

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Metallurgie

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DE LA TECHNOLOGIE
DU LAMINAGE
DES DEMI-PRODUITS ET DES
TOLES FORTES EN ACIER

Proposé par :

DO NANG
TIEN

Etudié par :

M. BARAKA
M. BERRIM

Dirigé par :

DO NANG
TIEN

PROMOTION : JUIN 1990

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A

Mes parents bien aimés.

Mes chers frères, soeurs, beaux frères et belles soeurs.

Toute ma famille.

Mon ami Amir et sa famille.

Tous mes amis.

M. BARAKA.

A

Mes chers parents.

Mes chers frères et soeurs.

Mes chers amis.

M. BERRIM.

R E M E R C I E M E N T S

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur DO NANG TIEN notre promoteur et enseignant qui nous a dirigé et tant bien suivi durant notre travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et particulièrement à ceux du département METALLURGIE.

Nos remerciements vont également aux personnes de service formation ainsi que celles du service train laminage du complexe d'El Hadjar et notre secrétaire.

Nous ne pouvons oublier Mr et Mme NOUAS qui ont assuré avec compétence et dévouement la réalisation de cette thèse d'ingénieur.

P L A N :

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DESIGNATION.....

PREMIERE PARTIE

ETUDE THEORIQUE DU LAMINAGE DES DEMI-PRODUITS

CHAPITRE I: INTRODUCTION

I.1	IMPORTANCE ET PLACE DU LAMINAGE (BUT).....	: 1
I.2	OBJECTIFS DU PROJET.....	: 2
I.3	LES LAMINOIRS.....	: 3
I.4	PROCEDE DE LAMINAGE.....	: 8

CHAPITRE 2: LINGOTS DEMI-PRODUIT ET EBAUCHES

2.1	METHODES D'ELABORATION DE L'ACIER.....	: 9
2.2	COULEE DE L'ACIER.....	: 11
2.3	LINGOTS.....	: 12
2.4	PRODUITS FINIS.....	: 14
2.5	DEMI-PRODUITS: BLOOMS, BRAMES ET EBAUCHES.....	: 15

CHAPITRE 3: PARAMETRES DE DEFORMATION DES DEMI-PRODUITS

3.1	DEFORMATION.....	: 18
3.2	PARAMETRES CARACTERISTIQUES.....	: 31

3.3 CONCLUSIONS.....: 34

DEUXIEME PARTIE

AMELIORATION DE LA TECHNOLOGIE DES DEMI-PRODUITS ET DES
TOLES FORTES

CHAPITRE 4: TECHNOLOGIE DU LAMINAGE DES TOLES FORTES

4.1 USAGE, DIMENSIONS FINALES.....: 35
4.2 COMPLEXE SIDERURGIQUE D'EL HADJAR.....: 35
4.3 PROCESSUS TECHNOLOGIQUE.....: 36
4.4 ETUDE PRATIQUE D'ELARGISSEMENT.....: 39

CHAPITRE 5: CANNELURE ET DISPOSITION

5.1 ELEMENTS DE CANNELURE.....: 41
5.2 DIMENSIONS ET DISPOSITIONS DES CANNELURES.....: 42
5.3 DISPOSITION DES CYLINDRES.....: 44
5.4 CANNELURE.....: 45
5.5 PARAMETRES CALCULES AU COURS DU LAMINAGE.....: 46

CHAPITRE 6: CHAUFFAGE ET REFROIDISSEMENT DES BLOOMS ET BRAMES.....:

6.1 CHOIX DES FOURS.....	70
6.2 CHAUFFAGE DES LINGOTS AVANT LE LAMINAGE.....	71
6.3 DEFAUTS DES PRODUITS.....	73

CHAPITRE 7: REGIMES DE REDUCTION

7.1 ETUDE DE LA REDUCTION MAXIMALE.....	79
7.2 REDUCTION MOYENNE A UNE PASSE ET NOMBRE DE PASSES.....	81
7.3 NOMBRE ET ORDRE DE RETOURNEMENT.....	83
7.4 REGIMES DE REDUCTION POUR LES BLOOMS ET LES BRAMES.....	86
7.5 CONCLUSION GENERALE.....	87

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	88
----------------------------------	----

DESIGNATION

h_0 :	épaisseur initiale de la barre	[mm]
h_1 :	épaisseur finale de la barre	[mm]
h_m :	épaisseur moyenne de la barre	[mm]
Δh :	réduction totale	[mm]
ξ :	réduction relative conventionnelle	[mm]
e :	réduction relative vraie	[mm]
L_1 :	longueur finale de la barre	[mm]
L_0 :	longueur initiale de la barre	[mm]
Δl :	allongement total	[mm]
μ :	coefficient d'étirage	
γ :	coefficient de réduction	
λ :	coefficient d'élargissement	
b_1 :	largeur finale de la barre	[mm]
b_0 :	largeur initiale de la barre	[mm]
b_m :	largeur moyenne de la barre	[mm]
Δb :	élargissement total	[mm]
δ_h :	taux logarithmique de déformation de hauteur	
δ_b :	taux logarithmique de déformation de largeur	
δ_l :	taux logarithmique de déformation de longueur	
α :	angle d'entraînement	[degré]
β :	angle de frottement	[degré]
D :	diamètre du cylindre	[mm]
R :	rayon du cylindre	[mm]
l_c :	longueur de la corde d'entraînement	[mm]
l_a :	longueur de l'arc d'entraînement	[mm]
l_d :	longueur du foyer géométrique de déformation, ou projection horizontale de l'arc d'entraînement	[mm]
f :	coefficient de frottement	
S_c :	surface de contact	[mm ²]
S_{cx} :	projection horizontale de la surface de contact ..	[mm ²]
S_{cy} :	projection verticale de la surface de contact	[mm ²]
V_e :	vitesse d'entrée de la barre	[m/s]
V_s :	vitesse de sortie de la barre	[m/s]
V :	vitesse circonférencielle des cylindres	[m/s]
V_1 :	vitesse minimale de rotation des cylindres	[m/s]
V_2 :	vitesse moyenne de rotation des cylindres	[m/s]
V_3 :	vitesse maximale de rotation des cylindres	[m/s]
ω :	rotation des cylindres par minute	[tr/mn]
σ_z :	contrainte qui agit dans le sens de la longueur	
$\dot{\epsilon}$:	vitesse de déformation	[m/s]
\dot{p} :	pression spécifique	[Kg/m ²]
K :	limite d'écoulement du métal à la température du laminage	[Pa]
η :	viscosité du métal	[Pa.s]
\dot{w} :	vitesse moyenne de déformation lors du laminage ..	[s ⁻¹]
m :	coefficient d'influence du frottement entre le métal et les cylindres sur la résistance du métal	
T :	température de laminage	[°C]
c :	teneur en Carbone du métal à laminer	[en %]
M_n :	teneur en Manganèse du métal à laminer	[en %]
Cr :	teneur en Chrome du métal à laminer	[en %]

- C_v : coefficient d'influence de la vitesse circulaire des cylindres
- B_e : largeur d'échancrure [mm]
- B_b : largeur de base [mm]
- Δ_e : jeu des pièces de liaison de la cage de travail ... [mm]
- Δ_e : jeu de déformation élastique des pièces [mm]
- Δ_u : jeu d'usure des tables des cylindres [mm]
- β : jeu entre deux cylindres de travail [mm]
- H_e : hauteur d'échancrure [mm]
- φ : angle d'inclinaison latérale [degré]
- x : profondeur d'affûtage [mm]
- D_E : distance entre deux axes des engrenages ($D_E = cte$) .. [mm]
- D_o : diamètre primitif, distance entre deux axes des cylindres D_{max}, D_{min}
 D_{min} est limité par la résistance du cylindre [mm]
- D_{os} : diamètre primitif du cylindre supérieur [mm]
- D_{oi} : diamètre primitif du cylindre inférieur [mm]
- D_{es}, D_{ei} : diamètres de collet des cylindres supérieurs .. [mm]
- D : diamètre des cylindres variant de D_{max} à D_{min} à cause du réaffûtage [mm]
- K' : coefficient de réaffûtage
- P : pression totale [Pa]
- M_x : moment de rotation du laminage [N.m]
- N_x : puissance du laminage [watt]
- τ : rythme de laminage [s]
- $\Sigma \tau_m$: temps total de machine [s]
- $\Sigma \tau_p$: temps entre les pauses [s]

PREMIERE PARTIE

ETUDE THEORIQUE DU LAMINAGE
DES DEMI-PRODUITS

CHAPITRE 1

I N T R O D U C T I O N

1-1. Importance et place du laminage: But:

Le laminage consiste à déformer et allonger un lingot ou un demi-produit porté à la température de laminage (1200°C environ), entre deux cylindres tournant en sens inverse.

Cette déformation est poursuivie par des passages successifs, soit entre les mêmes cylindres, soit une succession de paires de cylindres, de façon à aboutir à une forme géométrique utilisable, rails, poutrelles, etc...

Tel qu'il arrive de l'aciérie, le lingot présente une structure cristalline constituée par des gros cristaux, appelés "dendrites", qui sont fragiles. Une déformation par laminage est nécessaire pour lui donner une structure plus fine, qui confèrera au produit une meilleure tenacité.

En outre, avant de commencer le formage proprement dit du profil, il est nécessaire, pour des raisons purement dimensionnelles, de réaliser une réduction de section, en gardant pour celle-ci une forme polygonale convexe carrée ou rectangulaire, octogonale ou ronde.

Ce premier laminage s'appellera "dégrossissage".

Le premier travail de dégrossissage est commun à tous les produits laminés, il est effectué sur des laminoirs à demi-produits.

Le demi-produit est alors repris et subit une nouvelle réduction au cours de laquelle le profilage désiré est obtenu par passage dans des cannelures successives placées sur des cages de laminoirs constituant les laminoirs de produits finis ou laminoirs finisseurs.

. Description du complexe sidérurgique d'El Hadjar:

Le complexe dispose:

- d'une cokerie;
- des ateliers de préparation de matières (minerai de fer, coke, agglomérations);
- de 2 hauts fourneaux pour la production de fonte liquide, l'un d'une capacité de 560.000 tonnes/an et l'autre d'une capacité de 1400.000 tonnes/an;
- de 2 aciéries à oxygène (ACO₁, ACO₂);
- d'une aciérie électrique (ACE);
- d'un laminoir à chaud (LAC);
- d'un laminoir à froid (LAF);
- d'un laminoir à fils ronds (LFR);
- d'une tuberie spirale (TUS);
- d'une tuberie sans soudure (TSS).

L'ensemble de ces installations permet la production de 2.000.000 de tonnes d'acier par an pour une gamme de production très diversifiée.

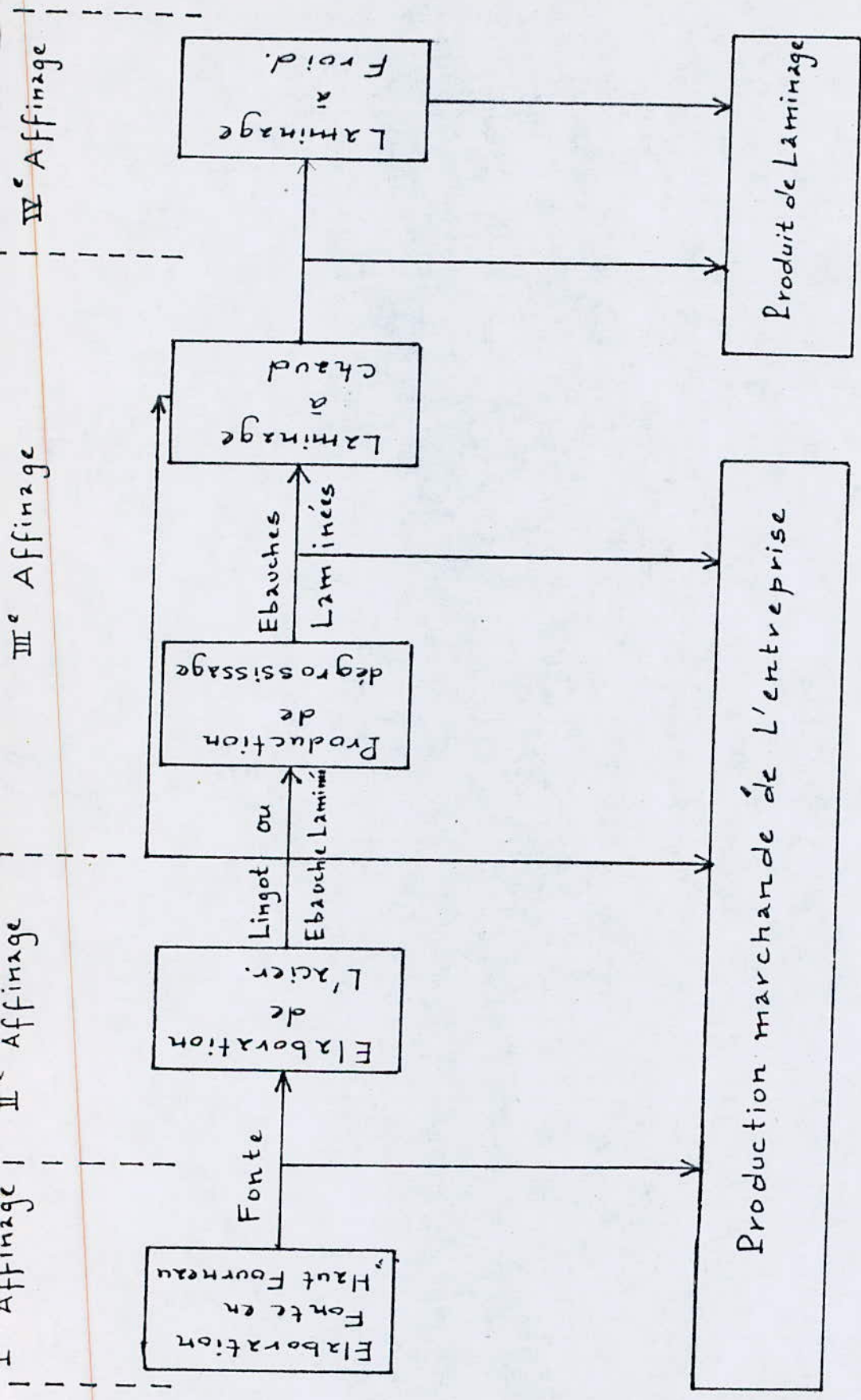


Fig. 1 Laminage dans le cycle métallurgique.

1-2. Objectifs du projet

En se basant sur le fonctionnement d'un complexe existant, nous étudions les paramètres de foyer de déformation et les paramètres de technologie (modèle logarithmique, paramètre technique des dispositions des cages, paramètres dynamiques et thermiques), certaines formules d'élargissement ainsi que les régimes de réduction de certains demi-produits, pour améliorer la technologie des demi-produits et des tôles fortes afin d'augmenter la productivité.

