage
		3069	F5	707,49	57,49	Ecaillage
	CAF	1407356	F6Sup	1407,43	137,43	Ecaillage

Tab .1 : Cylindres écaillés en 2010 et T1 de 2011

Ecaillage du cylindre N° 36660



Ecaillage sur cylindre N° 36657



Fig.3 : photos de quelques cylindres écaillés

IV- paramètres influant sur les cylindres de laminage à chaud :

Les sites d'endommagement des cylindres de travail peuvent être la table, les tourillons ou le raccordement tourillon-table, nous nous limiterons au cours de ce travail à l'analyse de la détérioration de la table des cylindres.

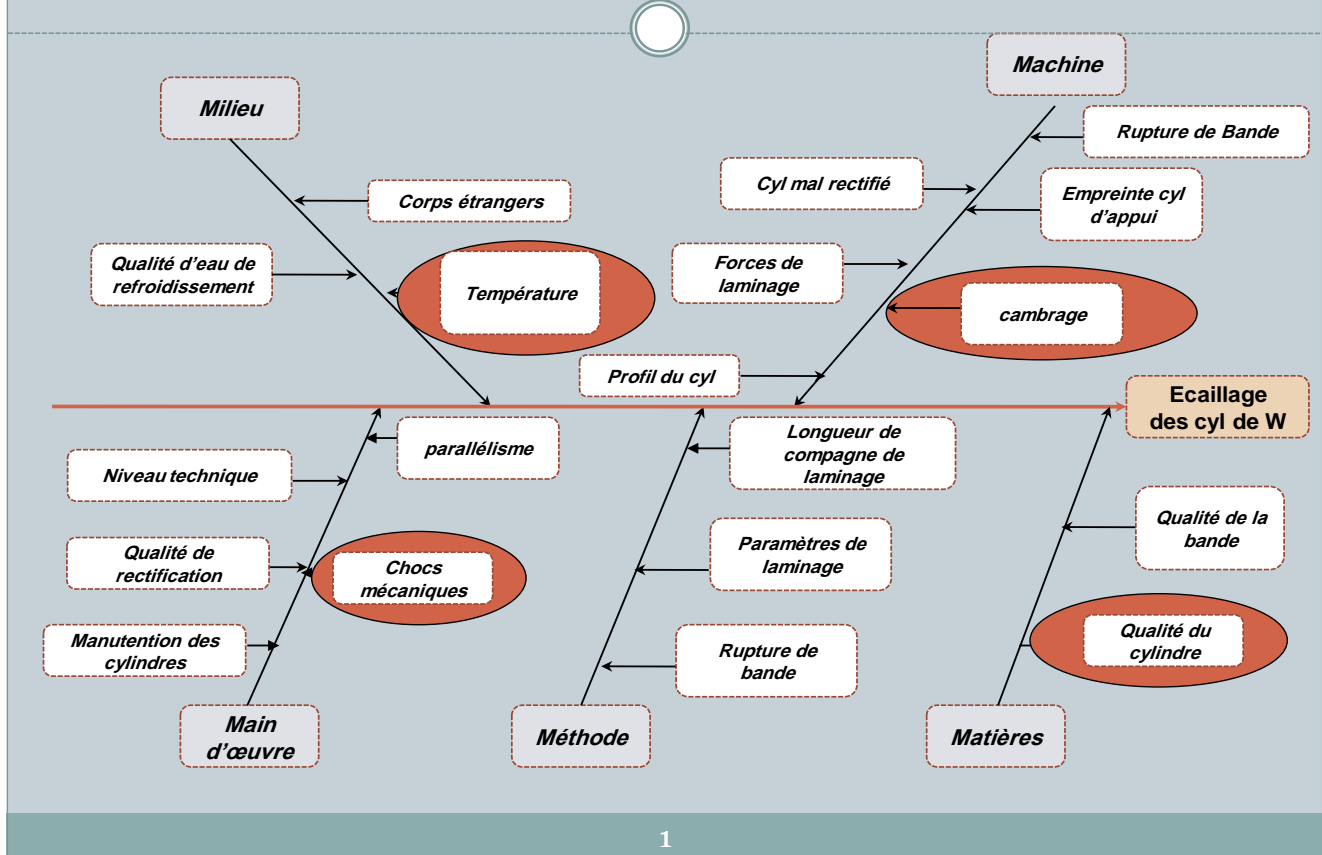
Méthodologie de travail :

Diagramme ISCHIKAWA : c'est une méthode japonaise basée sur le principe que chaque problème est sûrement source d'une défaillance dans un des cinq (05) M, qui sont : **M**achine, **M**ilieu, **M**atière, **M**éthodes, **M**ain d'œuvre.

Donc on forme cinq arêtes autour de l'objectif et on développe les différentes sources de problème pour chaque M.

La planche (1) montre les principales causes qui peuvent conduire à l'écaillage des cylindres, bien que la recherche est trop vaste, on se limitera à développer l'influence de quatre paramètres qui sont : la température, la qualité des cylindres, les chocs mécaniques et les forces de cambrage.

Ecaillage des cylindres



1

Planche .1 : paramètres influant sur l'écaillage des cylindres dans le laminage à chaud

II- Problématique : Durant les années 2010 et 2011, le laminoir à chaud d'ARCELORMITTAL ALGERIE a enregistré une très grande consommation des cylindres de

travail du train finisseur notamment dans les cages 5 et 6 dont 70% sont à caractère accidentel et spécialement suite au défaut décaillage.

L'objectif de ce travail consiste à fixer les causes probables de cet écaillage accidentel et à y remédier.

Nous avons analysé l'impact de différents paramètres de laminage sur l'endommagement de nos cylindres.

L'ajustement et le contrôle de ces paramètres de laminage pris en considération permettront de ramener la consommation des cylindres du laminoir à chaud à une valeur très proche de la moyenne du groupe ArcelorMittal.

II- Forces agissantes sur les cylindres : il est très intéressant de connaître toutes les forces qui peuvent agir sur le cylindre pendant le laminage et définir lesquelles ont plus de sollicitation et plus d'impact.

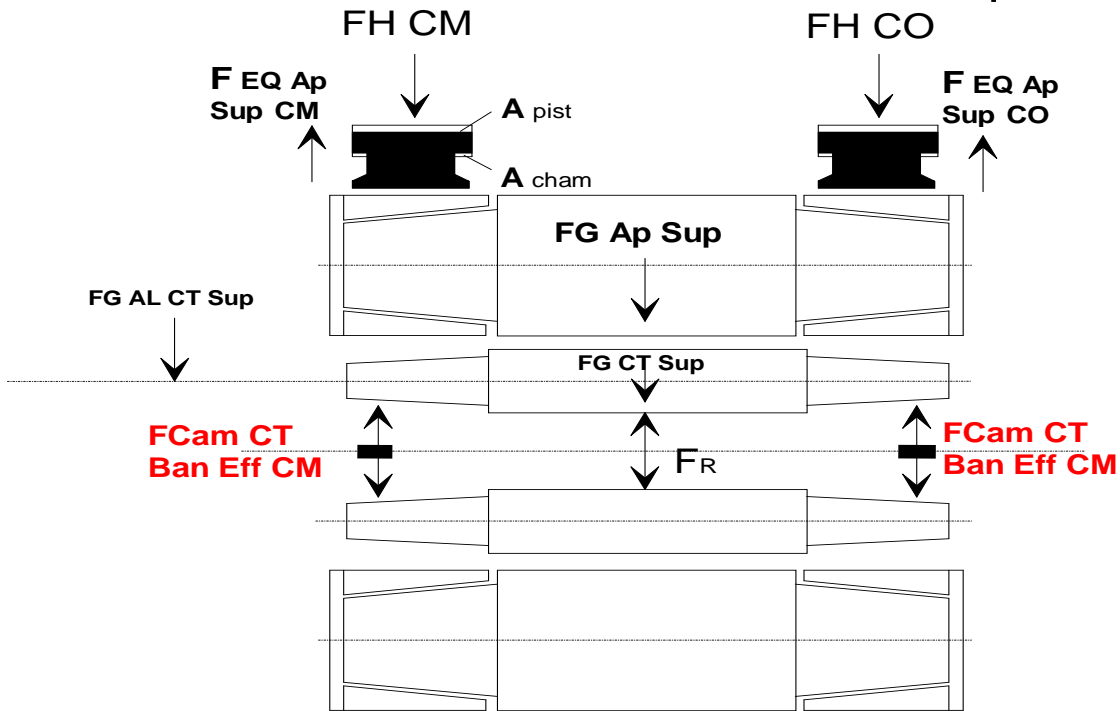
La figure (1) représente toutes les forces agissantes dans une cage de train de laminage et spécialement des forces dites forces de cambrage, force hydraulique de serrage.

D'autres forces interviennent de fait du contact cylindres-cylindres ou cylindres bande.

On rajoute aussi d'autres contraintes de type thermique et chimique suite au contact de cylindres avec la bande à laminer à des températures élevées de l'ordre de 1000 °C et l'eau de refroidissement d'une manière cyclique.

Coté
moteur

Coté
Opérateur



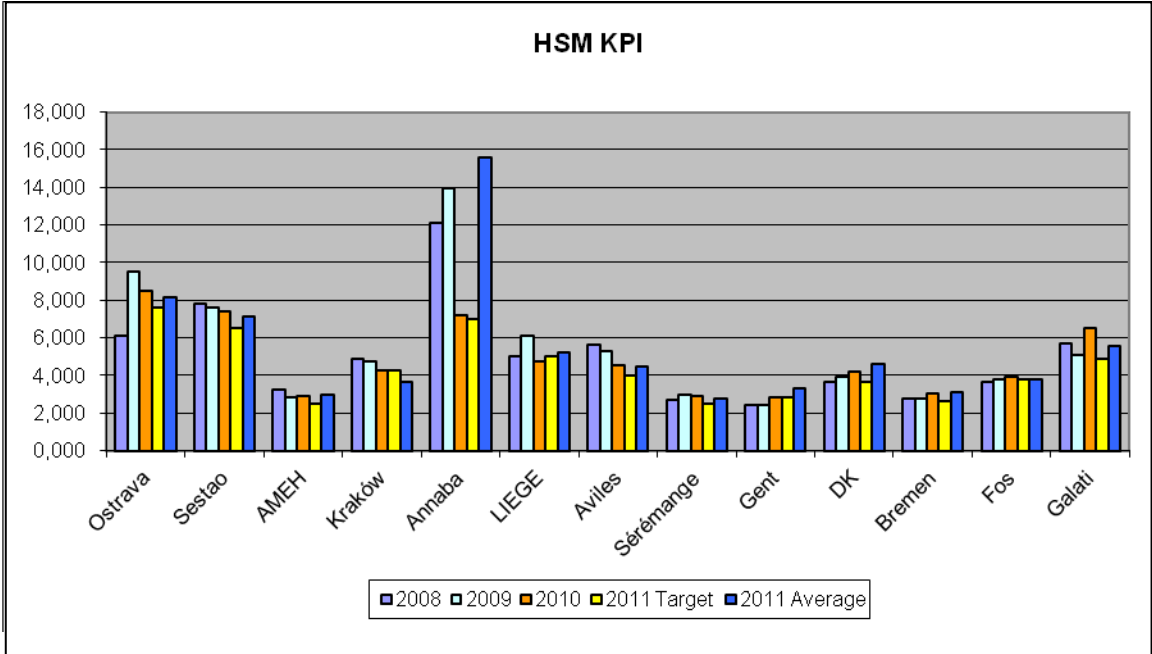
Fig(1) Schéma représentatif des forces de cambrage avec toutes les forces dans la cage du laminoir

- F.....force
- CM.....Coté moteur
- CO..... Coté Opérateur
- Ap Sup.....Cylindre d'appuis superieur
- CT Sup.....Cylindre de travail superieur
- G_Al.....indice de force de gravité des allonges
- G.....indice de force de gravité
- H.....indice de force hydraulique
- R.....indice de force de cylindre
- Eq.....indice de force d'équilibrage
- Apist.....air coté piston
- Acham.....air coté chambre
- Cam CT.....Cambrage cylindres de travail
- BanEff.....Effect de la bande

III- Statistiques des faits accidentels sur les cylindres de travail :

La figure (2) montre une comparaison graphique de la consommation des cylindres d'arcelor mittal- Algerie durant les années de 2008 à 2010 ainsi que le premier trimestre de l'année 2011 où elle a dépassé les 15 mm/kt , bien que la moyenne du groupe ne dépasse pas les 6mm/kt

Fig.2: Consommation des cylindres Annaba par rapport au groupe T1 2011



Dans le tableau 1, on trouve tous les cylindres écaillés pendant l'année 2010 et le premier trimestre de l'année 2011 qui ont fait l'objet de notre étude.

Dans le train finisseur, on utilise deux types de cylindres : les cylindres haut chrome (18% de Cr) dans les cages 1, 2, 3 et 4 et les cylindres à trempe indéfinie (ICDP) dans les cages 5 et 6.

La totalité des cylindres écaillés sont des cylindres en fonte à trempe indéfinie placés dans les cages 5 et 6.

L'écaillage de ces cylindres est de type sporadique comme il est montré sur la figure 3.

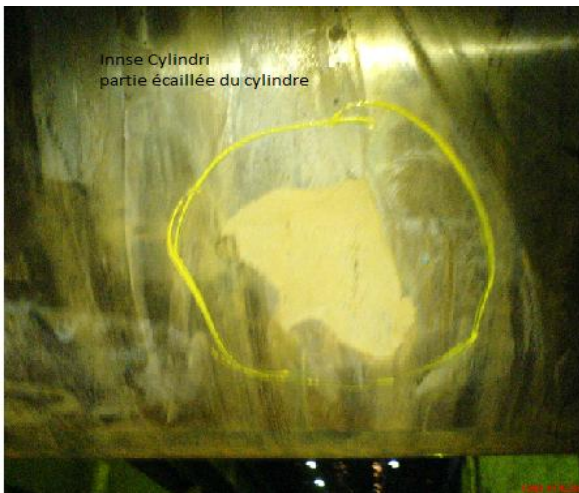
MOIS	NoMBRE	No CYLINDRES	CAGE	Ø CYLINDRES	MM PERDU	DEFAULTS
JANVIER	0	0	0	0,00	0,00	-

FEVRIER	1	3176	F3	657,60	7,60	Ecaillage
MARS	1	83474	F6	704,60	54,60	Ecaillage
AVRIL	1	83705	F6	707,00	57,00	Ecaillage
		2962	F4	677,10	27,10	Ecaillage
MAI	3	83416	F5	679,70	29,70	Ecaillage
		2961	F5	688,00	38,10	Ecaillage
JUIN	2	2688	F5	690,00	41,10	Ecaillage
		83706	F5	698,17	48,17	Ecaillage
JUILLET	1	83283	F3	671,00	21,00	Ecaillage
AOUT	1	2959	F5	678,85	28,95	Ecaillage
SEPTEMBRE	0	0	0	0,00	0,00	0
OCTOBRE	0	0	0	0,00	0,00	0
NOVEMBRE	1	83290	F5	661,50	11,50	Ecaillage
		3100	F5	662,31	13,31	Ecaillage
		74507	F5	681,91	1,91	Ecaillage
DECEMBRE	6	83433	F6	687,61	37,61	Ecaillage
		2579	F5	655,35	5,35	Ecaillage
		83414	F5	690,58	40,58	Ecaillage
		83640	F5	693,80	43,80	Ecaillage

MOIS	NOmbRE	Nº CYLINDRES	CAGE	Ø CYLINDRES	MM PERDU	DEFAUTS
	4	83395	F5	663,18	13,18	Ecaillage
		83451	F5	659,37	9,37	Ecaillage
JANVIER		3068	F5	711,14	61,14	Ecaillage
		74503	F5	651,82	1,82	Ecaillage
FEVRIER	1	2633	F5	708,78	58,78	Ecaillage
	CAF	109952	F5Sup	1367,58	97,58	Ecaillage
MARS	3	4440	F6	719,06	69,06	Ecaillage
		92330	F5	701,27	51,27	Ecaillage
		3069	F5	707,49	57,49	Ecaillage
	CAF	1407356	F6Sup	1407,43	137,43	Ecaillage

Tab .1 : Cylindres écaillés en 2010 et T1 de 2011

Ecaillage du cylindre N° 36660



Ecaillage sur cylindre N° 36657



Fig.3 : photos de quelques cylindres écaillés

IV- paramètres influant sur les cylindres de laminage à chaud :

Les sites d'endommagement des cylindres de travail peuvent être la table, les tourillons ou le raccordement tourillon-table, nous nous limiterons au cours de ce travail à l'analyse de la détérioration de la table des cylindres.

Méthodologie de travail :

Diagramme ISCHIKAWA : c'est une méthode japonaise basée sur le principe que chaque problème est sûrement source d'une défaillance dans un des cinq (05) M, qui sont : **M**achine, **M**ilieu, **M**atière, **M**éthodes, **M**ain d'œuvre.

Donc on forme cinq arêtes autour de l'objectif et on développe les différentes sources de problème pour chaque M.

La planche (1) montre les principales causes qui peuvent conduire à l'écaillage des cylindres, bien que la recherche est trop vaste, on se limitera à développer l'influence de quatre paramètres qui sont : la température, la qualité des cylindres, les chocs mécaniques et les forces de cambrage.

Ecaillage des cylindres

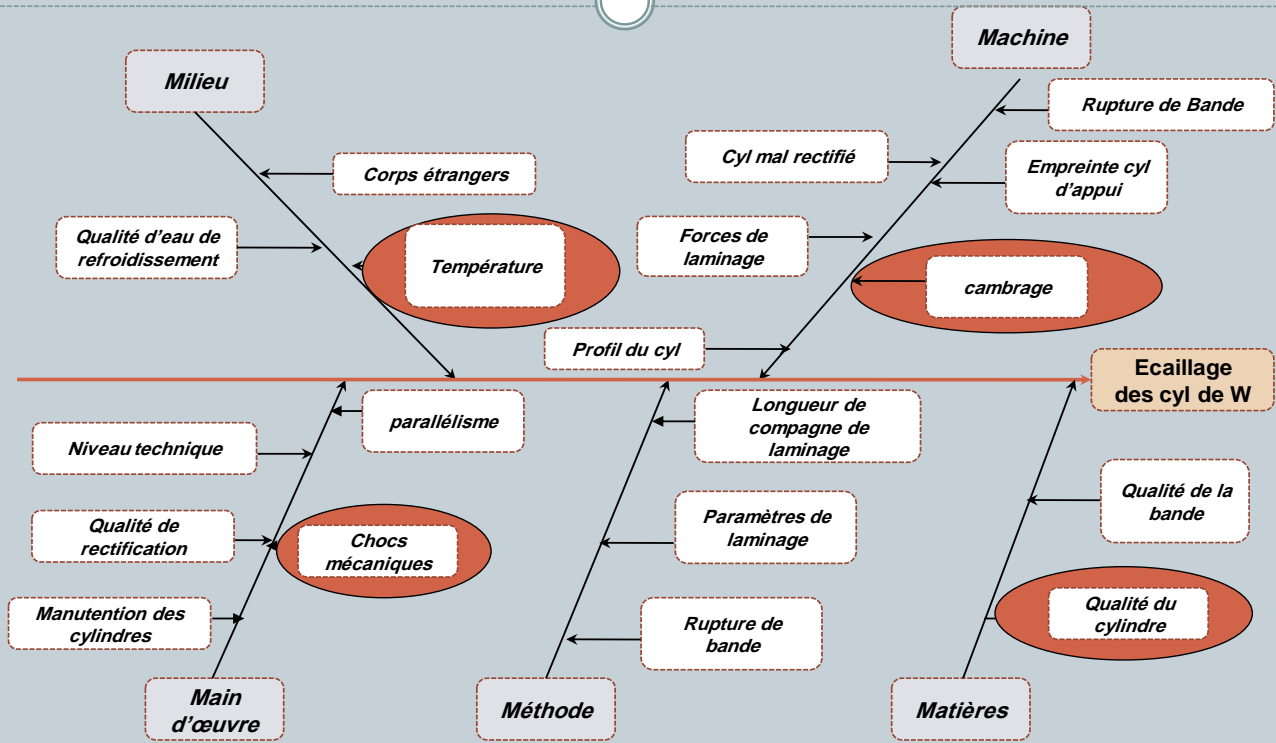
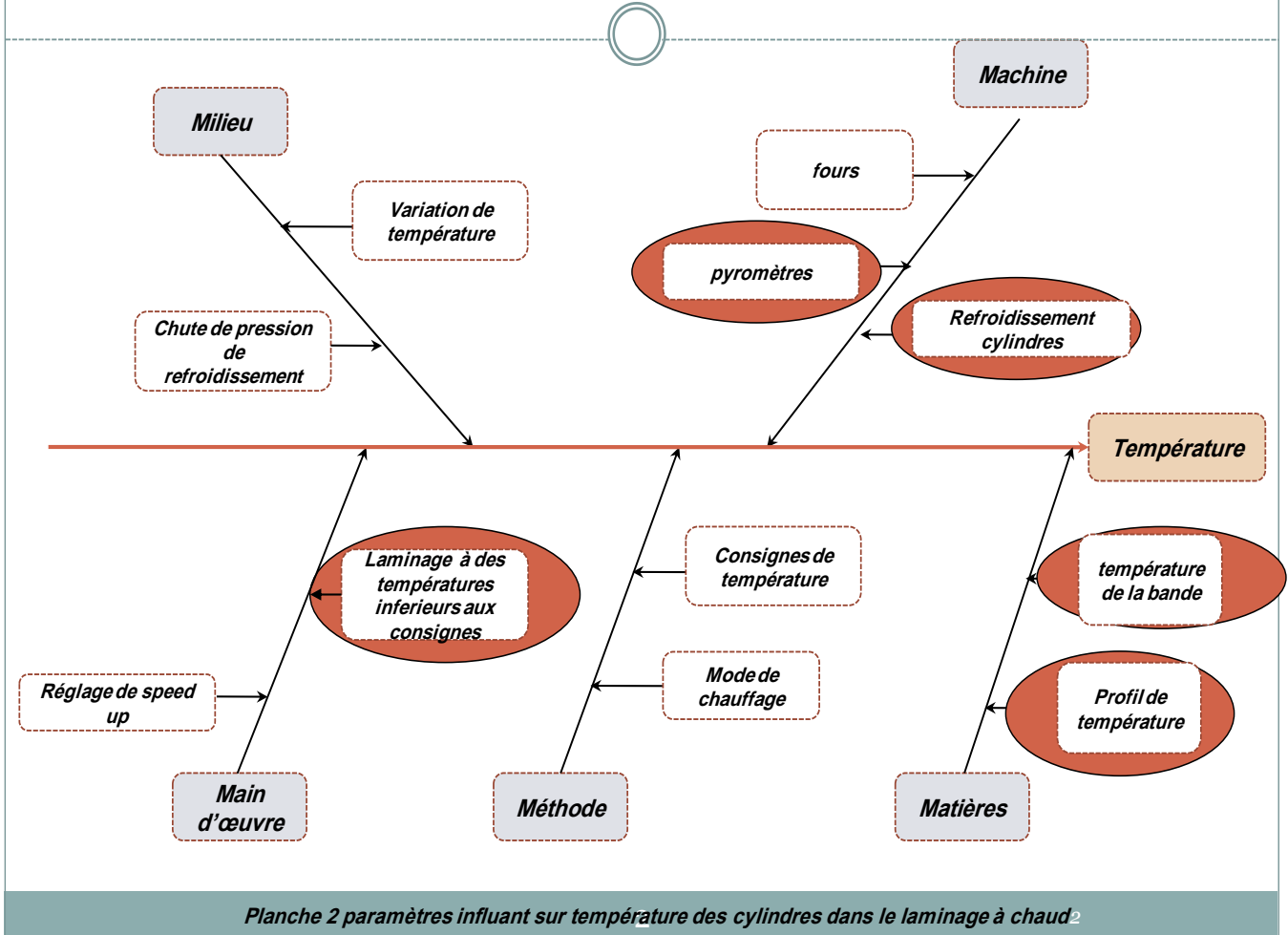


Planche .1 : paramètres influant sur l'écaillage des cylindres dans le laminage à chaud

IV.1 : influence de la température :

Température



IV.1.1 Impact direct :

Les sollicitations subies par les cylindres sont de nature diverse. Au cours de son service, le cylindre est sollicité de deux manières : mécanique et thermique.

Sous l'effet de la température et la qualité d'eau de refroidissement, les cylindres sont sollicités à deux types de chargement :

A) Un chargement thermique dû au contact de la bande à laminier portée à une température voisine de 1100 °c et au refroidissement par jet d'eau très peu de temps après.

Sous l'effet de la chaleur on site deux effets :

Effet superficiel, crique thermique : au cours de laminage, la surface du cylindre est amenée à environ 600 °c, dès que la matière à laminier vient à son contact, une partie de cette chaleur est éliminée par l'eau de refroidissement qui peut être prévue et une autre partie est transmise par conduction dans le corps du cylindre. Ainsi la surface subit des fluctuations thermiques cycliques importantes et assez rapides tandis que le corps du cylindre s'échauffe plus régulièrement et plus lentement jusqu' à l'abaissement à un équilibre thermique.

Les variations thermiques de la surface du cylindre entre le contact de la bande laminée et l'eau de refroidissement , crée une contrainte de compression qui est normalement suffisamment élevée pour

l'obliger à fléchir pour l'absorber à chaque fois que la partie chauffée se dégage de l'arc de contact ce qui la met sous tension, tension qui peut être l'origine de la naissance des criques thermiques.

Rupture par contrainte thermique pendant la mise en température : la progression thermique générale qui s'accumule dans le corps du cylindre provoque un réseau de contraintes dans le cylindre qui peuvent atteindre un niveau dangereux particulièrement au début de laminage.

Ce réseau de contrainte provient du fait que la partie extérieure du cylindre est chaude et a tendance à se dilater tandis que la partie interne, étant à une température plus basse, a moins tendance à se dilater. Une partie du cylindre est donc tirée contre l'autre, des parties du cylindre sont en tension tandis que d'autres sont sous compression.

Les éléments dangereux de ce réseau de contraintes sont ceux sous tension et dans les conditions de mise en température. La contrainte maximale en tension apparaît le long de l'axe central du cylindre dans le sens longitudinal et a tendance à provoquer la rupture transversale du cylindre à partir de l'intérieur c'est-à-dire à le faire éclater.

B- Un chargement physico-chimique :

L'agressivité du milieu de refroidissement du cylindre associé à l'évolution de la température de la surface du cylindre est à l'origine de l'oxydation du métal de la surface des cylindres. Cette oxydation peut conduire à de nouveaux types d'endommagements.

A chaque tour du cylindre le réseau de fissures thermiques qui s'était renfermé au contact de la bande s'ouvre de nouveau lorsqu'il se trouve brutalement refroidi. Ainsi les faces internes s'oxydent et ceci d'autant plus profondément que l'arrosage est faible et mal réparti, c'est-à-dire que la température du métal est plus élevée.

Une analyse à la microsonde de ces produits d'oxydation dans le cas d'une fonte à haute teneur en chrome a permis d'identifier une multitude d'oxydes du type :

FeO , Cr₂O₃, NiO, SiO₂, MnO .

Lorsque les lèvres des fissures sont suffisamment écartées à cause des produits d'oxydation de la matrice, les oxydes de la bande laminée (calamine) peuvent s'introduire dans les fissures en favorisant le déchaussement en micro-écaillages du métal.

Pour bien montrer l'impact des deux agressivités appliquées sur les cylindres sous l'effet de la température et la qualité d'eau de refroidissement, on a réalisé les deux essais suivants :

-Essai ultra-sonique sur une partie mal refroidie d'un cylindre de travail quarto réversible en fonte haut chrome (13% de Cr) présentant des criques à feu profondes (fig 3). Le choix du cylindre est dû au fait qu'on l'a laissé en service 37000 tonnes de production après l'apparition des criques ; bien qu'on sera obligé de changer un cylindre des cages 5 et 6 dès l'apparition de légères criques sous l'effet de son impact direct sur la bande



qualité de la laminée.

Fig.4 : défaut de crique à feu sur cylindre de travail quarto

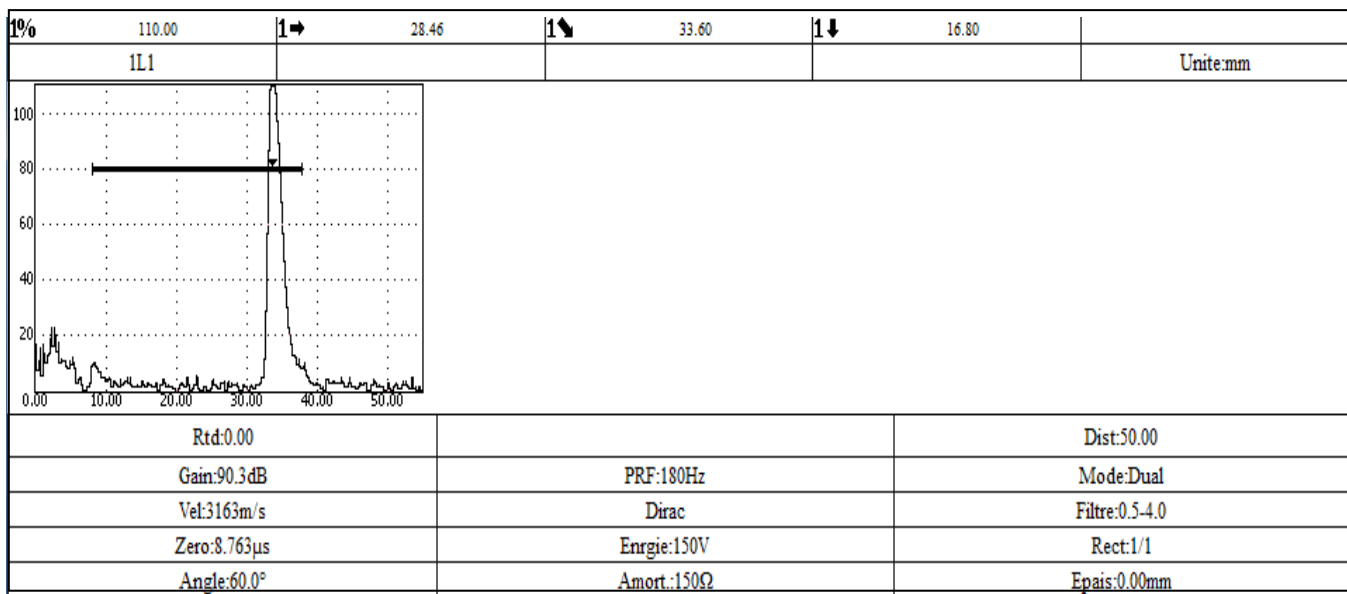
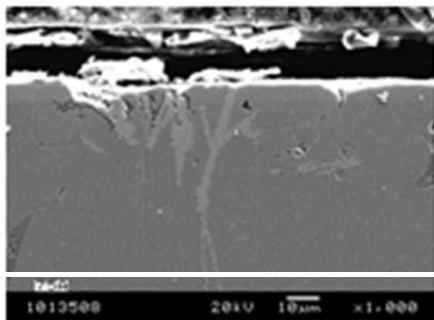


Planche.3. analyse par ultra-son d'un cylindre présentant des criques à feu

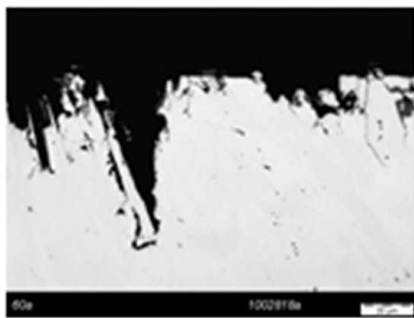
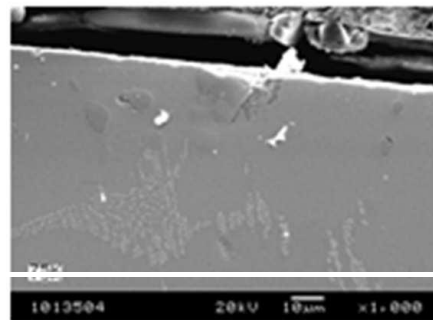
Les résultats montrent bien une pénétration de fissure allant jusqu'à 16 mm soit 0,5 mm par tonne laminée ou 1,6 mm par jour de laminage (planche.3).

L'absence d'outil de contrôle des fissures au niveau du laminoir à chaud d'Annaba a fait qu'en éliminant uniquement 7 mm de couche de travail, le maillage des criques à feu a disparu et le cylindre était prêt à être inséré dans la cage bien qu'une fissure de profondeur 9 mm existe encore et peut être source d'écaillage.

L'essai de corrosion, réalisé au niveau du laboratoire de la compagnie MARICHAL KETIN en Belgique, montre la pénétration de corrosion en fonction de la qualité d'eau pour plusieurs types de matériaux qui rentrent dans la gamme de fabrication des cylindres de laminage. Cette méthode consiste à solliciter le matériaux par des eaux de différentes grades d'acidité et à mesurer la profondeurs des pénétrations de corrosion (fig 5 et 6).



350ppm Cl⁻ +
200ppm Ca²⁺ +
0,60ppm HOCl
+ 25ppm PO₄³⁻ +
300ppm SO₄²⁻



350ppm Cl⁻

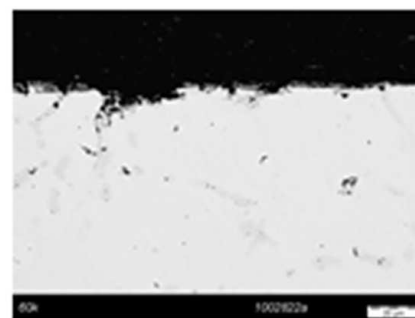


Fig.5 : influence des additifs dans l'eau de refroidissement sur la dégradation des cylindres de travail

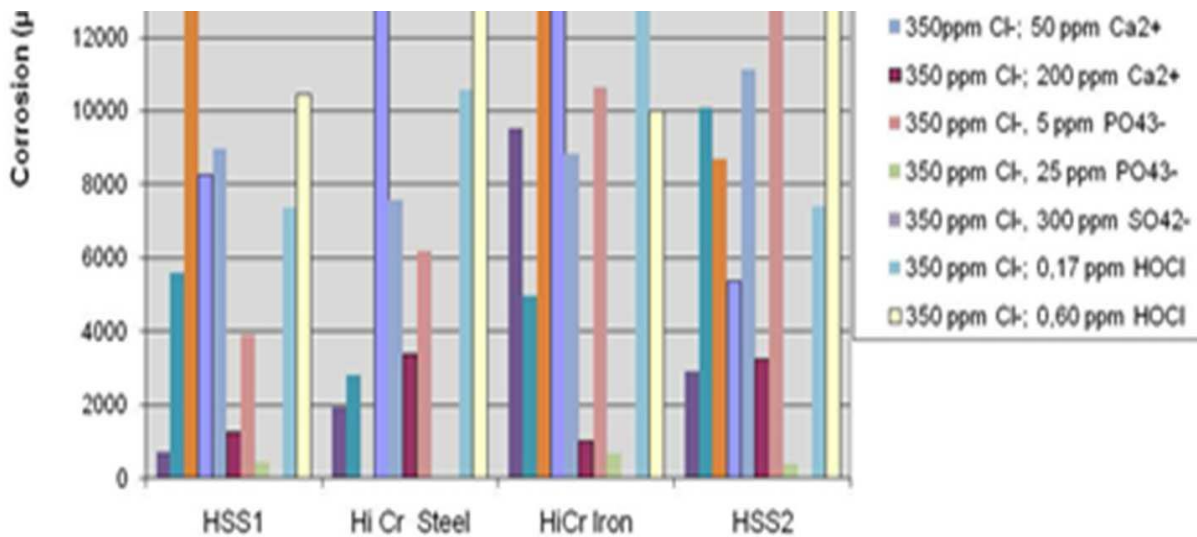


Fig.6 : essai de fatigue thermique – corrosion sur quelques type de matériaux utilisés dans la fabrication des cylindres

IV.1 .2- Impact indirect :

A) Profil de température de la bande:

Dans ce chapitre ,on ne s'intéressera pas à la température des cylindres au cours de laminage et son impact sur l'effet d'écaillage des cylindres mais sur la variation de la température sur la bande laminée à chaud (profil de température) et son influence sur deux grandeurs qui agissent sur les cylindres qui sont les forces de laminage et les forces de cambrage.

Le principe en cours de laminage est le suivant ;

Une basse température favorise l'apparition des ondulations au centre de la bande qui oblige les systèmes automatiques de contrôle (AGC : automatique gage control) et HGC : (hydraulique gage control) à donner des corrections rapides sur les forces de cambrage et moins rapide sur les forces de laminage.

Une haute température favorise l'apparition des ondulations aux bords de la bande et les systèmes de contrôle agissent cette fois de manière opposée.

Notant bien que le calcul des paramètres de laminage notamment les forces de laminage et les forces de cambrage se fait sur la base des paramètres géométriques, des paramètres chimiques et d'autre paramètre entre autres la température de la bande mesurée en cours de son passage du four au train finisseur par des **pyromètres optiques**,

Maintenant imaginons une bande dont la température mesurée avant train finisseur indique une valeur faible, donc les systèmes prévoient une grande force de laminage et une faible force de cambrage afin d'avoir un profil conforme de la bande, s'il y aura une défaillances sur la mesure des pyromètres et que la température réelle est très élevée à celle mesurée, les jauges d'épaisseur, planéité et profile mesurent l'impact de la température et donc donnent l'information aux deux systèmes de contrôle AGC et HGC, ces derniers appliquent des corrections rapides sur l'effort de cambrage et moins rapides sur l'effort de laminage , ceci nous met dans une situation «force de cambrage et laminage élevées en même temps » ce qui conduit à l'écaillage des cylindres s'il se répète souvent.

Une série d'essais d'étalonnage était nécessaire pour approuver l'efficacité des pyromètre du laminoir à chaud à bien mesurer la température des bandes dans les différentes zones du train de laminage.

Des mesures de températures ont été effectuées au niveau des quatre zones choisies selon la position des prises de température par les pyromètres :

Zone 1 : Pyromètre sortie four Type M1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Zone 2 : Pyromètre sortie quarto Type R1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Zone 3 : Pyromètre entrée finisseuse Type R1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Zone 4 : Pyromètre sortie finisseuse Type M1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Avec le système de thermographie composé de la caméra infrarouge FLIR A40M avec le bus Firewire et du micro-ordinateur le logiciel Thermacam Research 2.9 de Flir pour l'acquisition, la sauvegarde et le prétraitement des données.

La comparaison entre les deux systèmes de mesure LAC (laminoir à chaud) et l'URASM Les paramètres de mesure de la température par la caméra infrarouge FLIR A40M sont:

Humidité relative = 60%	Température apparente réfléchi = 25°C	Température atmosphérique =2 5°C
-------------------------	---------------------------------------	----------------------------------

Zone 1 : Sortie four

		Paramètres Objet		Emissivité = 0.80	Distance = 4m
Numéro de brame	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre (°C)	Température Caméra infrarouge Flir (°C)	Ecart (°C)
8726044	1	12h01	886	886,7	0,7
8726045	2	12h08	1038	1038,3	0,3

Tab.2 : Tableaux de mesure des Températures zone défournement

D'après les mesures effectuées au niveau de la Zone 1 ,sortie du four de l'atelier LAC, on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes sont proches l'une de l'autre(fig.7 et tab.2).

- Pour la première mesure l'écart est de **0,7°C**

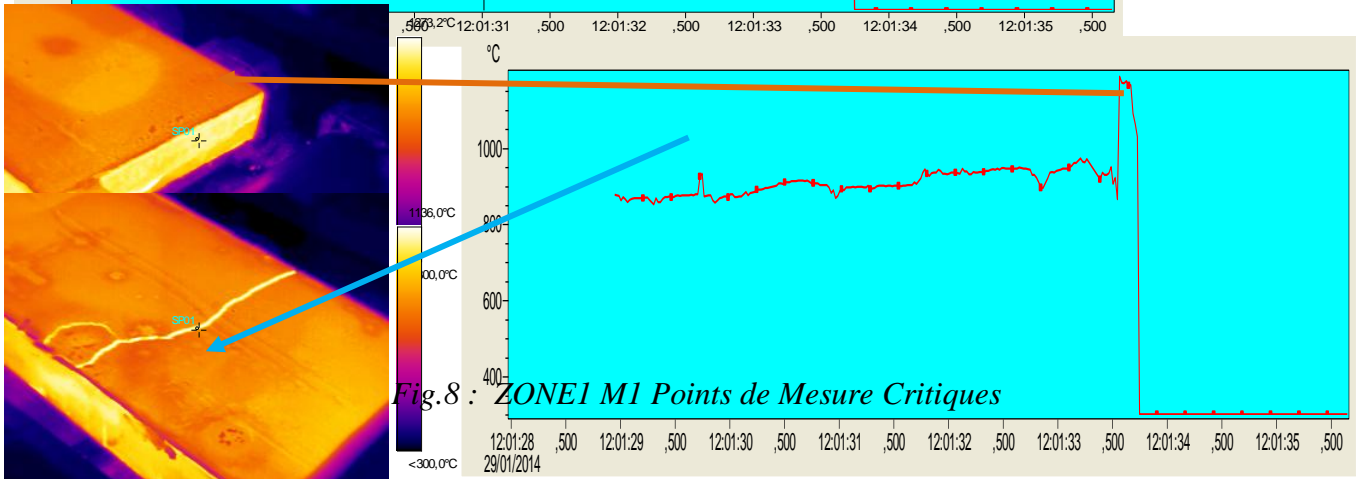
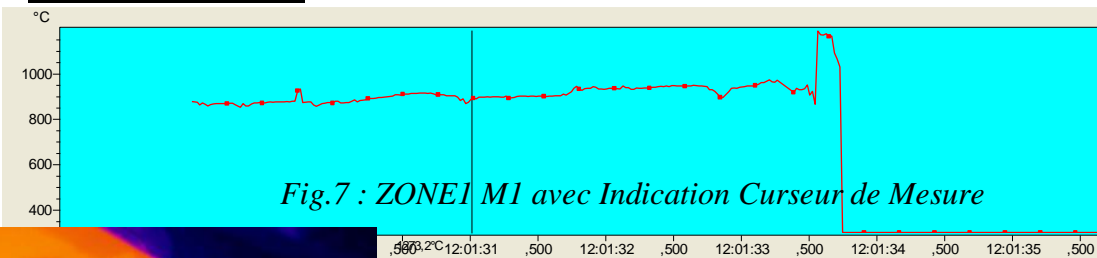
- Pour la deuxième mesure l'écart est de **0,3°C**

A noter qu'on a constaté deux pics de température pour la première mesure (Fig.8) (Zone1 M1 Points de Mesure Critique) due à l'absence de la calamine sur la surface de la brame (Numéro de la brame 8726044) après défournement:

Premier pic de température ordre température est de : 932,9°C

Deuxième pic de température ordre température est de :1186°C

Première Mesure



Zone 2 : Sortie Quarto

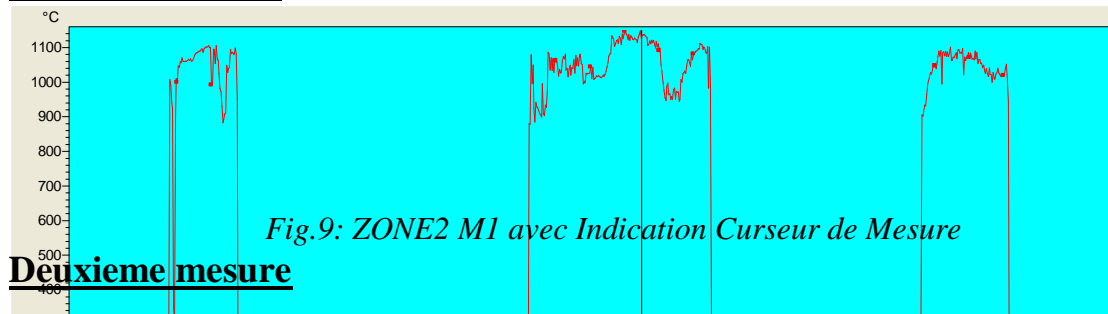
Numéro de brame	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre	Température Caméra infrarouge	Ecart ΔT (°C)
8726049	1	12h32	1128,67	1128,90	0,23
8726050	2	12h35	1126,23	1127,00	0.77

Tab.3 : Tableaux de mesure des températures zone sortie réversible

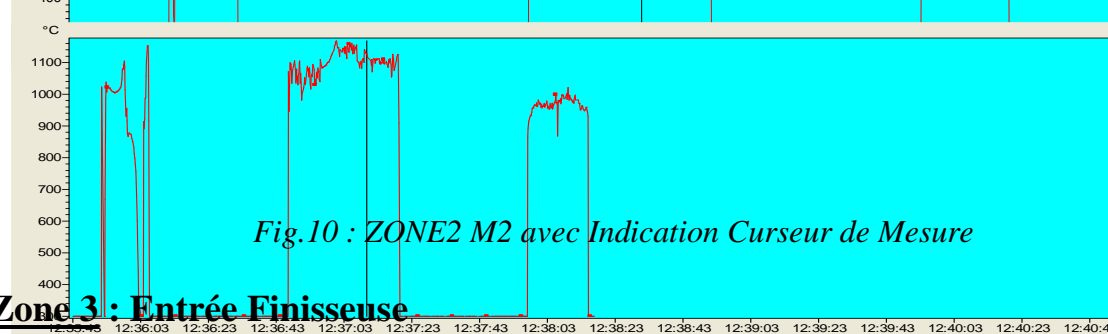
D'après les mesures effectuées au niveau de l'atelier LAC pour la zone sortie Quarto, on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes sont proches l'une de l'autre (Tab.3 et fig.9 et 10).

L'écart de la première mesure de la température ΔT (°C) est **0,23 °C**.
 L'écart de la deuxième mesure de la température ΔT (°C) est **0,77 °C**.

Première mesure



Deuxieme mesure



Zone 3 : Entrée Finisseuse

Paramètres Objet Emissivité = 0.75 Distance = 4m

Numéro de brame	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre (°C)	Température Caméra infrarouge Flir (°C)	Ecart (°C)
8726055	1	13h43	1030,62	1030,20	0,42
8726056	2	13h50	1045,94	1046,10	0,16

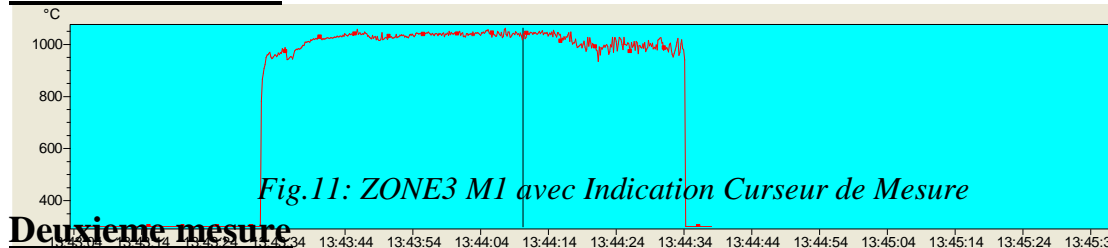
Tab.4 : Tableaux de mesure des températures zone entrée finisseuses

D'après les mesures effectuées au niveau de l'atelier LAC on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes de Température sont proches l'une de l'autre Tab.4 et fig.11 et 12.

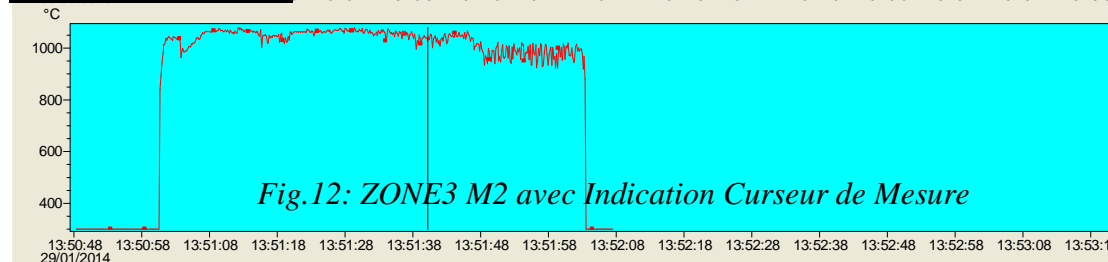
L'écart de la première mesure de la température ΔT (°C) est **0,42°C**.

L'écart de la deuxième mesure de la température ΔT (°C) est **0,16°C**

Premiere mesure



Deuxieme mesure



Zone 4 : Sortie Finisseuse

Paramètres Objet Emissivité = 0.60 Distance = 4m

Numéro de	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre	Température Caméra infrarouge	Ecart (°C)
-----------	--------	--------------------	-----------------------	-------------------------------	------------

brame			(°C)	Flir (°C)	
8726059	1	14h03	902,083	902,00	0,083
8726060	2	14h09	902,880	902,5	0,380

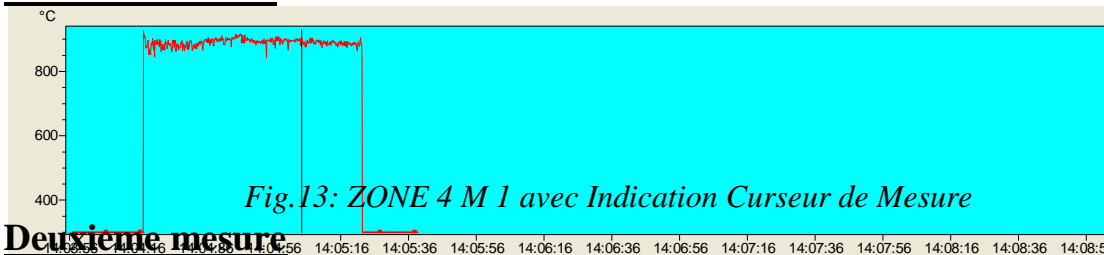
Tab.5 : Tableaux de mesure des températures zone sortie finisseuses

D'après les mesures effectuées au niveau de l'atelier LAC on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes de Température sont proches l'une de l'autre (Tab.5 et fig.13 et 14).

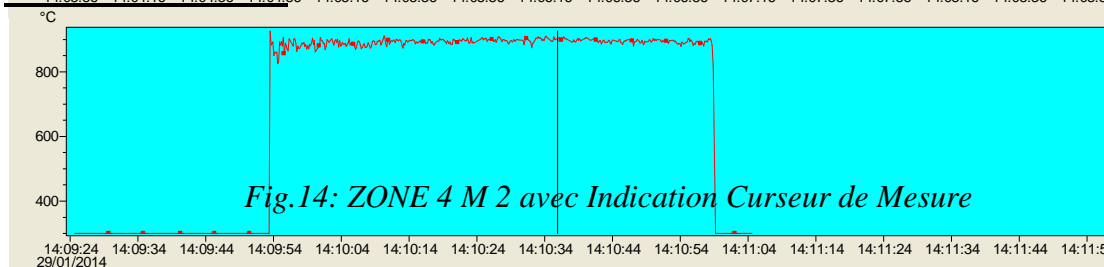
L'écart de la première mesure de la température ΔT (°C) est **0,083°C**.

L'écart de la deuxième mesure de la température ΔT (°C) est **0,380°C**.

Première mesure



Deuxième mesure



Conclusion :

L'écart maximal entre les mesures effectuée par les deux systèmes pyromètres du LAC et la caméra infrarouge de l'URASM, au niveau des différentes zones du laminage est de l'ordre **0,77°C**

Cet écart répond aux spécifications métrologiques pour la grandeur de mesure de température au niveau des différentes zones du laminoir à chaud.

Une série d'essai de laminage des brames défournées à plusieurs intervalles de temps, nous a permis de prélever les profils de température représentés dans le tableau 06, ces températures sont des moyennes mesurées par notre caméra infrarouge comme le montre la figure 15 :

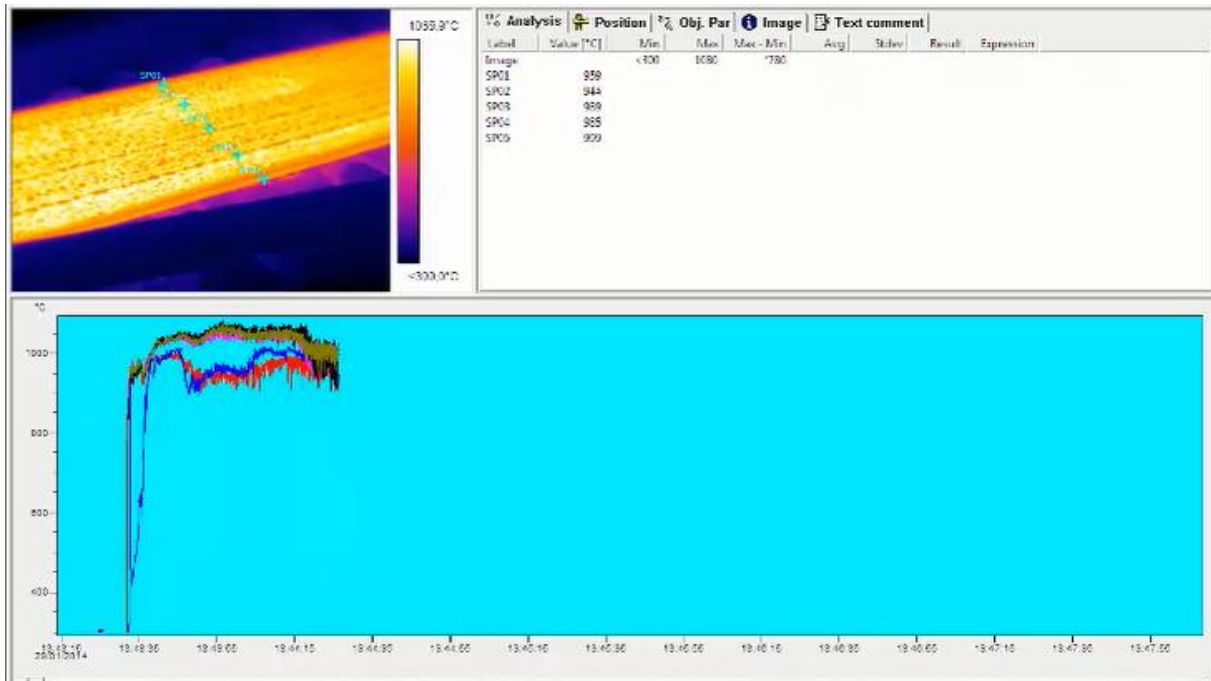


Fig.15 : mesure de profile de température de la bande entrée train finisseur.

Tab.6. Tableaux de mesure profile de température en fonction du temps de défournement

Temps de défournement Min	15	25	35	45	60	75
Temp moy centre °c	1035	1032	1032	1035	1026	1027
Temp moy CM °c	1031	1032	1027	1031	1021	1018
Temp moy CO °c	1030	1030	1010	1009	996	992

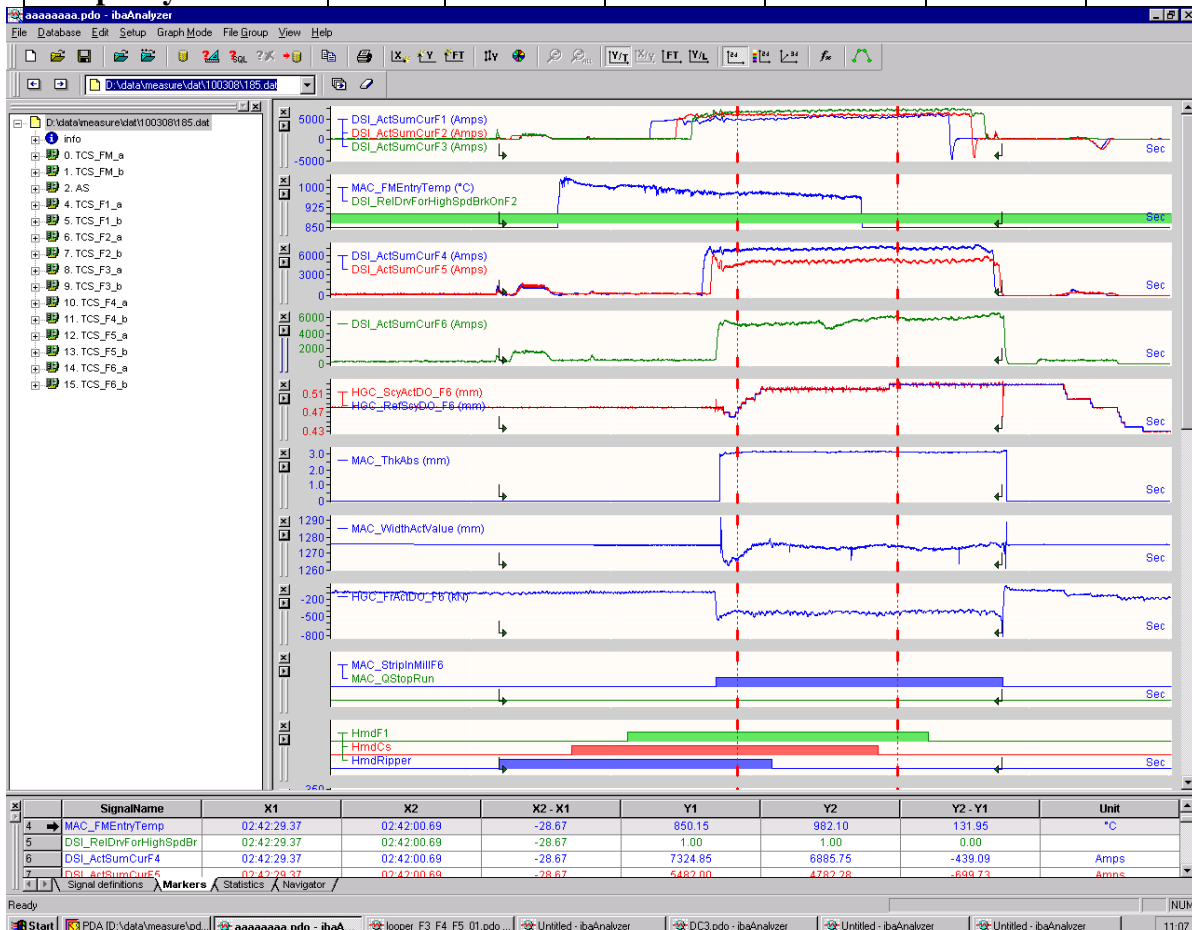


Planche .4 : variation des forces de laminage et de cambrage d'une bande laminée à chaud

On note bien qu' à chaque essai , l'opérateur sera obligé de rapporter des corrections au parallélisme des cages finisseuses pour éviter le cintrage des bandes et ainsi éviter des ébauches ou avaries.

En utilisant le contrôle graphique par notre système IBA analyser et en suivant les variations des forces de cambrage et force de laminage en fonction du profil de température comme le montre la planche 4, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Une variation de 20°C de température entrée finisseuses fait varier les forces d'engagement de 100 KN et les forces de cambrage de 350 KN.
- Un changement de 05 points sur les valeurs de correction pour une épaisseur moyenne de 3 mm fait varier les forces d'engagement de 200 KN.
- Les changements multiples aggravent énormément les valeurs DO (Drive side – Operateur side).

L'intervalle de défournement (temps) influe considérablement sur le profil de température. Ce dernier crée un gradient de forces sur les cylindres entre la partie opérateur et la partie moteur.

IV.2 : Influence de la qualité des cylindres :

Diagramme ISHIKAWA (qualité de cylindre)

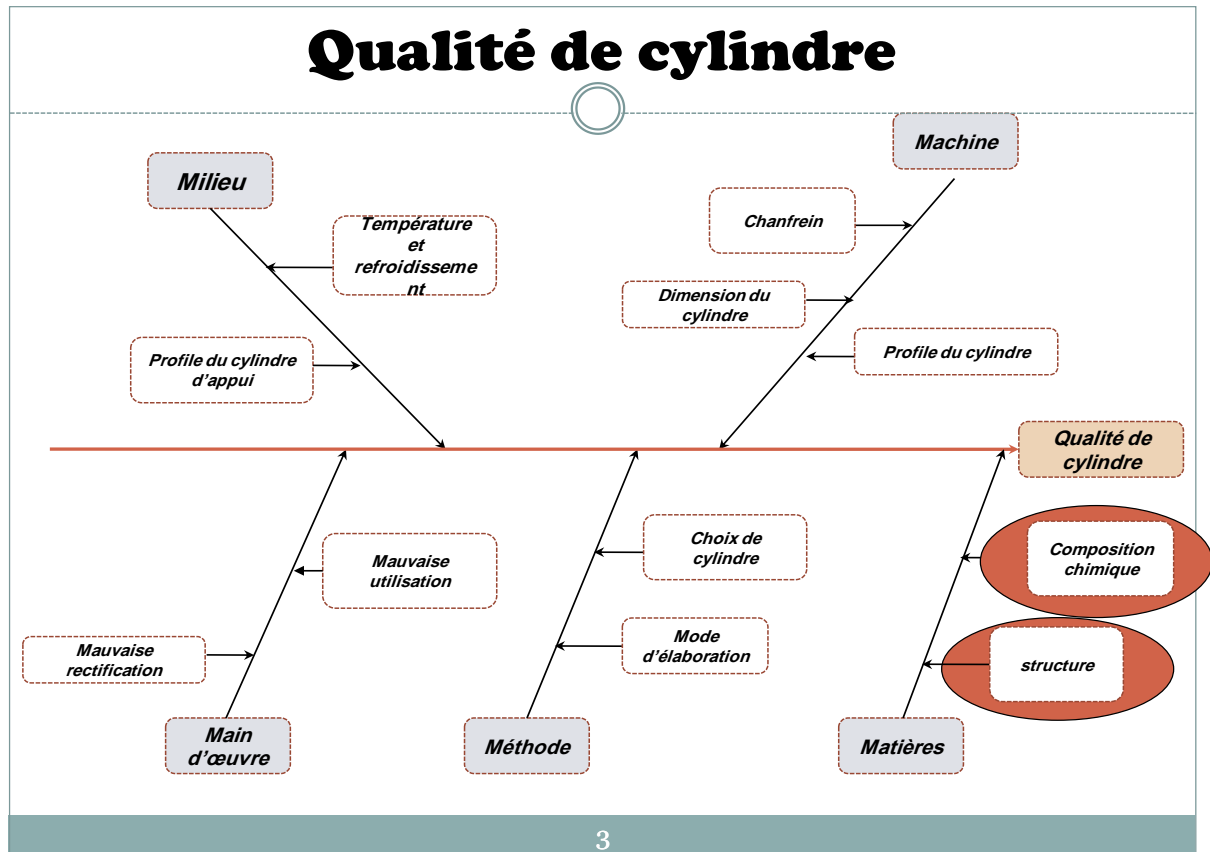


Planche.5 : paramètres influant sur la qualité des cylindres dans le laminage à chaud

Pendant notre étude et durant les années 2011-2013 nous avons soumis 28 échantillons des cylindres écaillés à des essais de dureté, chimique et structurale. Nous montrons ici trois cas d'étude des cylindres de trois fournisseurs reconnus mondialement. Il s'agit de :

MARICHAL KETIN Belgique
 DAVY ROLLS Royaume unis
 INNSE CILINDRI Italie

IV.2.1 Cas cylindre MKB :

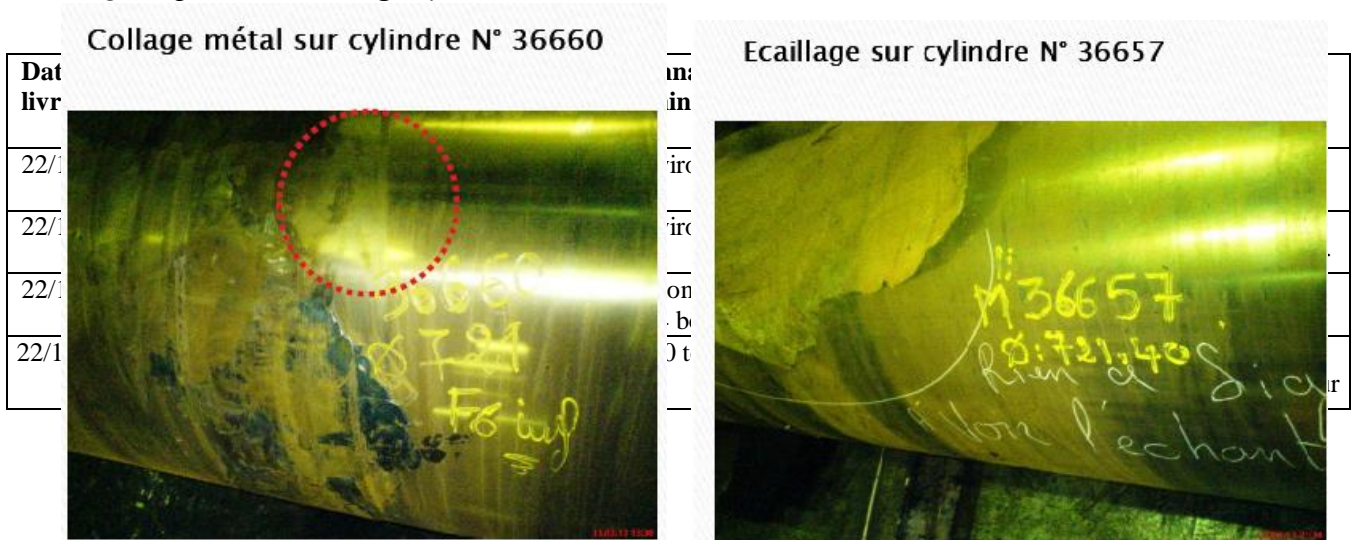
L'étude a été initiée à la suite des problèmes rencontrés lors de l'utilisation des 04 cylindres en fonte ICDP d'origine MARICHAL KETIN :

- 03 cylindres ont subit des collages métal dès les premières utilisations (laminage d'environ 1500 tonnes).
- 01 cylindre a subit un écaillage profond sur 70 mm (la totalité de la couche de travail).

Il a été mis à notre disposition un échantillon prélevé sur le fragment détaché du cylindre écaillé (Matricule 36657). Les coupes micrographiques ainsi que les analyses ont été effectuées sur une section située à environ 10 mm de la surface de la table du cylindre.

ASPECT MACROGRAPHIQUE DES CYLINDRES ENDOMMAGES :

Fig.16 :photosd'écailage cylindres MKB



Tab .7 : statistiques des cylindres écaillés du fournisseur MKB

RESULTATS D'ANALYSES :

Essais de dureté :

Shore C mesurée	Shore C spécifié sur certificat MARICHAL KETIN	
65	Bas	80.6
	milieu	79.3
	haut	79.6

Analyses chimiques :

Elément (%)	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
Analyse	4.07	0.89	0.90	0.011	0.014	4.20	1.77	0.43
Sur certificat MARICHAL KETIN	3.42	0.95	0.97	Non spécifié	Non spécifié	4.36	1.74	0.39

Tab .8 : analyse chimique d'un échantillon de cylindre MKB écaillé

Microstructure/ Fonte hypo eutectique : Ledeburite + bainite

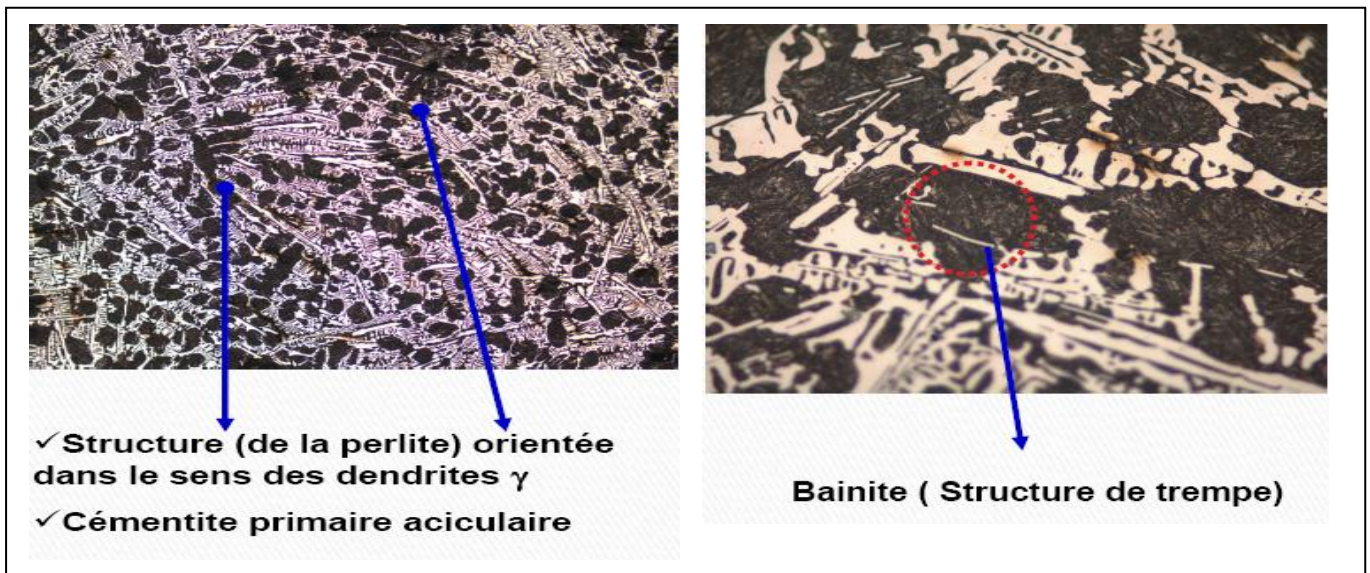
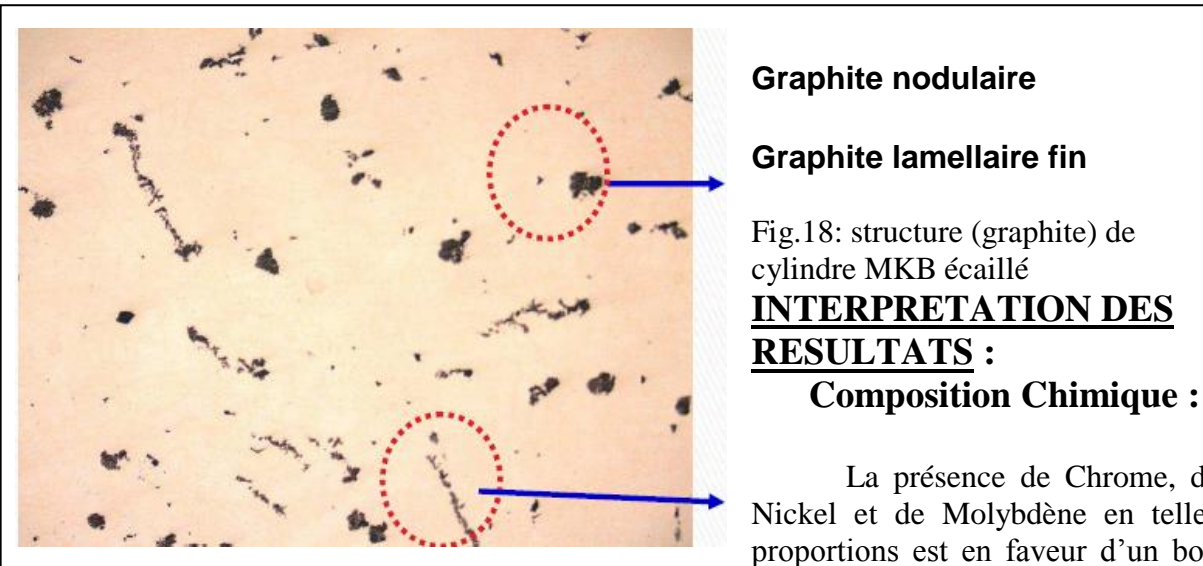


Fig .17 : analyse structurale d'un échantillon de cylindre MKB

Microstructure :



INTERPRETATION DES RESULTATS :

Composition Chimique :

La présence de Chrome, de Nickel et de Molybdène en telles proportions est en faveur d'un bon

niveau de dureté superficielle et par conséquent une bonne tenue à l'usure du cylindre.