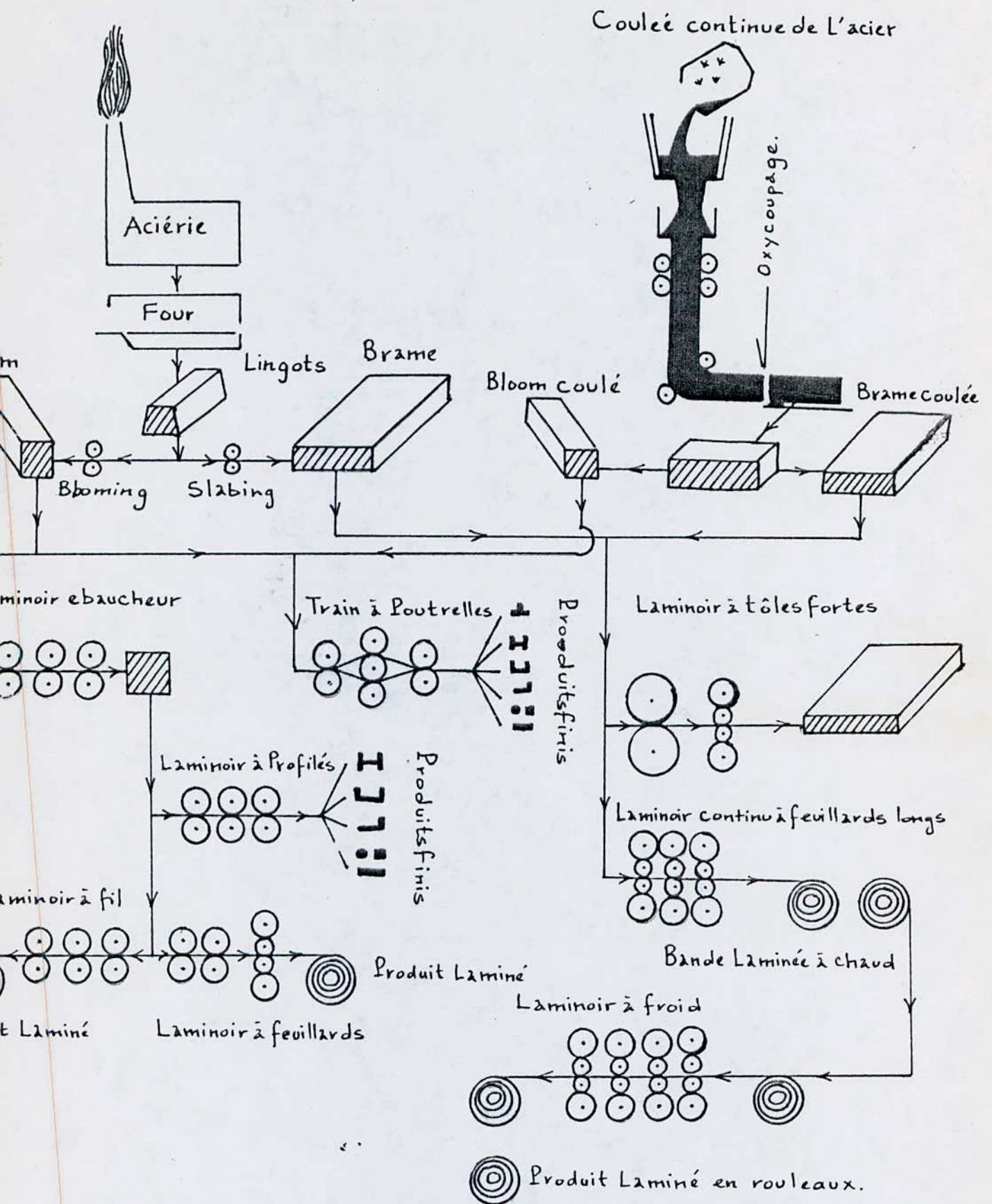
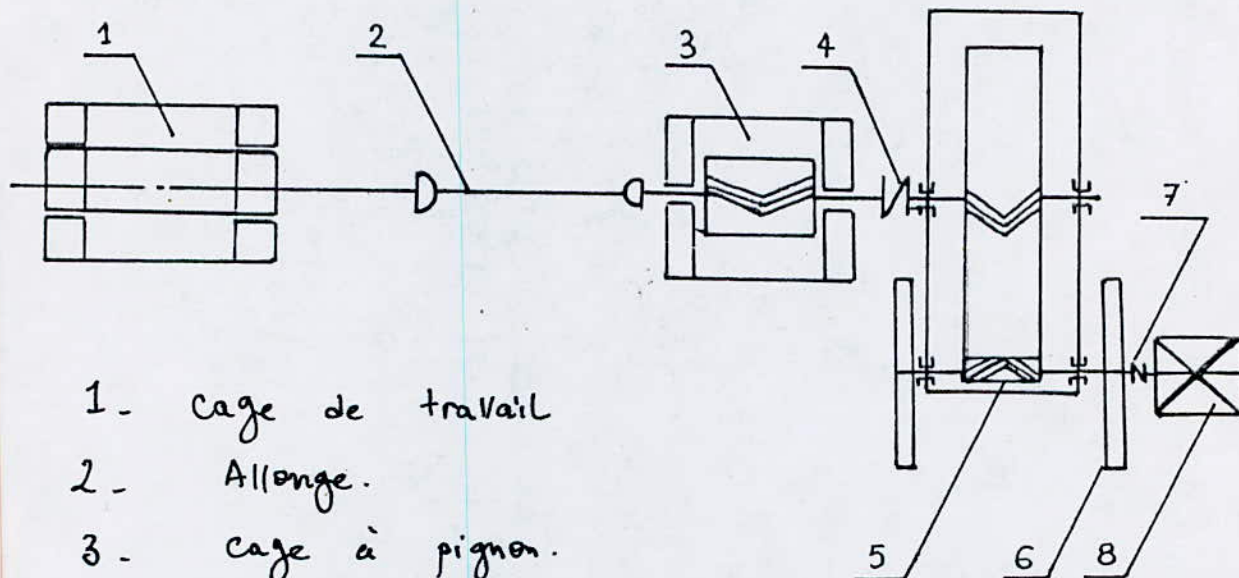


Fig. 4 Procédés de Laminage.

1-3. Les Laminaires:

Les ensembles fondamentaux d'un Laminier sont:

- . une ou plusieurs cages de laminage;
- . le moteur;
- . le réducteur;
- . la cage à pignon;
- . le volant;
- . les pièces d'accouplement reliant les ensembles.



- 1 - Cage de travail
- 2 - Allonge.
- 3 - cage à pignon.
- 4 - Manchon du Laminier
- 5 - Réducteur
- 6 - Volant.
- 7 - Manchon du moteur.
- 8 - Moteur.

Fig. 2 Schéma d'un Laminier

Cage de laminage:

la cage est l'ensemble principal d'un laminoir. Elle comporte:

- . deux montants (1) avec des bossages (2);
- . les entablements (3) sur lesquels reposent les montants;
- . les entretoises (4) qui rattachent les montants;
- . le chapeau (5);
- . les cylindres de travail (6);
- . les empoises du cylindre inférieur (7), du cylindre médian (8) et du cylindre supérieur (9) et de leurs coussinets;
- . le dispositif de serrage des cylindres (10);
- . l'installation pour l'équilibrage du cylindre supérieur (11).

Les montants sont destinés à assurer le positionnement des cylindres et à supporter la face de séparation qui est transmise à la cage par les supports des tourillons.

Les montants peuvent être de deux types: fermés ou ouverts.

Les montants fermés assurent une meilleure précision des profilés mais rendent plus difficile le remplacement des cylindres. Ces montants sont prévus pour les gros trains dégrossisseurs et à tôle qui doivent fournir un grand effort (jusqu'à 2000t).

Les montants ouverts sont employés dans des cages de dégrossissage, pour lesquelles la rigidité du bâti importe peu.

Les cylindres de travail assurent directement la réduction du métal et lui donnent la forme nécessaire. Au cours de la déformation du métal, les cylindres reçoivent la pression développée pendant l'opération et la transmettent aux coussinets.

Le cylindre comporte les éléments suivants:

1. la table qui est en contact direct avec le métal;
2. les tourillons, placés de deux côtés de la table qui reposent sur les coussinets;
3. les trèfles qui rattachent le cylindre à l'arbre.

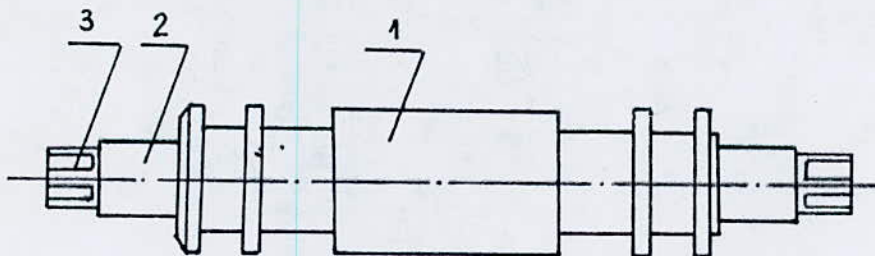
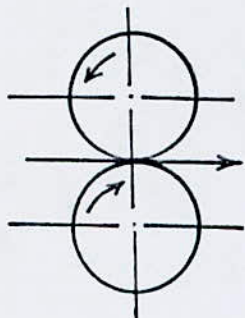


Fig. 3 Elements d'un cylindre de travail

Les cages peuvent être réparties en 5 groupes suivant le nombre et la disposition des cylindres:

- . duos;
- . trios;
- . quartos;
- . à cylindres multiples;
- . universelles;
- . planétaires.

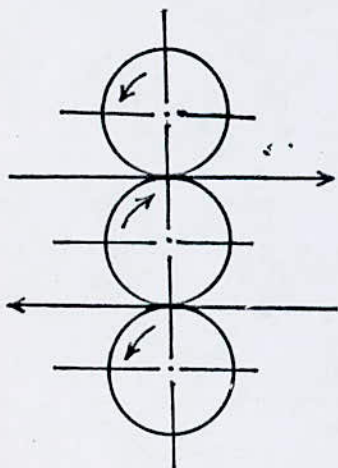
. Les cages duos:



Les cages duos comportent deux cylindres à sens de rotation constant, dont les axes sont placés horizontalement. On les utilise largement quand le produit ne subit qu'une passe de laminage (trains finisseurs de cages côte à côte, cages en ligne, ...) et dans les laminoirs à tôles minces de cages côte à côte.

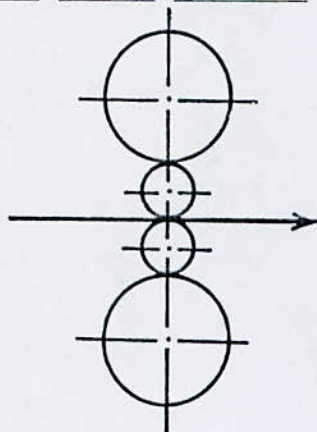
Le sens de rotation des duos réversibles est alternés, c'est à dire que le sens de rotation change à chaque passe. Les cages de ce type sont montées dans les blooming, les slabing et sont utilisées également comme cages de dégrossissage dans les laminoirs à tôles fortes, universelles, à rails, etc...

. Les cages trios:



Chaque cylindre tourne dans le même sens; les cylindres sont disposés dans le plan vertical. Pour relever la barre et la placer entre les cylindres supérieurs et médians, on a prévu des tabliers releveurs et culbuteurs disposés sur l'un des côtés, ou même des deux côtés de la cage. Les cages de ce type sont largement employées dans les laminoirs à profilés de cage côte à côte.

. Les cages quartos:

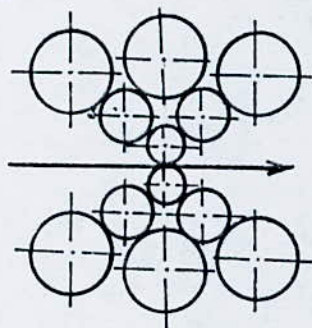


Elles comportent 4 cylindres placées l'un au dessus de l'autre dans le plan vertical. Les deux petits cylindres sont les cylindres de travail, alors que les deux autres, plus grands, forment l'appui; ils reçoivent la pression développée pendant l'opération et réduisent la flexion des cylindres de travail.

Ces cages sont utilisées uniquement pour le laminage des produits plats à chaud et à froid.

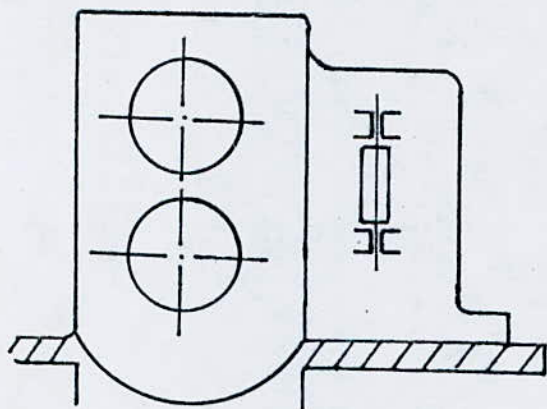
La mise en application du quarto, qui est à l'origine de la réussite des trains continus à tôles, a littéralement révolutionné la technique du laminage à plat.

. Les cages à cylindres multiples: (6,12,20)

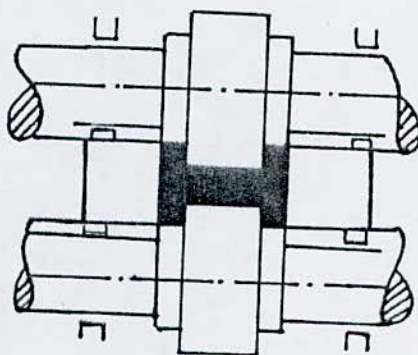


Le diamètre très faible des cylindres (10...30 mm) et la rigidité de la cage permettent d'exécuter le laminage à froid d'un ruban très mince. Les cylindres de travail de ces cages ne comportent pas de commandes (cette commande est impossible vu le petit diamètre des cylindres). Ils reposent sur plusieurs cylindres de commandes qui, à leur tour, s'appuient sur plusieurs cylindres de support. Le schéma ci-dessus assure une rigidité très élevée de tout l'ensemble et une absence totale de flexion des cylindres.

. Les cages universelles:



.Cylindres horizontaux



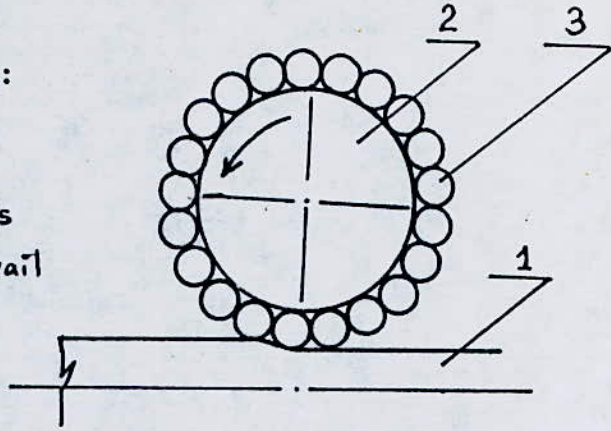
.Cylindres verticaux

Elles sont employées pour le laminage des larges plats, des tôles et des brames (trains dits universels). Dans ces cages, le métal est réduit par les cylindres horizontaux et verticaux. Ces derniers agissent en assurant la formation des rives égales et lisses. Les cylindres verticaux sont placés devant ou derrière, et parfois devant et derrière les cylindres horizontaux. Les cylindres horizontaux peuvent former un duo, un trio ou un quatuor.

Les cages universelles sont employées également pour le laminage des poutrelles à larges ailes, dont la hauteur peut atteindre jusqu'à 1000 mm. On utilise dans ce but des laminoirs universels. Les cylindres verticaux de ces laminoirs tournent sur leurs axes (sans commandes); ils sont placés entre les empoises des cylindres horizontaux et dans le même plan que ces derniers.

. Les cages planétaires:

1. Métal
2. Cylindres d'appuis
3. Cylindres de travail



Les cylindres de travail tournent librement sans commandes grâce aux frottements.

I-4. Procédé de laminage: (voir Fig. 4).

CHAPITRE 2

Lingots, demi-produits et ébauches

2-1. Methodes d'élaboration de l'acier:

Actuellement, l'acier est fabriqué par quatre procédés principaux, caractérisés essentiellement:

- . d'une part par le principal oxygénant utilisé,
- . d'autre part par la thermicité de l'opération; celle-ci peut s'effectuer sans apport de chaleur ou bien elle nécessite une source extérieure de chaleur (combustible gazeux, courant électrique).

Les principaux procédés sont les suivants:

- . affinage par le vent: procédés Bessemer et Thomas;
- . affinage par l'O₂ : procédé à oxygène;
- . affinage sur sole : procédés Martin acide et basique
- . affinage électrique.

- . Affinage par le vent: procédés Bessemer et Thomas:

Le procédé consiste essentiellement à faire traverser le bain de fonte liquide par un courant d'air froid. La fonte est introduite liquide à 1250°C environ dans le convertisseur; on y souffle de l'air froid qui oxyde les impuretés en donnant un dégagement de chaleur suffisant pour élever la température et maintenir le métal à l'état liquide, malgré l'élévation de son point de fusion (1500°C). L'oxydation est tellement énergique que, bien que le temps de contact entre l'air et le bain soit de l'ordre du centième de seconde, les gaz sortant du convertisseur ne contiennent pratiquement pas d'oxygène libre.

Chaque élément oxydable peut-être caractérisé par son pouvoir thermogène qui est l'élévation de température du bain produite par la combustion neutre et sans perte de chaleur de 1% de cet élément.

Pour le procédé Bessemer, le revêtement du convertisseur est en silice, par contre pour celui de Thomas, le revêtement est à base de dolomie et on introduit de la chaux vive avec la fonte.

- . Affinage par Oxygène: procédé à O₂:

Ce sont des aciers obtenus par affinage de la fonte par l'action de l'oxygène. Le principe des procédés à l'O₂ est analogue à celui des procédés Bessemer et Thomas. Les différences essentielles portent sur les deux points suivants:

- . emploi exclusif de l'O₂, donc absence d'azote;
- . soufflage à la surface du bain (et non par le fond du creuset) à l'aide d'une lance métallique refroidie à l'eau.

On peut distinguer deux types de réalisations selon que, pendant le soufflage, l'appareil:

- . reste immobile (procédé LD et dérivés);
- . est animé d'un mouvement de rotation (procédés Kaldo, rotor).

Simultanément, la lance est selon deux types:

- . verticale;
- . inclinée.

Le garnissage de l'appareil est toujours basique, et l'on opère en présence de chaux ou plutôt de chaux magnésienne.

. Affinage sur sole: procédé Martin acide et basique:

Le procédé d'affinage sur sole, ou procédé Martin, consiste à traiter la charge à affiner dans un four à sole où elle est chauffée par sa surface à l'aide d'un combustible gazeux; la haute température, nécessaire (1650°C environ pour la scorie en fin d'opération) ne peut être atteinte que grâce au chauffage préalable de l'air et du combustible à l'aide de récupérateurs. La charge est constituée par un mélange fonte + ferrailles en proportions quelconques; on peut d'ailleurs partir uniquement de fonte, ou de ferrailles sans fonte: généralement la charge contient 20 à 50% de fonte.

* Caracteristiques du procédé Martin acide:

La sole est à base de silice.

Charge: La charge contient au plus 30% de fonte; sa teneur moyenne en carbone est, 1%; on l'obtient par addition de coke. La quantité de minerai ne peut être que faible, car les oxydes de fer se combinant à la silice détruiraient le garnissage; c'est pourquoi la proportion de fonte par rapport aux ferrailles est limitée.

* Caracteristiques du procédé Martin basique:

La proportion de fonte peut-être quelconque, et en utilisant du minerai de fer en quantité suffisante, on peut à la rigueur opérer uniquement sur de la fonte, même phosphoreuse. Pratiquement, la charge qui contient toujours de la chaux est composée de riblons et de fonte en proportions variables suivant les conditions locales de ravitaillement en matières premières. Si la proportion de fonte croît les additions de minerai d'affinage sont plus importantes; la scorie est plus abondante, la dépense de combustion augmente, l'opération est plus lente, et le four aura une durée moindre à cause de l'action rongearite des scories.

• Affinage électrique:

L'acier électrique est élaboré dans un four chauffé à l'aide du courant électrique. A part cette différence résultant du mode de chauffage, le procédé électrique est analogue au procédé Martin.

La charge est constituée surtout par des ferrailles. L'oxydation s'effectue par l'intermédiaire du laitier, mais ici l'atmosphère, neutre ne peut contribuer à la formation d'oxyde de fer à la surface du bain. La période de réduction prend une importance notable; la désulfuration qui peut être très poussée se fait de la même manière qu'au haut fourneau.

Parmi ces quatre méthodes, El Hadjar utilise le procédé d'affinage par soufflage d'oxygène pur (le procédé LD). Cet affinage se réalise dans les convertisseurs basiques d'une capacité de 50 à 70 tonnes, il consiste à brûler les impuretés de la fonte, et à intégrer, dans le liquide en fusion des métaux d'alliage.

Une fois l'opération d'affinage terminée, l'acier est coulé en continu et mis sous forme de brames de longueurs désirées.

2-2. Coulée de l'acier:

Une fois l'élaboration de l'acier achevée, il est déversé dans une poche de coulée bien chauffée.

Les dimensions de la poche sont le plus souvent choisies de façon à ce qu'elle reçoive tout le volume du métal fourni par le four et une partie de la scorie nécessaire à assurer l'isolation du métal.

Ensuite l'acier est coulé dans les lingotières métalliques pour obtenir des lingots.

Il existe trois coulées de l'acier:

coulée directe (en chute): lors de la coulée directe ou en chute, chaque lingotière est remplie à part par de l'acier liquide.

coulée en source: l'acier, versé de la poche dans un jet central, s'engage dans les chenaux de coulée plus étroits pour aboutir à plusieurs lingotières.

coulée continue de l'acier: c'est un procédé utilisé dans plusieurs usines, permet de réaliser une grande économie de métal. Le métal liquide est versé en un jet continu à partir de la poche de coulée 1 dans un dispositif intermédiaire 2, puis dans les cristallisoirs 3 refroidis par l'eau de circulation. On place en bas de chaque cristallisoir un germe cristallin en acier, qui retient à l'intérieur du cristallisoir les premières portions du métal liquide.

En entrant en contact avec ces germes et des parois, le métal liquide commence à se solidifier rapidement depuis

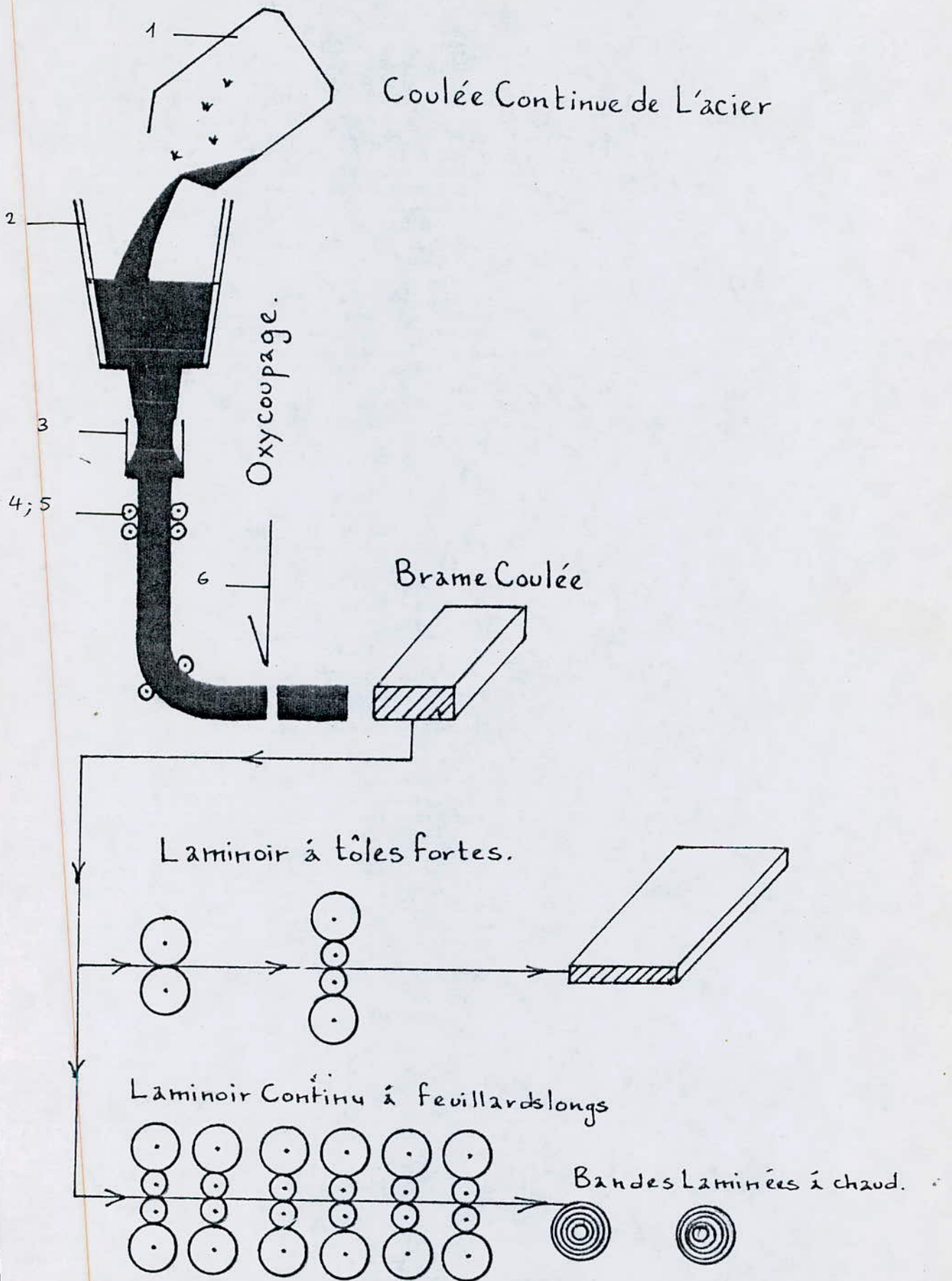


Fig. 5 Procédé de Laminage du complexe d'ELHADJAR

la surface du lingot; le métal se soude au germe et peut être retiré avec des cristallisoirs par le bas à l'aide des rouleaux 4 et 5.

La solidification du lingot continue formé dans le cristallisoir est accélérée au cours de son passage dans la zone de refroidissement secondaire par l'eau.

Le lingot définitivement solidifié est dirigé vers les chariots du découpage au gaz 6. En se déplaçant avec le chariot vers le bas, le lingot est tronçonné en longueurs courantes; le convoyeur le transporte jusqu'à la table de réception, d'où il est envoyé au dépôt, puis vers les laminoirs.

Conclusion: la coulée en chute donne moins d'inclusions non métalliques que la coulée en source et un métal plus chaud dans la tête du lingot.

La coulée en source assure un meilleur état de surface et un métal plus chaud dans sa partie inférieure.

Le volume du métal liquide déversé dans une lingotière diminue à mesure du refroidissement, ce qui conditionne le phénomène du retrait.

La partie intérieure du lingot reste liquide un certain temps même après la fin du remplissage de la lingotière.

Là où le métal reste longtemps liquide, il se forme une retassure due au retrait du métal (plus près de la tête).

Le complexe d'El Hadjar utilise la coulée continue de l'acier

. Avantage: bonne hétérogénéité chimique.

. Inconvénient: difficile à réaliser le procédé de coulée de l'acier (équipement, énergie).

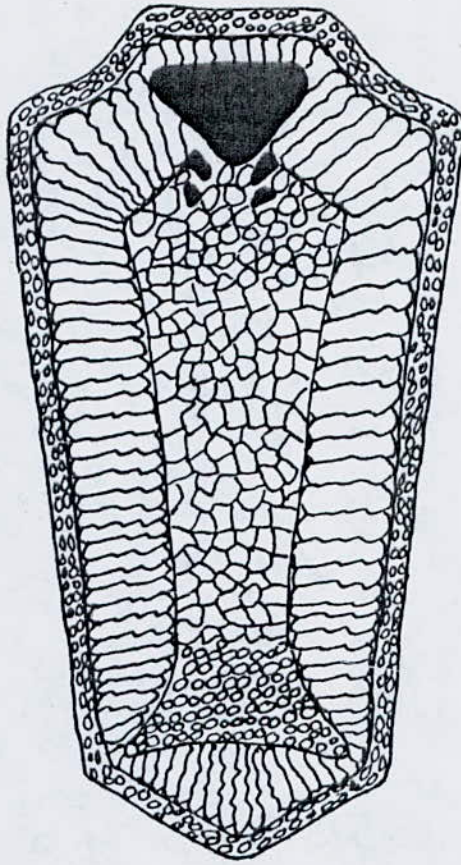
2-3. Lingot:

. Structure: La structure du métal lors de sa solidification dans une lingotière est hétérogène. Il est facile de comprendre la cause de ce phénomène, si l'on examine de près la cristallisation d'un acier calmé bien désoxydé dans une lingotière.

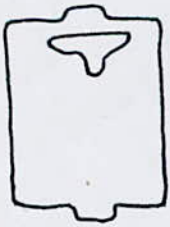
Le métal liquide est versé à la température de 1540°C à 1560°C; en entrant dès le début en contact avec le fond et les parois froids de la lingotière, le métal se refroidit rapidement sur leurs surfaces et forme une couche relativement mince de petits cristaux différemment orientés.

Après le refroidissement de la surface, le lingot s'écarte quelque peu du fond et des parois de la lingotière par suite du retrait des couches intérieures du métal.

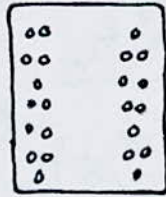
La couche d'air qui se forme entre le lingot et la lingotière ralentit le refroidissement de l'acier liquide à l'intérieur du lingot; on voit apparaître de gros cristaux disposés perpendiculairement à la surface de refroidissement de la lingotière. Il se forme ici une zone de cristaux allon-



Acier Calmè



Calmè



Effervescent



Semi-Calmè

Fig. 6. Solidification d'un Lingot.

gés légèrement inclinés par rapport à la paroi.

L'évacuation de la chaleur du lingot a lieu dans des sens différents, c'est pourquoi les cristaux sont disposés irrégulièrement, leurs axes principaux étant orientés dans toutes les directions.

Dans la tête du lingot il se forme une retassure couverte en haut par du métal solidifié. Plus bas se répartissent les soufflures et la zone spongieuse.

La structure d'un lingot d'acier est fonction de la température du métal pendant la coulée, la vitesse linéaire de la coulée de la température de la lingotière et de l'épaisseur de ses parois, de la composition chimique de l'acier, du procédé de sa désoxydation et de plusieurs autres facteurs.

. Dimension: Les lingots sont des matériaux de départ pour fabriquer les blooms et les brames.

Pour les blooms on emploie des lingots de 7 à 10 tonnes.

Pour les brames on emploie des lingots de 10 à 25 tonnes.

- * Volume: . Les lingots sont à base carrée (pour l'obtention des barres).
- . Les lingots sont à base rectangulaire (pour l'obtention des tôles).

$$M = \rho \cdot V$$

M: masse du lingot [Kg]
V: volume du lingot [dm³]
 ρ : densité de l'acier [Kg/dm³]

$$V = S \cdot L$$

S: surface de section moyenne du lingot [dm²]
L: hauteur du lingot [dm]

- * Section carrée:

$$V = a^2 \cdot L \quad (1)$$

a: côté de section moyenne d'un lingot carrée.

Dans la plupart des cas: $L = 3 a$

$$\text{donc (1)} \implies V = 3 a^3$$

$$\implies a = \sqrt[3]{\frac{V}{3}}$$

- * Section rectangulaire: a x b

On donne a
On trouve b

* Section ronde:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0.785 d^2$$

$$V \approx 2.3 d^3 \quad \Leftrightarrow \quad L = 2.93 d$$

$$\text{alors } d = \sqrt[3]{\frac{V}{2.3}}$$

* Surface spécifique de contact:

$$K_s = \frac{S_c}{V} \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

S_c : surface de contact du lingot [m²].

2-4. Produits finis:

Les laminés peuvent être classés en quatre groupes principaux:

- . profilés en acier;
- . tôles d'acier;
- . laminés spéciaux;
- . tubes.

. Profilés en acier:

Ils peuvent être classés en profilés marchands et profilés spéciaux.

Le premier groupe comprend les ronds, les carrés, les plats, les cornières, les rubans, les fils, les poutres en U, en H (y compris allégées et à larges ailes), etc...

Le deuxième groupe compte les rails, les profilés spéciaux employés dans le bâtiment.

. Tôles d'acier:

Elles sont employées dans les buts les plus divers; d'après leur épaisseur on distingue 3 groupes principaux:

- * les tôles fortes avec plus de 4.76 mm d'épaisseur
- * les tôles moyennes d'une épaisseur de 3 à 4.76 mm
- * les tôles minces avec moins de 3 mm d'épaisseur.

. Les laminés spéciaux:

Parmi les laminés spéciaux il y a les bandages, les roues et les profilés à bulbes; la section de ces dernières varient avec la longueur. Les profilés à bulbes (par exemple l'acier à béton) sont employés dans le bâtiment pour la fabrication du béton armé.

Les profilés en tôle pliée permettent de simplifier la gamme d'opération dans la fabrication de nombreuses pièces destinées à de nombreux utilisateurs; ils constituent une variété des laminés spéciaux. Les profilés en tôle pliée des formes les plus diverses sont fabriqués à partir des bandes ou des tôles d'une épaisseur de 0.2 mm à 20 mm; ils sont employés essentiellement dans le bâtiment (dans les éléments de construction, les châssis des fenêtres, etc...).

. Les tubes d'acier:

Ils peuvent être de 3 types:

- * les tubes sans soudure;
- * les tubes soudés au four;
- * les tubes soudés électriquement.

2-5. Demi-produits: blooms, brames et ébauches:

Les blooms, brames et ébauches sont des demi-produits du laminage.

Blooms: c'est un produit de section carrée avec arrondissement des angles.

Ses arêtes sont un peu concaves et égales 140...150 mm.

Le rayon d'arrondissement est 20...60 mm.

La tolérance des arêtes de la section carrée est de $\pm(5...10)$ mm.

La longueur est 1000...6000 mm.

Les blooms sont employés comme des matériaux de départ du laminage des gros profilés et des ébauches. On peut trouver des blooms de 18 dimensions de section.

Brames: c'est un produit de section rectangulaire d'épaisseur 100...250 mm.

Le rayon d'arrondissement des angles atteint 30 mm (la graduation des épaisseurs égale 6 mm pour les épaisseurs 100...145 mm et 10 mm pour les épaisseurs 150...250 mm).

La largeur est 300...2000 mm (la graduation des largeurs est de 20 mm pour les largeurs atteignant 700 mm et 50mm pour les largeurs atteignant 7000 mm).

La tolérance des épaisseurs est de $\pm(4...5)$ mm; pour les largeurs, elle est de ± 10 mm.

La longueur est 1300...5000 mm.

On peut trouver des brames de 21 dimensions de section.

Les brames sont employées comme des matériaux de départ du laminage des tôles et des bandes.

Ebauches: c'est un produit de section carrée avec arrondissement des angles (pour les arêtes 40x40...250x250mm)

On peut trouver des ébauches de 30 dimensions de section Pour les dimensions minimales 40...50 mm.

Le rayon d'arrondissement est de 7 mm.

La tolérance des arêtes de la section carrée est 1,0...1,5 mm.

Pour les dimensions maximales 210...250 mm, le rayon d'arrondissement des angles est de 35 mm.

La tolérance des arêtes de la section est de $\pm(5,0...7,0$ mm).

La longueur est 1000...9000 mm.