~~Par contre la teneur en carbone est élevée par rapport à celle spécifiée dans le certificat du fournisseur et aussi celle des fontes faiblement alliées destinées à la fabrication des cylindres de travail .Usuellement , cette teneur ne devrait pas dépasser 3,6% (Tab.8).~~

Microstructure :

Points forts: La présence simultanée d'eutectique et de bainite est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle (fig.17).

Points faibles :

- Orientation dendritique de la structure.
- Cémentite primaire en grande proportion et de forme aciculaire fragilisante (conditions de refroidissement pendant la solidification du cylindre).
- Présence de graphite (lamellaire et nodulaire) sachant que dans les fontes blanches tout le carbone devrait précipité sous forme de cémentite ou autre carbure (conditions de refroidissement pendant la solidification du cylindre) mais ceci décrit bien les caractéristiques des cylindres en fontes à trempe indéfinie (fig.18).

Dureté:

La dureté réelle est inférieure à celle spécifiée dans le certificat du fournisseur de 14 points. Le carbone , qui devrait augmenter la dureté de la table du cylindre sous forme de cémentite alliée , a précipité en grandes proportion sous forme de graphite.

CONCLUSIONS :

L'endommagement des cylindres objet de cette étude est vraisemblablement dû à des anomalies microstructurales ; résultat de mauvaises conditions de refroidissement pendant la

coulée du cylindre ainsi qu'un traitement thermique non adéquat donnant lieu aux anomalies suivantes:

- Présence de cémentite primaire aciculaire en proportion importante (forme aciculaire fragilisante).
- Présence de graphite en grandes proportions, ce qui montre que les conditions de solidification n'ont pas été en faveur de la formation de la cémentite favorable aux conditions de travail des cylindres, l'excédant de carbone a précipité sous forme de graphite.

IV.2.2.Cas des cylindres DAVY ROLL :

Il a été mis à notre disposition deux (02) fragments d'écaillés détachés d'un cylindre d'origine Davy Roll .

INVESTIGATIONS EN LABORATOIRE :

✓ COMPOSITION CHIMIQUE

L'analyse chimique a été effectuée par voie spectrale et a donnée les résultats suivants :

élément	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ti	Cu	Ni	Mo
%	4.47	0.80	0.77	0.016	0.014	1.38	0.016	0.027	4.07	0.26

Tab .9 : analyse chimique d'un échantillon de cylindre DAVY ROLL écaillé

Il s'agit d'une fonte hypo eutectique faiblement alliée au Chrome et au Nickel

Il est à noter que le taux de carbone pour les cylindres travail de trains finisseurs continus ne dépasse pas 3,6 %

✓ ANALYSE MICROSCOPIQUE :

Des sections métallographiques ont été préparées sur les deux échantillons perpendiculairement au faciès de rupture. Les observations ont été effectuées au microscope à des grossissements allant de 150 X à 300 X.

Observation sans attaque :

Elle montre :

- Présence de graphite pseudo-lamellaire de taille hétérogène.
- Présence de fissures se propageant à l'interface matrice-graphite (le long des lamelles de graphite).
- Présence de lamelles de graphite enchevêtrées (Fig. 19).



Figure n°1 : Graphite de tailles hétérogène
G = 150X



Figure n°2 : Fissures se propageant le long des lamelles de graphite
G = 300X

Fig.19. *structure sans attaque chimique d'un*

Observation après révélation de la structure :

Elle montre une microstructure de fonte truitée (mi-blanche, mi-grise) (Fig. 20)

- Présence graphite
- Présence d'eutectique (lédeburite)
- Matrice bainitique

INTERPRETATIONS DES RESULTATS :

Composition Chimique :

- La présence de chrome, de Nickel et de Molybdène en telles proportions est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle et par conséquent une bonne tenue à l'usure
- La teneur en carbone est élevée par rapport aux fontes faiblement alliées destinées à la fabrication des cylindres de travail, usuellement cette teneur ne dépasse pas 0,36% (tab.9).

Microstructure :

- La présence simultanée d'eutectique, de graphite et de bainite est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle (fig.20).
- La localisation du graphite dans cette fonte, relativement dure, caractérise les fontes à trempe indéfinie.

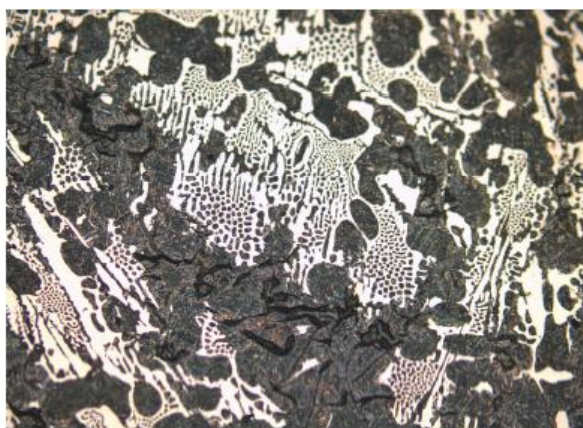


Figure n° 3- Structure de fonte truitée
G = 300X



Figure n° 3 – Lamelles de graphite enchevêtrées
G= 750X

- E
n
eff
et,
le
gra
phi
te

précipité dans les zones inter dendritiques génère des micros vides à l'interface matrice-graphite qui constituent des amorces faciles pour les fissures ; la propagation des fissures est facilitée par l'enchevêtrement des lamelles de graphite. Lors du laminage, le réseau de graphite près de la surface du cylindre, favorise l'amorçage des fissures et sous l'effet des contraintes appliquées, ces fissures trouvent leur chemin aisément le long de ce réseau (fig.20).

Fig.20.structure avec attaque chimique d'un échantillon Davy roll écaillé

CONCLUSIONS :

L'endommagement des cylindres ,objet de cette étude est dû à des anomalies microstructurales ,résultats d'un mauvais traitement thermique.

IV.2.3 Cas du cylindre INNSE CYLINDRI :

Ecaillage sur cylindre n°36660



Fig.21: photographie du cylindre écaillé INNSE Cylindri.

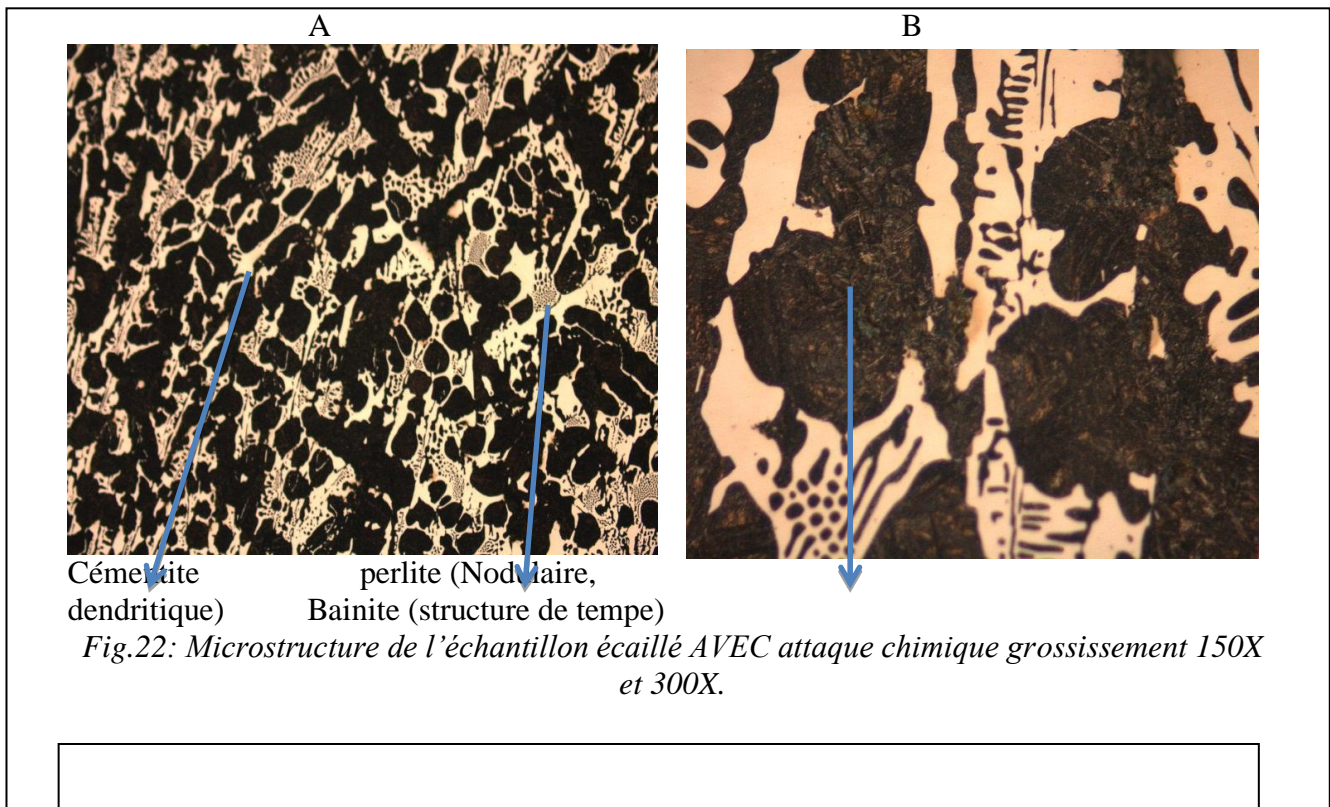
Analyse chimique :

Elément (%)	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Analyse	3,83	0,84	0,81	0,05	0,009	1,76	4,06	0,35
Sur certificat INNSE CYLINDRI	3,5	1,2	1,2	0,04	0,03	2,00	4,8	0,6

Tab .10 : analyse chimique d'un échantillon de cylindre INNSE écaillé

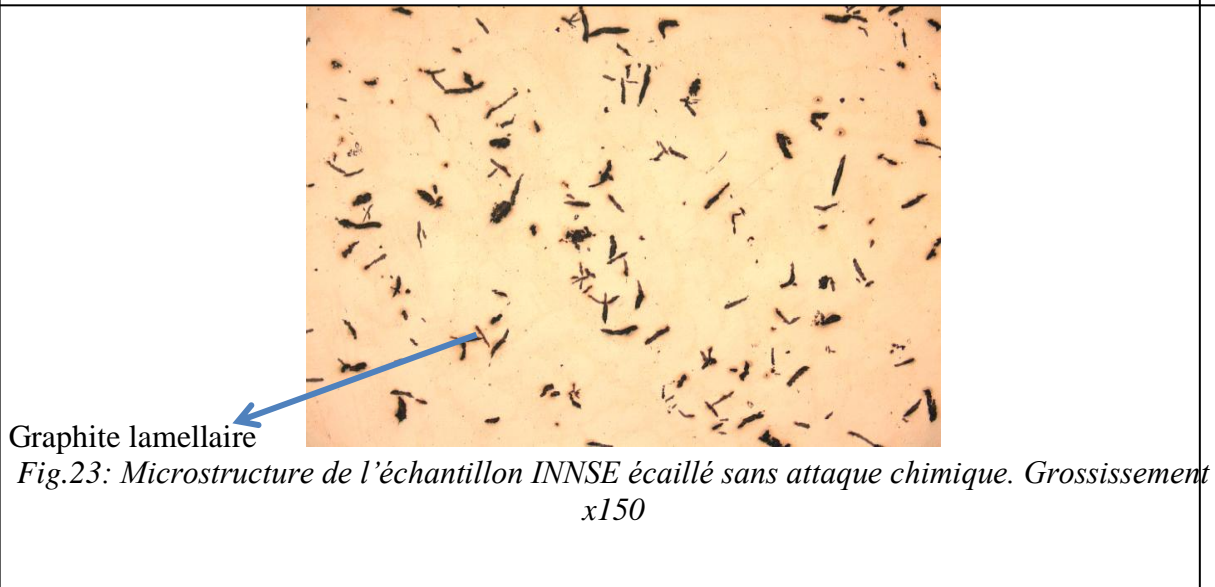
Essai de dureté :

Shore C mesurée	Shore C sur certificat INNSE cylindri	
75	Bas	76
	Milieu	76
	Haut	76



Cémentite
dendritique) perlite (Nodulaire,
Bainite (structure de tempe)

Fig.22: Microstructure de l'échantillon écaillé AVEC attaque chimique grossissement 150X et 300X.



Graphite lamellaire

Fig.23: Microstructure de l'échantillon INNSE écaillé sans attaque chimique. Grossissement x150

INTERPRETATION DES RESULTATS :

- **Composition Chimique** : La présence de Chrome, de Nickel et de Molybdène en telles proportions est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle et par conséquent une bonne tenue à l'usure du cylindre. Par contre la teneur en carbone est légèrement élevée par rapport à celle spécifiée dans le certificat du fournisseur, normalement cette teneur ne devrait pas dépasser 3,6%(Tab.10).

- **Microstructure** : La présence simultanée de la perlite, cémentite, et de la Bainite est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle.fig.21 et 22.

- **Dureté**: La dureté obtenue après analyse est de l'ordre de celle donnée par le fournisseur (entre : 75-80)

Conclusion des essais :

Les résultats précédents montrent clairement l'influence de la non-conformité de la qualité des cylindres sur l'apparition de l'écaillage néanmoins, ces cas de cylindre ne représentent que 7% de la totalité des cylindres écaillés.

Ceci montre que d'autres facteurs (autre que la qualité des cylindres) interviennent sur l'apparition du défaut d'écaillage.

IV. 3 : Influence des chocs mécaniques :

Chocs mécaniques

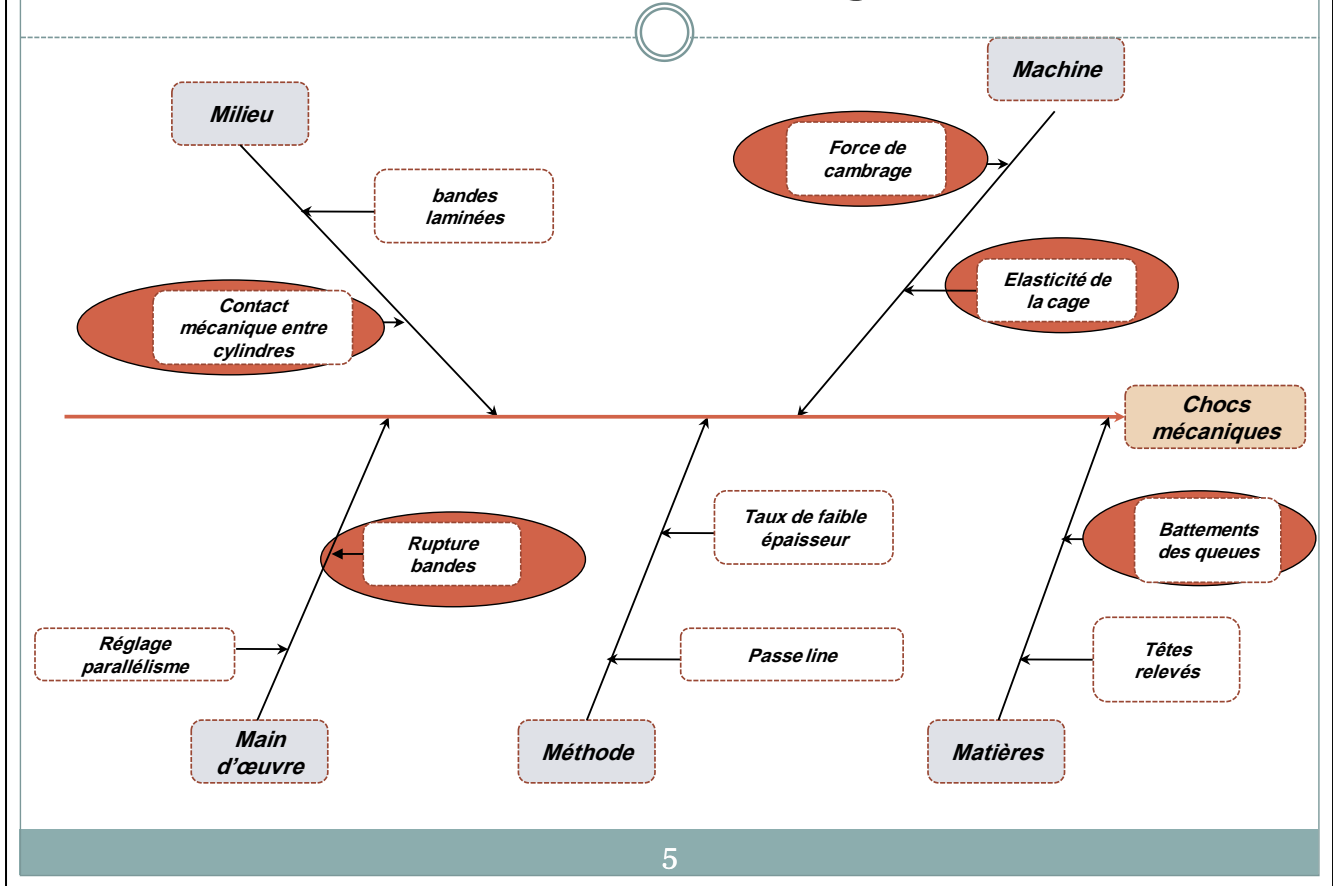


Planche.6 : paramètres influant sur les chocs mécaniques dans le laminage à chaud

Pendant le laminage des fines épaisseurs (inférieur à 2 mm), et en fonction de la valeur du séddage de la cage où les cylindres de travail se positionnent à un gap négatif allant jusqu'à -3 mm c'est-à-dire qu'ils sont en contact permanent et que la bande les sépare pendant son engagement et dès que cette dernière quitte l'emprise sous l'effet des deux forces agissantes (forces de laminage et de cambrage) les deux cylindres se martèlent entre eux pouvant causer des fissures internes dans les zones à défauts.

IV.3.1 Analyse des courbes d'extension :

L'analyse des courbes de calibrage avec seddage (fig.23) faite par deux grands spécialistes de laminage FROMM LAURANT et ALAIN PUISSANT à qui nous avons demandé de l'aide, a montré que les cages du train finisseur sont trop élastiques permettant le martelage des cylindres dès que la bande quitte la cage.

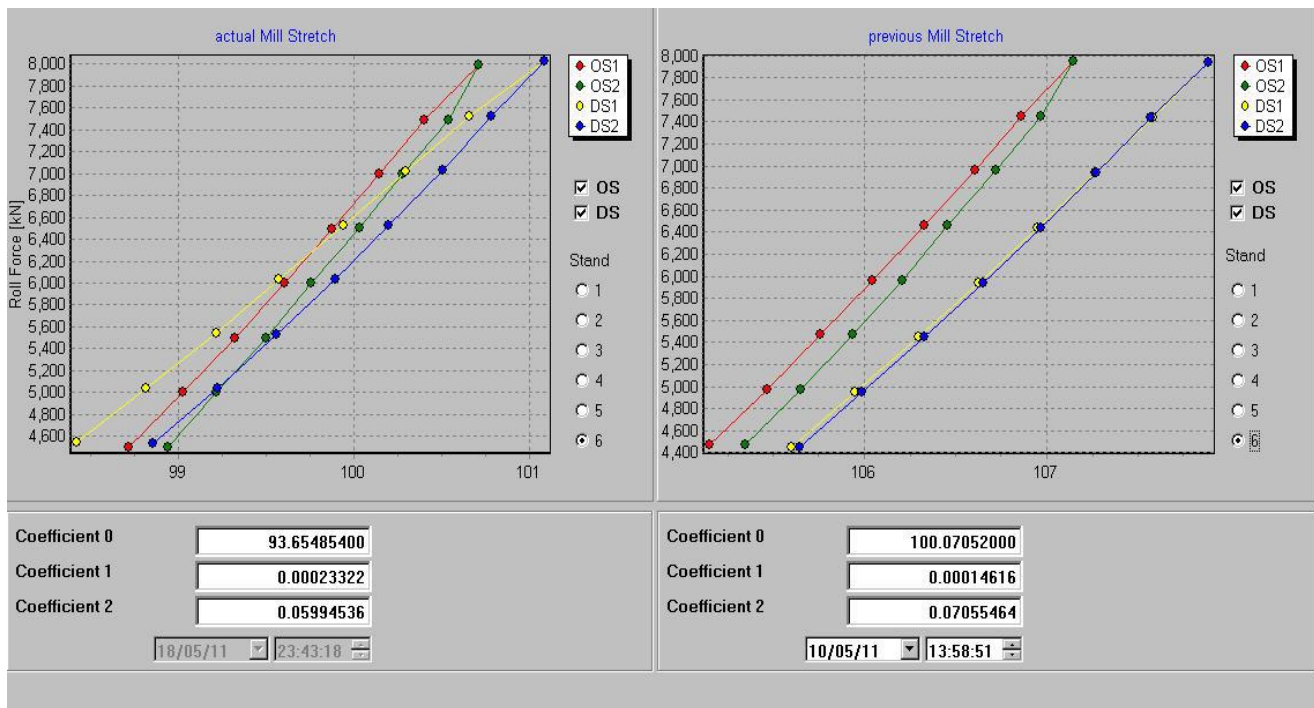
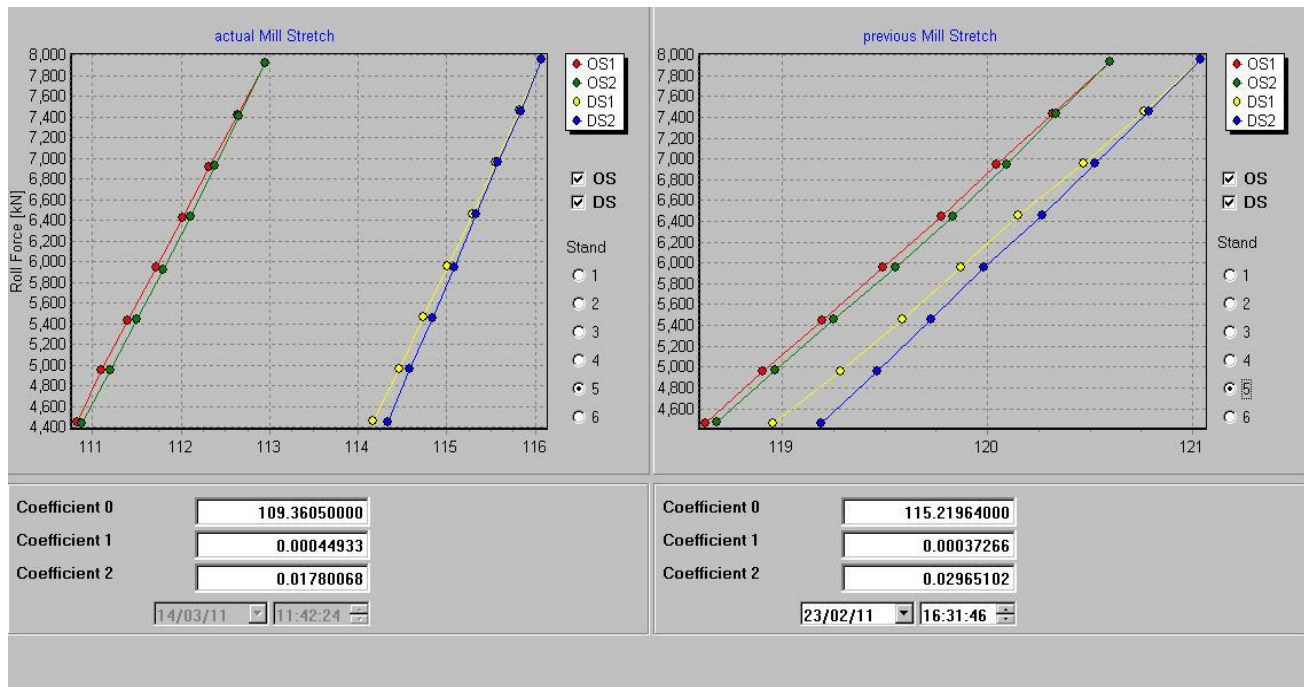


Fig.24 : Courbes d'extension des cages 5 et 6 pendant le calibrage avec seddage

IV.3.2. solution proposée :

La solution préconisée et qui a été réalisée avec succès ,consiste à l'arrêt de la fonction cambrage avant que la bande ne quitte la cage.

La planche 7 montre l'application sur HMI (Human Machine Interface) de la modification de la fonction cambrage faite sur le programme de calcul.

Cette solution a pu aussi éliminer un problème de pic de force de cambrage en queue de bande (pic de force de correction des ondulations de la bande après avoir quitter la cage amont) comme le montre les figures 24 et 25 , avant et après modification.

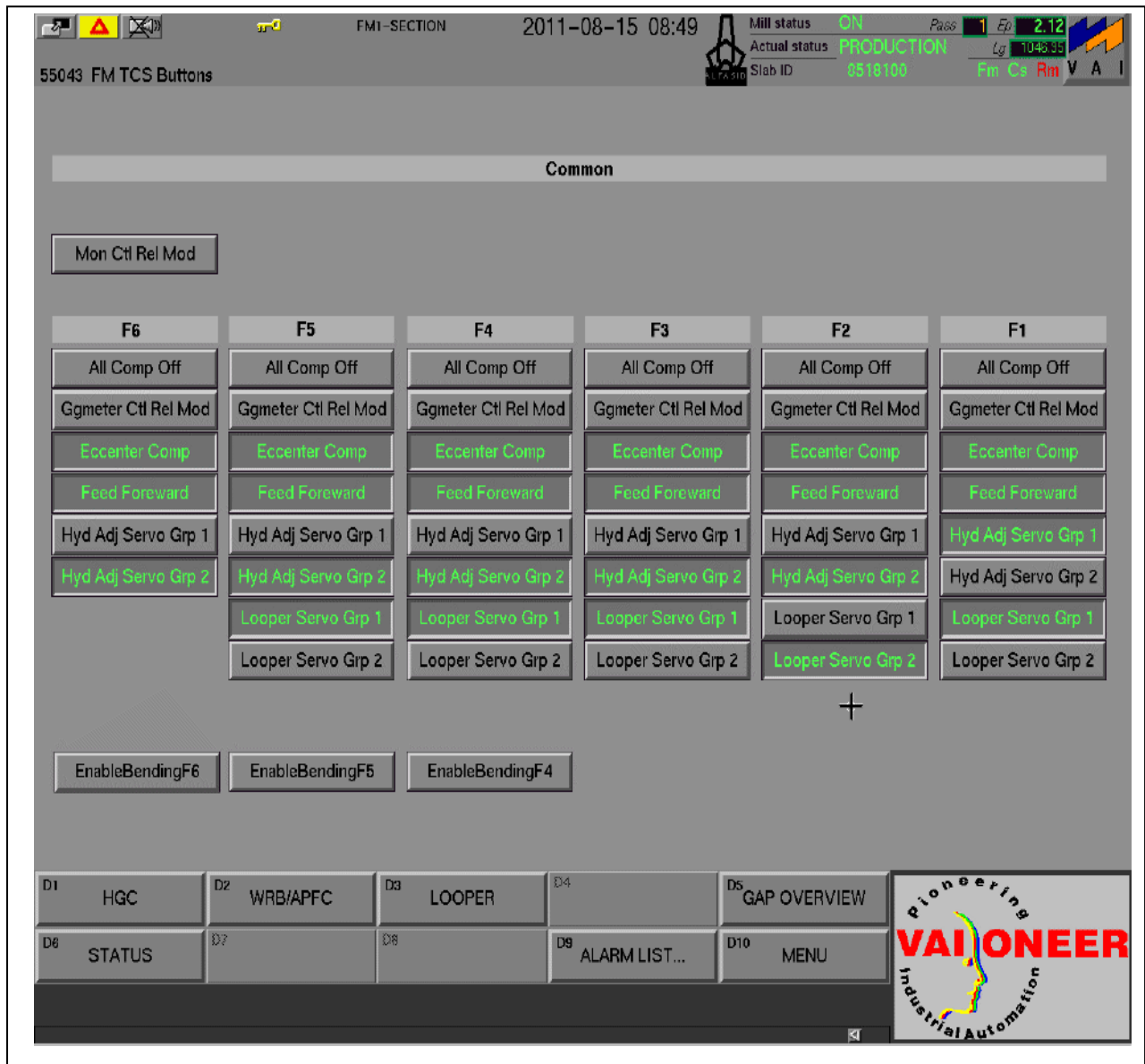


Planche 7 : modification d'arrêt de la fonction de cambrage en queue de bande pour les cages 4, 5 et 6

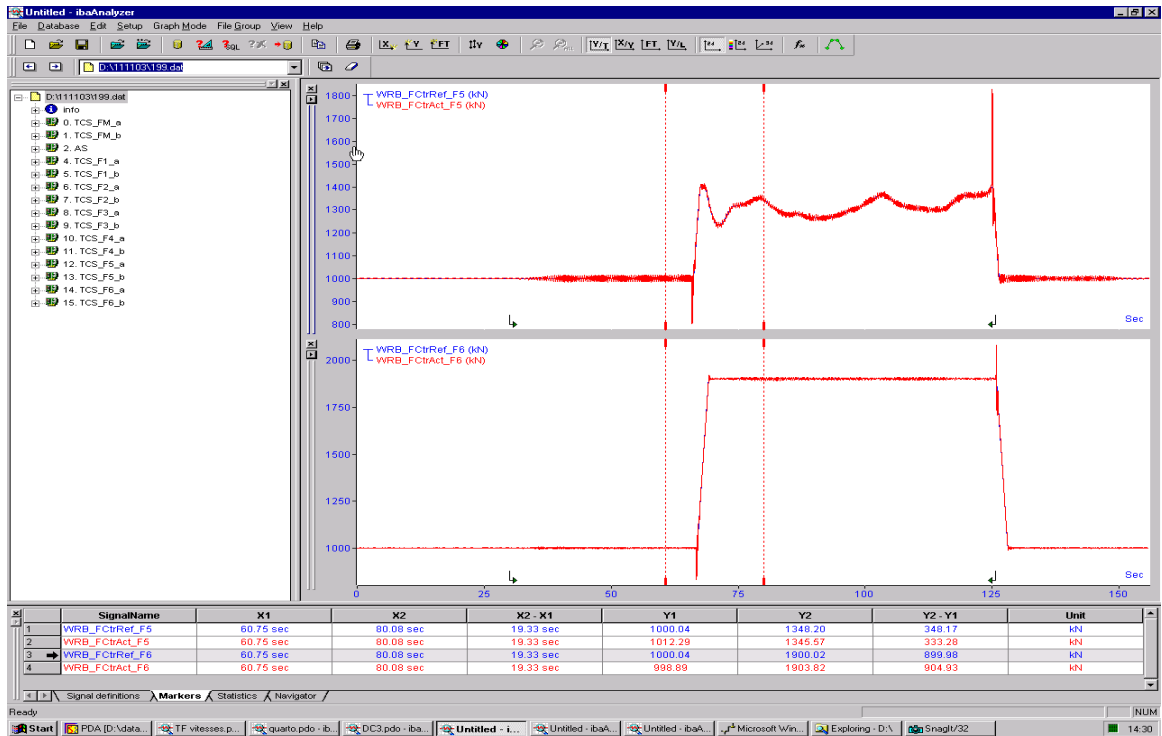


fig.25 : Pression de cambrage en queue de bobine avant modification

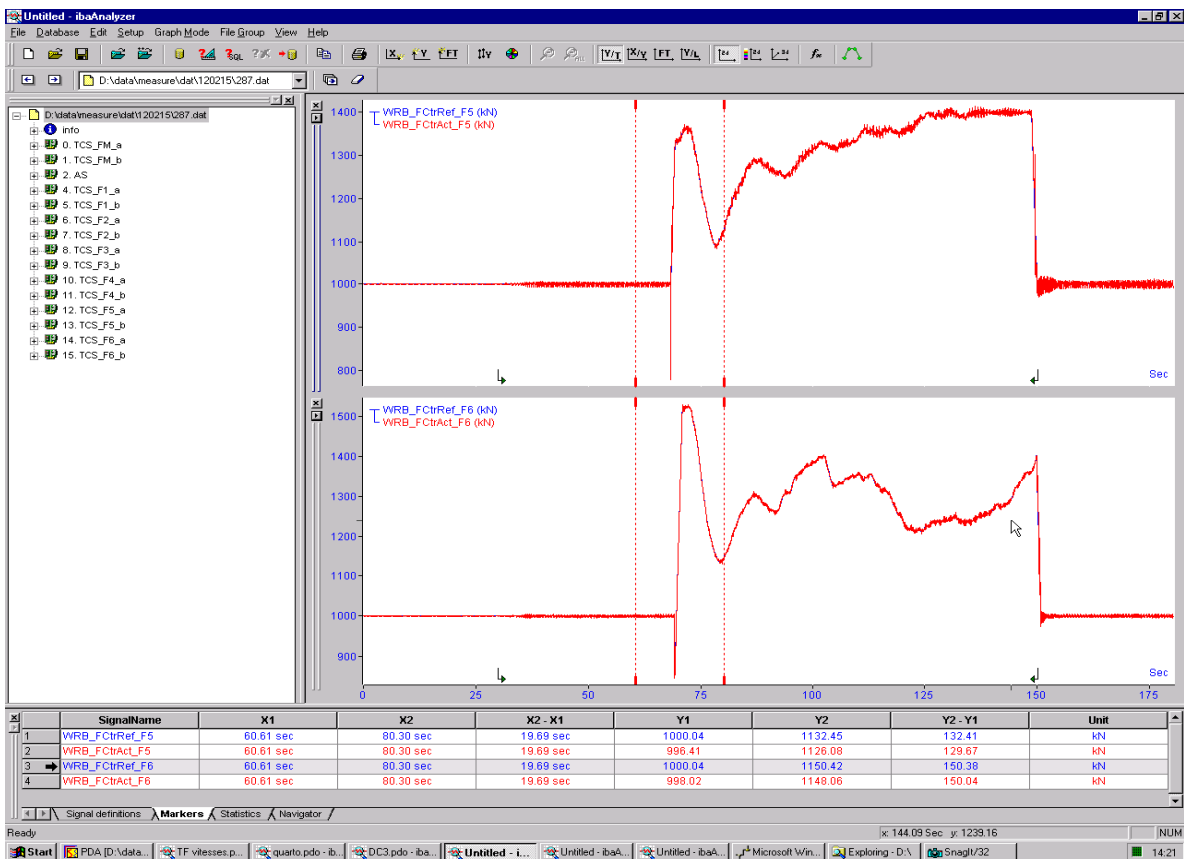


Fig.26 : Pression de cambrage en queue de bobine après modification

IV.3.3-Chocs mécanique dû aux ébauches :

Pour ce facteur, on se contentera de montrer une analyse faite par les experts du groupe Arcelor Mittal et présentée durant le séminaire des cylindres 2011 montrant l'évolution de la consommation des cylindres en fonction du taux débauche pour certain laminoir.