Les ébauches sont employées comme des matériaux de départ du laminage des barres et des produits finis.

Pratiquement, on trouve des dimensions des ébauches de: (60x60; 80x80; 100x100; 120x120; 150x150 mm).

Les blooms et les brames sont préparés à partir de lingots carrés ou rectangulaires.

Le poids et la forme du lingot dépendent du diamètre du cylindre, de la puissance du moteur, de la nuance de l'acier travaillé et du genre de l'ébauche à obtenir.

Le poids du lingot doit être choisi de façon à assurer un rendement maximal, une bonne qualité et un minimum de rebut. Par exemple, le poids des lingots pour la fabrication des brames est plus élevé que celui des lingots pour les blooms.

Pour que le rendement de l'atelier soit élevé, les blooming doivent produire de grosses pièces 200x200...350x350 mm de section.

Les lingots employés pour la production des blooms et des brames sont réchauffés dans des fours pits. Environ 90% des lingots sont livrés aux fours pits des blooming et des slabing directement depuis l'aciérie, c'est-à-dire dès leur extraction des lingotières; leur température moyenne est alors 800...850°C.

Généralement, les fours sont installés dans un bâtiment situé à proximité du blooming ou du slabing.

Le bâtiment où sont disposés les fours constitue le prolongement du bâtiment où se trouve le blooming; il est formé de deux travées, dont l'une pour les fours, et l'autre, pour les installations d'alimentation en gaz, en air et les commandes des fours.

Ces dernières années, la productivité des blooming de première catégorie du monde atteint 2.5 à 3 millions de tonnes par an et même plus.

Pour assurer un rendement assez élevé, le laminage d'une pièce dure 50...60 s.

Ordinairement, les blooming sont actionnés par un moteur électrique à courant continu d'une puissance de 7000 CV à vitesse réglable (0...50...120 tr/min).

D'après l'expérience des meilleures usines au monde, la réduction moyenne, en une passe, d'un lingot d'acier au carbone ou faiblement allié destiné à la fabrication d'un bloom est environ 65...75 mm. La réduction maximale tolérée est de 80...120 mm. Ce niveau de transformation exige 15 passes pour faire d'un lingot d'acier de 7 tonnes un bloom de section 250x250 mm, et 13 passes pour faire d'un lingot d'acier allié de 6.3 tonnes un bloom de section 250x250 mm.

La sortie des blooms d'acier effervescent est de 91...92.5 %, celle des rails 80...82 %.

Par la suite, les blooms sont travaillés soit sur des laminoirs à rails (profilés spéciaux à grosse section), soit sur des laminoirs dégrossisseurs (ébauches pour la fabrication des profils, des fils et de certains profilés spéciaux moyens ou fins).

En général, les trains dégrossisseurs sont disposés à proximité des blooming et sont incorporés dans l'atelier de préparation des services des laminoirs. Cette disposition permet de réaliser le laminage des produits fins depuis les gros lingots en chauffant le métal une seule fois, ce qui est économiquement très avantageux.

CHAPITRE 3

Paramètres de déformation des demi-produits

3-1. Déformation:

Le laminage produit une déformation plastique du métal, en réduisant l'épaisseur du plat et en augmentant sa longueur et sa largeur.

- Paramètres essentiels:

* à une passe:

- . la différence entre l'épaisseur initiale et l'épaisseur finale de la barre s'appelle réduction totale:

$$\Delta h = (h_0 - h_1) \text{ mm}$$

- . la différence entre la longueur finale et la longueur initiale de la barre s'appelle allongement total:

$$\Delta L = (L_1 - L_0) \text{ mm}$$

- . la différence entre la largeur finale et la largeur initiale de la barre s'appelle élargissement total:

$$\Delta b = (b_1 - b_0) \text{ mm}$$

- . la déformation de la barre lors du laminage peut être caractérisée par:

- . la réduction relative, c'est-à-dire le rapport de la réduction totale à l'épaisseur initiale, exprimée en %:

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%$$

- . le coefficient de réduction ν :

$$\nu = \frac{h_1}{h_0}$$

- . le coefficient d'élargissement λ :

$$\lambda = \frac{b_1}{b_0}$$

. le coefficient d'etirage μ :

$$\mu = \frac{L_1}{L_0} = \frac{S_0}{S_1}$$

Ainsi l'augmentation de la longueur de la barre est proportionnelle à la réduction de sa section transversale.

Dans les conditions normales, le resultat principal de la réduction de l'épaisseur du metal est son allongement, car son élargissement est relativement faible.

. Rapport entre les coefficients:

D'après la formule précédente, nous avons:

$$\begin{aligned} \frac{h_1}{h_0} &= \frac{b_0 L_0}{b_1 L_1} = \nu \\ \text{et } \frac{b_1}{b_0} &= \frac{h_0 L_0}{h_1 L_1} = \lambda \\ \Leftrightarrow \frac{h_1 b_1 L_1}{h_0 b_0 L_0} &= 1 \quad \text{ou} \quad \mu \cdot \nu \cdot \lambda = 1. \end{aligned}$$

Dans le cas de laminage des tôles minces, on peut considérer:

$$\begin{aligned} b_0 &= b_1 ; \quad \lambda = \frac{b_1}{b_0} = 1 \\ \text{alors } \mu &= \frac{1}{\nu} \quad \text{ou} \quad \mu = \frac{h_0}{h_1} \end{aligned}$$

On calcule les logarithmes d'equation $\mu \cdot \nu \cdot \lambda = 1$:

$$\ln \nu + \ln \lambda + \ln \mu = 0.$$

Si l'on designe: $\ln \nu = \ln \frac{h_1}{h_0} = \delta_h$

$$\ln \lambda = \ln \frac{b_1}{b_0} = \delta_b$$

$$\ln \mu = \ln \frac{L_1}{L_0} = \delta_l$$

on aura: $\delta_h + \delta_b + \delta_l = 0.$

. Valeurs absolues et relatives des paramètres de déformation:

. Valeurs absolues:

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

$$\Delta b = b_1 - b_0$$

$$\Delta l = l_1 - l_0$$

. Valeurs relatives:

- élargissement relatif:

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_1} \cdot 100 \%$$

$$\varepsilon'_b = \frac{\Delta b}{b_0} \cdot 100 \%$$

- réduction relative:

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 \%$$

$$\varepsilon'_h = \frac{\Delta h}{h_1} \cdot 100 \%$$

- allongement relatif:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_1} \cdot 100 \%$$

$$\varepsilon'_l = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \%$$

- étirage relatif:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \% = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100 \%$$

$$\varepsilon'_s = \frac{\Delta S}{S_1} \cdot 100 \% = \frac{S_0 - S_1}{S_1} \cdot 100 \%$$

- valeur relative de déformation volumique:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot 100 \%$$

$$\varepsilon'_v = \frac{\Delta V}{V_1} \cdot 100 \%$$

. Rapport entre les coefficients et valeurs relatives de déformation:

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = 1 - \frac{h_1}{h_0} = 1 - \nu$$

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_1} = 1 - \frac{b_0}{b_1} = 1 - \frac{1}{\lambda}$$

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_1} = 1 - \frac{l_0}{l_1} = 1 - \frac{1}{\mu}$$

$$\varepsilon_s = \frac{S_0 - S_1}{S_0} = 1 - \frac{S_1}{S_0} = 1 - \frac{1}{\mu}$$

. Vitesse de déformation:

$$\dot{\varepsilon}_h = \frac{\varepsilon_h}{t} \quad \text{ou} \quad \dot{\varepsilon}_h = \frac{d\varepsilon_h}{dt}$$

* à plusieurs passes:

Pendant n passes la section de la barre varie de S_0 a S_m , d'où les coefficients d'étirage suivants:

$$\mu_1 = \frac{S_0}{S_1}; \mu_2 = \frac{S_1}{S_2}; \dots \mu_m = \frac{S_{m-1}}{S_m}$$

$$\Leftrightarrow S_0 = \mu_1 \cdot S_1; S_1 = \mu_2 \cdot S_2; \dots S_{m-1} = \mu_m \cdot S_m.$$

$$\Leftrightarrow S_0 = \mu_1 \times \mu_2 \times \mu_3 \times \dots \times \mu_m S_m.$$

$$\Leftrightarrow \frac{S_0}{S_m} = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \dots \mu_m.$$

. coefficient d'étirage total:

$$\mu_\Sigma = \mu_1 \cdot \mu_2 \dots \mu_{m-1} \cdot \mu_m.$$

. coefficient d'etirage moyen:

$$\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{m-1} = \mu_m$$

$$\text{ainsi } \mu_\Sigma = \mu_m^m \Rightarrow \mu_m = \sqrt[m]{\mu_\Sigma}$$

Le nombre de passes n est:

$$n = \frac{\log \mu_\Sigma}{\log \mu_m} = \frac{\log S_0 - \log S_m}{\log \mu_m}.$$

Dans le cas de la section non rectangulaire de la barre, on peut établir la réduction:

$$\Delta h = \frac{S_0}{b_0} - \frac{S_1}{b_1}$$

- Zone de déformation:

Chaque cylindre entre en contact avec le métal suivant l'arc AB qui s'appelle "arc d'entraînement"; l'angle au centre qui correspond à cet arc s'appelle "angle d'entraînement". Le volume du métal limité par les arcs AB, les bords latéraux de la barre et les plans d'entrées et de sorties du métal depuis les cylindres s'appellent "Foyers" ou "zone de déformation du métal".

Pour établir l'angle d'entraînement, on emploie la formule:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h_0 - h_1}{D}$$

Cette formule exprime l'angle d'entraînement α , la réduction Δh et le diamètre des cylindres $D = 2 R$.

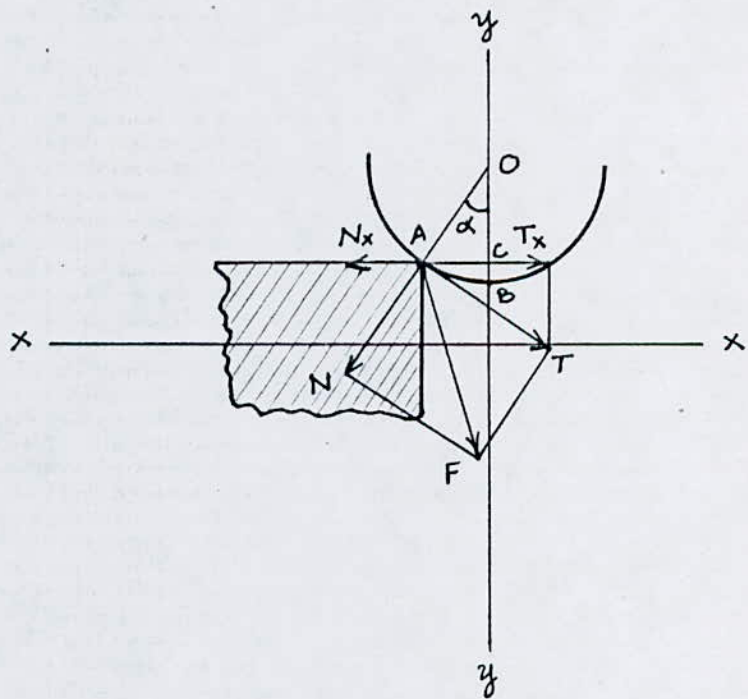
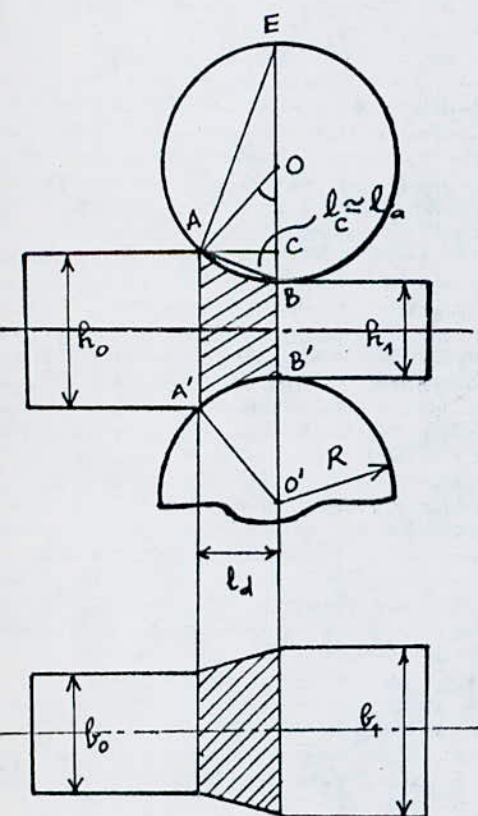
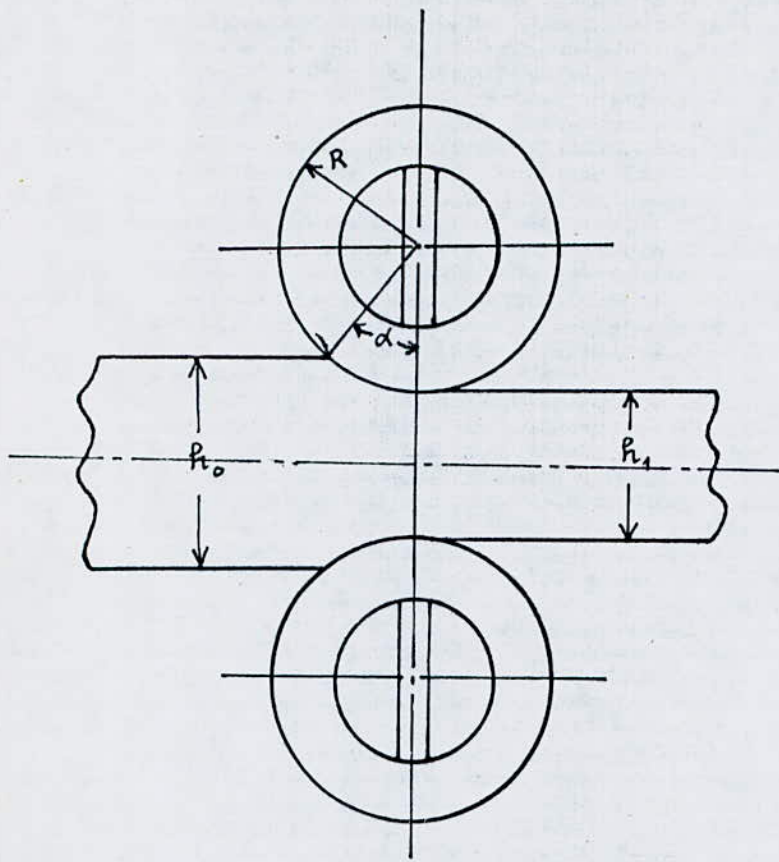


Fig. 7. Laminage des demi-Produits.

. Arc d'entraînement:

$$\widehat{AB} = l_a$$

$$l_a = R \alpha \text{ (rad)}$$

$$l_a = 2\pi R \cdot \frac{\alpha^\circ}{360^\circ} = \pi \cdot R \cdot \frac{\alpha^\circ}{180}$$

si $\alpha =$ valeur petite ($\alpha < 20^\circ$)

$$\implies l_a \approx l_c.$$

Le triangle ABC est semblable au triangle ABE:
ainsi: $AB^2 = BE \cdot BC$

$$l_a \approx AB = \sqrt{BE \cdot BC} = \sqrt{\Delta h \cdot R}$$

$$\text{et } AC = \sqrt{R \Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2} = \sqrt{R \Delta h \left(1 - \frac{\Delta h}{4R}\right)}$$

Lors du laminage: $\frac{\Delta h}{4R} < 0,1$ (valeur petite)

$$\implies AC = \sqrt{R \Delta h} \approx l_a \approx AB$$

. Longueur du foyer géométrique de déformation:
(ou longueur de la projection horizontale de l'arc d'entraînement)

$$l_d = \sqrt{(R \Delta h) - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}$$

$$\implies l_d = \sqrt{R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad [\text{mm}].$$

. Surface de contact:

Pour le laminage des profilés simples (tôles, bandes et ébauches de section rectangulaire ou carrée), la projection horizontale de la surface de contact est définie comme le produit de la largeur moyenne de la bande dans la zone de déformation par la longueur de cette zone de déformation.

$$\text{Donc: } S_{c_x} = b_m \cdot l_d = \left(\frac{b_0 + b_1}{2}\right) \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad [\text{mm}^2]$$

La projection verticale de la surface de contact est définie par:

$$S_{c_{z/2}} = \left(\frac{b_0 + b_1}{2}\right) \cdot \frac{\Delta h}{2} \quad [\text{mm}^2]$$

Enfin, la surface de contact est donnée par:

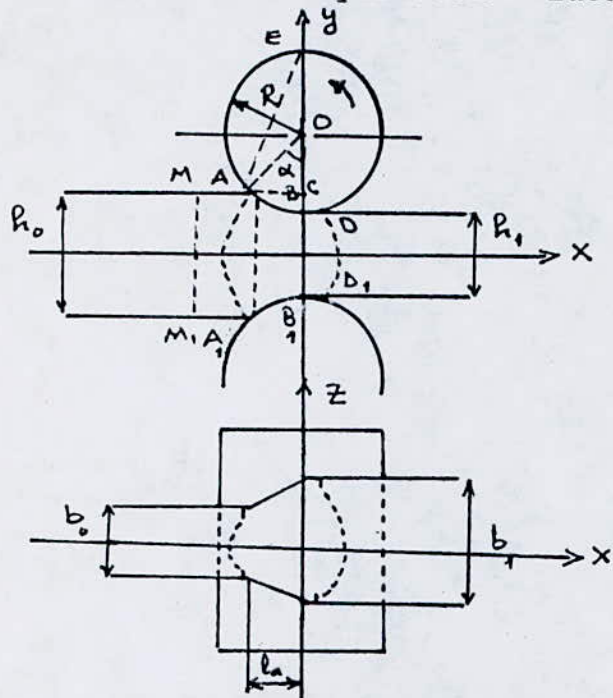
$$S_c = \left(\frac{b_0 + b_1}{2}\right) \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h - \left(\frac{b_1 - b_0}{2}\right)^2} \quad [\text{mm}^2]$$

. Foyer de deformation:

Caracteristiques: Foyer idéal AA_1B_1B .

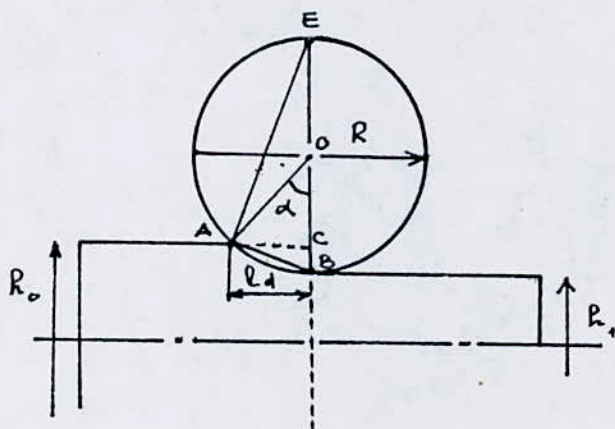
Foyer réel, MM_1D_1D .

Dimension du Foyer réel $>$ idéal (1,2...1,7)



- Dimension du Foyer idéal de déformation depend de: D, b_0, h_0, h_1, S_c .
- Dimension du Foyer réel de déformation depend de: D, b_0, h_0, h_1, S_c et d'autres facteurs: vitesse de déformation, taux de réduction, coefficient de frottement sur la surface de contact...
- Paramètres géométriques du Foyer de déformation: $\alpha, h_0, b_0, h_1, b_1, l_a, h_m, b_m$.

. Formule de α theorique:



Puisque lors du laminage la distance entre les axes (centres), des cylindres, augmente à cause de la déformation élastique des éléments (pièces) de la cage, et c'est pourquoi le jeu entre les 2 surfaces des cylindres augmente, d'où:

$$\delta = h_1 - h$$

Calcul de α_r :

D'après la première et la troisième formule, en remplaçant la valeur $h_0 - h_1$ par $h_0 - h$
c'est-à-dire $h_0 - h = \Delta h + \delta$

$$\text{Alors: } \cos \alpha_r = 1 - \frac{h_0 - h}{D} = 1 - \frac{\Delta h + \delta}{D}$$

$$\sin \frac{\alpha_r}{2} = \sqrt{\frac{h_0 - h}{2D}} = \sqrt{\frac{\Delta h + \delta}{2D}}$$

$$\alpha_r = \sqrt{\frac{h_0 - h}{R}} = \sqrt{\frac{\Delta h + \delta}{R}}$$

. Longueur du foyer de déformation (l_d):

En se basant sur le premier schéma, nous avons:

$$AC = l_d$$

Triangle AOC: $l_d = R \sin \alpha$

Approximativement: $l_d = R \alpha$

Pratiquement, la formule de l_d est difficile à appliquer car nous devons calculer α .

Il faut établir $l_d = f(\Delta h, R)$.

$$l_d = AC = \sqrt{R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \implies l_d = \sqrt{R \Delta h} \text{ [mm].}$$

avec $\frac{\Delta h^2}{4}$ tendant vers 0.

c'est-à-dire: $AC \approx \overline{AB} \approx \widehat{AB}$ (α petite valeur)

Pratiquement: $l_d = l_a$.

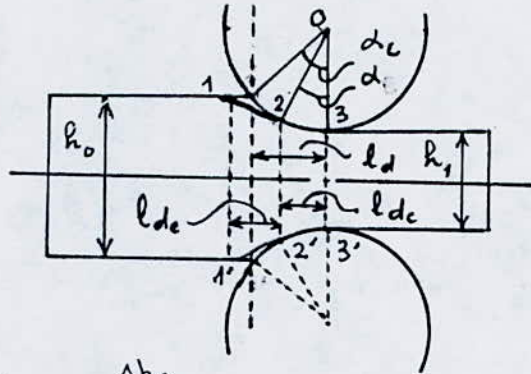
. Angle de contact (α_c):

Déformation en dehors de surface de contact,
Déformation d'extracontact:

On mesure plusieurs fois l'épaisseur de la barre d'essai (barre laminée incomplètement c'est-à-dire pas sur toute la longueur).

La hauteur h_0 commence à diminuer à partir du point 1 (théoriquement à partir du point 2); C'est-à-dire le point 1 se trouve avant la zone de contact 2 3 3' 2' (zone géométrique de déformation).

- Indice de déformation d'extracontact (i_{de}):



$$i_{de} = \frac{\Delta h_e}{\Delta h}$$

Δh_e = réduction absolue dans la zone d'extracontact.

- Rapport de α_c et α :

La réduction réelle de la barre dans la zone d'extracontact est: $\Delta h - \Delta h_e$

Ainsi:

$$l_{dc} = \sqrt{R (\Delta h - \Delta h_e)}$$

l_{dc} : longueur de la zone de contact réel.

En remplaçant la valeur de i_{de} , nous avons:

$$l_{dc} = \sqrt{R \Delta h \cdot (1 - i_{de})} = l_d \cdot \sqrt{1 - i_{de}}$$

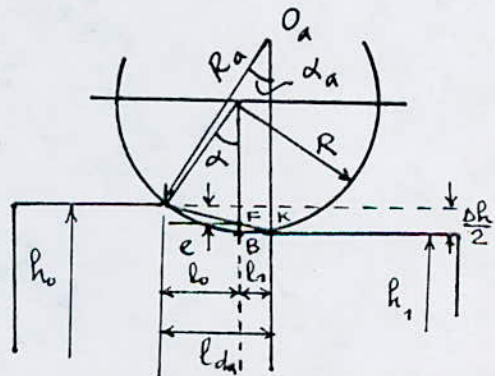
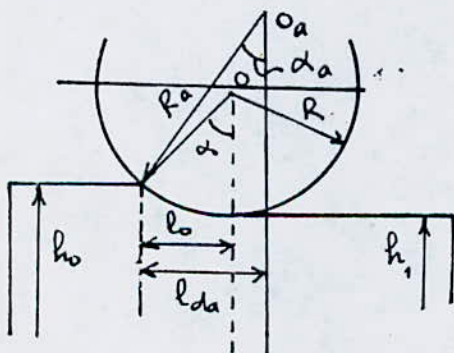
Par analogie:

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{(\Delta h - \Delta h_e)}{R}}$$

ou

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{\Delta h}{R} \left(1 - \frac{\Delta h_e}{\Delta h}\right)} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R} (1 - i_{de})} = \alpha \cdot \sqrt{1 - i_{de}}$$

- Applatissement des cylindres:



C'est un phénomène de déformation élastique locale (compression radiale) des cylindres.

L'applatissage provoque:

- une augmentation de la longueur du foyer de déformation;
- une diminution de la réduction;
- un changement des autres paramètres géométriques.

La forme précise de la surface de contact jusqu'ici n'est pas bien étudiée (pas claire).

La figure précédente donne une forme approximative de l'applatissage.

Le centre O devient O_a .

Le rayon R devient R_a .

. Formule de l_{da} :

l_{da} : longueur totale du foyer de déformation avec applatissage $l_{da} = l_0 + l_1$.

$BF = e$: c'est la compression radiale élastique: nous pouvons dire que F et K se trouvent sur la même horizontale (approximativement); or:

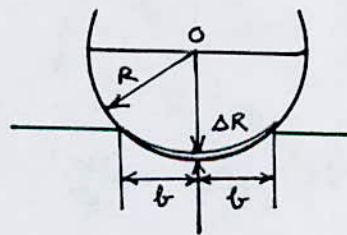
$$l_0 = \sqrt{R \Delta h}$$

$$\iff l_0 = \sqrt{R (\Delta h + 2 e)}$$

Par analogie: $l_1 = \sqrt{2 R e}$

$$l_{da} = \sqrt{R (\Delta h + 2 e)} + \sqrt{2 R e} = \sqrt{R \Delta h + l_1^2} + l_1$$

. Formule de la déformation élastique du cylindre lors de la compression sur un plan (Formule de Hertz):



$$\Delta R = \frac{2 P_l (1 - \mu^2)}{\pi E}$$

P_l : pression sur une unité de longueur de l'arc de contact du cylindre;

μ : coefficient de Poisson;

E : module d'élasticité du matériau du cylindre.

or $\sigma = E \epsilon$ (d'après la loi de HOOK)

nous avons:

$$e = \Delta R$$

$$l_1 = b$$

$$P_l = 2 l_1 P_m$$

P_m : pression moyenne sur la surface de contact.

En se basant sur la formule de ΔR , nous en déduisons les trois formules:

$$e = \frac{4 l_1 P_m (1 - \mu^2)}{\pi E}$$

$$l_1 = \left[\frac{8(1 - \mu^2)}{\pi E} \right] R \cdot P_m$$

$$l_{da} = \sqrt{R \Delta h + \left(\left[\frac{8(1 - \mu^2)}{\pi E} \right] R \cdot P_m \right)^2} + \frac{8(1 - \mu^2)}{\pi E} R \cdot P_m$$

Si l'on désigne:

$$\frac{8(1 - \mu^2)}{\pi E} = m$$

d'où:

$$l_1 = m \cdot R \cdot P_m$$

$$l_{da} = \sqrt{R \Delta h + (m R P_m)^2} + m R P_m$$

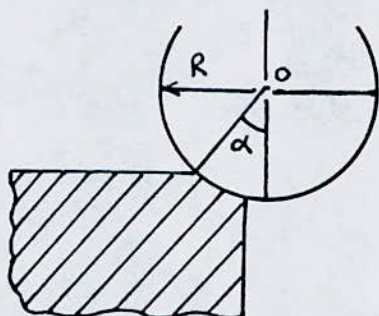
Forces en action :

Condition d'entraînement du métal par les cylindres:

- Periodes de laminage:

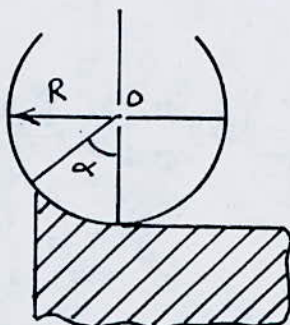
Première periode : Transitoire non stabilisée:

Lorsque le bout d'avant de la barre se déplace dans la zone de déformation.



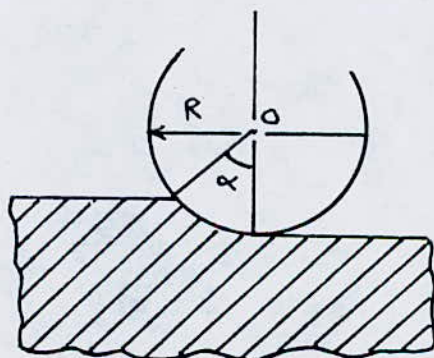
Troisième periode : transitoire non stabilisée:

Lorsque le bout de derrière se déplace dans la zone de déformation.



Deuxième periode : stabilisée :

Lorsque les deux bouts de la barre se déplacent à l'extérieur de la zone de déformation



-Les cas d'entraînement:

Premier cas: cas d'entraînement primordial:

Au moment de contact de la barre avec les cylindres tournants (moment d'entraînement primordial aux points A, A₁ on a:

$$\omega = \omega_1 \quad ; \quad R = R_1. \quad (\text{Voir Schéma Ci-dessous}).$$

Au moment de l'entraînement primordial (au premier contact du métal avec les cylindres), les projections horizontales de T et R sont:

$$T_x = T \cos \alpha; \text{force d'entraînement.}$$

$$R_x = R \sin \alpha; \text{force de refoulement.}$$

.Condition d'entraînement primordial:

Pour que les cylindres puissent entraîner le métal, il faut que:

$$T_x > R_x \quad \text{ou} \quad T \cos \alpha > R \sin \alpha$$

$$\text{Alors:} \quad \frac{T}{R} > \tan \alpha.$$

Le phénomène du laminage se produit grâce au frottement engendré entre les surfaces de contact des cylindres et de la barre. Au moment de l'entraînement, chaque cylindre exerce sur le métal deux actions celle de la force radiale R et celle de la force tangentielle T. On sait d'après la mécanique que quand deux corps se déplacent réciproquement, la force de frottement qui l'engendre est égale au produit de la force radiale R par le coefficient de frottement: $T = R \cdot f$.

Le rapport de la force de frottement à la force radiale est égale à la tangente de l'angle de frottement β , c'est-à-dire

$$\frac{T}{R} = \tan \beta = f.$$

Si f_e est le coefficient de frottement au moment d'entraînement primordial du contact par les cylindres nous avons:

$$T = f_e R.$$

$$\text{d'où:} \quad \frac{f_e \cdot R}{R} > \tan \alpha \quad \Rightarrow \quad f_e > \tan \alpha.$$

Si β_e est l'angle de frottement au moment d'entraînement primordial nous avons:

$$f_e = \tan \beta_e \quad \Rightarrow \quad \tan \beta_e > \tan \alpha \quad \Rightarrow \quad \beta_e > \alpha.$$

L'angle d'entraînement est inférieur à l'angle de frottement au moment d'entraînement primordial.

Le cas où $T_x = R_x$ est la condition limite d'entraînement. Ainsi l'angle d'entraînement maximal admissible pour le laminage au premier cas est:

$$\alpha \leq \beta_e$$

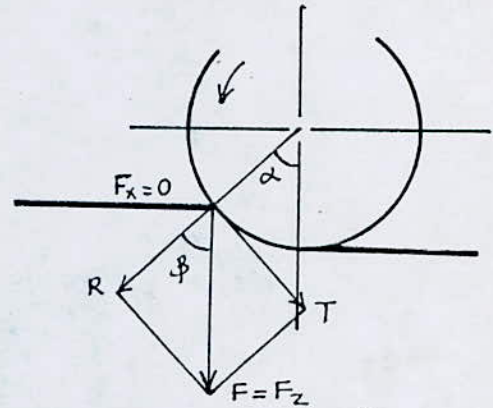
Si $\alpha = \beta_e$ il faut pousser le métal pour faire entrer le bout d'avant de la barre dans la zone de déformation.

Si $\alpha < \beta_e$ l'entraînement se produit facilement (librement).