Le graphique de la figure 26 montre bien l'influence directe des ébauches sur le ratio de consommation des cylindres.

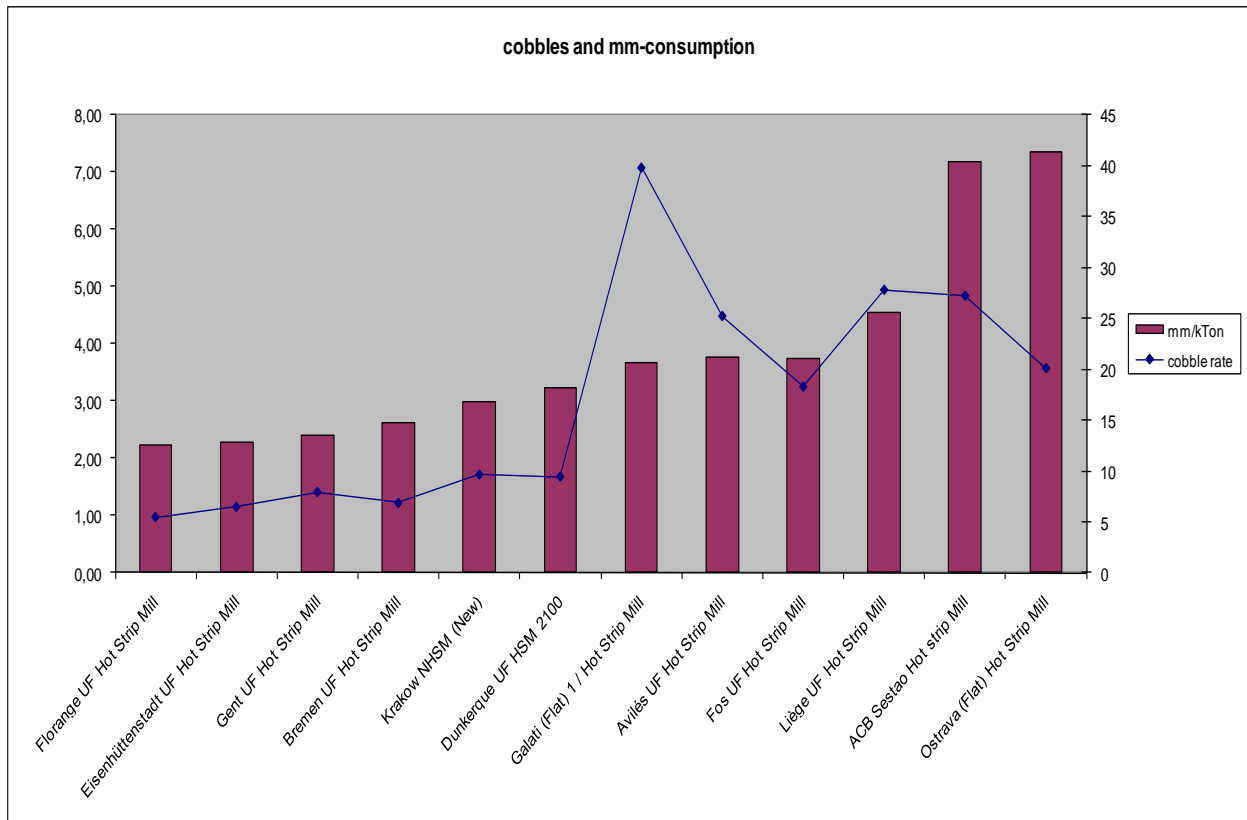


Fig.27: Relation entre la consommation des cylindres et le taux d'ébauche dans les laminoirs à chaud

IV.4 : Influence du cambrage et profile des cylindres :

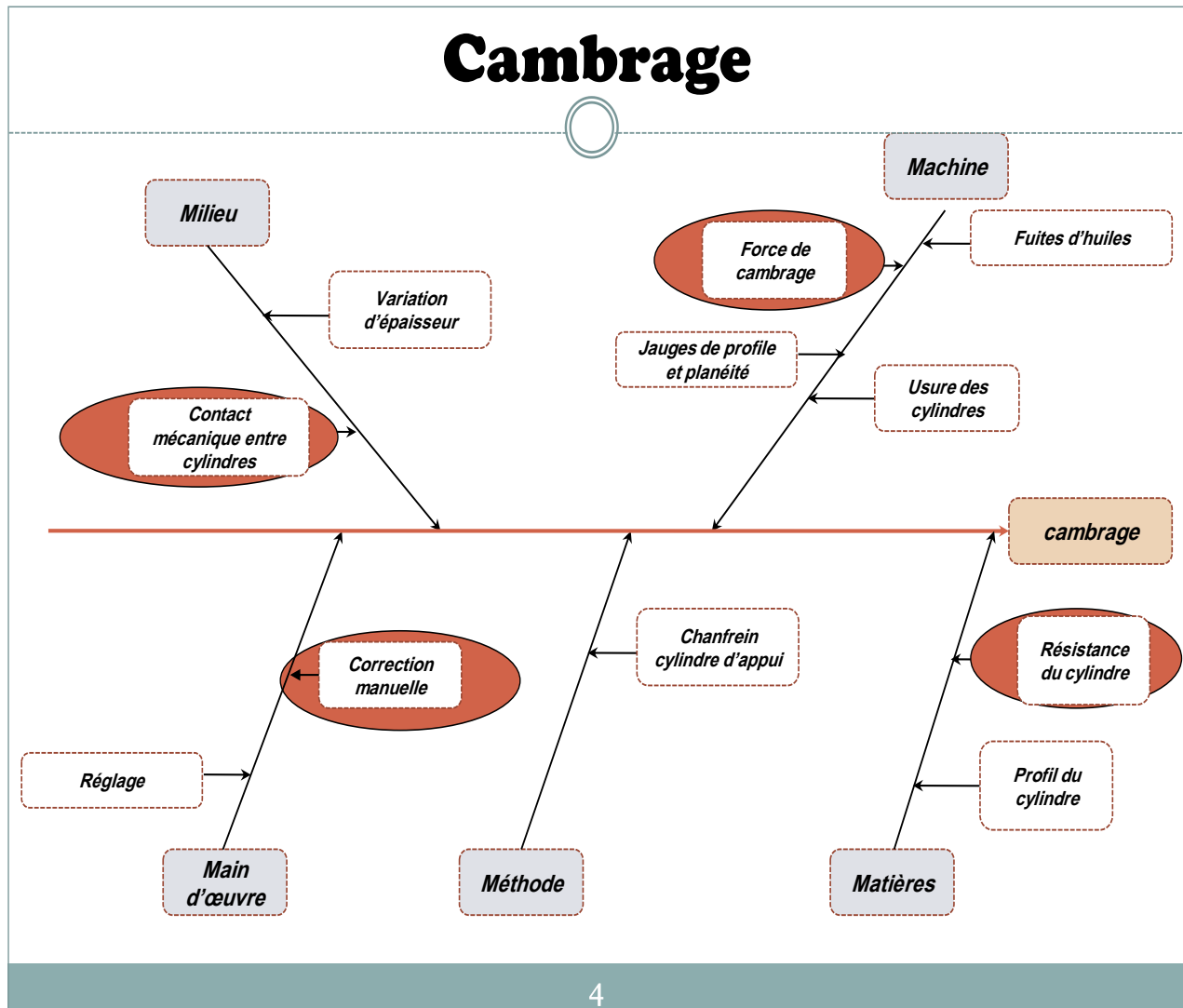
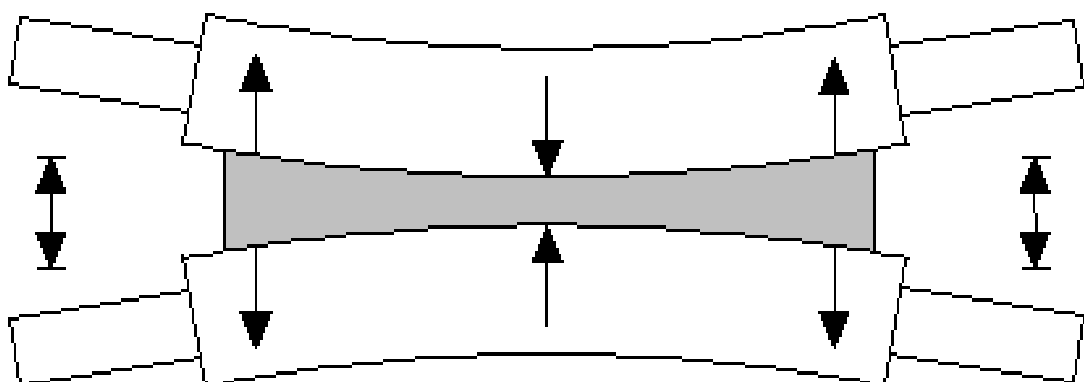


planche.8 : paramètres influant sur les forces de cambrage des cylindres dans le laminage à chaud

Dans ce chapitre, on se focalise sur l'influence des forces de cambrage du point de vue de la limite de résistance des cylindres.

IV.4.1 IMPACT DU CAMBRAGE :

Le cambrage est une force utilisée pour corriger le fléchissement ou le cambre des cylindres au cours de laminage sous l'effet des pressions de laminage comme il est montré sur la figure 27, afin de donner un profil correct à la bande laminée.



La
planc
he 9
,qui
repré

sente le calcul des forces de cambrage du train finisseur d'Arcelor mittal Algérie tirée des HMI du laminage à chaud ,montre les limites des forces de cambrage fixées par les constructeurs entre 150 et 2400 KN et sur le graphe fig.28 pour une bande laminée à 1,9 mm d'épaisseur, cette force a dépassé 1900 KN

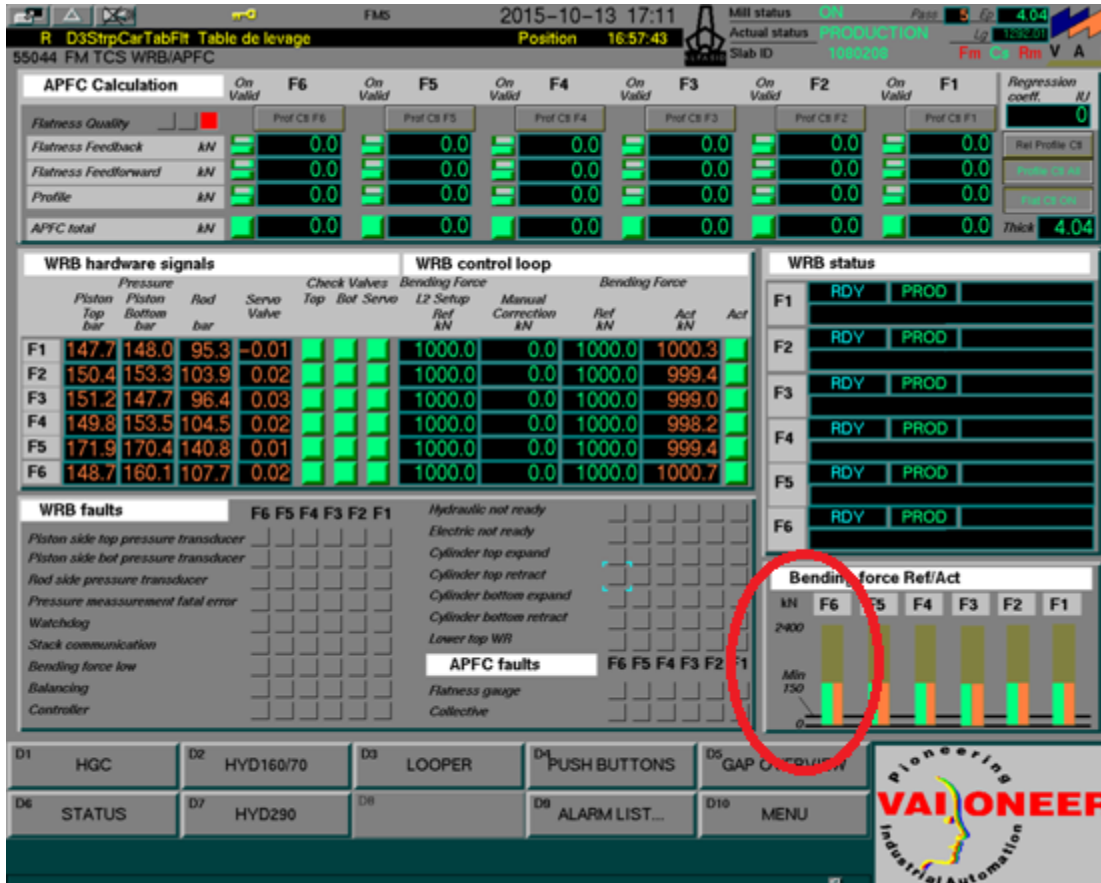


Planche.9.Vue de calcul des forces de cambrage du train finisseur

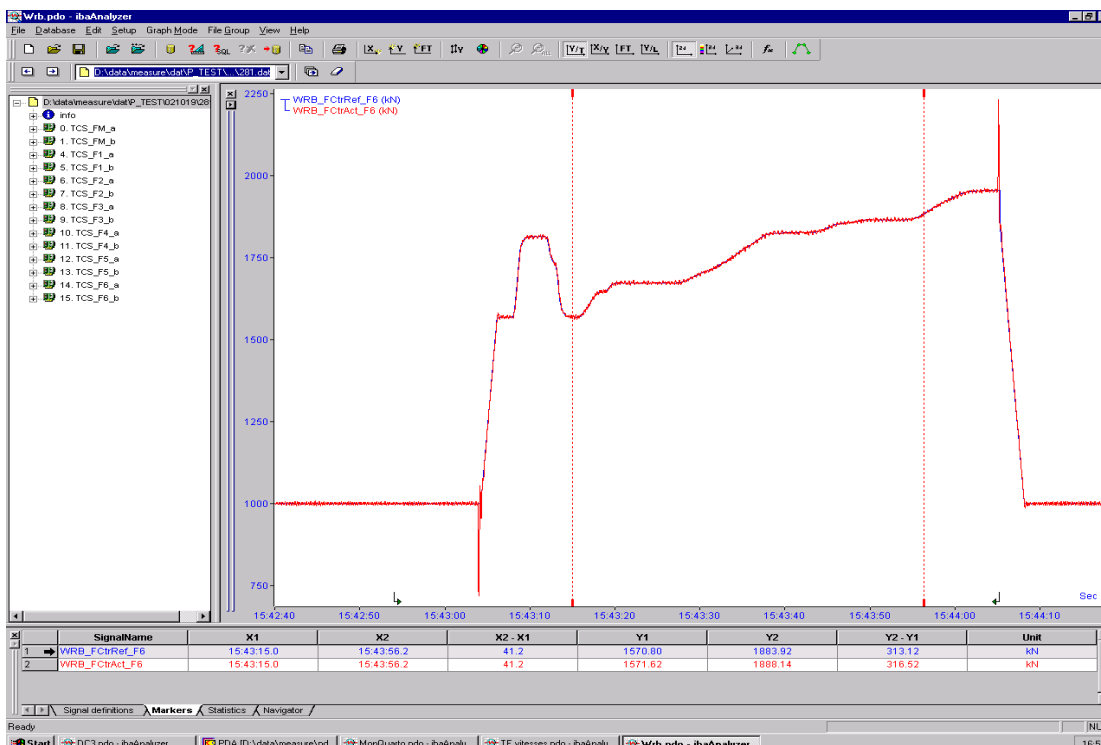


Fig.29. Graphe de force de cambrage d'une bande laminée à 1,9 mm d'épaisseur


Bien que lorsqu' on a consulté les fournisseurs reconnus dans le domaine de fabrication des cylindres et spécialement les cylindres en fonte à trempe indéfinie, ces derniers résistent à des forces de cambrage ne dépassant pas les 1700 KN donc les cylindres pendant le laminage des fines épaisseurs surtout en fin de compagne sont soumis à des forces nettement supérieures à leur résistance.

La limitation des forces de cambrage pour les cages 5 et 6 à des valeurs ne dépassant pas 1600 KN est facile à réaliser sur le programme de fonctionnement, seulement on doit chercher une solution à l'apparition des ondulations aux bords de la bande laminée.


IV.4.2 IMPACT DU PROFIL DES CYLINDRES :

La solution préconisée est de trouver le bon profil des cylindres du train finisseur capable de compenser la limitation des forces de cambrage afin d'avoir un bon profil des bandes laminées.

Une série d'expériences montrées sur les tableaux 11, 12 , 13 et 14 nous a permis de fixer un profil pour chaque jeu de cylindre des cage de train finisseur .

GAMME DE PROFILES DES CYLINDRES (initiale) 

LA GAMME DES PROFILES DES CYLINDRES DE TRAVAIL



TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL (mm)	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,04	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,00	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	0,00	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

Avec cette gamme de profil, les lamineurs sont obligés de trop charger les cages F5-6 pour obtenir une bonne planéité du produit fini

Tab 11 : gamme initiale des profils des cylindres

GAMME DE PROFILE DES CYLINDRES (modifi 1)

LA GAMME DES PROFILES DES CYLINDRES DE TRAVAIL ET APPUI				
TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,04	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,01	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	0,00	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

le choix du profil 10 μ sur la cage F3 est dans le but de créer une dégradation dans les amplitudes d'ondulation générées par les cages F1-2 pour faciliter leur élimination dans les cages F5-6 tout en minimisant l'usure des cylindres

Résultat : soulagement du taux de réduction de F5 mais pas celui du F6

Tab 12 : gamme des profils des cylindres (première modification)

GAMME DE PROFILE DES CYLINDRES (modif 2)

TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,04	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,01	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	-0,005	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

le choix du profil -5 μ sur la cage F5 est dans le but de partager la correction du profil de la bandes entre les cages F5-6 pour minimiser les charges et l'usure de la cage F6

Tab 13 : gamme des profils des cylindres (deuxième modification)

GAMME DE PROFILE DES CYLINDRES (modif 3)

TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,02	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,01	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	-0,005	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

le choix du profil 20 μ sur la cage F1 est dans le but de partager les corrections du profil de la bandes entre les cages pour minimiser les charges et l'usure des la cages **F6 en fin de campagne des cylindres de travail quarto** (changement profil bande sortie quarto)

Tab

14 : gamme des profils des cylindres (troisième modification)

Sur les tableaux 15 et 16 ,on montre une comparaison des paramètres de laminage entre deux bobines laminées à chaud 3*1030 mm*mm situées à la même longueur de la campagne de laminage c'est-à-dire au même ordre de laminage afin d'assimiler la même usure des cylindres.

En visant un profil de bande de 45 μ ,les valeurs des forces de laminage de la cage 6 avant modification sont de l'ordre de 8658 KN et celles du cambrage dépassent 1600 KN, bien qu'après modification, ces deux valeurs deviennent respectivement 6550 KN et 463 KN.

Notant qu'après modification des gammes de profile des cylindres, les forces de cambrage seront réparties sur les cylindres des premières cages fabriqués en fonte haut chrome dont la résistance aux forces de laminage et de cambrage sont nettement supérieure à celles en fonte à trempe indéfinie.

	TRB					Eff		Eff.		Hot		Reading
	Slab	Trb	Strip	Tol-	Tol+	Trb	Strip	Trb	Strip	Trb	Strip	Head
Thick	216.0	30.00	3.000	0.200	0.200	30.0	3.00	30.39	3.03			3.007
Width	1035.0	1031.8	1036.0	0.0	15.0	1031.8	1036.0	1045.3	1035.4			1021.2
Profile			45.0	15.0	15.0		45.0		13.2			0.0
Length	9.0	68.0	645.9			64.8	645.9	63.2	608.2			Wedge
Temp	1290.2	0.0	895.0	25.0	25.0	1087.8	895.0	Temp.				905.5
SpeedHead	0.75						7.170	Hd 1087.8	895.7			dlh2-10m
SpeedUp	0.054	after	1.2[s]	Offs	0.00		0.054	Tl1060.5	895.0			ODet

Std	Temp Head [° C]	Force de laminage			ExitCa Tail [° C]	Force Head [kN]	Calc Tail [kN]	Force mea [kN]	pression de cambrage		Bend Calc [kN]
		[° C]	[° C]	[° C]					[kN]	[kN/s]	
1	995	908	988	916	13005	17438	99	99999	62	99	200
2	978	910	972	917	11393	14305	99	99999	43	99	200
3	962	911	955	916	9738	11515	99	99999	28	99	200
4	946	910	939	913	8634	9699	99	99999	18	99	912
5	929	907	922	907	7924	8564	99	99999	11	99	1072
6	914	902	908	903	8658	9115	99	99999	7	99	1600

Tab.15 : paramètres de laminage d'une bobine avec la gamme de profil initiale des cylindres

TRB						Eff		Eff.		Hot		Reading
	Slab	Trb	Strip	Tol-	Tol+	Trb	Strip	Trb	Strip	Trb	Strip	
Thick	215.0	30.00	3.000	0.200	0.200	30.0	3.00	30.39	3.03			
Width	1020.0	1028.6	1033.0	0.0	20.0	1028.6	1033.0	1042.2	1029.6			
Profile			45.0	15.0	15.0		45.0		48.5			
Length	8.8	65.2	625.6			62.8	625.6	61.2	594.2			
Temp	1275.6	0.0	895.0	25.0	25.0	1084.3	895.0	Temp.				
SpeedHead	0.70						6.801	Hd 1084.3	895.0			
SpeedUp	0.052	after	1.3[s]	Offs	0.00		0.052	0.052	895.0	2.5	895.0	

Std	Temp Head [° C]	Force de laminage			ExitCa Tail [° C]	Force Head [kN]	Calc Tail [kN]	Force mea [kN]	pression de cambrage		Bend Calc [kN]
		[° C]	[° C]	[° C]					[kN]	[kN/s]	
1	999	914	991	921	12566	16758	99	99999	57	99	1600
2	981	915	975	921	11584	14502	99	99999	42	99	1600
3	965	916	960	923	10484	12341	99	99999	29	99	1600
4	950	917	943	919	8849	9880	99	99999	17	99	752
5	934	914	926	912	7237	7786	99	99999	9	99	735
6	917	907	907	903	6550	6847	99	99999	5	99	463

Tab.16 : paramètres de laminage d'une bobine avec la gamme de profil modifiée des cylindres

Enfin, les figures numérotées de 30 au 35 représentent quelques graphes des paramètres de laminage ,notamment les graphes de température, largeur, épaisseur, différence de force de laminage entre les deux cotés des cylindres et les forces de cambrage des cages

Set 6, pour deux cas d'écaillage des cylindres ceci pour la bande laminée pendant l'écaillage et deux autre laminées juste avant écaillage.

fig.30 : Paramètres de laminage de la bande N°1 avant écaillage du 04/12/2011

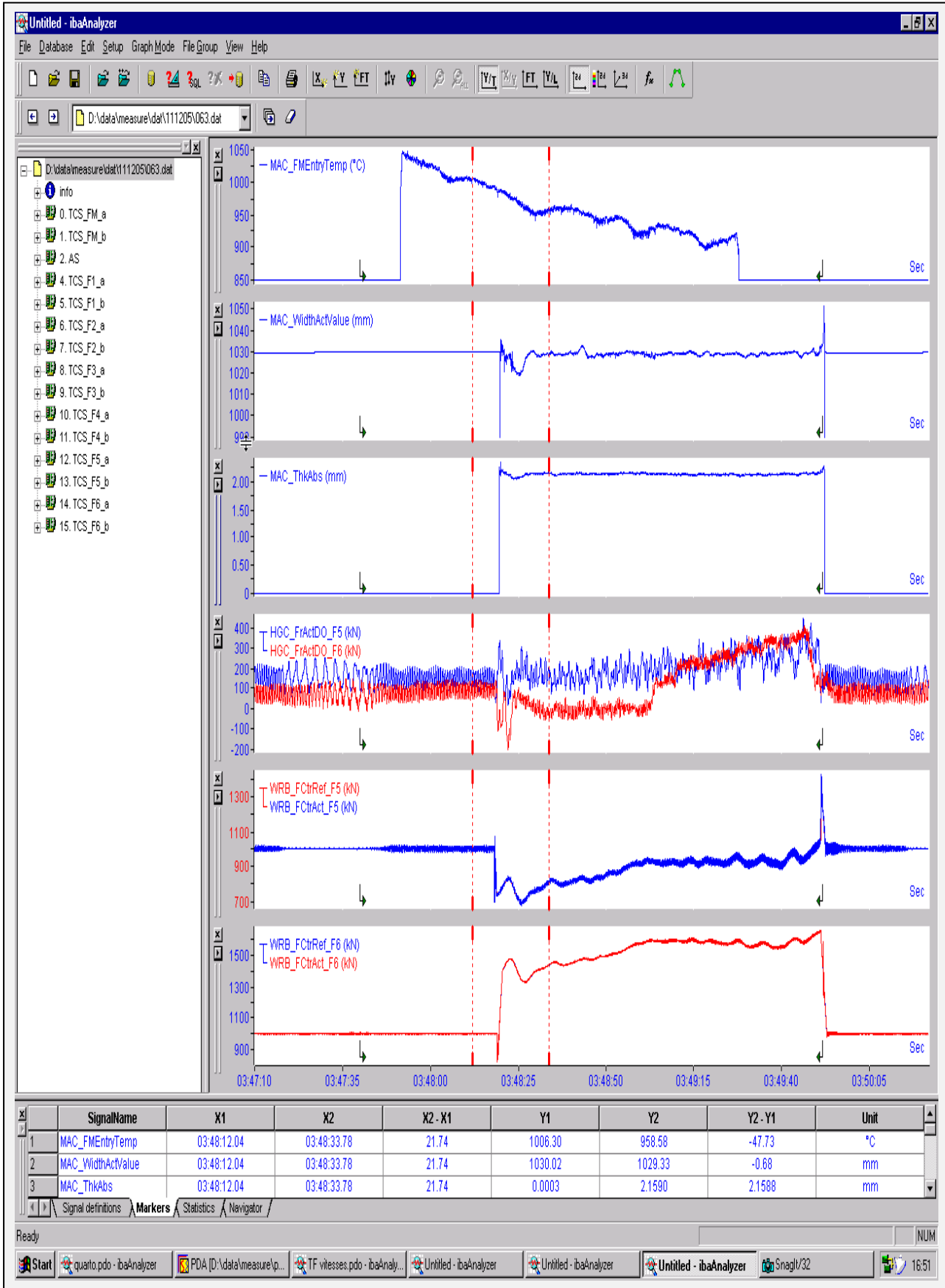


fig.31 : Paramètres de laminage de la bande N°2 avant écaillage du 04/12/2011

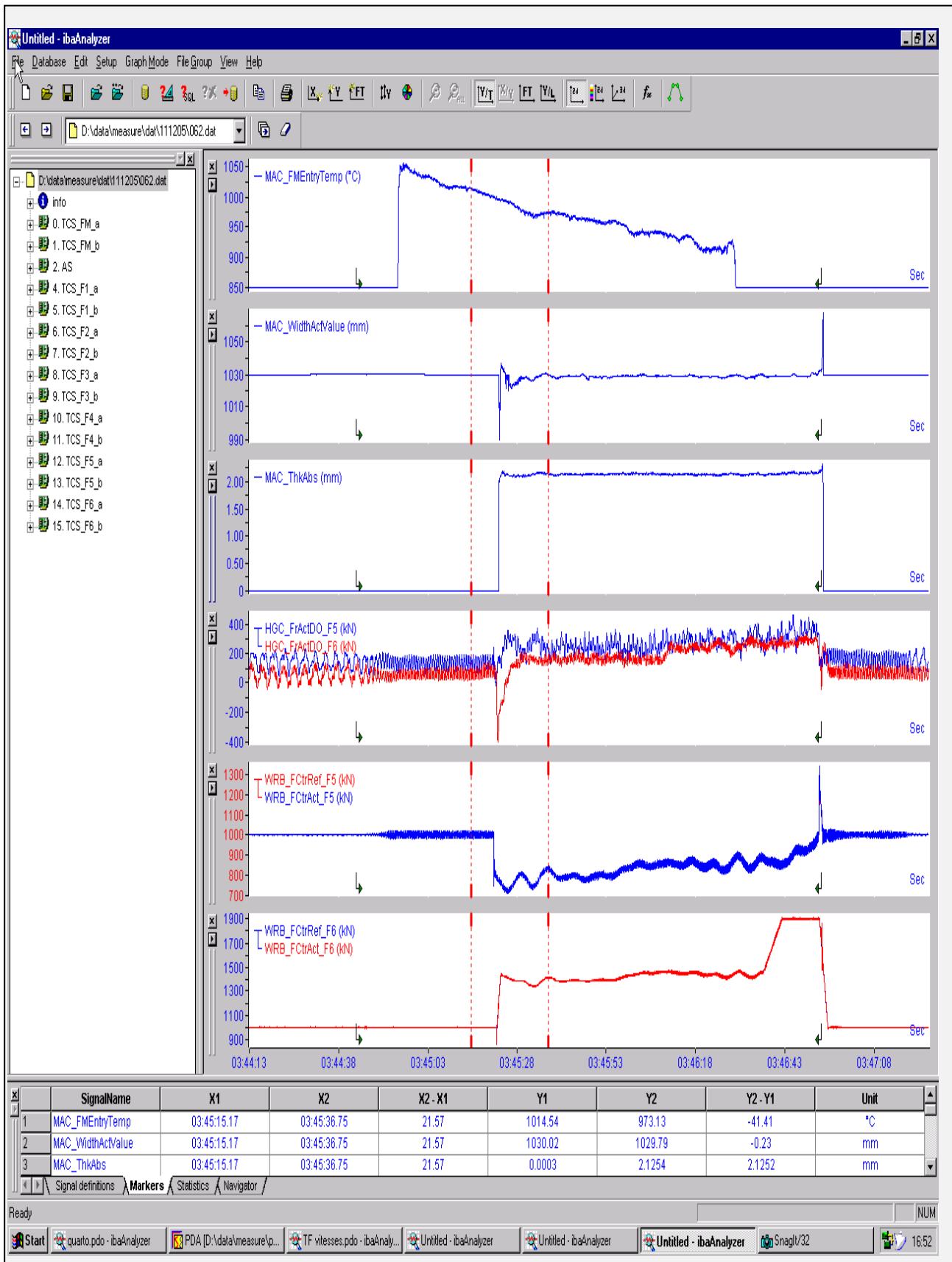


fig.32 : Paramètres de laminage de la bande pendant l'écaillage du 04/12/2011

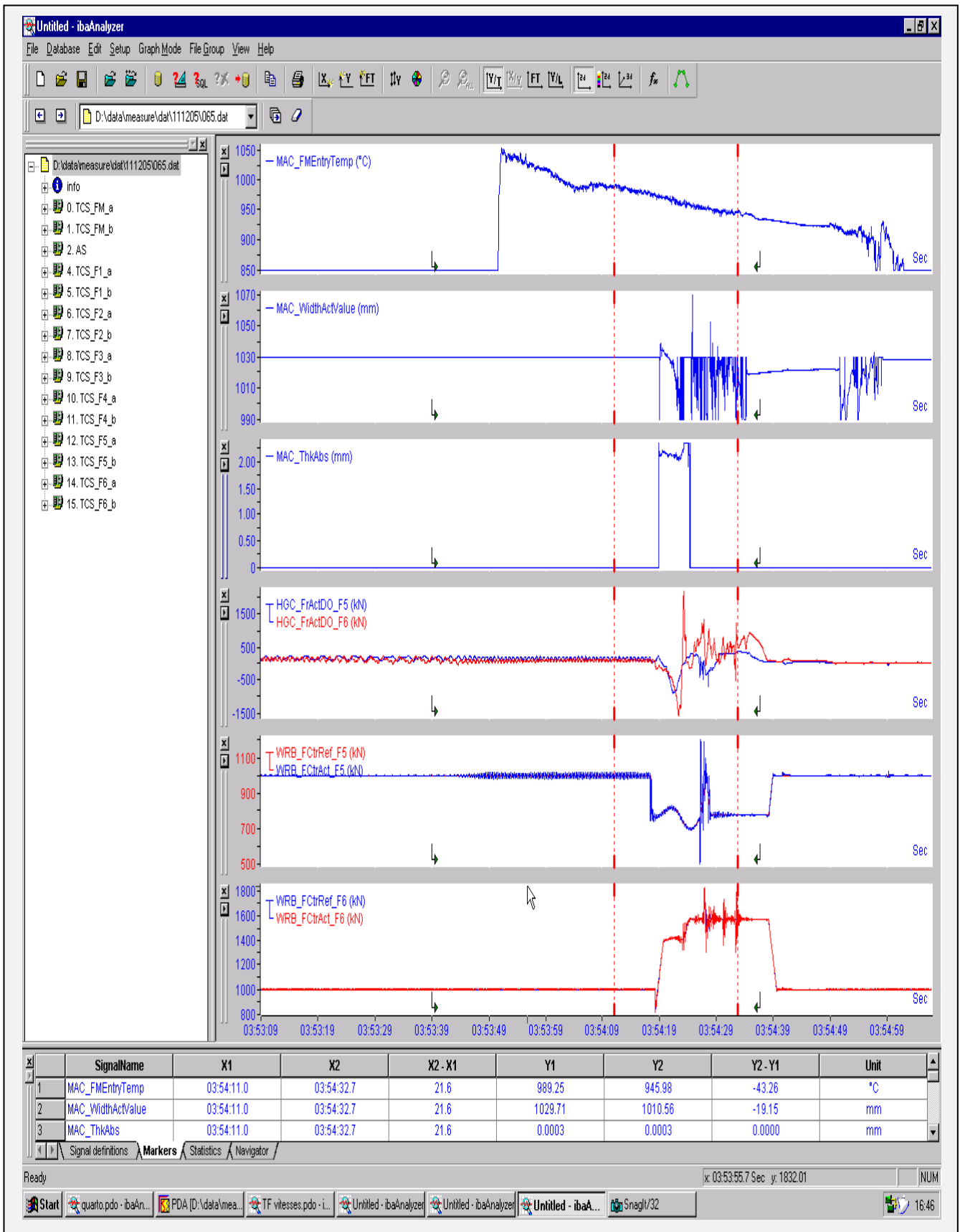
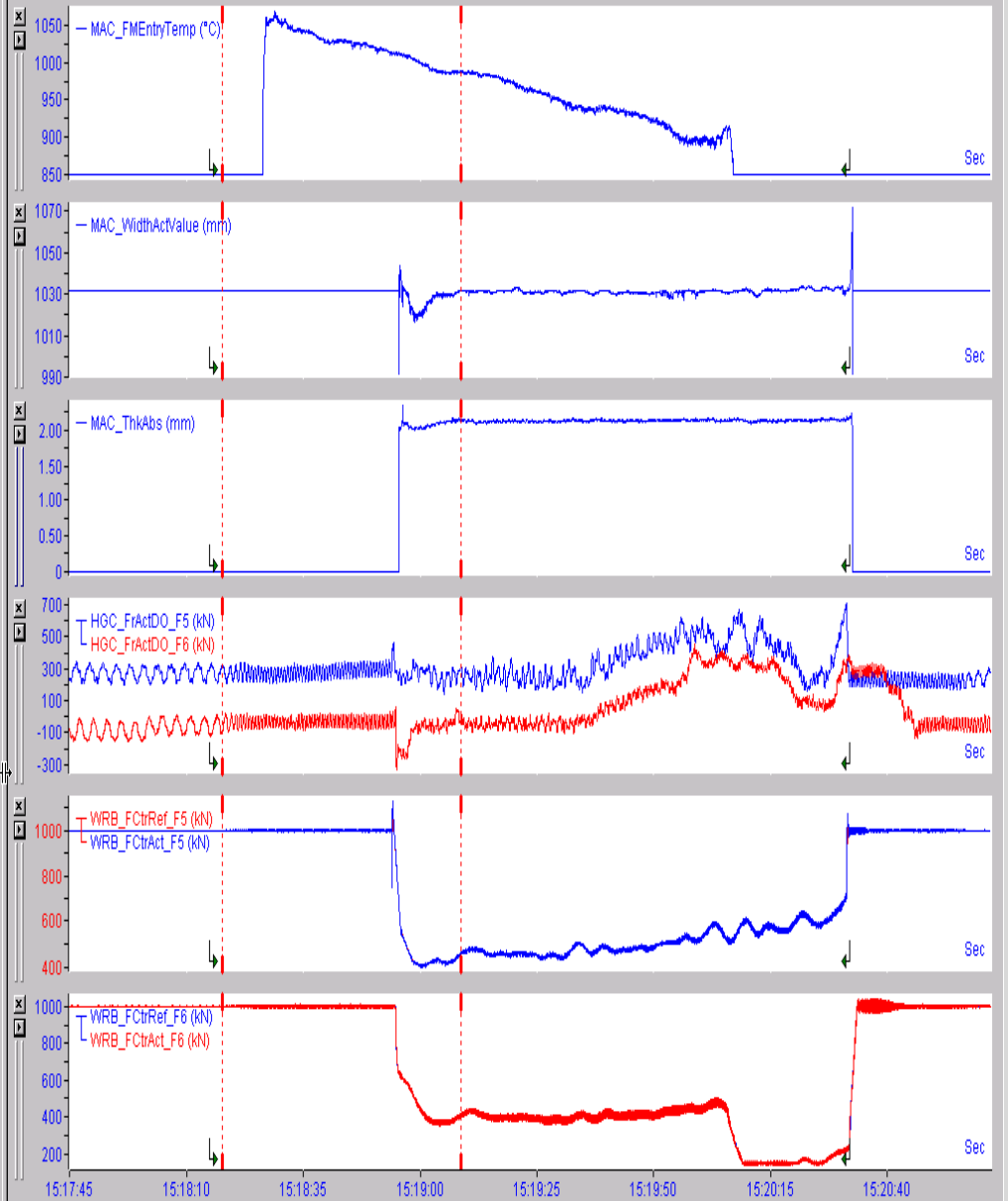