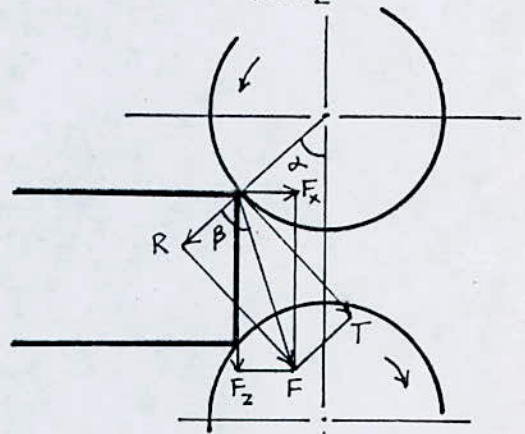
Deuxième cas: cas de période stabilisée:

.Les forces en action dans la période stabilisée du laminage:

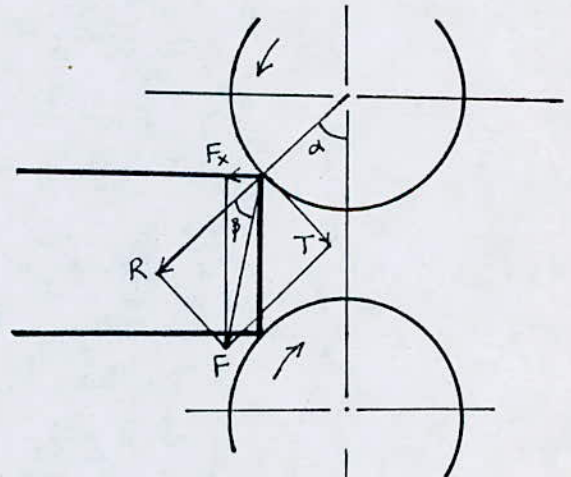
$\beta = \alpha$ (Limite)



$\beta > \alpha$ (Libre)



$\beta < \alpha$ (Forcé)



$\beta = \frac{\alpha}{2}$ (Stabilisé)

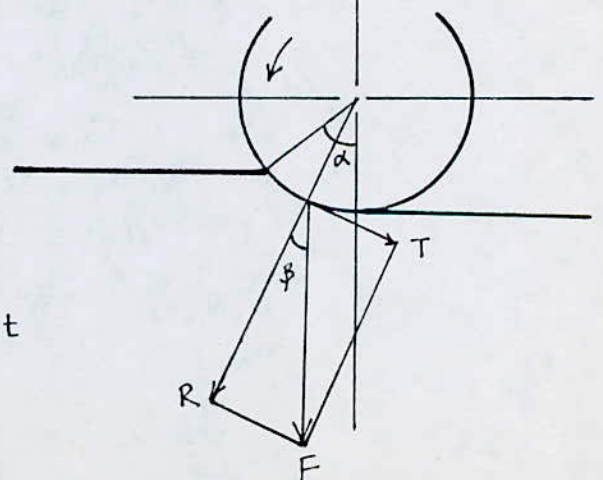
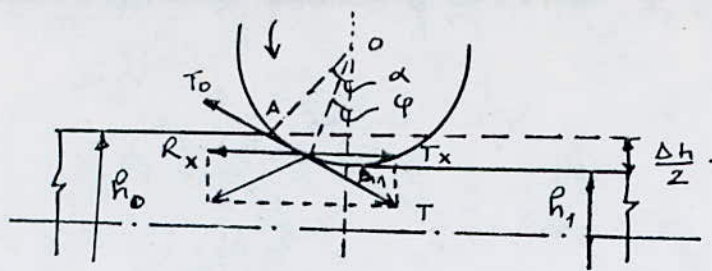


Fig. 8. Régimes d'entraînement



Admettons que la résultante des forces radiales au régime stabilisée est appliquée au milieu de l'arc AA_1 au point E; c'est-à-dire:

$$\varphi = \frac{\alpha}{2}$$

Par conséquent on peut réaliser le laminage (période stabilisée) nous avons:

$$T_x \gg R_x \quad \text{et} \quad T_x = T \cos \frac{\alpha}{2} = f_s R \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$R_x = R \sin \frac{\alpha}{2}$$

f_s : coefficient de frottement du métal lors de la période stabilisée.

$$\text{Alors: } f_s R \cos \frac{\alpha}{2} \gg R \sin \frac{\alpha}{2} \Leftrightarrow f_s \gg \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2};$$

avec $\operatorname{tg} \beta_s = \frac{T}{R} = f_s$.

β_s : Angle de frottement lors de la période stabilisée du laminage.

$$\operatorname{tg} \beta_s \gg \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \Leftrightarrow \frac{\alpha}{2} \leq \beta_s \Leftrightarrow \alpha \leq 2\beta_s$$

Ainsi dans la période stabilisée: $\varphi = \frac{\alpha}{2}$.

L'angle d'entraînement maximal admissible (condition limite du régime stabilisée):

$$\alpha = n \beta_s$$

n : coefficient de position de la résultante des forces radiales où $n > 1$; pratiquement on prend $n=2$.

Si la condition d'entraînement primordial est assurée, la réduction totale peut-être plus grande.

Conclusion:

Si nous comparons les conditions limites au régime stabilisée et dans le cas d'entraînement primordial, au point de vue de possibilité de réaliser le laminage, on peut dire que la réalisation du laminage primordial est uniquement dans le cas du régime stabilisé.

Au régime stabilisé, il y a une certaine réserve des forces de frottement: l'angle d'entraînement peut augmenter de n fois. Pratiquement, on réalise cette condition pour les blooms et les grandes ébauches.

3-2. Paramètres caractéristiques:

.Facteurs de forme: il existe 3 types: $\frac{l_a}{h_m}$; $\frac{b_m}{l_a}$; $\frac{b_o}{l_a}$.

On distingue: $\frac{l_a}{h_m}$ (sur la section longitudinale)
 $\frac{b_m}{l_a}$ et $\frac{b_o}{l_a}$ (sur la vue de dessus)

Si $\frac{b_o}{l_a} < 1$ (étroit).

Si $\frac{b_o}{l_a} = 1$ (critique).

Si $\frac{b_o}{l_a} > 1$ (large).

Valeur de h_m : $h_m = \frac{h_0 + h_1}{2}$
 Valeur plus précise de h_m : $h_m = \left(\frac{h_0 + 2h_1}{3} \right)$.

$$h_m = \sqrt{h_0 h_1} \quad \text{d'où} \quad \frac{l_a}{h_m} = \sqrt{\frac{R \Delta h}{h_0 h_1}}$$

Réduction relative:

$$e_h = \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) = \ln \frac{1}{\nu}; \quad \varepsilon''_h = \frac{\Delta h}{h_m}; \quad \varepsilon'''_h = \frac{\Delta h}{\sqrt{h_0 h_1}}; \quad \varepsilon'_h = \frac{\Delta h}{h_1}$$

Coefficient de déformation de hauteur ν :

$$\nu = \frac{h_1}{h_0} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{h_0}{h_1} = \frac{l_1}{l_0} = \frac{F_0}{F_1}$$

Elargissement relatif : e_b, ξ, i, λ .

Elargissement relatif vrai: $\delta_b = \ln \left(\frac{b_1}{b_0} \right) = \ln \lambda$.

Elargissement relatif conventionnel ξ : $\varepsilon'_b = \frac{\Delta b}{b_0}$.

Indice d'élargissement i_b : $i_b = \frac{\Delta b}{\Delta h}$.

Allongement relatif: $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_1} \cdot 100$

Allongement relatif vrai: $\delta_l = \ln \left(\frac{l_1}{l_0} \right) = \ln \mu$; $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_1}$.

Allongement relatif conventionnel: $\varepsilon'_l = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100$.

Remarque:

En traçant sur ordinateur ($\varepsilon'_h, \varepsilon''_h, \varepsilon'''_h, \varepsilon_h$) en fonction de $\ln \frac{h_0}{h_1}$, nous avons obtenu les courbes suivantes: (Voir. page 33a) et 33.b.

-Etude d'élargissement:

Il a été établi expérimentalement et théoriquement:

.Formule de JOHZ:

$$\Delta b = K \Delta h.$$

$K = (0,35 \dots 0,48)$

Le coefficient tenant compte de l'influence de tous les facteurs de laminage sauf pour la réduction totale.

.Formule de ZIEBEL:

$$\Delta b = K \cdot l \cdot \frac{\Delta h}{h_0}$$

l : prolongement de la zone de déformation.

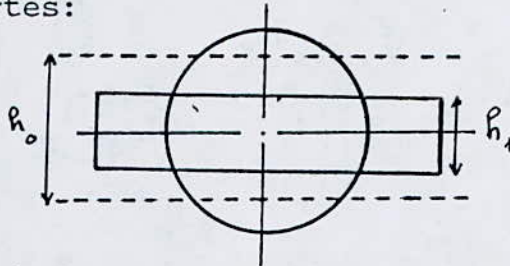
$$K = (0.35 \dots 0.45)$$

.Formule de BAKHTINOV:
$$\Delta b = 0,57 \frac{\Delta h}{h_0} \left(\sqrt{RDh} - \frac{\Delta h}{2f} \right).$$

.Facteurs influencants:

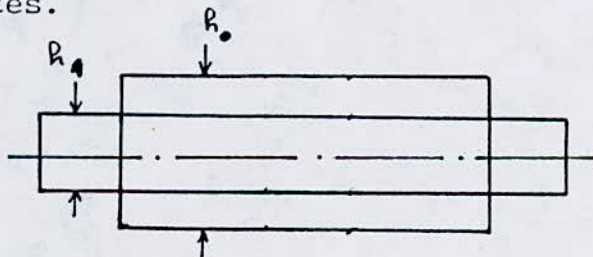
- Plus le diamètre D augmente, plus la longueur de la barre l augmente.
- Plus l augmente, plus les forces de frottement f augmentent.
- Plus f augmentent, plus l'allongement Δl diminue.
- Plus l'allongement Δl diminue, plus l'élargissement Δb augmente
- Plus f augmente, plus l'élargissement augmente.
- Plus la température augmente, plus f diminue.
- Plus la vitesse augmente, plus f diminue et plus l'élargissement diminue.

.Paramètres caractéristiques du laminage des demi-produits, ébauches et des tôles fortes:



.Barre de section compliquée avec des cylindres ordinaires. Présence d'irrégularité de hauteur initiale h_0 .

μ ; D ; $D+h_1$; h_1 = constantes.
 h_0 ; α ; non constantes.



.Barre rectangulaire à cylindres ordinaires.
 Le nombre de paramètre $n=5$.

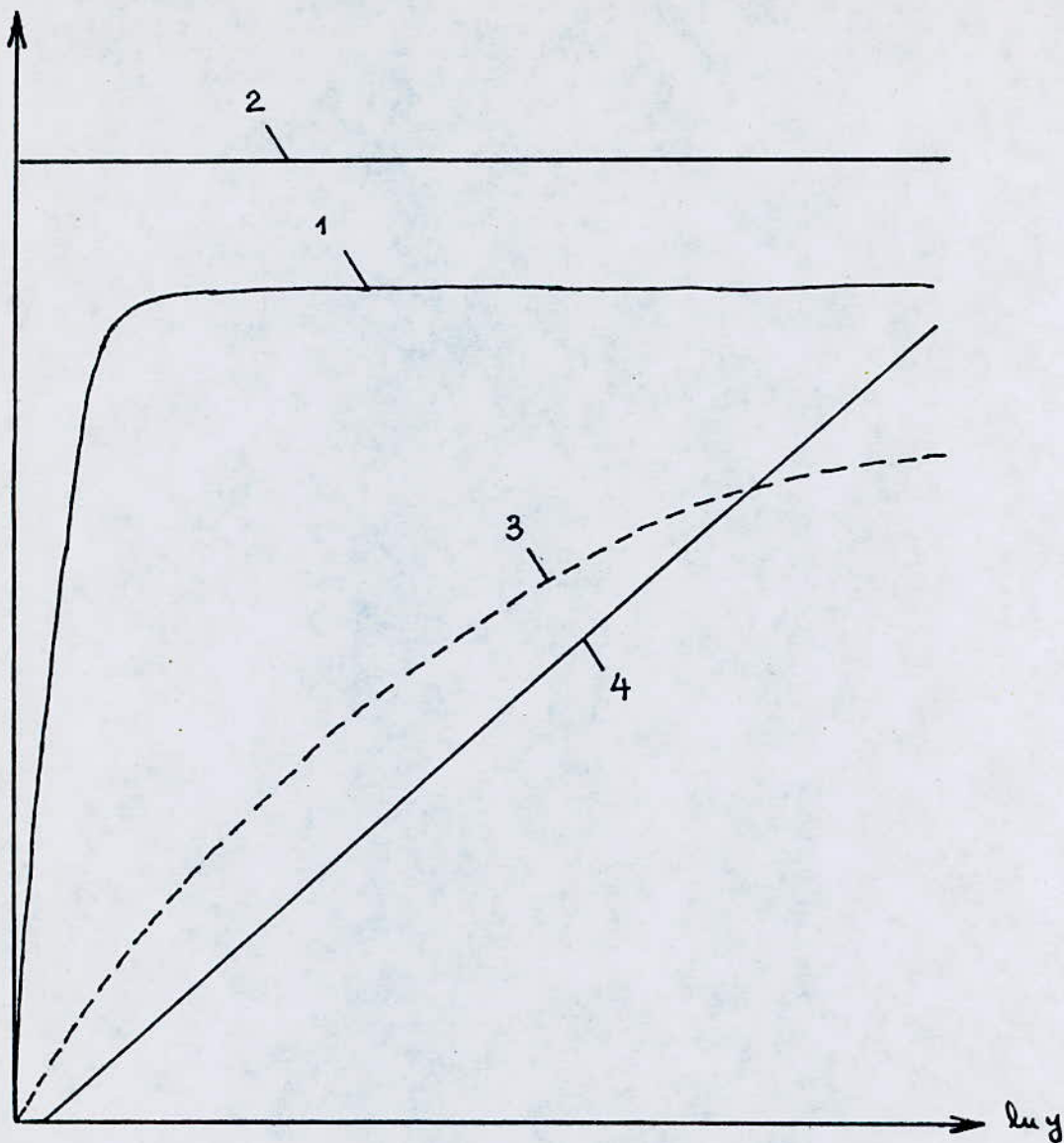
μ ; $D+h_1$; $D-h_1$; h_0 ; α = constantes.

.Produits finis:

*Système carré-ovale: μ et h_0 = constantes.
 $D+h_1$; h_1 ; α non constantes.
 barre rectangulaire et cylindres à cannelures.

*Système ovale-carré: μ et $D+h_1$ = constantes. ; h_0 , D , h_1 , α non constantes.
 barre de section compliquée et cylindres à cannelures.

$\varepsilon'_R, \varepsilon''_R, \varepsilon'''_R, \varepsilon_R$



- 1- $\varepsilon_R = f(luy)$.
- 2- $\varepsilon'_R = f'(luy)$.
- 3- $\varepsilon''_R = f''(luy)$.
- 4- $\varepsilon'''_R = f'''(luy)$.

Variation de $(\varepsilon_h, \varepsilon'_h, \varepsilon''_h, \varepsilon'''_h)$ en fonction
de $luy \frac{h_0}{h_1}$. (Résultats de Calcul Sur Ordinateur)

PROGRAMME DU CALCUL SUR ORDINATEUR HP vectra (U.S.A) DE E'_h, E''_h, E'''_h, E_h

EN FONCTION DE $\ln \frac{h_0}{h_1}$:

```
10 INPUT " P= " ; P
20 INPUT " A= " ; A
30 SCREEN 2
40 COLOR 10,1,6
50 LINE ( 20,0 ) - ( 20,180 ) : LINE ( 20,180 ) - ( 240,180 )
60 FOR Y = 1 TO 200 STEP P
70 X = ( 19 + Y ) * Y
80 E1 = 180 - A*( Y-I ) / Y
   E2 = 180 - A*( Y-I )
   E3 = 18 - A*2*( Y-I ) / ( Y+I )
   E4 = 180 - A*( Y - I ) / SQR ( Y )
   E5 = 180 - A*Y
90 PSET ( X,E1 ) : PSET ( X,E2 ) : PSET ( X,E3 ) : PSET ( X,E4 ) :
   PSET ( X,E5 )
100 NEXT Y
110 GOTO 110.
```

3-3. Conclusions:

- Proposition des paramètres supplémentaires ($\varepsilon'_n, \varepsilon''_n, \varepsilon'''_n$) permettant des études plus approfondies et plus précises.
- Le diagramme précédent (page 33a) est le premier pas de ces études.
- Il est nécessaire d'étudier profondément les zones de déformations réelles.
- L'angle d'entraînement réel est très important car son calcul donne une valeur très précise.
- Le phénomène de déformation d'extracontact est en réalité une déformation en dehors de la surface de contact. Ce phénomène nous permet de comparer l'angle d'extracontact avec l'angle d'entraînement théorique en faisant apparaître l'indice de déformation d'extracontact.
- Une autre proposition envisagée est celle de l'appatissement des cylindres qu'il faudra en tenir compte pour le calcul de la longueur totale du foyer de déformation et l'utilisation de la formule de HERTZ. Cette méthode est difficile à appliquer pour le calcul pratique.
- La formule de JOHNSON pour le calcul d'élargissement est une formule de base, par contre celles de ZIEBEL et BAKHTINOV sont plus complètes. Elles permettent aussi d'étudier théoriquement les paramètres influençants, mais elles sont difficiles à appliquer pour le calcul des paramètres de technologie dans les usines.

DEUXIEME PARTIE

AMELIORATION DE LA TECHNOLOGIE

DES DEMI-PRODUITS ET DES

TÔLES FORTES

CHAPITRE 4

Technologie du laminage des tôles fortes:

4-1. Usage, dimensions finales:

Usage des tôles fortes: Constructions navales, construction de machines, routières, énergétiques, fabrication des tubes de grands diamètres

Epaisseur finale : (4...160) mm , parfois 300 mm.

Largeur finale : (1000...5100) mm.

Longueur finale en fonction de la masse du lingot et de l'épaisseur des tôles: (8...50) m.

Les tôles du complexe d'El Hadjar ont la référence suivante:

Epaisseur finale: (5...20) mm.

Largeur finale: (1000...2650) mm.

Longueur finale \leq 24 m.

Particularité de la technologie:

Si on emploie des machines de coulée continue des brames, ce qui donne une grande économie. Il y a 3 types d'ébauches pour le laminage des tôles fortes:

-Lingots.

-Brames coulées en continue (complexe d'El Hadjar).

-Brames laminées.

Les brames se réchauffent dans les fours à passage ou à poutrelles pas a pas. Après le chauffage, on élimine les écailles de fer sur la surface des brames par des équipements spécialisés. Pour les produits en acier de qualité, on doit réaliser des chauffages intermédiaires lors du laminage. A la dernière passe les produits sont transportés au refroidisseur pour passer une étape de refroidissement intermédiaire puis on réalise la passe finisseuse. Après cette passe, les produits chauds sont transportés directement vers la dresseuse (planeuse). Enfin ils repassent au refroidisseur à la section de contrôle et de nettoyage des tôles à l'aide d'un appareil radiographique.