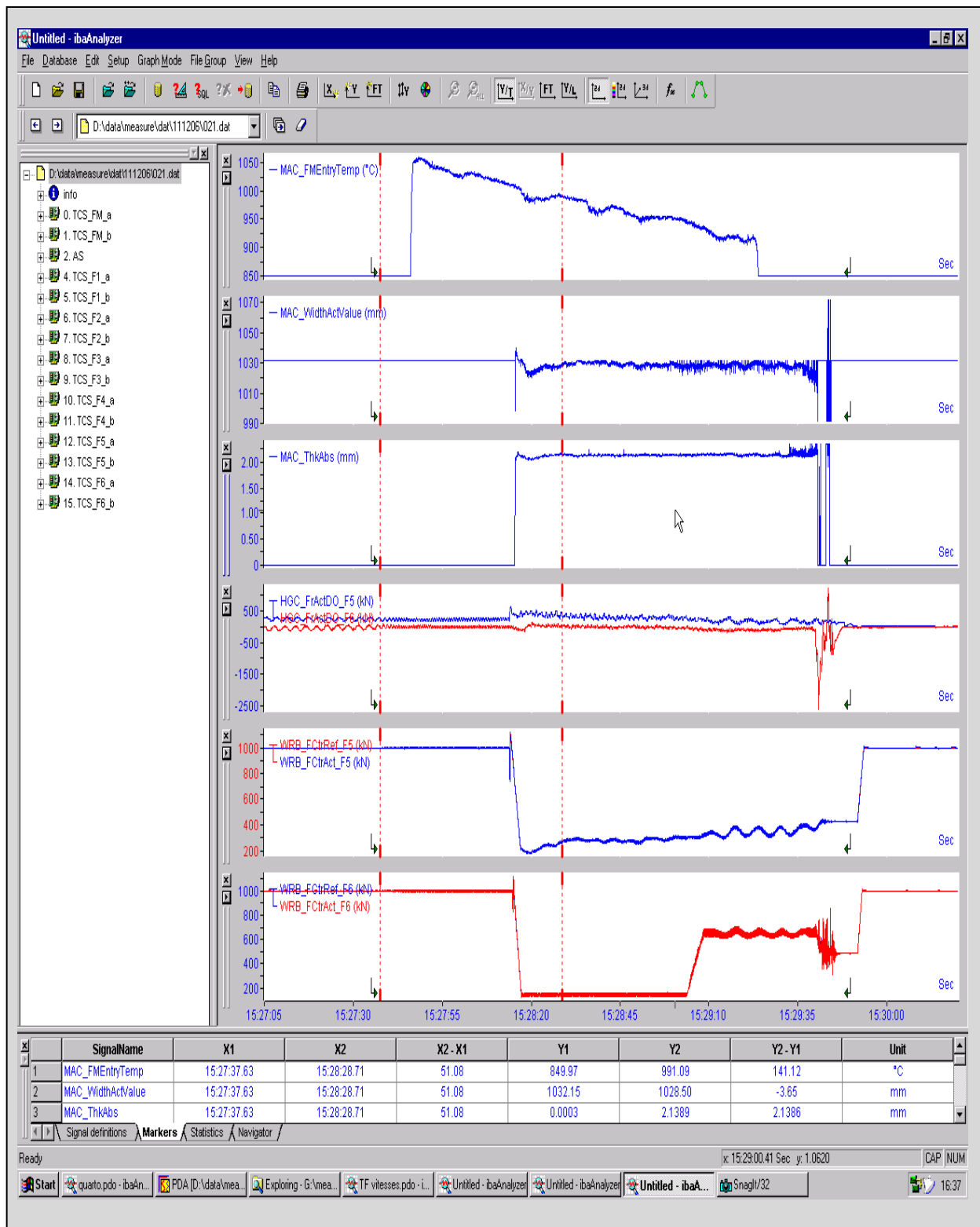
fig.33 : Paramètres de laminage de la bande N°1 avant écaillage du 06/12/2011

- info
- 0. TCS_FM_a
- 1. TCS_FM_b
- 2. AS
- 4. TCS_F1_a
- 5. TCS_F1_b
- 6. TCS_F2_a
- 7. TCS_F2_b
- 8. TCS_F3_a
- 9. TCS_F3_b
- 10. TCS_F4_a
- 11. TCS_F4_b
- 12. TCS_F5_a
- 13. TCS_F5_b
- 14. TCS_F6_a
- 15. TCS_F6_b



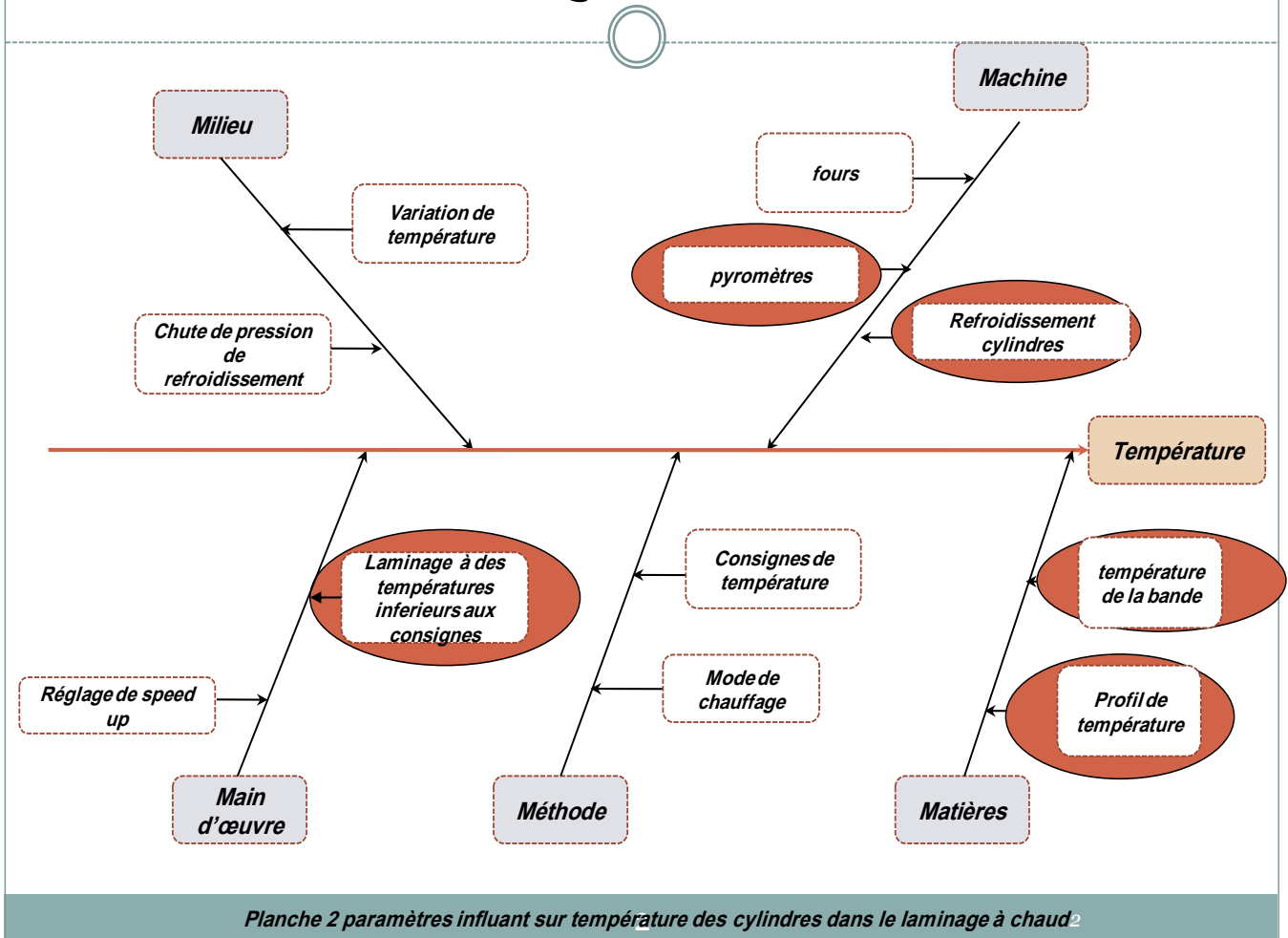
	SignalName	X1	X2	X2 - X1	Y1	Y2	Y2 - Y1	Unit
1	MAC_FEntryTemp	15:18:17.76	15:19:08.75	50.99	849.90	987.66	137.76	°C
2	MAC_WidthActValue	15:18:17.76	15:19:08.75	50.99	1032.33	1031.72	-0.61	mm
3	MAC_ThkAbs	15:18:17.76	15:19:08.75	50.99	0.0003	2.1227	2.1224	mm

fig.35 : Paramètres de laminage de la bande pendant l'écaillage du 06/12/2011



IV.1 : influence de la température :

Température



IV.1.1 Impact direct :

Les sollicitations subies par les cylindres sont de nature diverse. Au cours de son service, le cylindre est sollicité de deux manières : mécanique et thermique.

Sous l'effet de la température et la qualité d'eau de refroidissement, les cylindres sont sollicités à deux types de chargement :

A) Un chargement thermique dû au contact de la bande à laminier portée à une température voisine de 1100 °c et au refroidissement par jet d'eau très peu de temps après.

Sous l'effet de la chaleur on site deux effets :

Effet superficiel, crique thermique : au cours de laminage, la surface du cylindre est amenée à environ 600 °c, dès que la matière à laminier vient à son contact, une partie de cette chaleur est éliminée par l'eau de refroidissement qui peut être prévue et une autre partie est transmise par conduction dans le corps du cylindre. Ainsi la surface subit des fluctuations thermiques cycliques importantes et assez rapides tandis que le corps du cylindre s'échauffe plus régulièrement et plus lentement jusqu' à l'abaissement à un équilibre thermique.

Les variations thermiques de la surface du cylindre entre le contact de la bande laminée et l'eau de refroidissement , crée une contrainte de compression qui est normalement suffisamment élevée pour

l'obliger à fléchir pour l'absorber à chaque fois que la partie chauffée se dégage de l'arc de contact ce qui la met sous tension, tension qui peut être l'origine de la naissance des criques thermiques.

Rupture par contrainte thermique pendant la mise en température : la progression thermique générale qui s'accumule dans le corps du cylindre provoque un réseau de contraintes dans le cylindre qui peuvent atteindre un niveau dangereux particulièrement au début de laminage.

Ce réseau de contrainte provient du fait que la partie extérieure du cylindre est chaude et a tendance à se dilater tandis que la partie interne, étant à une température plus basse, a moins tendance à se dilater. Une partie du cylindre est donc tirée contre l'autre, des parties du cylindre sont en tension tandis que d'autres sont sous compression.

Les éléments dangereux de ce réseau de contraintes sont ceux sous tension et dans les conditions de mise en température. La contrainte maximale en tension apparaît le long de l'axe central du cylindre dans le sens longitudinal et a tendance à provoquer la rupture transversale du cylindre à partir de l'intérieur c'est-à-dire à le faire éclater.

B- Un chargement physico-chimique :

L'agressivité du milieu de refroidissement du cylindre associé à l'évolution de la température de la surface du cylindre est à l'origine de l'oxydation du métal de la surface des cylindres. Cette oxydation peut conduire à de nouveaux types d'endommagements.

A chaque tour du cylindre le réseau de fissures thermiques qui s'était renfermé au contact de la bande s'ouvre de nouveau lorsqu'il se trouve brutalement refroidi. Ainsi les faces internes s'oxydent et ceci d'autant plus profondément que l'arrosage est faible et mal réparti, c'est-à-dire que la température du métal est plus élevée.

Une analyse à la microsonde de ces produits d'oxydation dans le cas d'une fonte à haute teneur en chrome a permis d'identifier une multitude d'oxydes du type :

FeO , Cr₂O₃, NiO, SiO₂, MnO .

Lorsque les lèvres des fissures sont suffisamment écartées à cause des produits d'oxydation de la matrice, les oxydes de la bande laminée (calamine) peuvent s'introduire dans les fissures en favorisant le déchaussement en micro-écaillages du métal.

Pour bien montrer l'impact des deux agressivités appliquées sur les cylindres sous l'effet de la température et la qualité d'eau de refroidissement, on a réalisé les deux essais suivants :

-Essai ultra-sonique sur une partie mal refroidie d'un cylindre de travail quarto réversible en fonte haut chrome (13% de Cr) présentant des criques à feu profondes (fig 3). Le choix du cylindre est dû au fait qu'on l'a laissé en service 37000 tonne de production après l'apparition des criques ; bien qu'on sera obligé de changer un cylindre des cages 5 et 6 dès l'apparition de légères criques sous l'effet de son impact direct sur la bande



qualité de la laminée.

Fig.4 : défaut de crique à feu sur cylindre de travail quarto

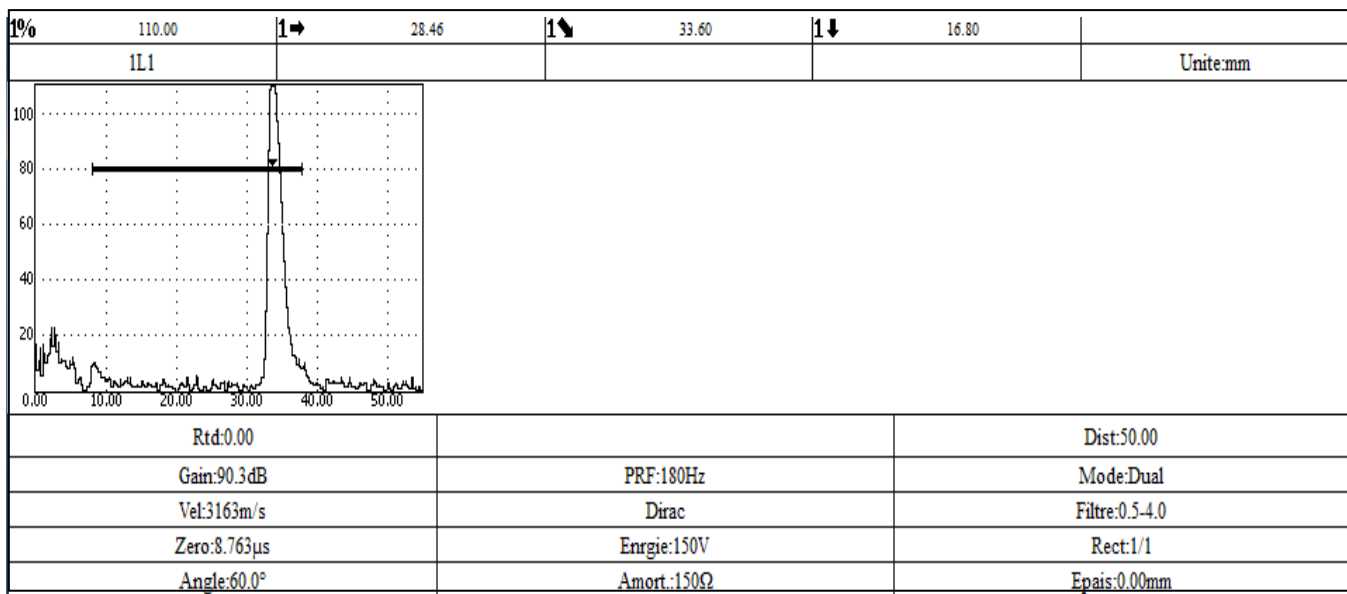
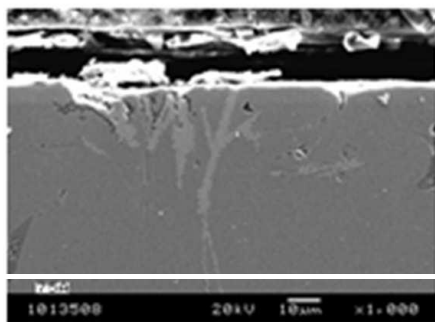


Planche.3. analyse par ultra-son d'un cylindre présentant des criques à feu

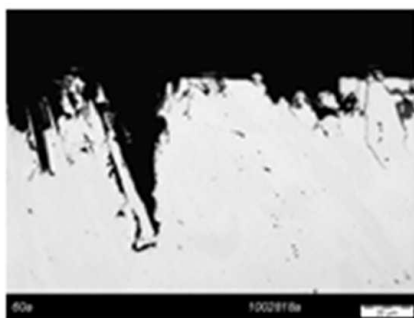
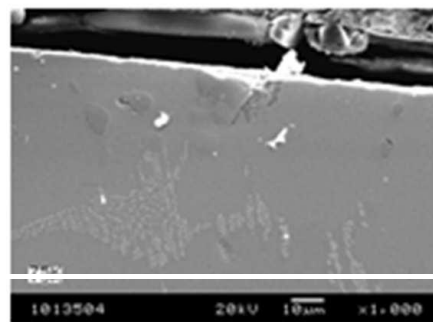
Les résultats montrent bien une pénétration de fissure allant jusqu'à 16 mm soit 0,5 mm par tonne laminée ou 1,6 mm par jour de laminage (planche.3).

L'absence d'outil de contrôle des fissures au niveau du laminoir à chaud d'Annaba a fait qu'en éliminant uniquement 7 mm de couche de travail, le maillage des criques à feu a disparu et le cylindre était prêt à être inséré dans la cage bien qu'une fissure de profondeur 9 mm existe encore et peut être source d'écaillage.

L'essai de corrosion, réalisé au niveau du laboratoire de la compagnie MARICHAL KETIN en Belgique, montre la pénétration de corrosion en fonction de la qualité d'eau pour plusieurs types de matériaux qui rentrent dans la gamme de fabrication des cylindres de laminage. Cette méthode consiste à solliciter le matériaux par des eaux de différentes grades d'acidité et à mesurer la profondeurs des pénétrations de corrosion (fig 5 et 6).



350ppm Cl⁻ +
200ppm Ca²⁺ +
0,60ppm HOCl
+ 25ppm PO₄³⁻ +
300ppm SO₄²⁻



350ppm Cl⁻

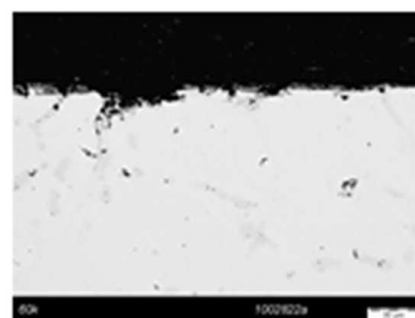


Fig.5 : influence des additifs dans l'eau de refroidissement sur la dégradation des cylindres de travail

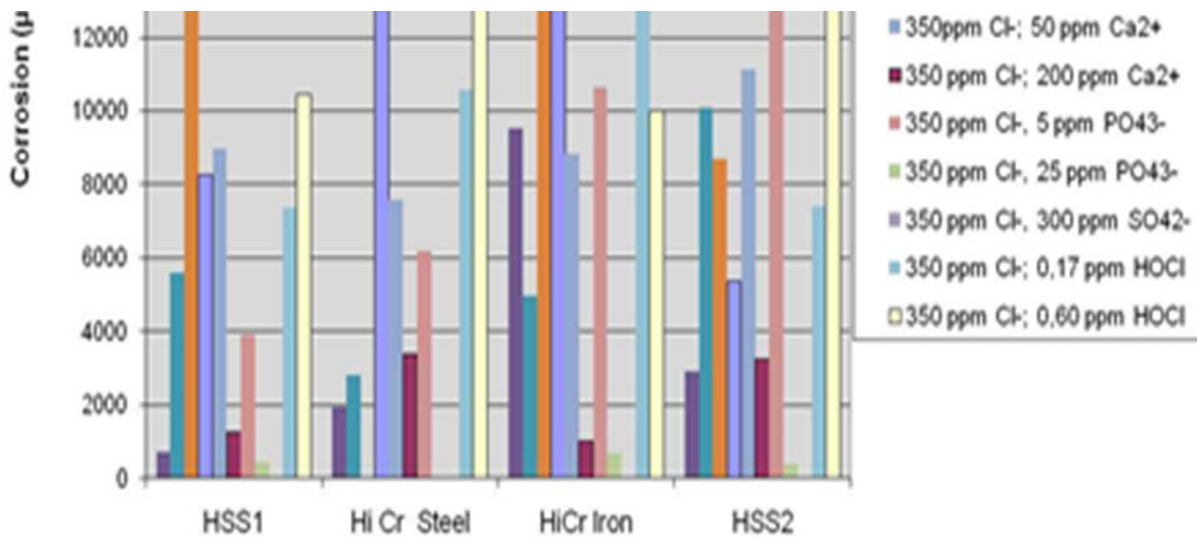


Fig.6 : essai de fatigue thermique – corrosion sur quelques type de matériaux utilisés dans la fabrication des cylindres

IV.1 .2- Impact indirect :

A) Profil de température de la bande:

Dans ce chapitre ,on ne s'intéressera pas à la température des cylindres au cours de laminage et son impact sur l'effet d'écaillage des cylindres mais sur la variation de la température sur la bande laminée à chaud (profil de température) et son influence sur deux grandeurs qui agissent sur les cylindres qui sont les forces de laminage et les forces de cambrage.

Le principe en cours de laminage est le suivant ;

Une basse température favorise l'apparition des ondulations au centre de la bande qui oblige les systèmes automatiques de contrôle (AGC : automatique gage control) et HGC : (hydraulique gage control) à donner des corrections rapides sur les forces de cambrage et moins rapide sur les forces de laminage.

Une haute température favorise l'apparition des ondulations aux bords de la bande et les systèmes de contrôle agissent cette fois de manière opposée.

Notant bien que le calcul des paramètres de laminage notamment les forces de laminage et les forces de cambrage se fait sur la base des paramètres géométriques, des paramètres chimiques et d'autre paramètre entre autres la température de la bande mesurée en cours de son passage du four au train finisseur par des **pyromètres optiques**,

Maintenant imaginons une bande dont la température mesurée avant train finisseur indique une valeur faible, donc les systèmes prévoient une grande force de laminage et une faible force de cambrage afin d'avoir un profil conforme de la bande, s'il y aura une défaillances sur la mesure des pyromètres et que la température réelle est très élevée à celle mesurée, les jauges d'épaisseur, planéité et profile mesurent l'impact de la température et donc donnent l'information aux deux systèmes de contrôle AGC et HGC, ces derniers appliquent des corrections rapides sur l'effort de cambrage et moins rapides sur l'effort de laminage , ceci nous met dans une situation «force de cambrage et laminage élevées en même temps » ce qui conduit à l'écaillage des cylindres s'il se répète souvent.

Une série d'essais d'étalonnage était nécessaire pour approuver l'efficacité des pyromètre du laminoir à chaud à bien mesurer la température des bandes dans les différentes zones du train de laminage.

Des mesures de températures ont été effectuées au niveau des quatre zones choisies selon la position des prises de température par les pyromètres :

Zone 1 : Pyromètre sortie four Type M1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Zone 2 : Pyromètre sortie quarto Type R1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Zone 3 : Pyromètre entrée finisseuse Type R1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Zone 4 : Pyromètre sortie finisseuse Type M1 de 600 à 1600°C constructeur LAND

Avec le système de thermographie composé de la caméra infrarouge FLIR A40M avec le bus Firewire et du micro-ordinateur le logiciel Thermacam Research 2.9 de Flir pour l'acquisition, la sauvegarde et le prétraitement des données.

La comparaison entre les deux systèmes de mesure LAC (laminoir à chaud) et l'URASM Les paramètres de mesure de la température par la caméra infrarouge FLIR A40M sont:

Humidité relative = 60%	Température apparente réfléchi = 25°C	Température atmosphérique =2 5°C
-------------------------	---------------------------------------	----------------------------------

Zone 1 : Sortie four

		Paramètres Objet		Emissivité = 0.80	Distance = 4m
Numéro de brame	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre (°C)	Température Caméra infrarouge Flir (°C)	Ecart (°C)
8726044	1	12h01	886	886,7	0,7
8726045	2	12h08	1038	1038,3	0,3

Tab.2 : Tableaux de mesure des Températures zone défournement

D'après les mesures effectuées au niveau de la Zone 1 ,sortie du four de l'atelier LAC, on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes sont proches l'une de l'autre(fig.7 et tab.2).

- Pour la première mesure l'écart est de **0,7°C**

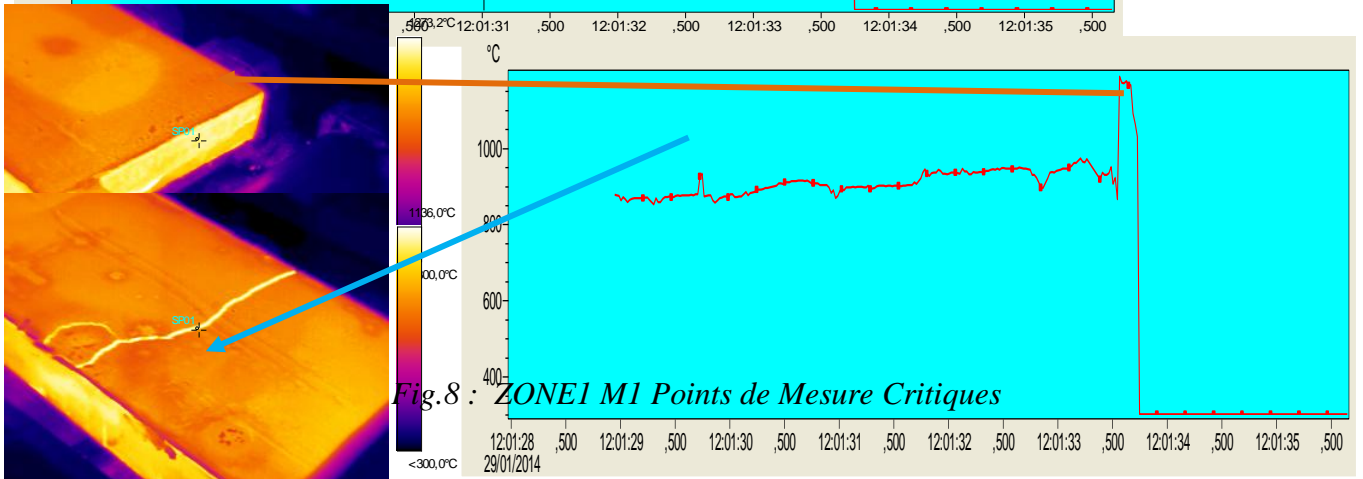
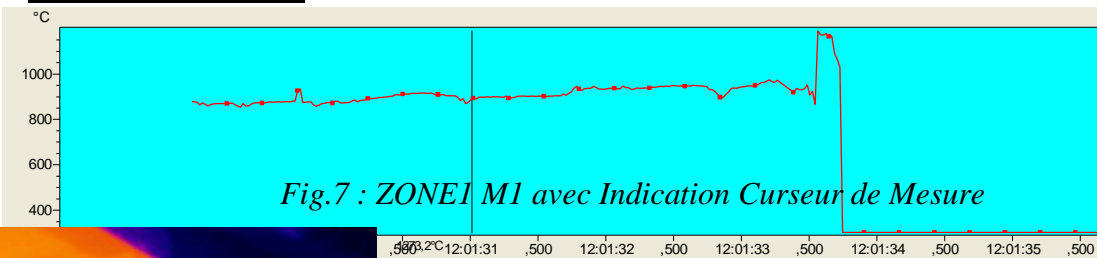
- Pour la deuxième mesure l'écart est de **0,3°C**

A noter qu'on a constaté deux pics de température pour la première mesure (Fig.8) (Zone1 M1 Points de Mesure Critique) due à l'absence de la calamine sur la surface de la brame (Numéro de la brame 8726044) après défournement:

Premier pic de température ordre température est de : 932,9°C

Deuxième pic de température ordre température est de :1186°C

Première Mesure



Zone 2 : Sortie Quarto

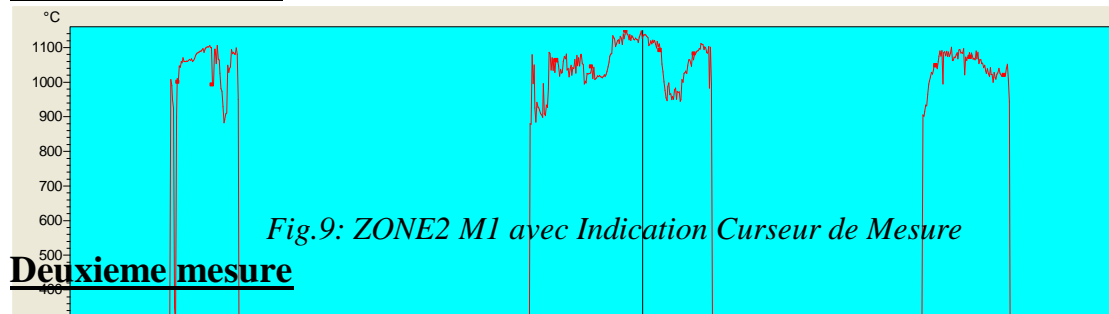
Numéro de brame	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre	Température Caméra infrarouge	Ecart ΔT (°C)
8726049	1	12h32	1128,67	1128,90	0,23
8726050	2	12h35	1126,23	1127,00	0.77

Tab.3 : Tableaux de mesure des températures zone sortie réversible

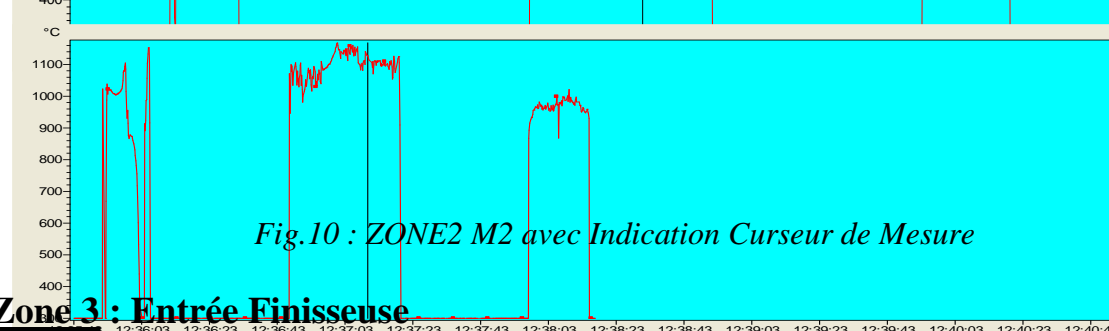
D'après les mesures effectuées au niveau de l'atelier LAC pour la zone sortie Quarto, on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes sont proches l'une de l'autre (Tab.3 et fig.9 et 10).

L'écart de la première mesure de la température ΔT (°C) est **0,23 °C**.
 L'écart de la deuxième mesure de la température ΔT (°C) est **0,77 °C**.

Première mesure



Deuxieme mesure



Zone 3 : Entrée Finisseuse

Paramètres Objet Emissivité = 0.75 Distance = 4m

Numéro de brame	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre (°C)	Température Caméra infrarouge Flir (°C)	Ecart (°C)
8726055	1	13h43	1030,62	1030,20	0,42
8726056	2	13h50	1045.94	1046,10	0,16

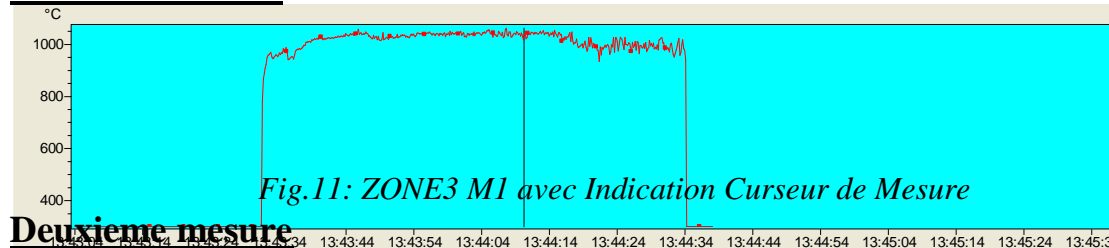
Tab.4 : Tableaux de mesure des températures zone entrée finisseuses

D'après les mesures effectuées au niveau de l'atelier LAC on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes de Température sont proches l'une de l'autre Tab.4 et fig.11 et 12.

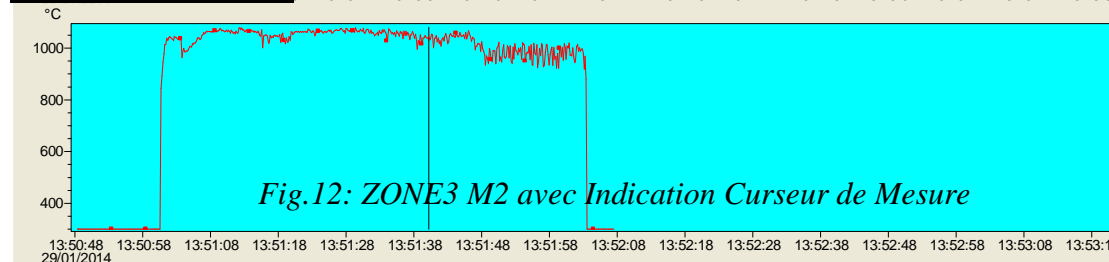
L'écart de la première mesure de la température ΔT (°C) est **0,42°C**.

L'écart de la deuxième mesure de la température ΔT (°C) est **0,16°C**

Premiere mesure



Deuxieme mesure



Zone 4 : Sortie Finisseuse

Paramètres Objet Emissivité = 0.60 Distance = 4m

Numéro de	Mesure	Temps de la mesure	Température Pyromètre	Température Caméra infrarouge	Ecart (°C)
-----------	--------	--------------------	-----------------------	-------------------------------	------------

brame			(°C)	Flir (°C)	
8726059	1	14h03	902,083	902,00	0,083
8726060	2	14h09	902,880	902,5	0,380

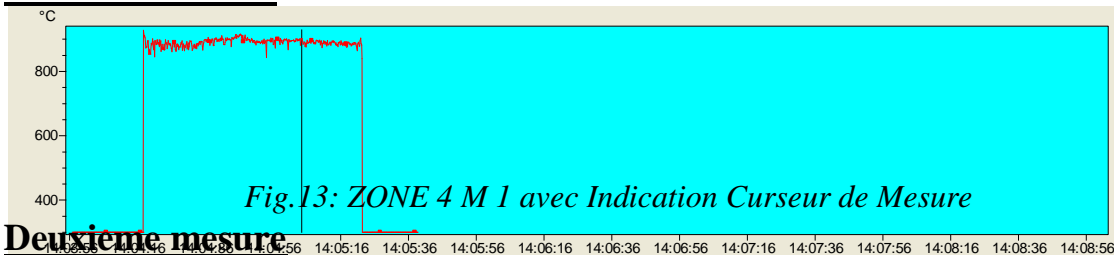
Tab.5 : Tableaux de mesure des températures zone sortie finisseuses

D'après les mesures effectuées au niveau de l'atelier LAC on a constaté que les mesures de température prises par les deux systèmes de Température sont proches l'une de l'autre (Tab.5 et fig.13 et 14).

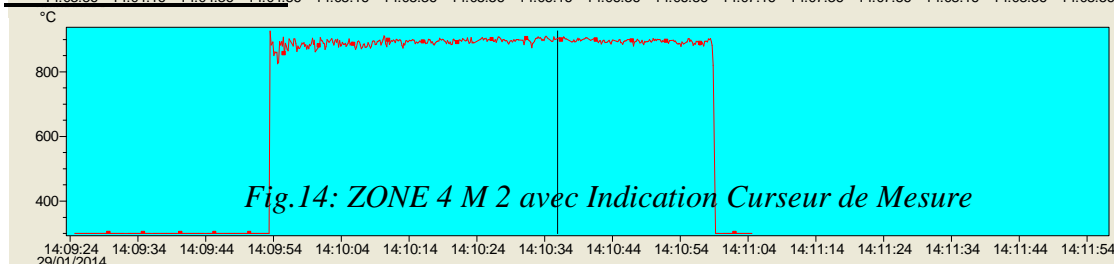
L'écart de la première mesure de la température ΔT (°C) est **0,083°C**.

L'écart de la deuxième mesure de la température ΔT (°C) est **0,380°C**.

Première mesure



Deuxième mesure



Conclusion :

L'écart maximal entre les mesures effectuée par les deux systèmes pyromètres du LAC et la caméra infrarouge de l'URASM, au niveau des différentes zones du laminage est de l'ordre **0,77°C**

Cet écart répond aux spécifications métrologiques pour la grandeur de mesure de température au niveau des différentes zones du laminoir à chaud.

Une série d'essai de laminage des brames défournées à plusieurs intervalles de temps, nous a permis de prélever les profils de température représentés dans le tableau 06, ces températures sont des moyennes mesurées par notre caméra infrarouge comme le montre la figure 15 :

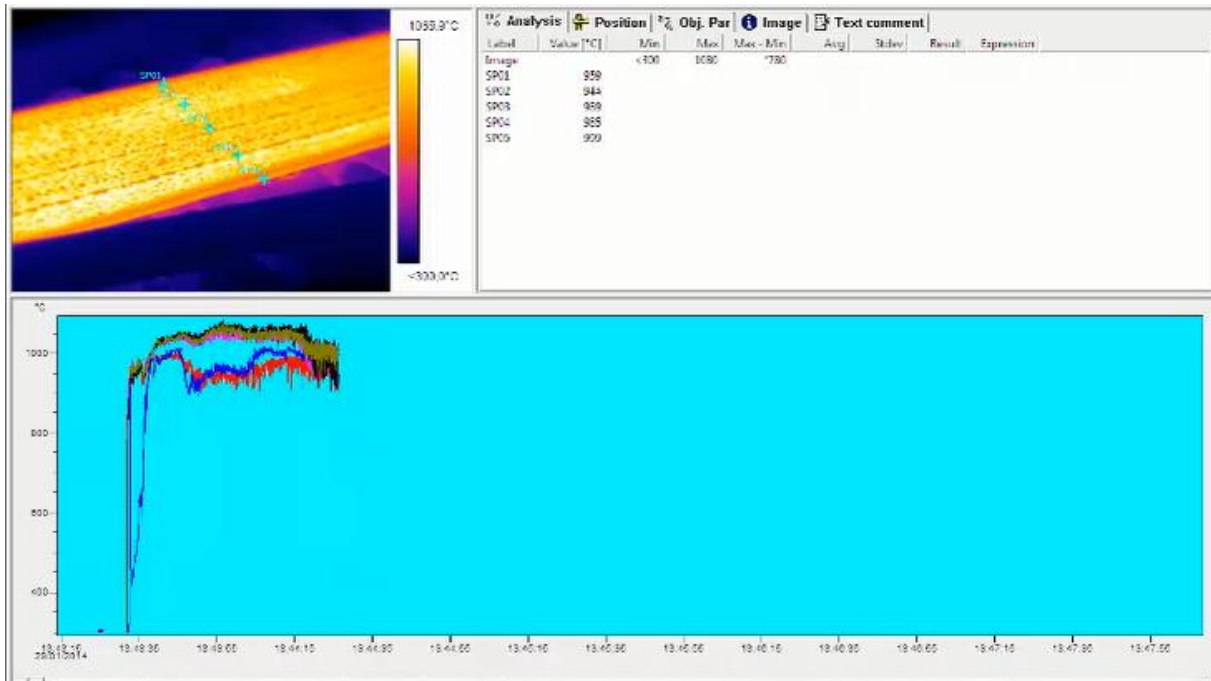


Fig.15 : mesure de profile de température de la bande entrée train finisseur.

Tab.6. Tableaux de mesure profile de température en fonction du temps de défournement

Temps de défournement Min	15	25	35	45	60	75
Temp moy centre °c	1035	1032	1032	1035	1026	1027
Temp moy CM °c	1031	1032	1027	1031	1021	1018
Temp moy CO °c	1030	1030	1010	1009	996	992

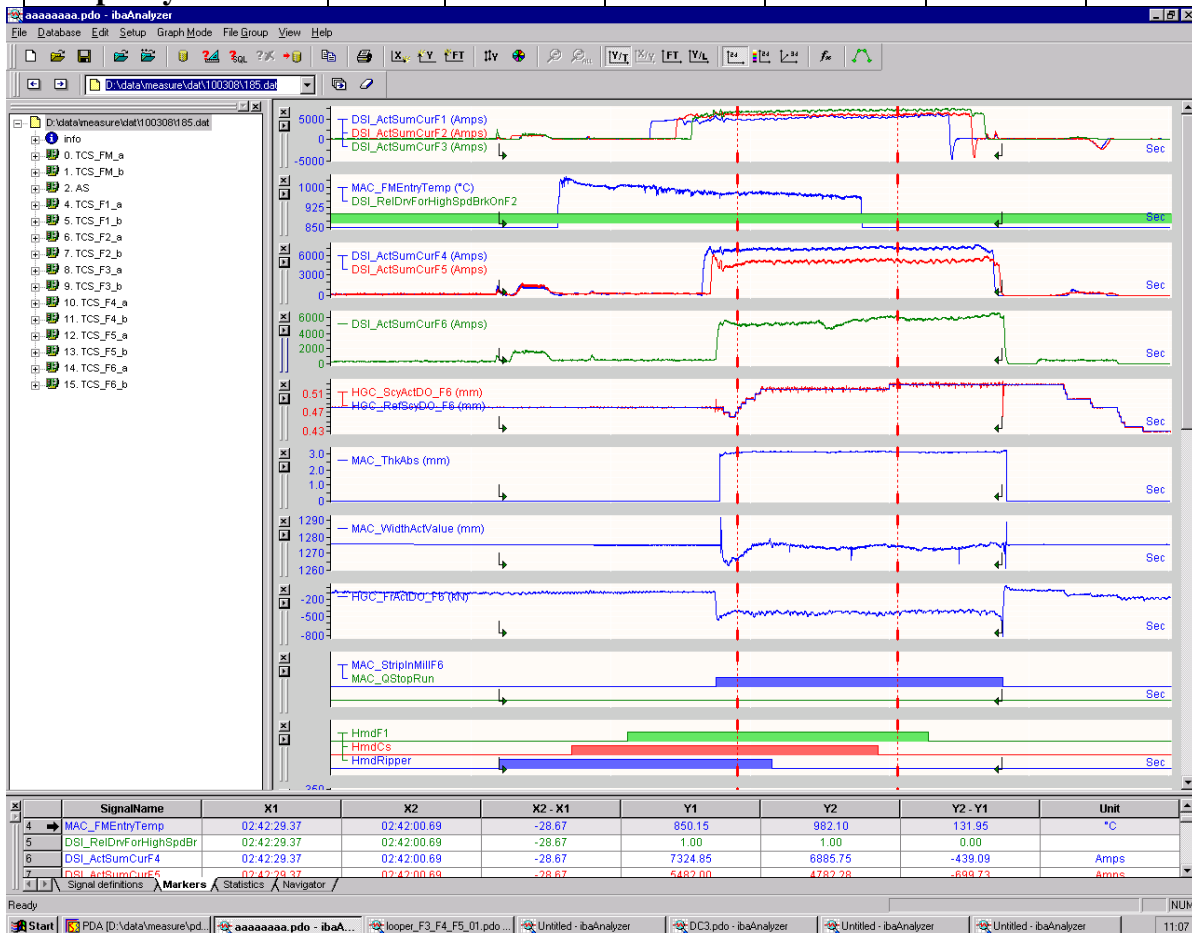


Planche .4 : variation des forces de laminage et de cambrage d'une bande laminée à chaud

On note bien qu' à chaque essai , l'opérateur sera obligé de rapporter des corrections au parallélisme des cages finisseuses pour éviter le cintrage des bandes et ainsi éviter des ébauches ou avaries.

En utilisant le contrôle graphique par notre système IBA analyser et en suivant les variations des forces de cambrage et force de laminage en fonction du profil de température comme le montre la planche 4, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Une variation de 20°C de température entrée finisseuses fait varier les forces d'engagement de 100 KN et les forces de cambrage de 350 KN.
- Un changement de 05 points sur les valeurs de correction pour une épaisseur moyenne de 3 mm fait varier les forces d'engagement de 200 KN.
- Les changements multiples aggravent énormément les valeurs DO (Drive side – Operateur side).

L'intervalle de défournement (temps) influe considérablement sur le profil de température. Ce dernier crée un gradient de forces sur les cylindres entre la partie opérateur et la partie moteur.

IV.2 : Influence de la qualité des cylindres :

Diagramme ISHIKAWA (qualité de cylindre)

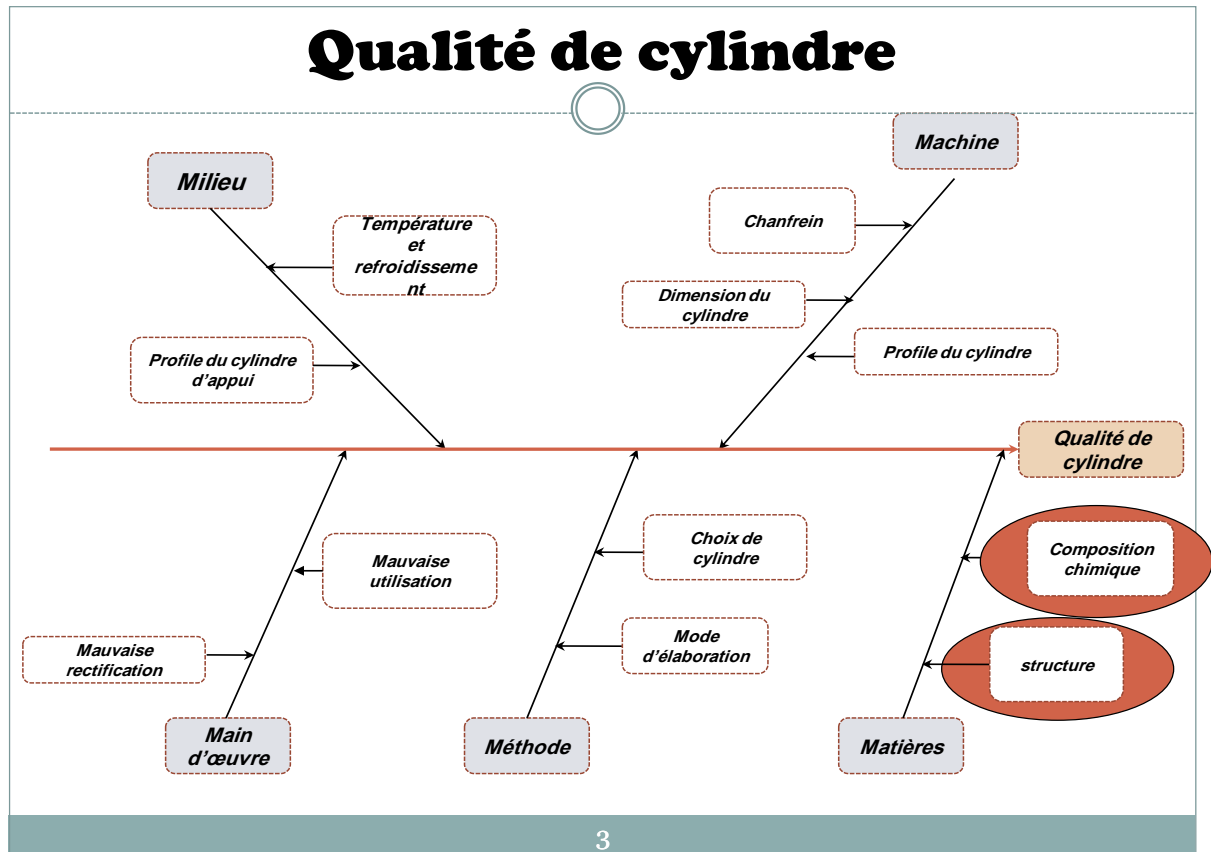


Planche.5 : paramètres influant sur la qualité des cylindres dans le laminage à chaud

Pendant notre étude et durant les années 2011-2013 nous avons soumis 28 échantillons des cylindres écaillés à des essais de dureté, chimique et structurale.

Nous montrons ici trois cas d'étude des cylindres de trois fournisseurs reconnus mondialement. Il s'agit de :

MARICHAL KETIN Belgique
 DAVY ROLLS Royaume unis
 INNSE CILINDRI Italie

IV.2.1 Cas cylindre MKB :

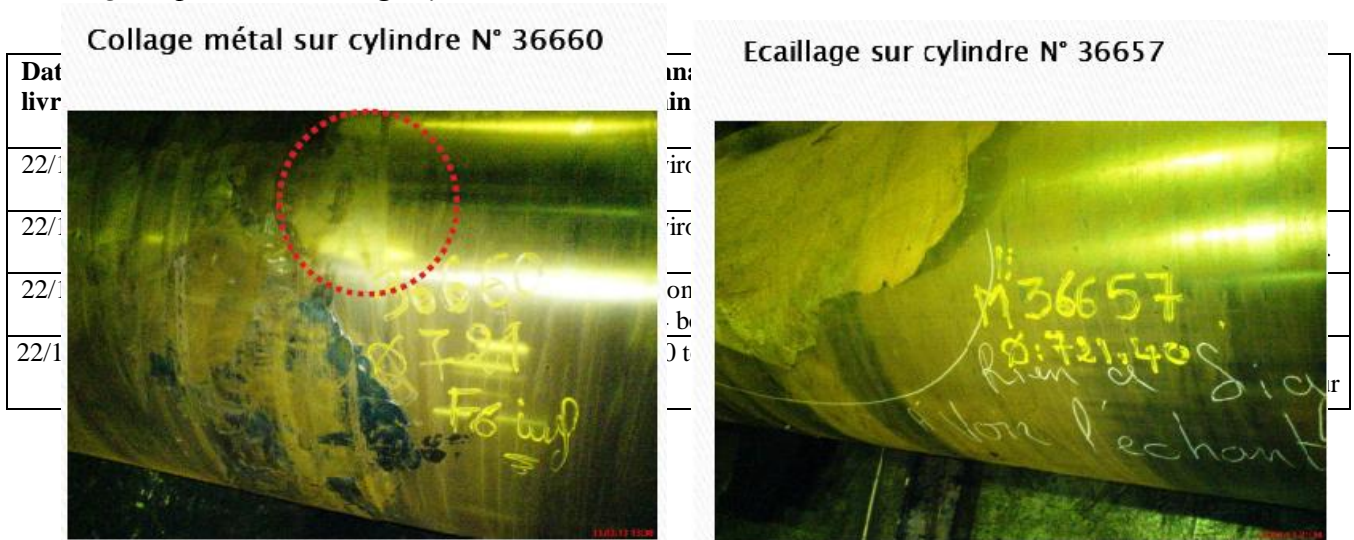
L'étude a été initiée à la suite des problèmes rencontrés lors de l'utilisation des 04 cylindres en fonte ICDP d'origine MARICHAL KETIN :

- 03 cylindres ont subi des collages métal dès les premières utilisations (laminage d'environ 1500 tonnes).
- 01 cylindre a subi un écaillage profond sur 70 mm (la totalité de la couche de travail).

Il a été mis à notre disposition un échantillon prélevé sur le fragment détaché du cylindre écaillé (Matricule 36657). Les coupes micrographiques ainsi que les analyses ont été effectuées sur une section située à environ 10 mm de la surface de la table du cylindre.

ASPECT MACROGRAPHIQUE DES CYLINDRES ENDOMMAGES :

Fig.16 :photosd'écailage cylindres MKB



Tab .7 : statistiques des cylindres écaillés du fournisseur MKB

RESULTATS D'ANALYSES :

Essais de dureté :

Shore C mesurée	Shore C spécifié sur certificat MARICHAL KETIN	
65	Bas	80.6
	milieu	79.3
	haut	79.6

Analyses chimiques :

Elément (%)	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
Analyse	4.07	0.89	0.90	0.011	0.014	4.20	1.77	0.43
Sur certificat MARICHAL KETIN	3.42	0.95	0.97	Non spécifié	Non spécifié	4.36	1.74	0.39

Tab .8 : analyse chimique d'un échantillon de cylindre MKB écaillé

Microstructure/ Fonte hypo eutectique : Ledeburite + bainite

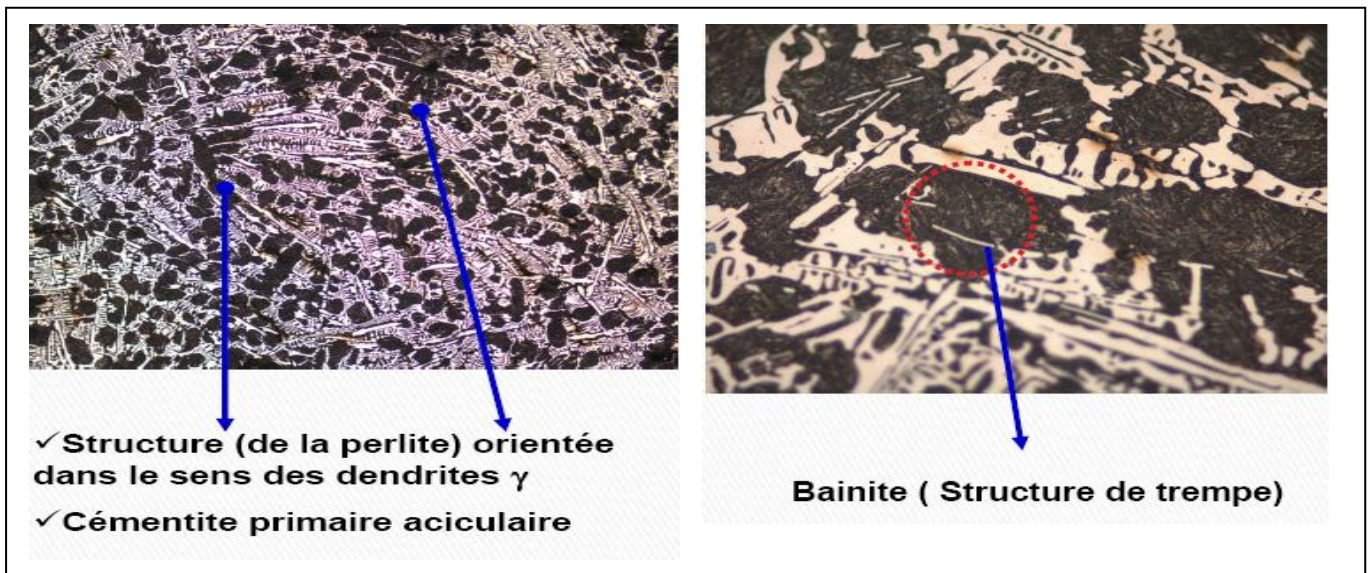
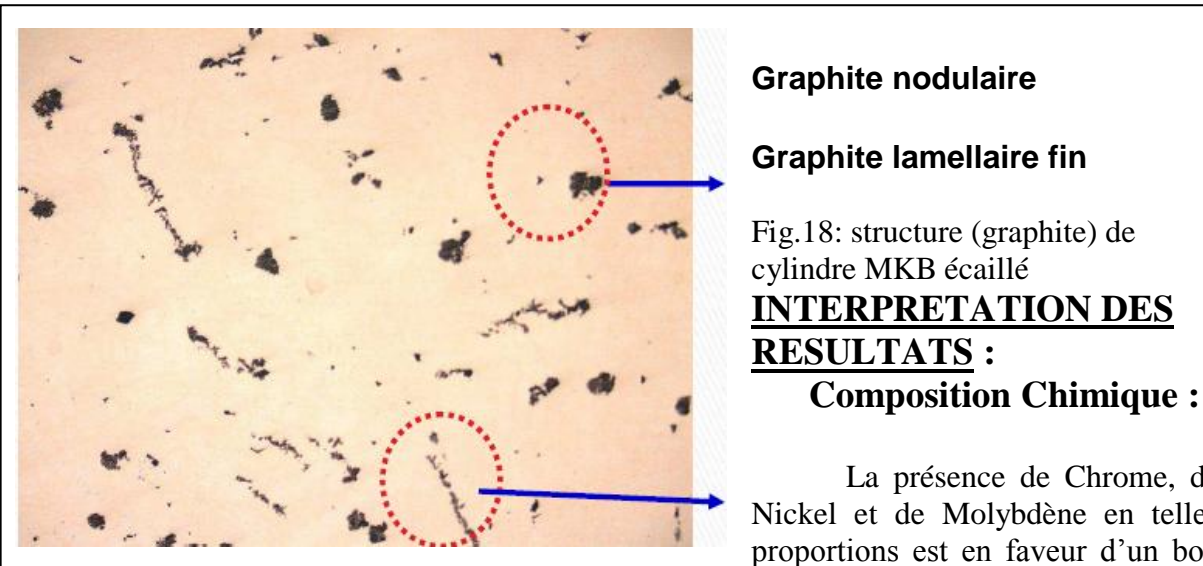


Fig .17 : analyse structurale d'un échantillon de cylindre MKB

Microstructure :



niveau de dureté superficielle et par conséquent une bonne tenue à l'usure du cylindre.
~~Par contre la teneur en carbone est élevée par rapport à celle spécifiée dans le certificat du fournisseur et aussi celle des fontes faiblement alliées destinées à la fabrication des cylindres de travail .Usuellement , cette teneur ne devrait pas dépasser 3,6% (Tab.8).~~

Microstructure :

Points forts: La présence simultanée d'eutectique et de bainite est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle (fig.17).

Points faibles :

- Orientation dendritique de la structure.
- Cémentite primaire en grande proportion et de forme aciculaire fragilisante (conditions de refroidissement pendant la solidification du cylindre).
- Présence de graphite (lamellaire et nodulaire) sachant que dans les fontes blanches tout le carbone devrait précipité sous forme de cémentite ou autre carbure (conditions de refroidissement pendant la solidification du cylindre) mais ceci décrit bien les caractéristiques des cylindres en fontes à trempe indéfinie (fig.18).

Dureté:

La dureté réelle est inférieure à celle spécifiée dans le certificat du fournisseur de 14 points. Le carbone , qui devrait augmenter la dureté de la table du cylindre sous forme de cémentite alliée , a précipité en grandes proportion sous forme de graphite.

CONCLUSIONS :

L'endommagement des cylindres objet de cette étude est vraisemblablement dû à des anomalies microstructurales ; résultat de mauvaises conditions de refroidissement pendant la

coulée du cylindre ainsi qu'un traitement thermique non adéquat donnant lieu aux anomalies suivantes:

- Présence de cémentite primaire aciculaire en proportion importante (forme aciculaire fragilisante).
- Présence de graphite en grandes proportions, ce qui montre que les conditions de solidification n'ont pas été en faveur de la formation de la cémentite favorable aux conditions de travail des cylindres, l'excédant de carbone a précipité sous forme de graphite.

IV.2.2.Cas des cylindres DAVY ROLL :

Il a été mis à notre disposition deux (02) fragments d'écaillés détachés d'un cylindre d'origine Davy Roll .

INVESTIGATIONS EN LABORATOIRE :

✓ COMPOSITION CHIMIQUE

L'analyse chimique a été effectuée par voie spectrale et a donnée les résultats suivants :

élément	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ti	Cu	Ni	Mo
%	4.47	0.80	0.77	0.016	0.014	1.38	0.016	0.027	4.07	0.26

Tab .9 : analyse chimique d'un échantillon de cylindre DAVY ROLL écaillé

Il s'agit d'une fonte hypo eutectique faiblement alliée au Chrome et au Nickel

Il est à noter que le taux de carbone pour les cylindres travail de trains finisseurs continus ne dépasse pas 3,6 %

✓ ANALYSE MICROSCOPIQUE :

Des sections métallographiques ont été préparées sur les deux échantillons perpendiculairement au faciès de rupture. Les observations ont été effectuées au microscope à des grossissements allant de 150 X à 300 X.

Observation sans attaque :

Elle montre :

- Présence de graphite pseudo-lamellaire de taille hétérogène.
- Présence de fissures se propageant à l'interface matrice-graphite (le long des lamelles de graphite).
- Présence de lamelles de graphite enchevêtrées (Fig. 19).



Figure n°1 : Graphite de tailles hétérogène
G = 150X



Figure n°2 : Fissures se propageant le long des lamelles de graphite
G = 300X

Fig.19. *structure sans attaque chimique d'un*

Observation après révélation de la structure :

Elle montre une microstructure de fonte truitée (mi-blanche, mi-grise) (Fig. 20)

- Présence graphite
- Présence d'eutectique (lédeburite)
- Matrice bainitique

INTERPRETATIONS DES RESULTATS :

Composition Chimique :

- La présence de chrome, de Nickel et de Molybdène en telles proportions est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle et par conséquent une bonne tenue à l'usure
- La teneur en carbone est élevée par rapport aux fontes faiblement alliées destinées à la fabrication des cylindres de travail, usuellement cette teneur ne dépasse pas 0,36% (tab.9).

Microstructure :

- La présence simultanée d'eutectique, de graphite et de bainite est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle (fig.20).
- La localisation du graphite dans cette fonte, relativement dure, caractérise les fontes à trempe indéfinie.

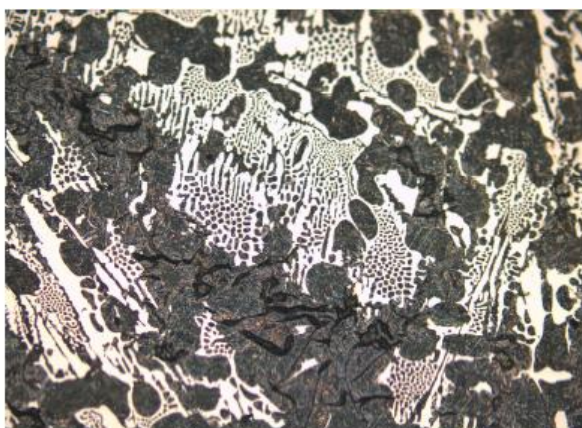


Figure n° 3- Structure de fonte truitée
G = 300X



Figure n° 3 – Lamelles de graphite enchevêtrées
G= 750X

- E
n
eff
et,
le
gra
phi
te

précipité dans les zones inter dendritiques génère des micros vides à l'interface matrice-graphite qui constituent des amorces faciles pour les fissures ; la propagation des fissures est facilitée par l'enchevêtrement des lamelles de graphite. Lors du laminage, le réseau de graphite près de la surface du cylindre, favorise l'amorçage des fissures et sous l'effet des contraintes appliquées, ces fissures trouvent leur chemin aisément le long de ce réseau (fig.20).

Fig.20.structure avec attaque chimique d'un échantillon Davy roll écaillé

CONCLUSIONS :

L'endommagement des cylindres ,objet de cette étude est dû à des anomalies microstructurales ,résultats d'un mauvais traitement thermique.

IV.2.3 Cas du cylindre INNSE CYLINDRI :

Ecaillage sur cylindre n°36660



Fig.21: photographie du cylindre écaillé INNSE Cylindri.

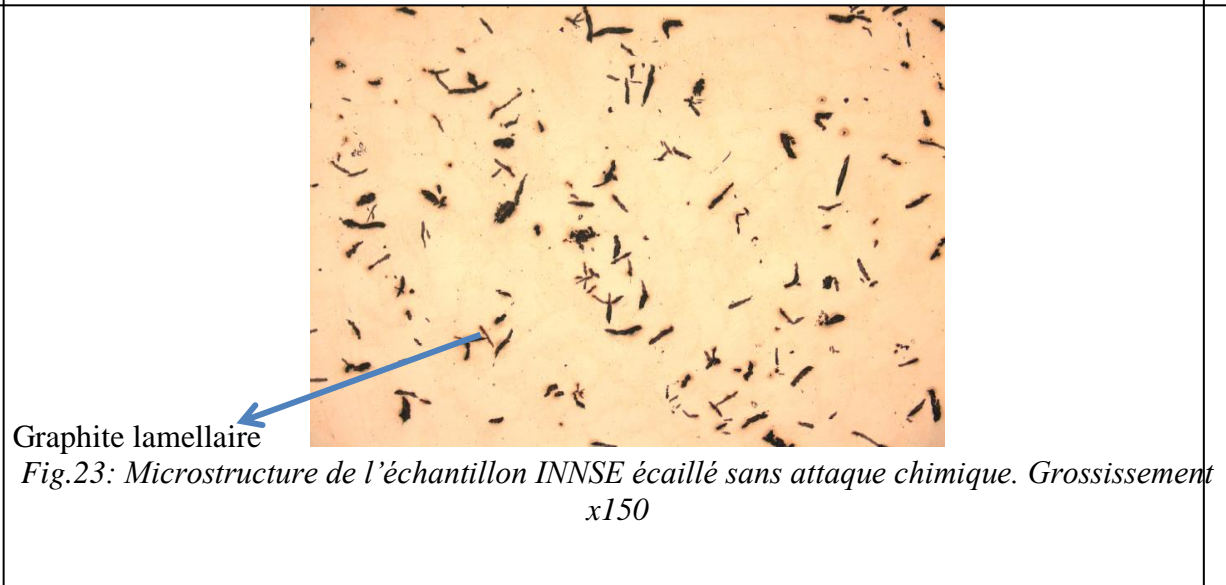
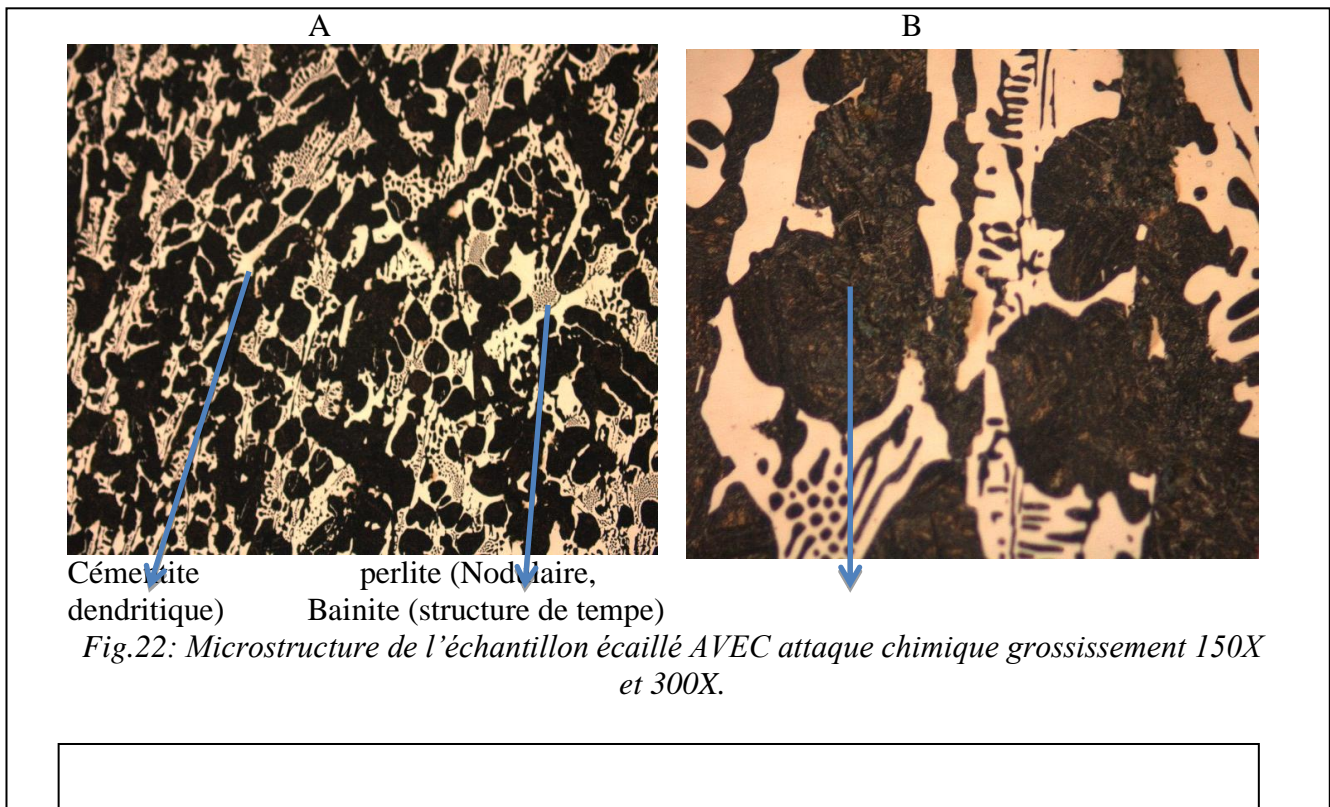
Analyse chimique :

Elément (%)	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Analyse	3,83	0,84	0,81	0,05	0,009	1,76	4,06	0,35
Sur certificat INNSE CYLINDRI	3,5	1,2	1,2	0,04	0,03	2,00	4,8	0,6

Tab .10 : analyse chimique d'un échantillon de cylindre INNSE écaillé

Essai de dureté :

Shore C mesurée	Shore C sur certificat INNSE cylindri	
75	Bas	76
	Milieu	76
	Haut	76



INTERPRETATION DES RESULTATS :

- **Composition Chimique** : La présence de Chrome, de Nickel et de Molybdène en telles proportions est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle et par conséquent une bonne tenue à l'usure du cylindre. Par contre la teneur en carbone est légèrement élevée par rapport à celle spécifiée dans le certificat du fournisseur, normalement cette teneur ne devrait pas dépasser 3,6%(Tab.10).