Le traitement thermique des produits est réalisé dans des équipements spécialisés qui comprennent des fours de chauffage, refroidisseurs et des fours de revenu (fours d'adoucissage pour éliminer les contraintes restantes ...).

4-2. Complexe Siderurgique d'El Hadjar:

-Laminoir à chaud: (LAC)

Le train à bandes de sider (TAC) est un train semi-continu capable de laminier des bandes d'un poids maximal de 21 Tonnes

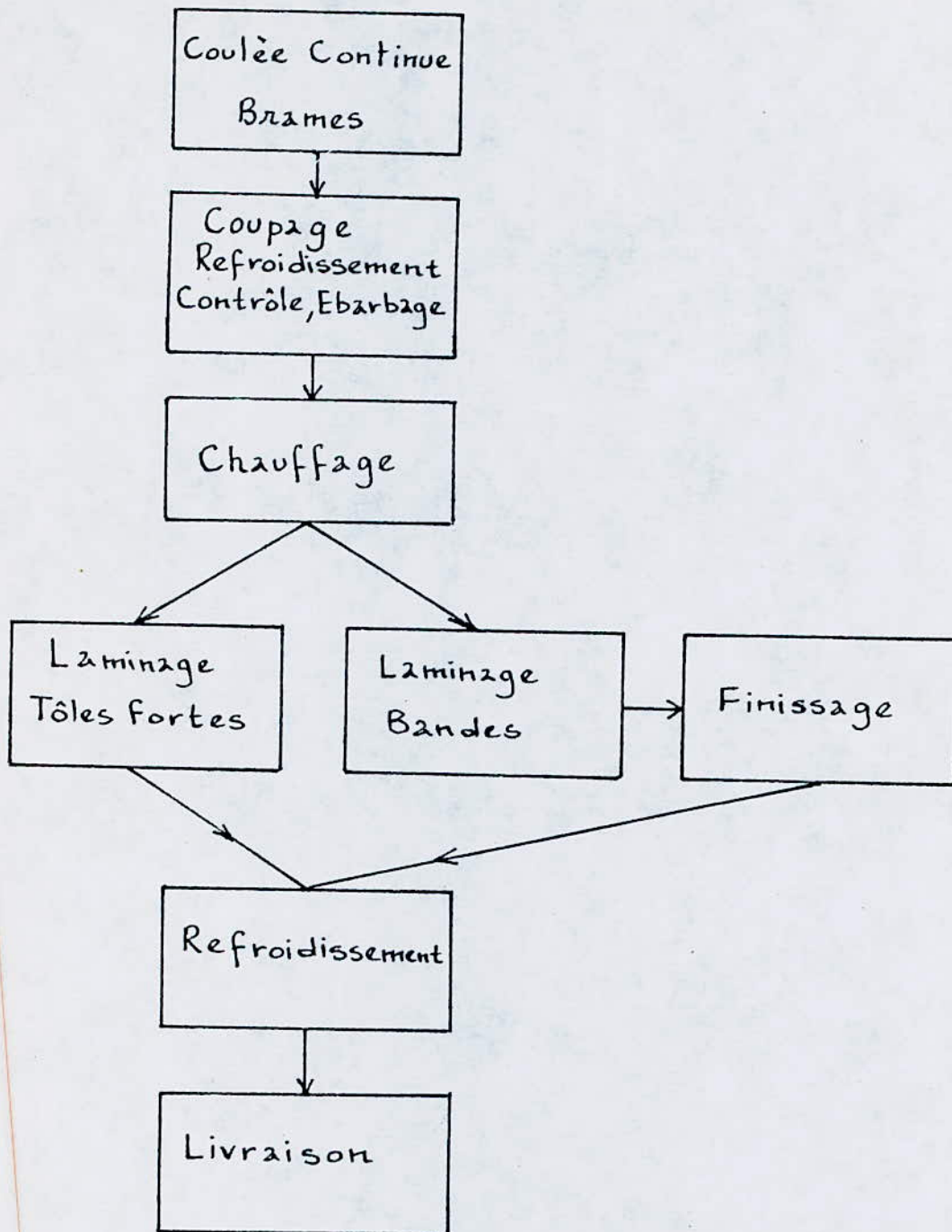


Fig. 9. Schéma du train Laminier Actuel d'EL-HADJAR.

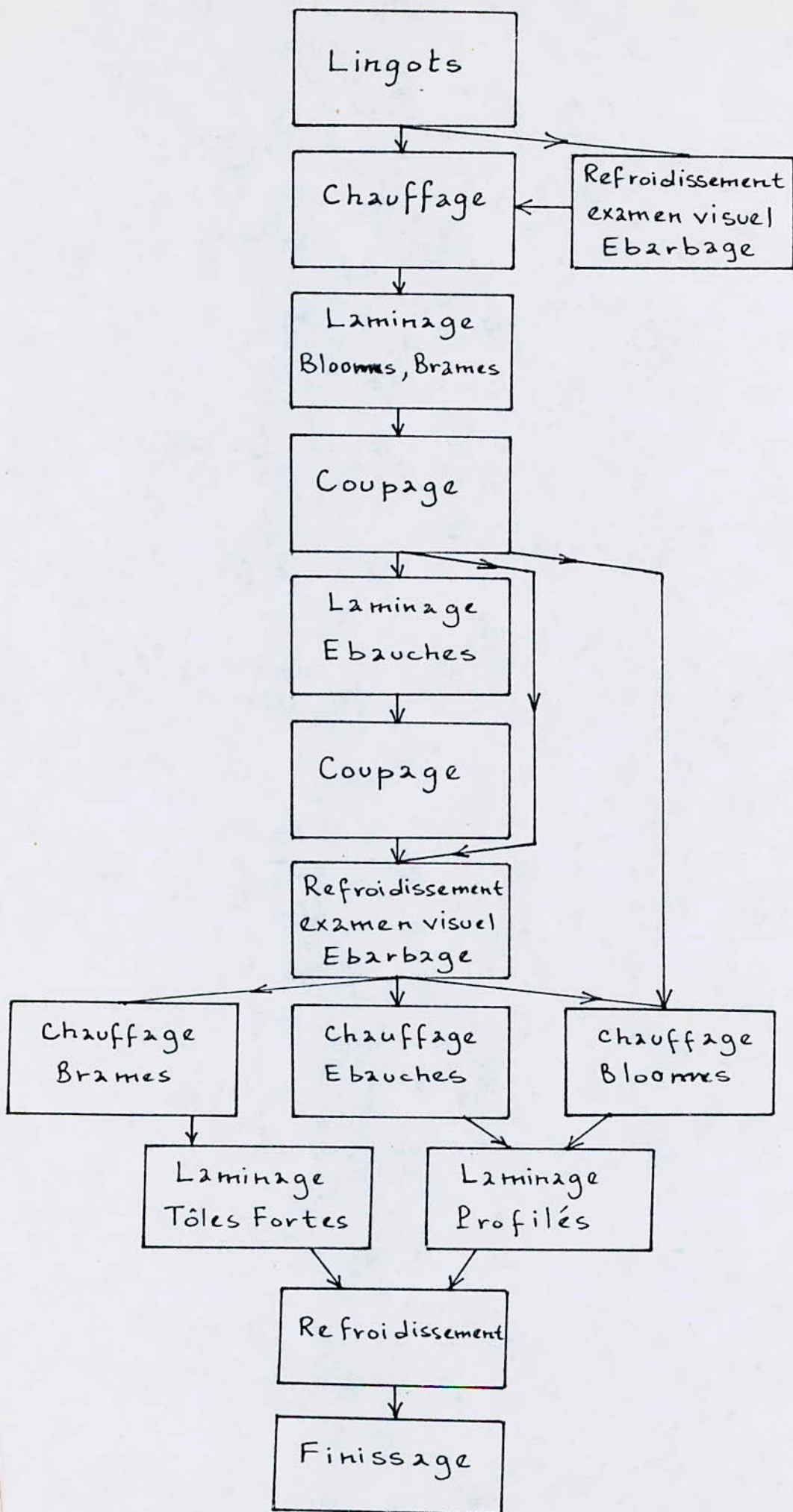


Fig.10. Procédé perspectif de Laminage proposé pour SNS d'EL-HADJAR

Les dimensions des brames:

Epaisseurs: (150...220) mm.

Largeur : (600...1350) mm.

Longueur: (1750...9000) mm.

Il peut laminier:

-Soit des tôles fortes évacuées, après la cage dégrossisseuse réversible vers le parachèvement.

-Soit des bobines: Epaisseur : (1.5...15) mm.

Largeur: (600...1350) mm.

Diamètre maximal: 1880 mm.

La production maximale du train peut atteindre 1800000 Tonnes par an, en bobines.

Pour réaliser cette production le LAC dispose de:

.2 fours poussants d'une capacité de 240 Tonnes / heure.

.1 four poussant d'une capacité de 125 Tonnes / heure.

.1 laveuse à brames.

.1 cage bride-oxyde.

.1 cage quarto réversible.

.1 planeuse à chaud.

.1 cisaille volante.

.1 décalamineuse.

.1 train finisseur constitué de 6 cages.

.Systèmes de mesure et de contrôle.

.1 système de refroidissement bandes.

.1 table à rouleaux pour les bobineuses.

.3 bobineuses.

4-3. Procéssus technologique:

Les brames provenant de l'aciérie à oxygène n°1 (ACO₁), sont réceptionnées et conditionnées au parc à brames, à savoir:

.Refroidissement à l'air et à l'eau.

.Ecriquage (élimination des défauts superficiels).

.Listage et programmation.

-Fours:

Les brames sont réchauffées jusqu'à une température de laminage (1250°C).

Le chauffage a pour but d'augmenter la plasticité du métal pour diminuer l'effort de laminage et par conséquent l'augmentation de la réduction partielle et la diminution du nombre de passes.

Le combustible utilisé est le gaz naturel ou gaz de cokerie.

-Laveuse:

Son rôle est d'éliminer la calamine, formée au niveau des fours, par jets d'eau d'une pression de 140 bars.

-Brise-oxyde:

Constituée d'une cage duo horizontale et d'une cage verticale; son rôle est de réduire l'épaisseur et la largeur de la brame. La calamine brisée au cours des réductions est nettoyée

par jet d'eau (pression : 140 bars).

-Cage dégrossisseuse réversible:

Elle est composée d'une cage verticale pour réaliser la mise en largeur des produits à laminer. Elle est utilisée uniquement lors du laminage bandes, ses réductions sont opérés lors des 3 premières passes impaires.

Une cage horizontales composée de 4 cylindres:

2 cylindres d'appuis pour diminuer la flexion des cylindres de travail et qui sont refroidis par jet d'eau d'une pression de 4 bars.

2 cylindres de travail qui sont au contact de la bande et refroidis par pression d'eau de 18 bars.

La plus grande réduction s'effectue au niveau de cette cage et elle a 2 rôles:

-Production des tôles fortes (produit fini) pour le parachèvement.

-Production des ébauches pour le train finisseur.

En amont et en aval de cette cage il y a des règles de centrage pour center la brame dans l'axe de laminage.

-Planeuse:

Elle est utilisée lors du laminage des tôles fortes pour planer les produits de dimensions : (5...20) mm.

-Cisaille volante:

Son but est de couper la tête et la queue de l'ébauche provenant de quarto.

La tête est coupée en forme arrondie, par des couteaux courbes pour faciliter son engagement au train finisseur.

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

La capacité de coupe (40...1350) mm à 1000°C.

-Décalamineuse:

Son rôle est d'éliminer la couche de calamine, formée durant le parcours de l'ébauche entre le quarto et les finisseuses, par jet d'eau d'une pression de 140 bars.

-Train finisseur:

Il est composé de 6 cages, placés en tendem, de même constitution et de même fonction, il a pour but:

.De réduire l'épaisseur de l'ébauche pour le porter aux dimensions demandées sur le programme de laminage.

.D'améliorer le grade de finition de la superficie de la bande suivant comme elle se présente après la cage quarto.

.De donner à la bande un profil bien déterminé suivant sa destination.

.D'effectuer le laminage en un temps le plus bref possible, coordonnant dans le meilleur mode la réduction avec la vitesse des cylindres dans les différentes cages.

Ceux-ci non seulement pour augmenter le tirage de laminage (rendement), mais aussi pour éviter un refroidissement excessif de la bande, durant son passage, chose importante à cause de

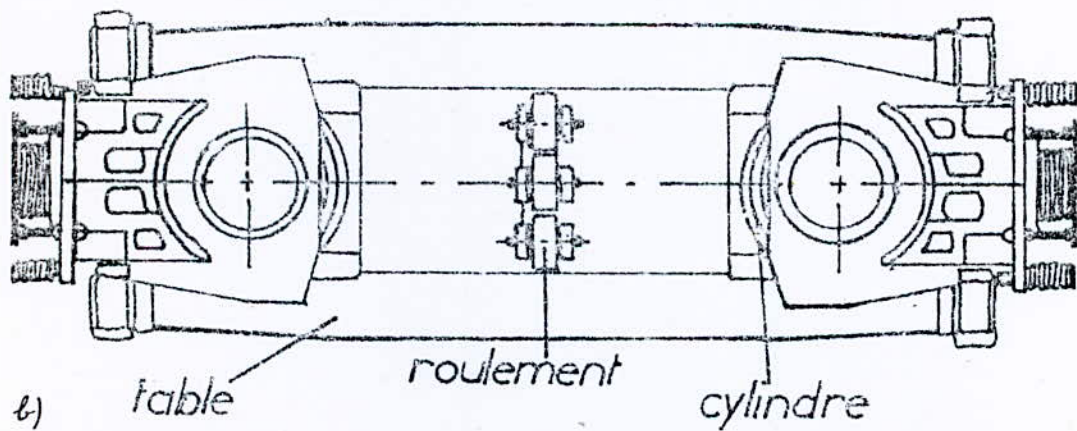
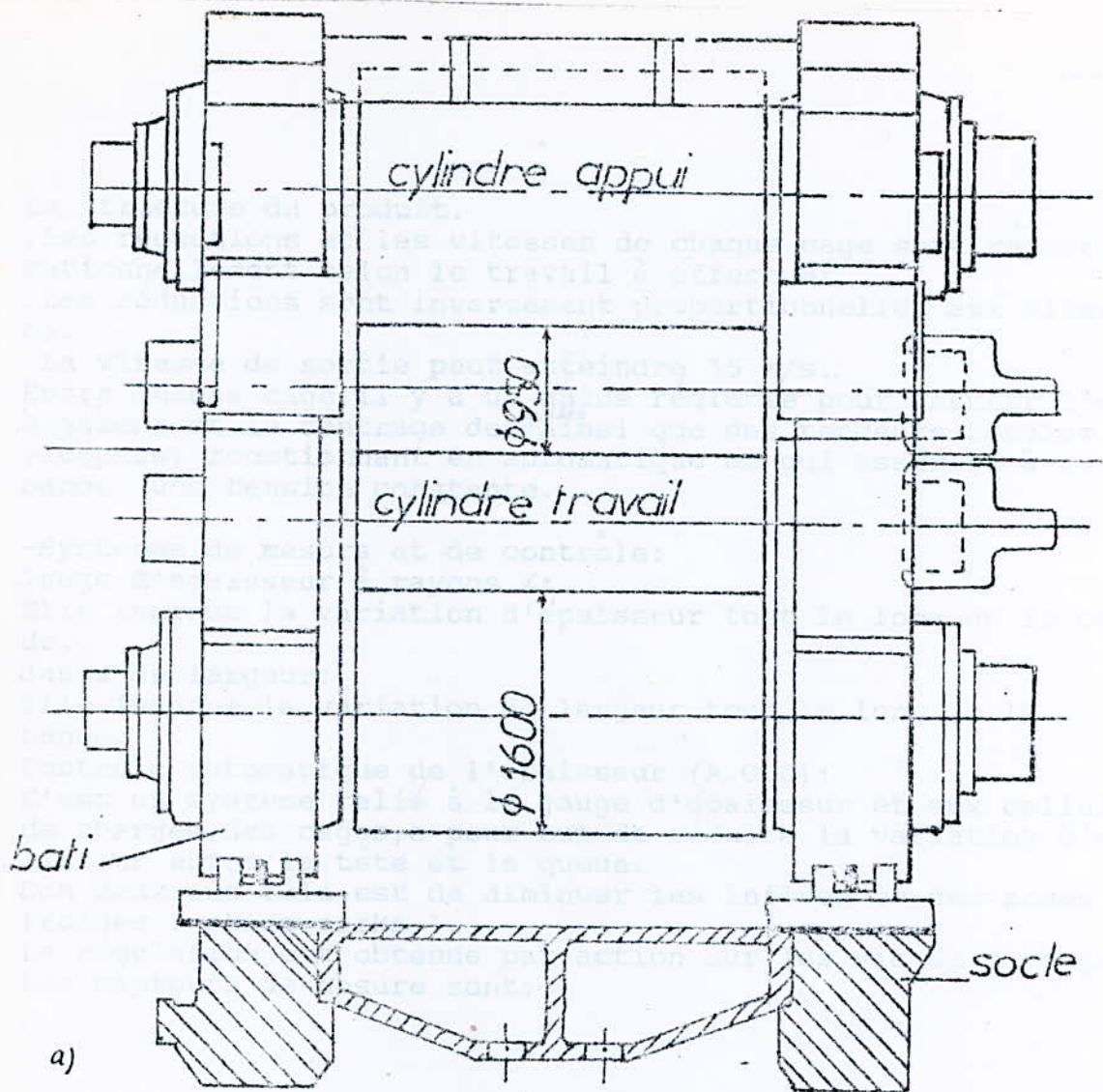
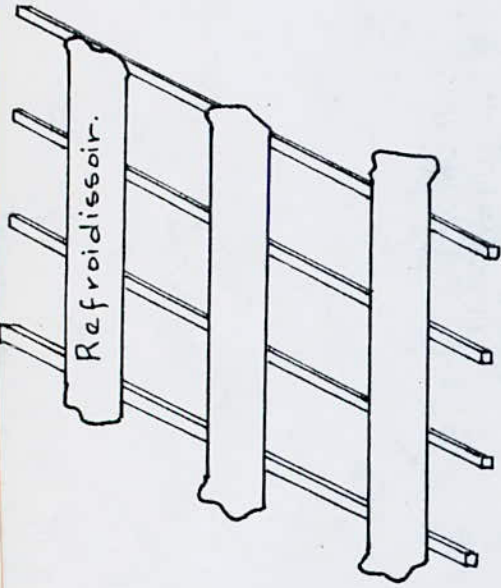


Fig. 11. Quarto reversible (a) et Cage Verticale (b).