- **Microstructure** : La présence simultanée de la perlite, cémentite, et de la Bainite est en faveur d'un bon niveau de dureté superficielle.fig.21 et 22.

- **Dureté**: La dureté obtenue après analyse est de l'ordre de celle donnée par le fournisseur (entre : 75-80)

Conclusion des essais :

Les résultats précédents montrent clairement l'influence de la non-conformité de la qualité des cylindres sur l'apparition de l'écaillage néanmoins, ces cas de cylindre ne représentent que 7% de la totalité des cylindres écaillés.

Ceci montre que d'autres facteurs (autre que la qualité des cylindres) interviennent sur l'apparition du défaut d'écaillage.

IV. 3 : Influence des chocs mécaniques :

Chocs mécaniques

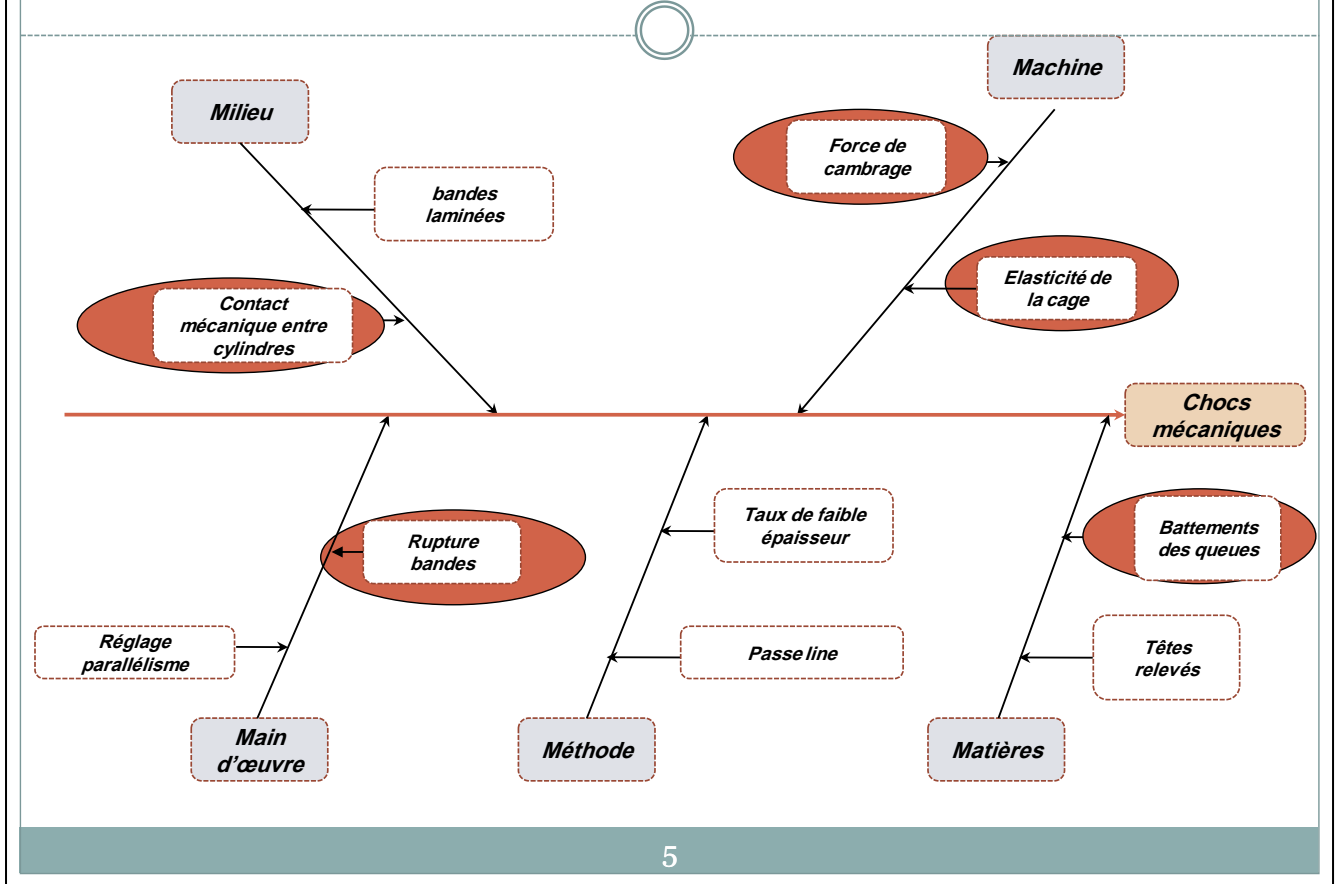


Planche.6 : paramètres influant sur les chocs mécaniques dans le laminage à chaud

Pendant le laminage des fines épaisseurs (inférieur à 2 mm), et en fonction de la valeur du séddage de la cage où les cylindres de travail se positionnent à un gap négatif allant jusqu'à -3 mm c'est-à-dire qu'ils sont en contact permanent et que la bande les sépare pendant son engagement et dès que cette dernière quitte l'emprise sous l'effet des deux forces agissantes (forces de laminage et de cambrage) les deux cylindres se martèlent entre eux pouvant causer des fissures internes dans les zones à défauts.

IV.3.1 Analyse des courbes d'extension :

L'analyse des courbes de calibrage avec seddage (fig.23) faite par deux grands spécialistes de laminage FROMM LAURANT et ALAIN PUISSANT à qui nous avons demandé de l'aide, a montré que les cages du train finisseur sont trop élastiques permettant le martelage des cylindres dès que la bande quitte la cage.

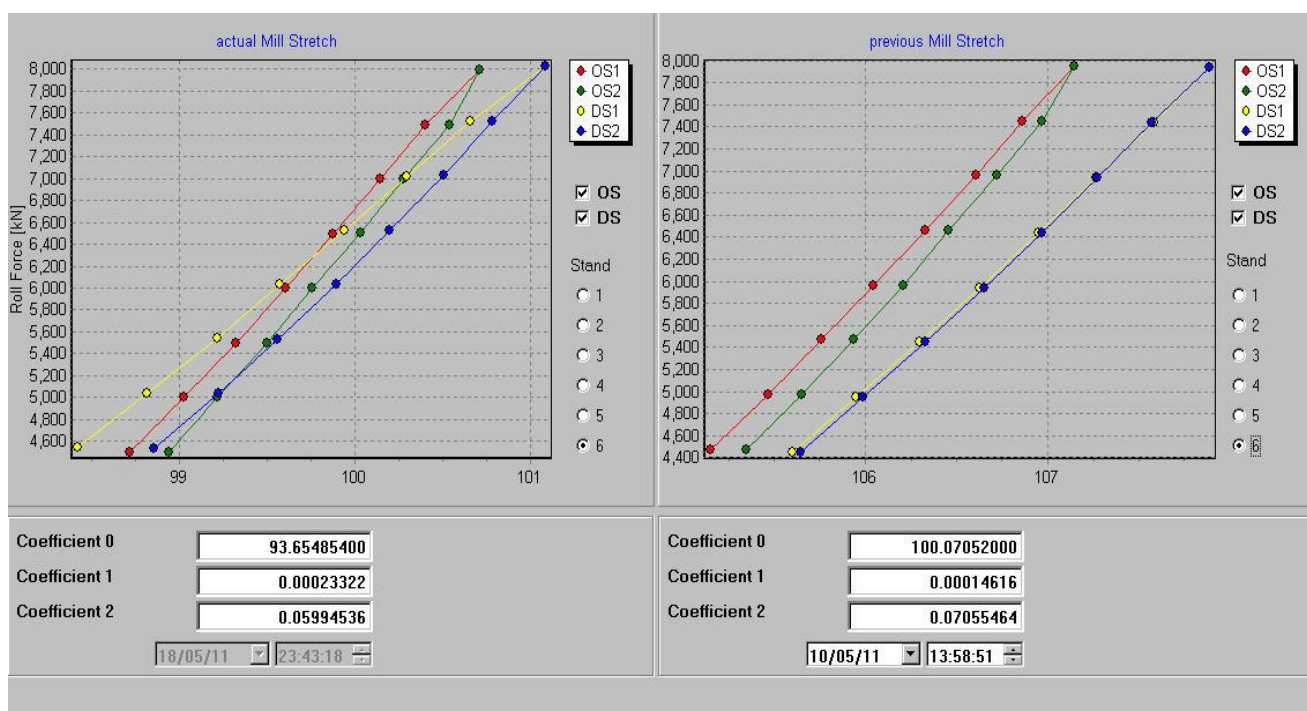
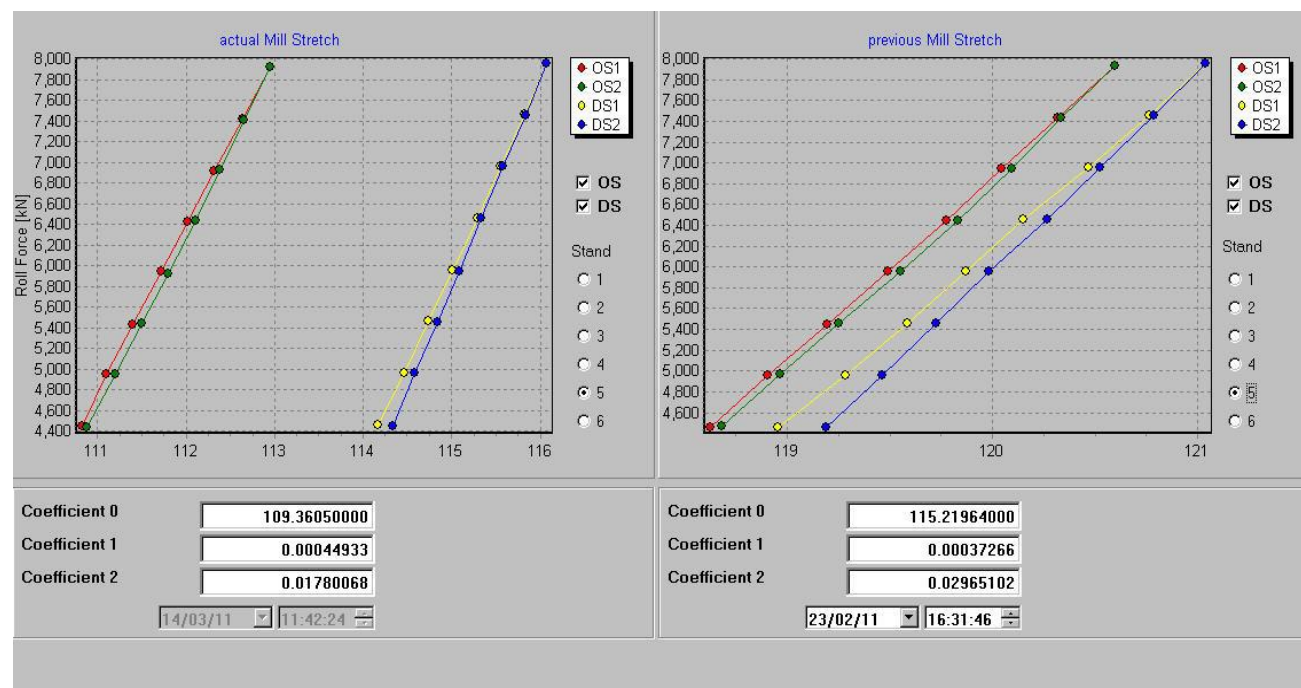


Fig.24 : Courbes d'extension des cages 5 et 6 pendant le calibrage avec seddage

IV.3.2. solution proposée :

La solution préconisée et qui a été réalisée avec succès ,consiste à l'arrêt de la fonction cambrage avant que la bande ne quitte la cage.

La planche 7 montre l'application sur HMI (Human Machine Interface) de la modification de la fonction cambrage faite sur le programme de calcul.

Cette solution a pu aussi éliminer un problème de pic de force de cambrage en queue de bande (pic de force de correction des ondulations de la bande après avoir quitter la cage amont) comme le montre les figures 24 et 25 , avant et après modification.

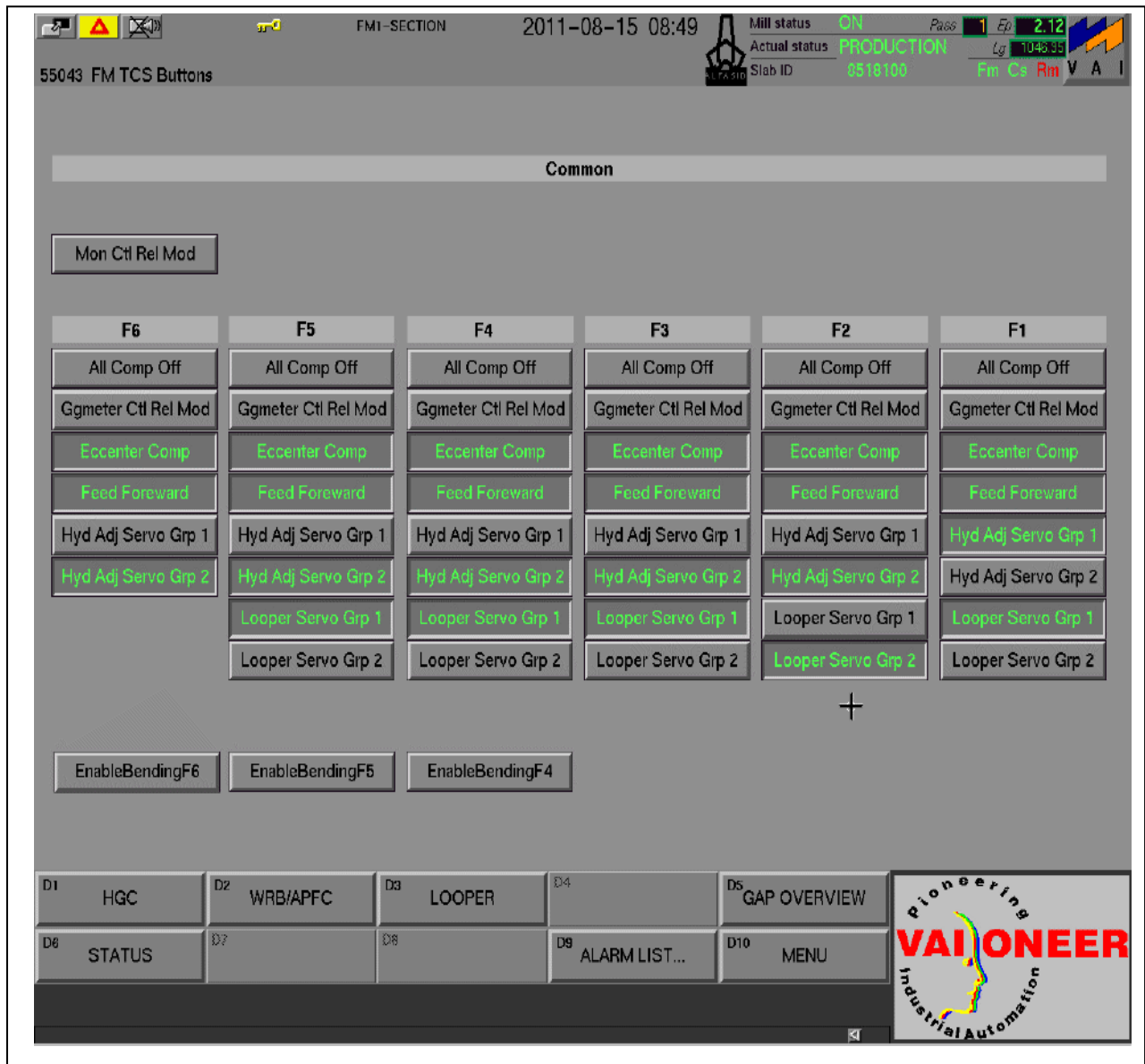


Planche 7 : modification d'arrêt de la fonction de cambrage en queue de bande pour les cages 4, 5 et 6

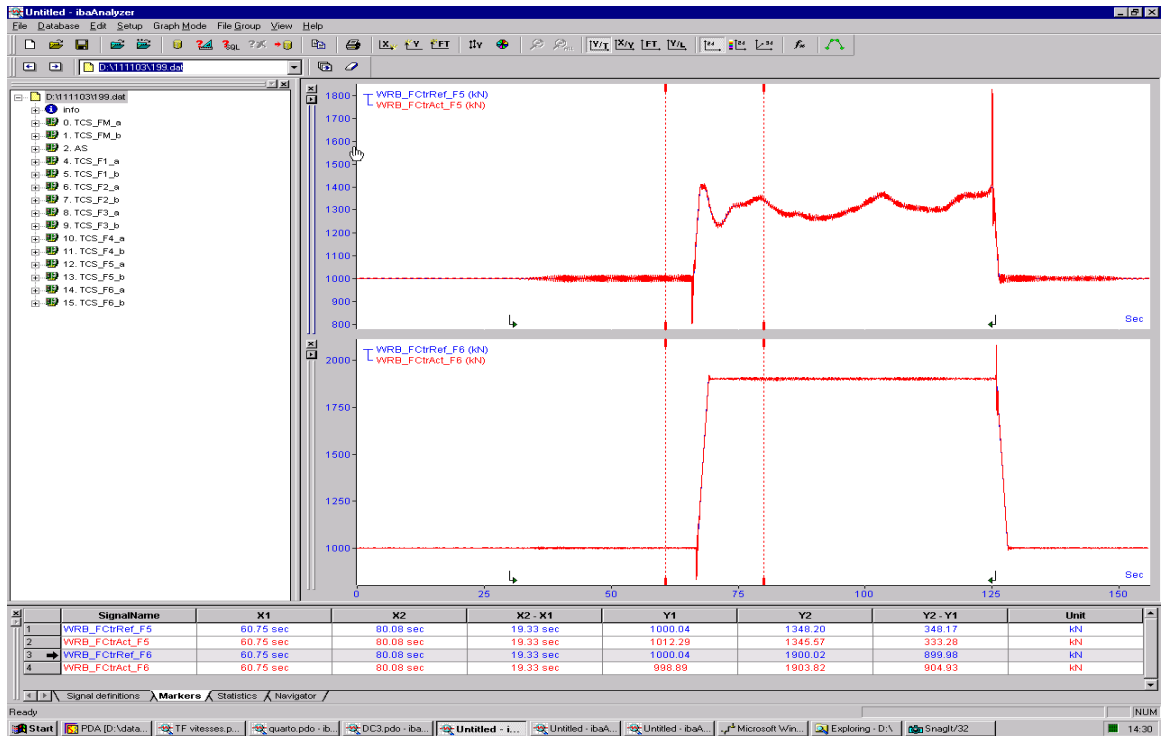


fig.25 : Pression de cambrage en queue de bobine avant modification

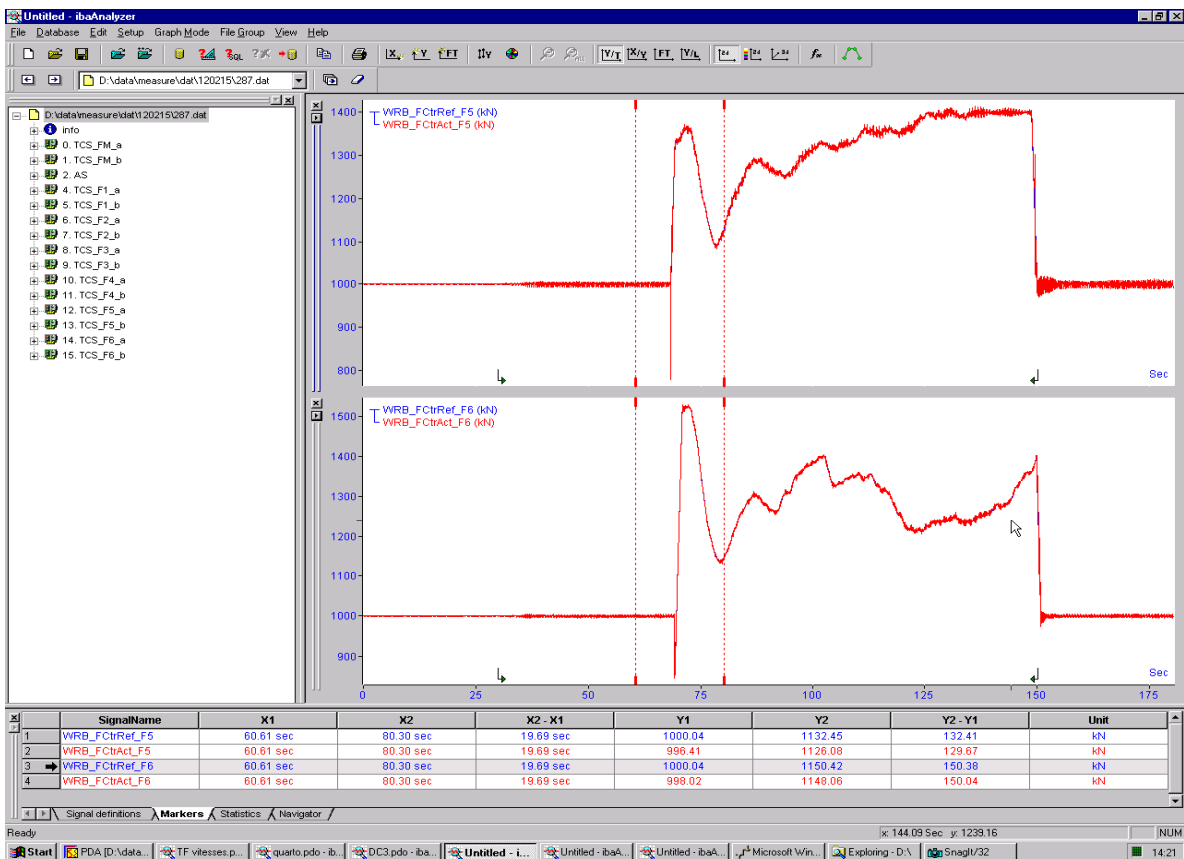


Fig.26 : Pression de cambrage en queue de bobine après modification

IV.3.3-Chocs mécanique dû aux ébauches :

Pour ce facteur, on se contentera de montrer une analyse faite par les experts du groupe Arcelor Mittal et présentée durant le séminaire des cylindres 2011 montrant l'évolution de la consommation des cylindres en fonction du taux débauche pour certain laminoir.

Le graphique de la figure 26 montre bien l'influence directe des ébauches sur le ratio de consommation des cylindres.

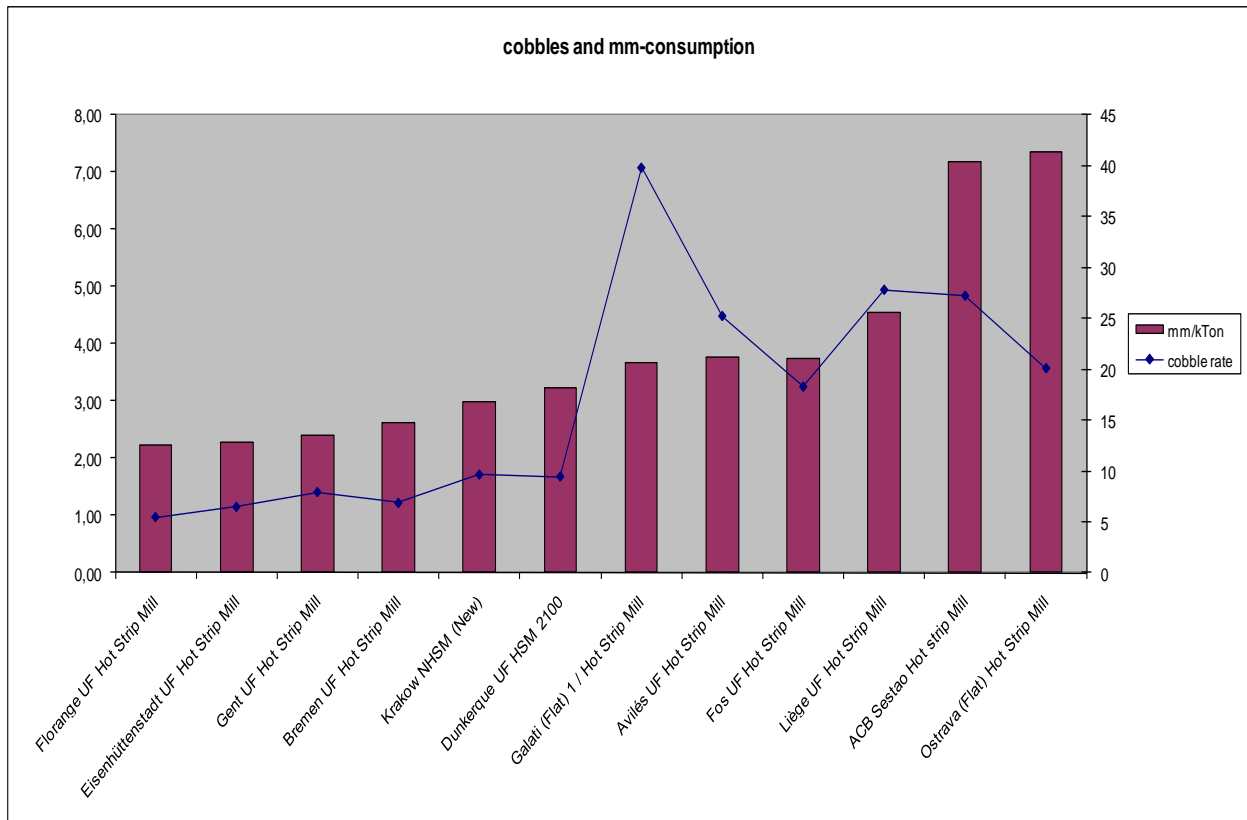


Fig.27: Relation entre la consommation des cylindres et le taux d'ébauche dans les laminoirs à chaud

IV.4 : Influence du cambrage et profile des cylindres :

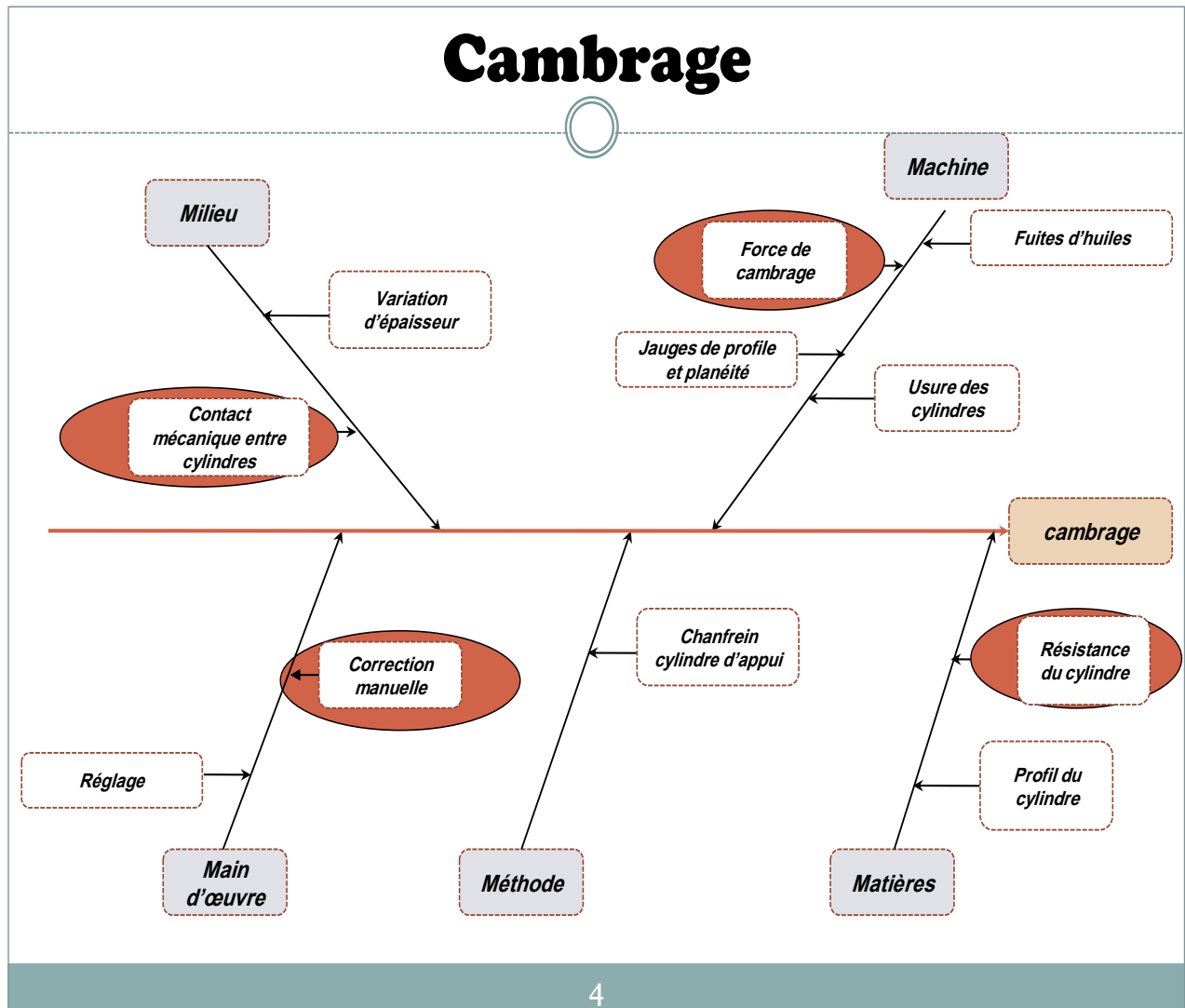
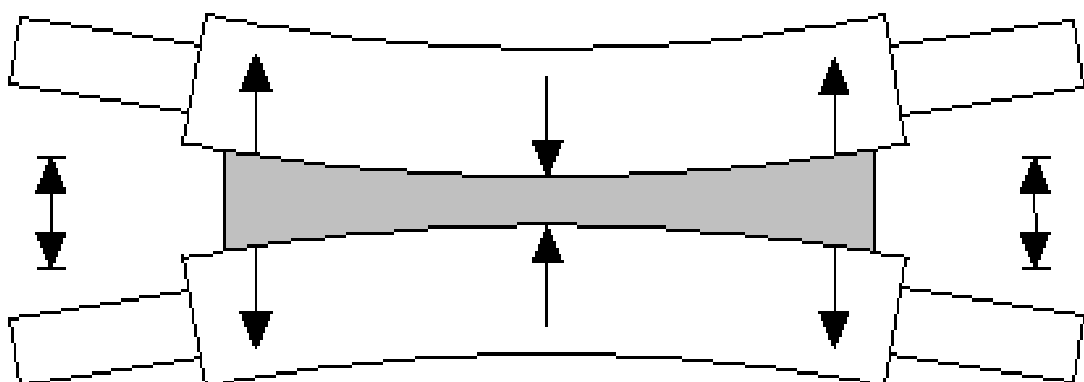


planche.8 : paramètres influant sur les forces de cambrage des cylindres dans le laminage à chaud

Dans ce chapitre, on se focalise sur l'influence des forces de cambrage du point de vue de la limite de résistance des cylindres.

IV.4.1 IMPACT DU CAMBRAGE :

Le cambrage est une force utilisée pour corriger le fléchissement ou le cambre des cylindres au cours de laminage sous l'effet des pressions de laminage comme il est montré sur la figure 27, afin de donner un profil correct à la bande laminée.



La
planc
he 9
,qui
repré

sente le calcul des forces de cambrage du train finisseur d'Arcelor mittal Algérie tirée des HMI du laminage à chaud ,montre les limites des forces de cambrage fixées par les constructeurs entre 150 et 2400 KN et sur le graphe fig.28 pour une bande laminée à 1,9 mm d'épaisseur, cette force a dépassé 1900 KN

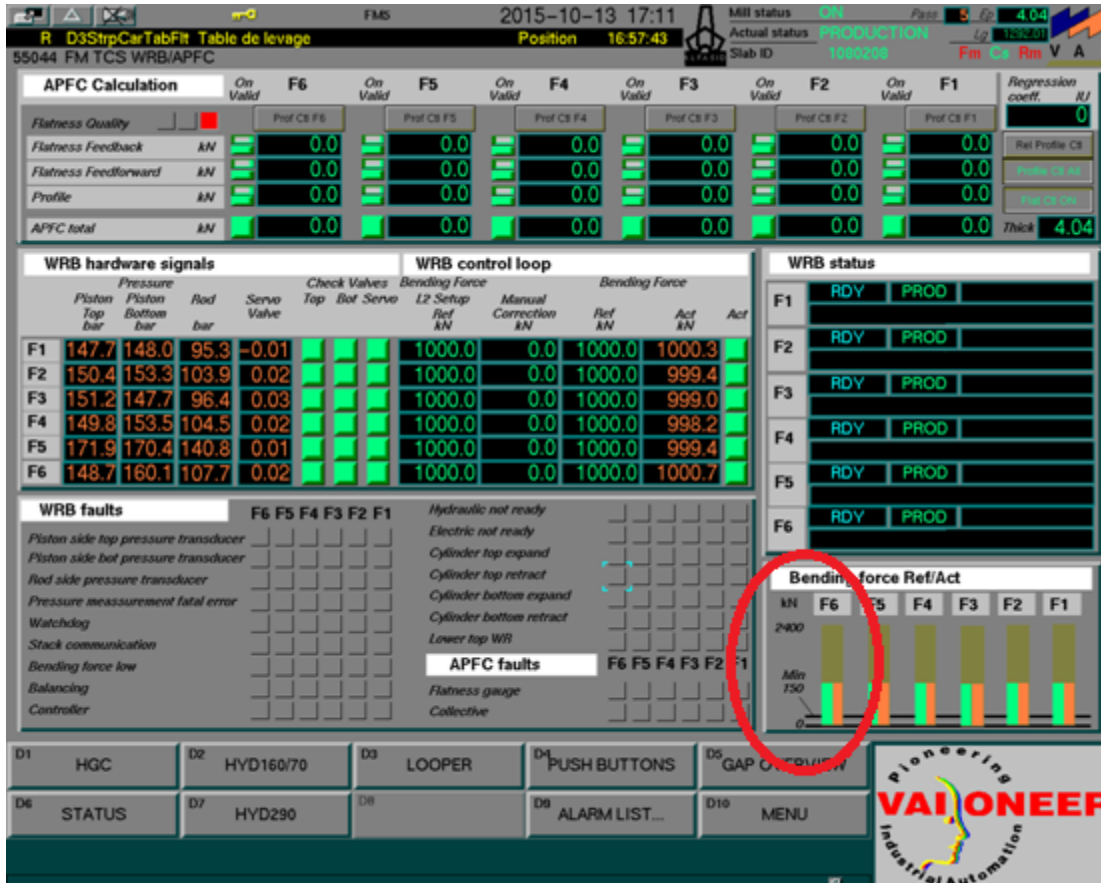


Planche.9.Vue de calcul des forces de cambrage du train finisseur

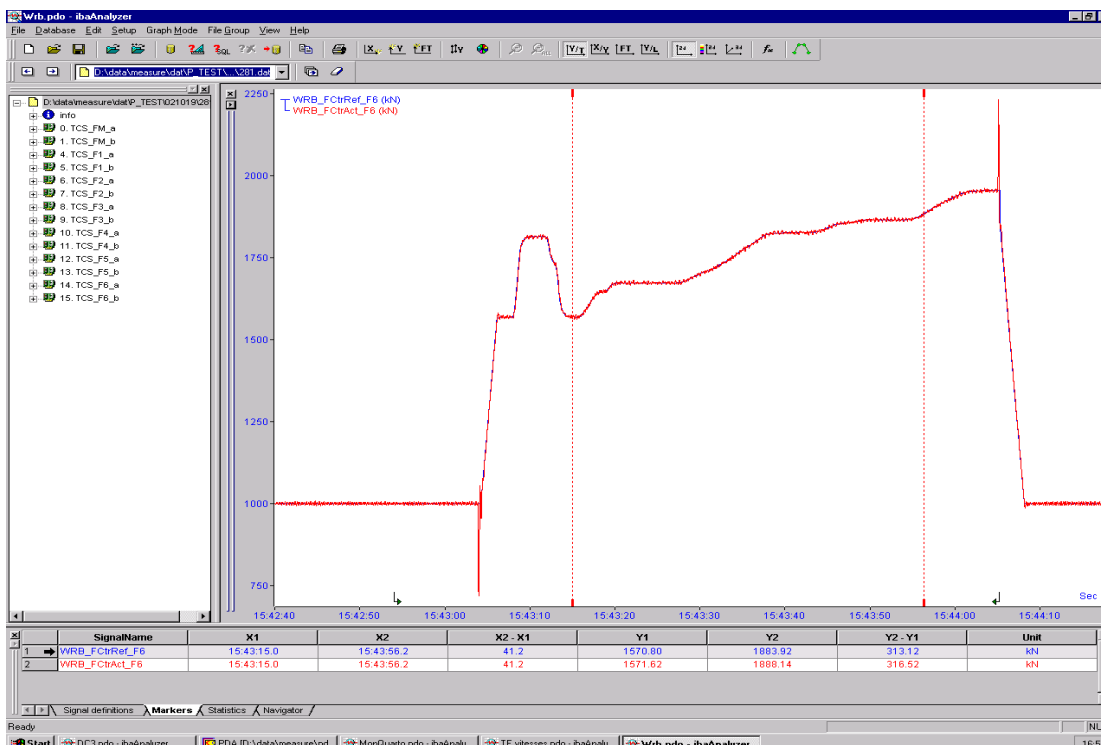


Fig.29. Graphe de force de cambrage d'une bande laminée à 1,9 mm d'épaisseur


Bien que lorsqu' on a consulté les fournisseurs reconnus dans le domaine de fabrication des cylindres et spécialement les cylindres en fonte à trempe indéfinie, ces derniers résistent à des forces de cambrage ne dépassant pas les 1700 KN donc les cylindres pendant le laminage des fines épaisseurs surtout en fin de compagne sont soumis à des forces nettement supérieures à leur résistance.

La limitation des forces de cambrage pour les cages 5 et 6 à des valeurs ne dépassant pas 1600 KN est facile à réaliser sur le programme de fonctionnement, seulement on doit chercher une solution à l'apparition des ondulations aux bords de la bande laminée.


IV.4.2 IMPACT DU PROFIL DES CYLINDRES :

La solution préconisée est de trouver le bon profil des cylindres du train finisseur capable de compenser la limitation des forces de cambrage afin d'avoir un bon profil des bandes laminées.

Une série d'expériences montrées sur les tableaux 11, 12 , 13 et 14 nous a permis de fixer un profil pour chaque jeu de cylindre des cage de train finisseur .

GAMME DE PROFIL DES CYLINDRES (initiale) 

LA GAMME DES PROFILS DES CYLINDRES DE TRAVAIL



TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL (mm)	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,04	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,00	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	0,00	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

Avec cette gamme de profil, les lamineurs sont obligés de trop charger les cages F5-6 pour obtenir une bonne planéité du produit fini

Tab 11 : gamme initiale des profils des cylindres

GAMME DE PROFILE DES CYLINDRES (modifi 1)

LA GAMME DES PROFILES DES CYLINDRES DE TRAVAIL ET APPUI				
TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,04	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,01	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	0,00	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

le choix du profil 10 μ sur la cage F3 est dans le but de créer une dégradation dans les amplitudes d'ondulation générées par les cages F1-2 pour faciliter leur élimination dans les cages F5-6 tout en minimisant l'usure des cylindres

Résultat : soulagement du taux de réduction de F5 mais pas celui du F6

Tab 12 : gamme des profils des cylindres (première modification)

GAMME DE PROFILE DES CYLINDRES (modif 2)

TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,04	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,01	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	-0,005	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

le choix du profil -5 μ sur la cage F5 est dans le but de partager la correction du profil de la bandes entre les cages F5-6 pour minimiser les charges et l'usure de la cage F6

Tab 13 : gamme des profils des cylindres (deuxième modification)

GAMME DE PROFILE DES CYLINDRES (modif 3)

TRAVAILFINISSEUSE				
CAGE	GAMME	PROFIL	DURETE	MATIER
F1	650÷670	0,02	76÷80SH-C	CHROME
F2	660÷680	0,02	"	CHROME
F3	670÷690	0,01	"	CHROME
F4	680÷700	0,00	"	CHROME
F5	690÷710	-0,005	"	ICDP
F6	700÷720	-0,01	"	ICDP

le choix du profil 20 μ sur la cage F1 est dans le but de partager les corrections du profil de la bandes entre les cages pour minimiser les charges et l'usure des la cages **F6 en fin de campagne des cylindres de travail quarto** (changement profil bande sortie quarto)

Tab

14 : gamme des profils des cylindres (troisième modification)

Sur les tableaux 15 et 16 ,on montre une comparaison des paramètres de laminage entre deux bobines laminées à chaud 3*1030 mm*mm situées à la même longueur de la campagne de laminage c'est-à-dire au même ordre de laminage afin d'assimiler la même usure des cylindres.

En visant un profil de bande de 45 μ ,les valeurs des forces de laminage de la cage 6 avant modification sont de l'ordre de 8658 KN et celles du cambrage dépassent 1600 KN, bien qu'après modification, ces deux valeurs deviennent respectivement 6550 KN et 463 KN.

Notant qu'après modification des gammes de profile des cylindres, les forces de cambrage seront réparties sur les cylindres des premières cages fabriqués en fonte haut chrome dont la résistance aux forces de laminage et de cambrage sont nettement supérieure à celles en fonte à trempe indéfinie.

	TRB					Eff		Eff.		Hot		Reading
	Slab	Trb	Strip	Tol-	Tol+	Trb	Strip	Trb	Strip	Trb	Strip	Head
Thick	216.0	30.00	3.000	0.200	0.200	30.0	3.00	30.39	3.03			3.007
Width	1035.0	1031.8	1036.0	0.0	15.0	1031.8	1036.0	1045.3	1035.4			1021.2
Profile			45.0	15.0	15.0		45.0		13.2			0.0
Length	9.0	68.0	645.9			64.8	645.9	63.2	608.2			Wedge
Temp	1290.2	0.0	895.0	25.0	25.0	1087.8	895.0	Temp.				905.5
SpeedHead	0.75						7.170	Hd 1087.8	895.7			dlh2-10m
SpeedUp	0.054	after	1.2[s]	Offs	0.00		0.054	T11060.5	895.0			ODet

Std	Temp Head [° C]	Force de laminage			ExitCa Tail [° C]	Force Head [kN]	Calc Tail [kN]	Force mea	pression de cambrage		Bend Calc [kN]
		[° C]	[° C]	[° C]					[kN]	[kN/s]	
1	995	908	988	916	13005	17438	99	99999	62	99	200
2	978	910	972	917	11393	14305	99	99999	43	99	200
3	962	911	955	916	9738	11515	99	99999	28	99	200
4	946	910	939	913	8634	9699	99	99999	18	99	912
5	929	907	922	907	7924	8564	99	99999	11	99	1072
6	914	902	908	903	8658	9115	99	99999	7	99	1600

Tab.15 : paramètres de laminage d'une bobine avec la gamme de profil initiale des cylindres

TRB						Eff		Eff.		Hot		Reading
	Slab	Trb	Strip	Tol-	Tol+	Trb	Strip	Trb	Strip	Trb	Strip	
Thick	215.0	30.00	3.000	0.200	0.200	30.0	3.00	30.39	3.03			
Width	1020.0	1028.6	1033.0	0.0	20.0	1028.6	1033.0	1042.2	1029.6			
Profile			45.0	15.0	15.0		45.0		48.5			
Length	8.8	65.2	625.6			62.8	625.6	61.2	594.2			
Temp	1275.6	0.0	895.0	25.0	25.0	1084.3	895.0	Temp.				
SpeedHead	0.70						6.801	Hd 1084.3	895.0			
SpeedUp	0.052	after	1.3[s]	Offs	0.00		0.052	2.5	895.0			

Std	Temp Head [° C]	Force de laminage			ExitCa Tail [° C]	Force Head [kN]	Calc Tail [kN]	Force mea	pression de cambrage		Bend Calc [kN]
		[° C]	[° C]	[° C]					[kN]	[kN/s]	
1	999	914	991	921	12566	16758	99	99999	57	99	1600
2	981	915	975	921	11584	14502	99	99999	42	99	1600
3	965	916	960	923	10484	12341	99	99999	29	99	1600
4	950	917	943	919	8849	9880	99	99999	17	99	752
5	934	914	926	912	7237	7786	99	99999	9	99	735
6	917	907	907	903	6550	6847	99	99999	5	99	463

Tab.16 : paramètres de laminage d'une bobine avec la gamme de profil modifiée des cylindres

Enfin, les figures numérotées de 30 au 35 représentent quelques graphes des paramètres de laminage ,notamment les graphes de température, largeur, épaisseur, différence de force de laminage entre les deux cotés des cylindres et les forces de cambrage des cages

Set 6, pour deux cas d'écaillage des cylindres ceci pour la bande laminée pendant l'écaillage et deux autre laminées juste avant écaillage.

fig.30 : Paramètres de laminage de la bande N°1 avant écaillage du 04/12/2011

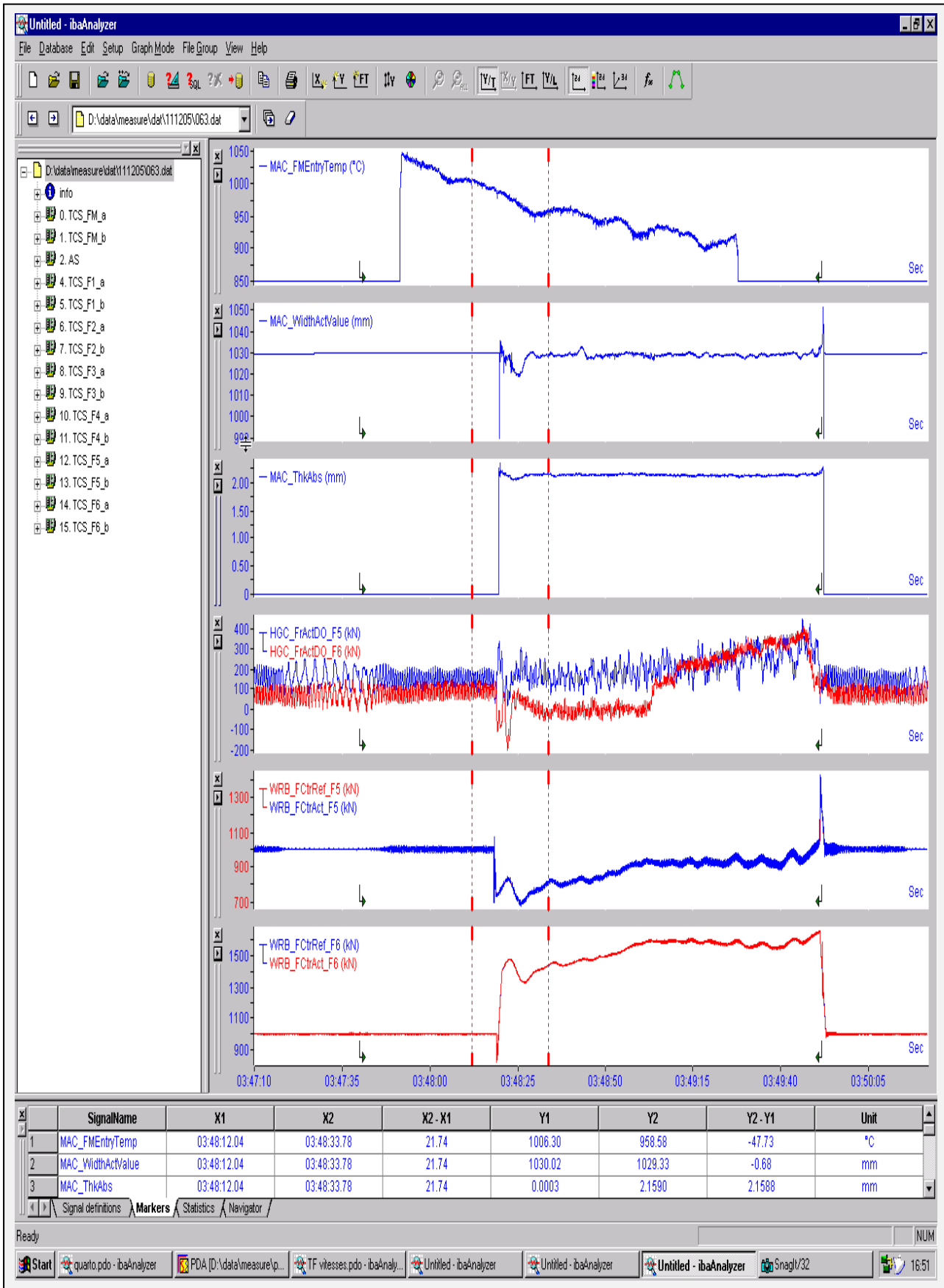


fig.31 : Paramètres de laminage de la bande N°2 avant écaillage du 04/12/2011

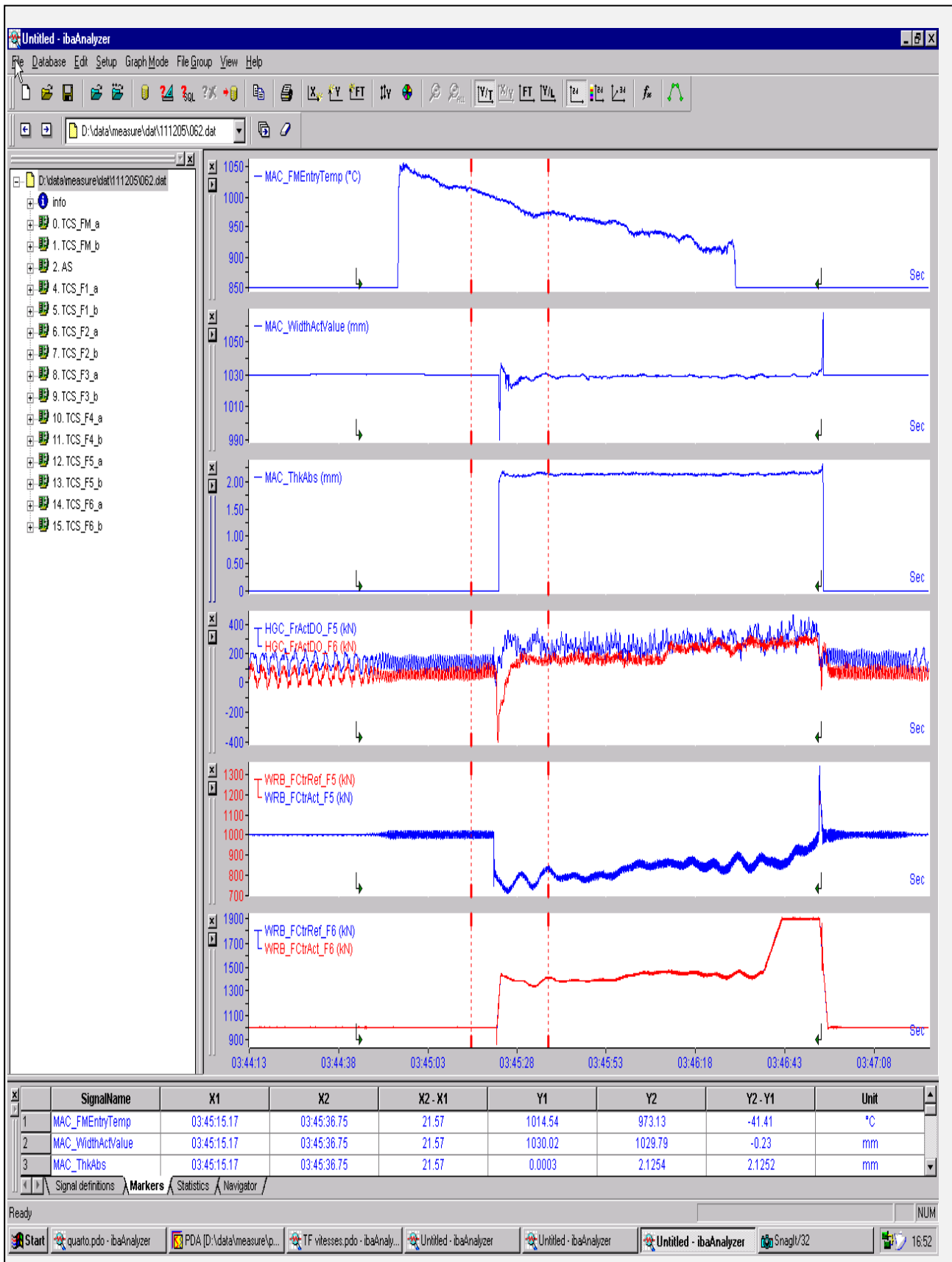


fig.32 : Paramètres de laminage de la bande pendant l'écaillage du 04/12/2011

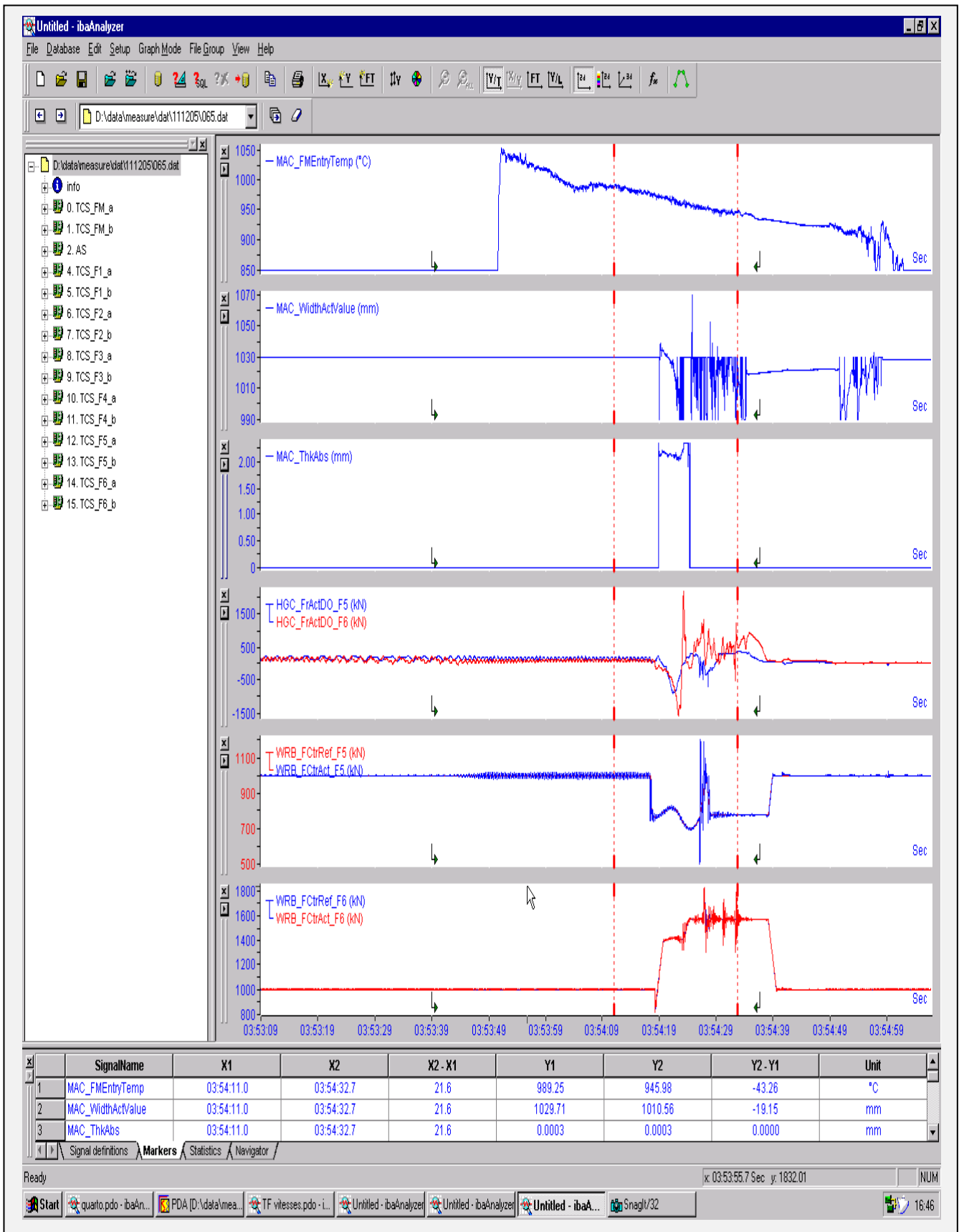
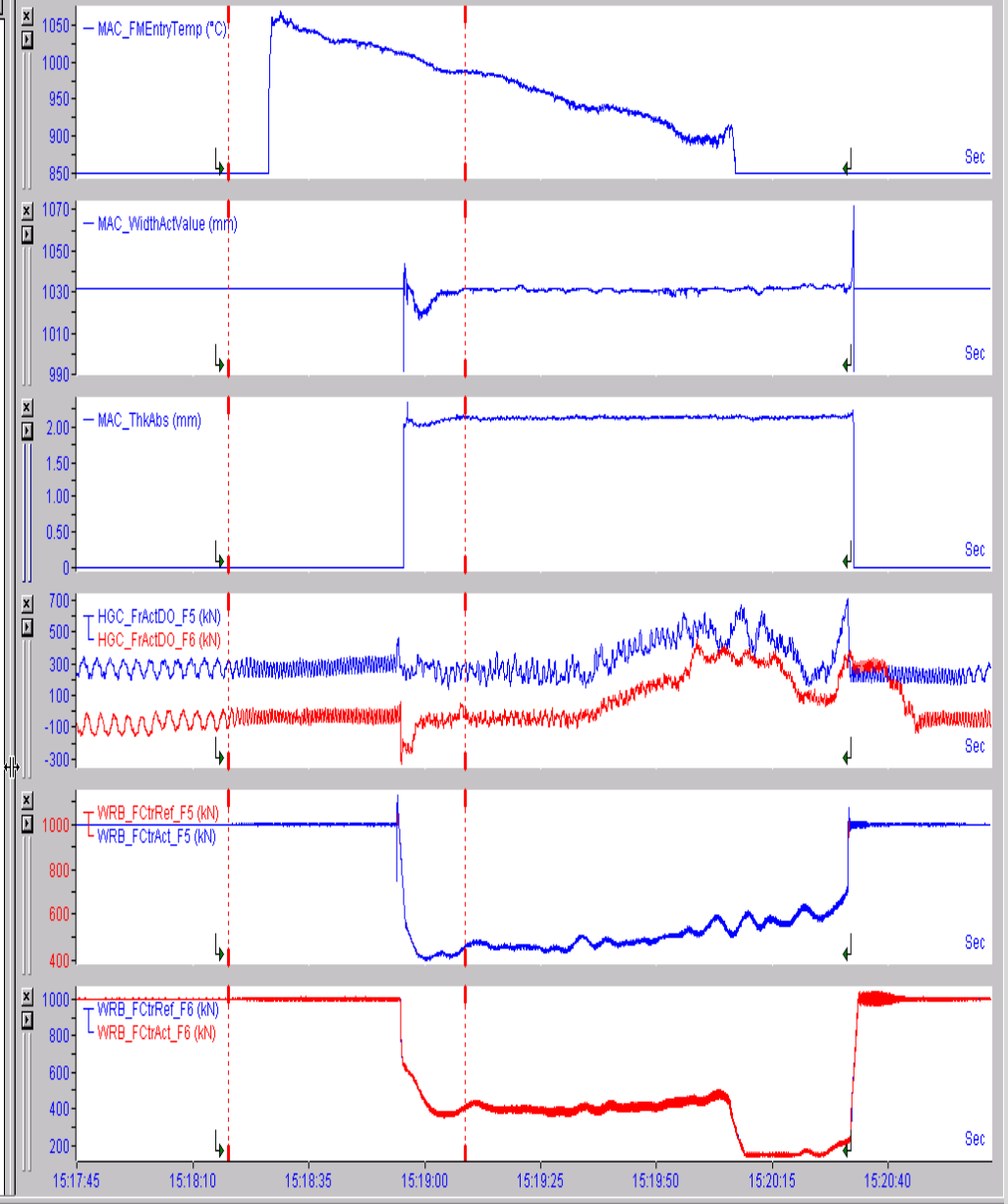


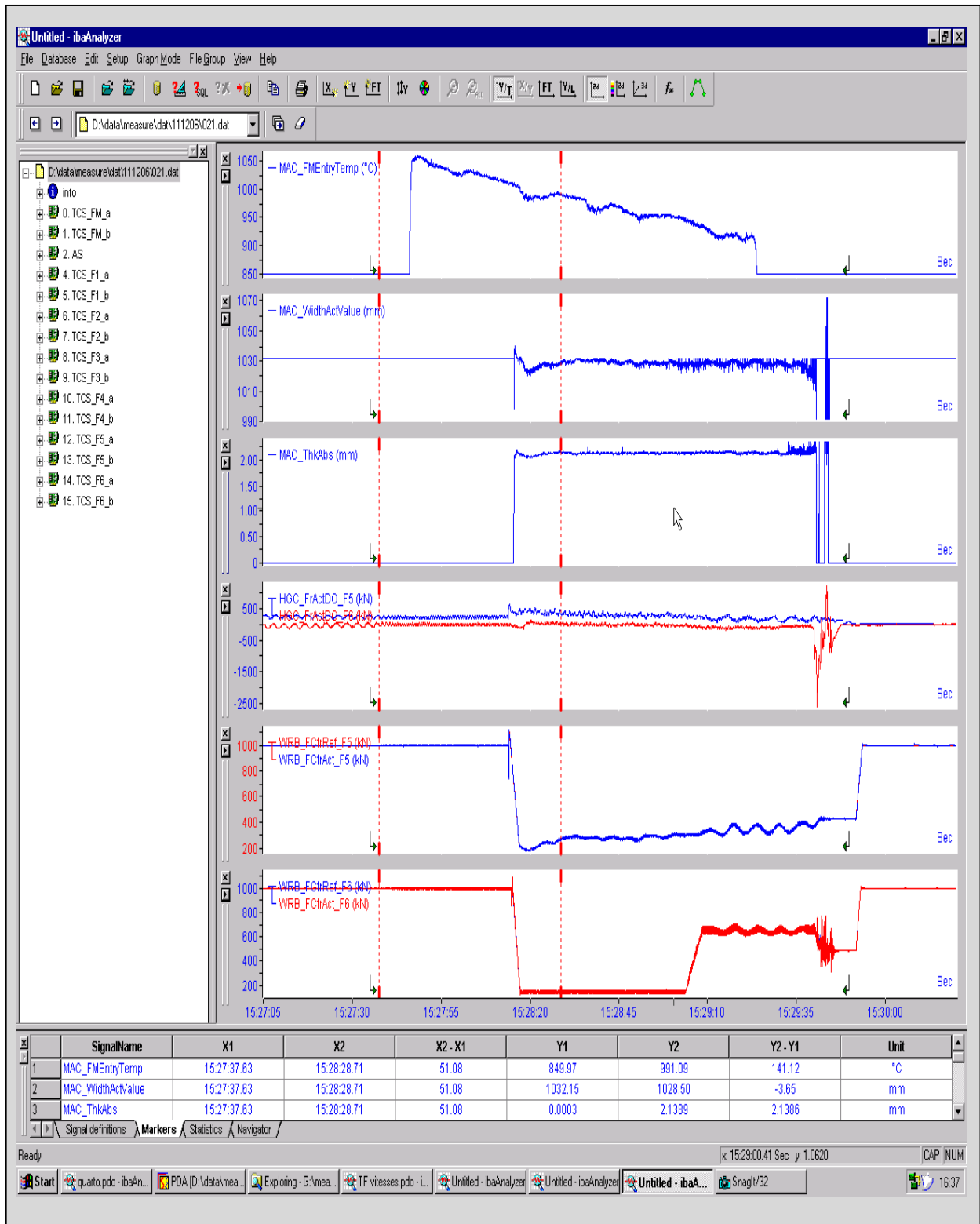
fig.33 : Paramètres de laminage de la bande N°1 avant écaillage du 06/12/2011

- info
- 0. TCS_FM_a
- 1. TCS_FM_b
- 2. AS
- 4. TCS_F1_a
- 5. TCS_F1_b
- 6. TCS_F2_a
- 7. TCS_F2_b
- 8. TCS_F3_a
- 9. TCS_F3_b
- 10. TCS_F4_a
- 11. TCS_F4_b
- 12. TCS_F5_a
- 13. TCS_F5_b
- 14. TCS_F6_a
- 15. TCS_F6_b



	SignalName	X1	X2	X2 - X1	Y1	Y2	Y2 - Y1	Unit
1	MAC_FEntryTemp	15:18:17.76	15:19:08.75	50.99	849.90	987.66	137.76	°C
2	MAC_WidthActValue	15:18:17.76	15:19:08.75	50.99	1032.33	1031.72	-0.61	mm
3	MAC_ThkAbs	15:18:17.76	15:19:08.75	50.99	0.0003	2.1227	2.1224	mm

fig.35 : Paramètres de laminage de la bande pendant l'écaillage du 06/12/2011



CONCLUSION GENERALE

En laminage à chaud, les points d'amélioration du procédé résident dans l'allongement des campagnes de laminage et donc dans l'allongement de la durée de vie des cylindres.

Le problème apparu au LAC-ANNABA est un écaillage sporadique des cylindres de travail du train finisseur. Ce qui induit une surconsommation de ces derniers .

Le but de notre travail était donc de supprimer ou au moins réduire l'apparition de ces écaillages.

Notre démarche a consisté à cibler judicieusement certains paramètres de laminage et d'étudier l'influence de leur ajustement et leur contrôle sur l'apparition de ces défauts .Les paramètres choisis étant :

- La température de la bande.
- La qualité du cylindre.
- Les chocs mécaniques.
- Le cambrage.

Nous avons analysé l'impact de chacun de ces facteurs et nous avons proposé des solutions et testé leurs efficacités.

Les résultats obtenus sont une amélioration très importante de la consommation des cylindres étudiés.

Le ratio de consommation des cylindres est ainsi passé de 16mm/kt à 6mm/kt .Ce qui correspond à la moyenne de consommation des cylindres du groupe international ARCELORMITTAL. Sur la base d'une production annuelle projeté de 500.000 tonnes, le LAC-ANNABA pourra espérer engendrer un revenu supplémentaire de plus de 2 millions de dollars.

Ce travail de recherche-développement pourra être poursuivi par l'étude de l'impact d'autres paramètres de laminage .Le but final étant la disparition totale de ces écaillages sporadiques.

Références

bibliographiques

Listes des références :

1. [1] Marichal Ketin Agora Liège BELGIEUM 2011
2. [2] Cylindres de BOFOS-AKERS document technique industriel ref 82122'3904
3. [3] Roll Failures Manuel Hot Mill Cast Work Rolls 1st Edition 2002
4. [4] Notions Pratiques de Mécanique de la Rupture B.Barthelemy et Ed.Eyrolles
5. [5] Mécanisme de Rupture et de Croissance de Fissres C. Robin Décembre 2010
6. [6] www.hajomar.com>Archive>MDR
7. PalDey S., Deevi S.C., "Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N", *Mater. Sci. Engg A* 342, 1-2 (2003) 58-79
8. Hogmark S., Jacobson S., Larsson M., "Design and evaluation of tribological coatings", *WEAR* 246, 1-2 (2000) 20-33

9. Prengel H.G, Jindal P.C., Wendt K.H, Santhanam A.T., Hedge P.L., Penich R.M., "A new class of high performance PVD coatings on cemented carbide cutting tools", *Surf. Coat. Techn.* 139 (2001) 25–34.
10. Dubar M., Dubois A., Dubar L., "Wear analysis of tools in cold forging: PVD versus CVD TiN coatings", *WEAR* 259 (2005) 1109-1116
11. Bazant Z.P., "Size effect on structural strength: a review", *Arch. Appl. Mech.* 69, 9-10 (1999) 703-725
12. Andersson P., Leven J., Hemming B., "Hot rolling tests with steel bars and silicon nitride rolls", *J.Mat. Proc. Tech.* 209 (2009) 884-893
13. Ohkohchi T., Yasuda K., Nakagawa M., "Characteristics of Sialon ceramic rolls in cold rolling", *ISIJ Int.* 32, 11 (1992) 1250-1257
14. Jimbo Y., Azushima A., "Lubrication characteristics of physical vapour deposition TiN-coated roll for high productivity in cold rolling of low-carbon steel sheet", *WEAR* 249 (2001) 215-221
15. Azushima A., Morita Y., "Lubrication characteristics of surface treated rolls", *ISIJ International* 32 (1992) 1232-1237
16. Montmitonnet P., Delamare F., Rizoulières B., "Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes", *WEAR* 245 (2000) 125-135
17. Ould C., Gachon Y., Montmitonnet P., Badiche X ., "Tribological Testing of Anti-Adhesive coatings for Cold Rolling Mill Rolls – Application to TiN-Coated Rolls", Proc. 14th ESAFORM Int. Conf.,
18. Queen's University Belfast, April 27-29 2011. AIP Conf. Proc. N°1353 (2011) 1747-1752
19. Delamare F., Kubié J., "An evaluation of the PSCT. III - experimental study of the friction test: the role of the metallurgical parameters of die and sheet", *J. Lub. Technol. (Trans. ASME)* 104 (1982) 538-544
20. Azushima A., Jimbo Y., "Effect of carbide properties of roll materials on lubricity in cold sheet rolling of low-carbon steel", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 41 (2001) 347-360
21. Montes de Oca Valero J.A., Elaboration du carbure et du nitrure de titane par des procédés chimiques et physiques en phase vapeur : caractérisation de la microstructure, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2002
22. I. Mallocci, R. Bonidal, P. Szczepanski, J. Daafouz, and C. Lung. Robust Steering Control Toolbox. Internal Rapport ArcelorMittal, 2008.