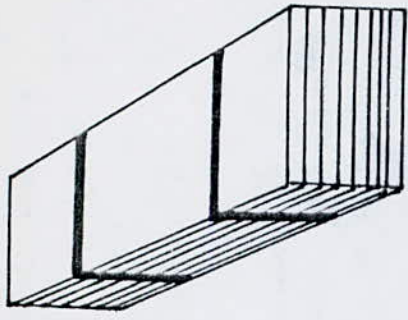
Plaqueuse



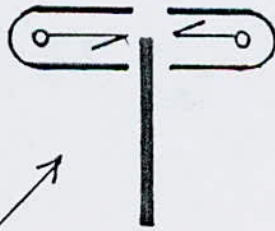
Refrigidisseur.



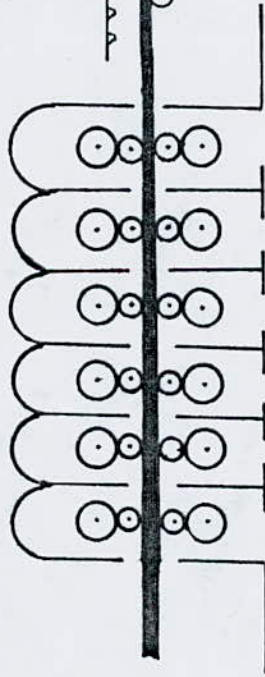
Parachevement



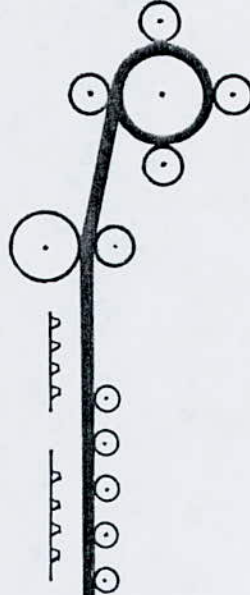
Cisaille



Train Finisseur.



Système Refroidissement. Bobineuses.



Depôt Bobines

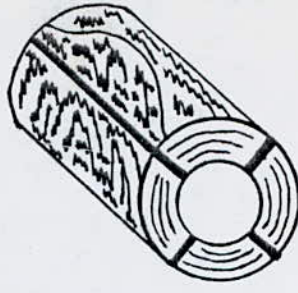


Fig. 14- Train de Laminage des bandes.

.2 transducteurs d'efforts par cage pour l'AGC-RF qui compense les erreurs relatives comme les Skids marks.

.2 jauges X pour l'AGC-XR qui compense dans une certaine mesure les erreurs absolues dues aux mauvais réglages initiaux.

-Accélération (speed-up):

Ce système s'enclenche dès que la tête de la bande quitte la sixième cage de 10 m environ.

Les vitesses des cages finisseuses de la table à rouleaux et des bobineuses augmentent jusqu'à atteindre une vitesse correspondante à l'accélération préaffichée.

Le système a pour but de diminuer l'écart de température entre tête et queue de la bande.

Le système permet des accélérations max de 0.1 m/s^2 .

Le taux usuel ne dépasse jamais 0.05 m/s^2 .

Le système synchronise l'ensemble du train finisseur (amont cages et bobineuses).

-Table à rouleaux sortie finisseur (table AK):

Elle est composée de 244 rouleaux subdivisés en 4 sections;

Elle a pour but d'amener la bande jusqu'aux bobineuses.

Les rouleaux sont auto-moteurs et sont synchronisés avec la vitesse de la dernière cage finisseuse.

-Système de refroidissement bandes:

Elle est constituée de 9 sections supérieures ayant 10 caissons, chacune constituée de 4 buses, 10 sections inférieures avec 13 rampes, chacune comportant 19 buses.

Pression: refroidissement laminaire.

Débit: un débit total de $5400 \text{ m}^3 / \text{h}$.

Ce système a pour but d'abaisser la température de la bande en figeant sa structure et en éliminant la calamine qui peut se former à la sortie du train finisseur.

-Bobineuses:

Il existe 3 bobineuses:

Chaque bobineuse est constituée de rouleaux entraineurs, de rouleaux presseurs et d'un mandrin.

Son rôle est d'enrouler la bande à sa sortie des finisseuses. Les vitesses de cette installation sont synchronisées avec la dernière cage finisseuse.

Après bobinage, les bobines sont évacuées au dépôt bobines par convoyeurs à chaînes.

4-4. Etude pratique d'élargissement:

Pour les 2 premières passes: on prend $\Delta b = 5 \text{ mm}$ à chaque passe.

Pour la troisième jusqu'à la cinquième passe:

$$\Delta b = (0.08 \dots 0.30) \Delta h ; \quad \Delta b = (0.20 \dots 0.30) \Delta h$$

(dernières passes).

Pour les autres passes: on prend les valeurs intermédiaire de Δb .

L'élargissement moyen pendant la période du laminage du lingot est donné par:

$$\Delta b = 0.15 \Delta h.$$

Généralement on prend la valeur de Δb multiple de 5 pour faciliter le travail des opérateurs.

Longueur du produit:

Le volume du métal réduit est: $V = \frac{M_g}{\rho}$

M_g : masse du lingot. [Kg]

ρ : densité du métal égale à 7850 Kg / m³.

Au 2 premières passes: on prend les valeurs de longueurs égales à l'initiales.

Au autres passes, la longueur du produit:

$$l_m = \frac{V}{S_m} = \frac{V}{h_m \cdot b_m}$$

Le coefficient d'étirage à n passe est donné par:

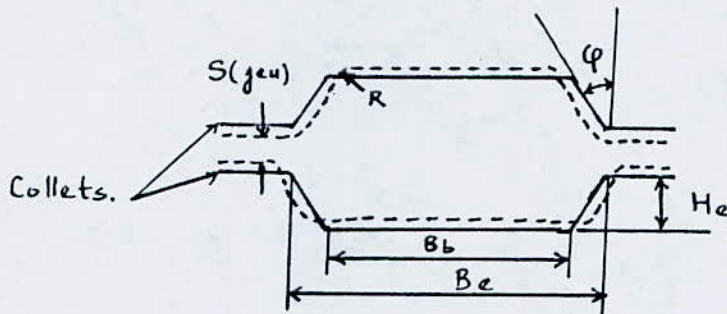
$$\mu_m = \frac{F_{m-1}}{F_m} = \frac{l_m}{l_{m-1}}$$

CHAPITRE 5

Cannelure et disposition

5-1. Éléments de cannelure:

-Jeu entre les collets des cylindres: S



$$S \geq \Delta_l + \Delta_e + \Delta_u.$$

Pour les blooming: $S = (0.015 \dots 0.020) \times D.$

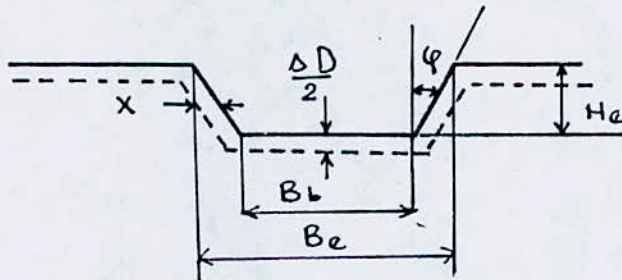
Pour les slabing: $S = (0.015 \dots 0.020) \times D.$

Pour les gros profilés: $S = (0.025 \dots 0.030) \times D.$

Pour les profilés moyens: $S = (0.010 \dots 0.018) \times D.$

Pour les profilés fins: $S = (0.005 \dots 0.008) \times D.$

.Angle d'inclinaison latéral:



$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_e - B_b}{2 H_e}$$

Pratiquement la largeur du métal à laminer est supérieure à la largeur de la rainure.

Dans les procédés de réaffûtage les diamètres des nouveaux cylindres diminuent jusqu'à la grandeur admissible du diamètre.

$$\Delta D = \frac{2x}{\operatorname{tg} \varphi}$$

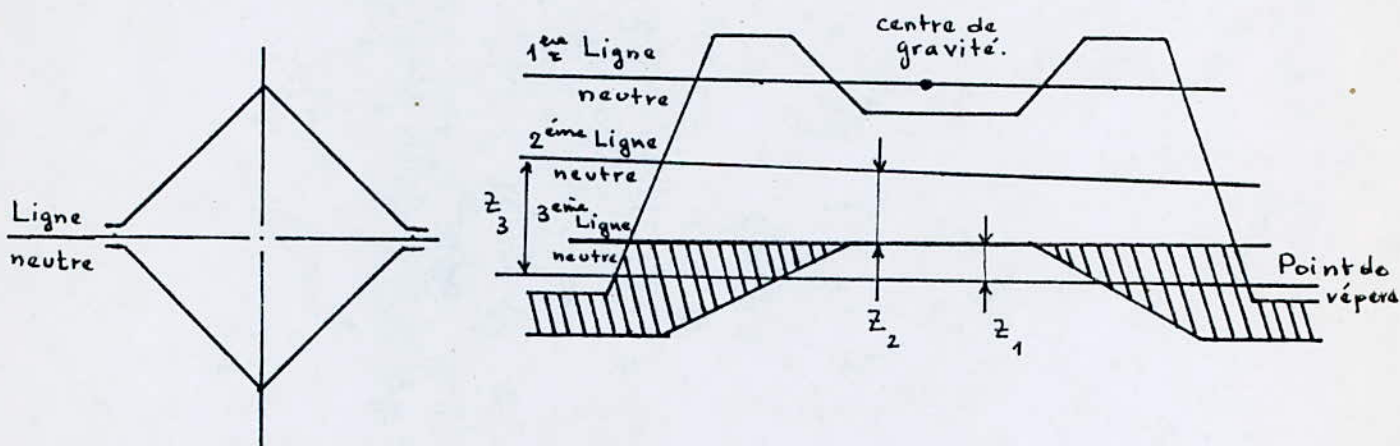
Pratiquement $\operatorname{tg} \varphi = (8 \dots 50) \%$.

.Arrondi (r): c'est:

Pour éviter les concentrations des contraintes.

Pour éliminer les arêtes pointues afin que les particules puissent se déplacer librement.

.Ligne neutre:



Pour que le métal avance en rectiligne, nous avons montré les 3 lignes neutres.

De ceux-ci nous tirons:

$$Z = \frac{W_1 z_1 + W_2 z_2 + W_3 z_3}{W_1 + W_2 + W_3}$$

Formule de moment statique.

5-2. Dimensions et dispositions des cannelures:

Jeu entre les collets: S

$$S = (5 \dots 15 \dots 20) \text{ mm.}$$

LES valeurs de S se varient conformément au régime de la réduction.

Hauteur d'échancrure (profondeur) H_e :

$$H_{\min} : \text{hauteur minimale du produit dans la cannelure donnée.}$$

$$H_e = (0.2 \dots 0.3) \times H_{\min} \text{ si } \frac{h}{b} \leq 1.3$$

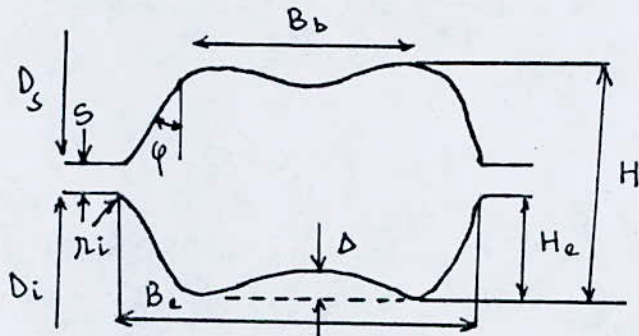
$$H_e = (0.35 \dots 0.45) \times H_{\min} \text{ si } \frac{h}{b} > 1.3$$

Si nous voulons laminer les brames, au lieu de la première cannelure, on emploie les cylindres lisses ou la cannelure de petite profondeur (hauteur).

$$2H_e = (90 \dots 130) \text{ mm.}$$

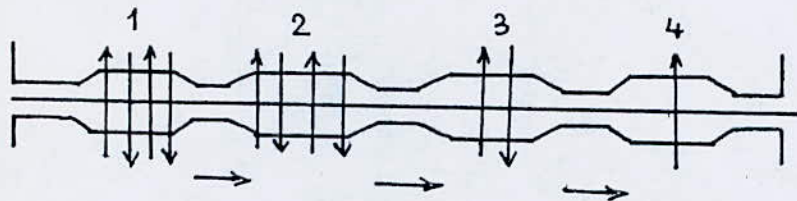
On obtient la hauteur nécessaire de la cannelure de façon à changer la valeur du jeu entre les collets.

Dimensions de la cannelure:



B_e , H_e : largeur, hauteur d'échancrure.
 B_b : largeur de base.

Disposition des cannelures:



Schema propose' a L'avenir.

Largeur de la cannelure pour les blooms:

$$B_b = B_{0min} - (0...10) \text{ mm.}$$

$$B_e = B_{1max} + (5...10) \text{ mm.}$$

B_{0min} : largeur minimale du produit avant l'entrée dans la cannelure.

B_{1max} : largeur maximale du produit après la sortie de la cannelure.

Pour les brames:

$$B_b = B_{1max} + (100...150) \text{ mm.}$$

Inclinaison latéral $tg\phi$:

Pour la dernière cannelure:

$$tg\phi = (10...15) \%$$

Pour les autres:

$$tg\phi = (20...35) \%$$

Convexité Δ de la base :

Elle est nécessaire pour compenser l'élargissement lors du

laminage dans la cannelure suivante:

$$\Delta = (2.5 \dots 5.0) \text{ mm.}$$

Pour la première et la dernière cannelure : $\Delta = 0$

Rayon r_2 : Pour les cannelures finisseuses nous avons:

$$H : \text{arête dy carré. } r_2 = (0.10 \dots 0.12) \times H$$

Pour les autres:

$$r_2 = (0.07 \dots 0.10) \times B_d, \text{ mais n'est pas supérieure à } (35 \dots 40) \text{ mm.}$$

Généralement $r_1 \approx r_2$.

On peut arrondir les valeurs de r_1, r_2 . Elles doivent être multiple de 5.

Largeur des collets entre 2 cannelures B_c :

$$B_c = (0.75 \dots 0.90) \times H_e$$

Pour les collets au bout des cylindres:

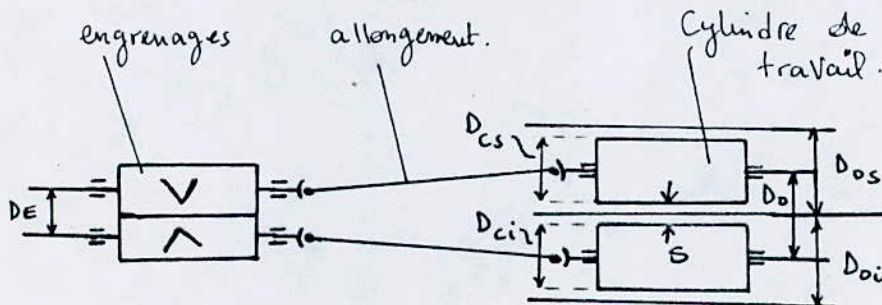
$$B_c = (100 \dots 120) \text{ mm.}$$

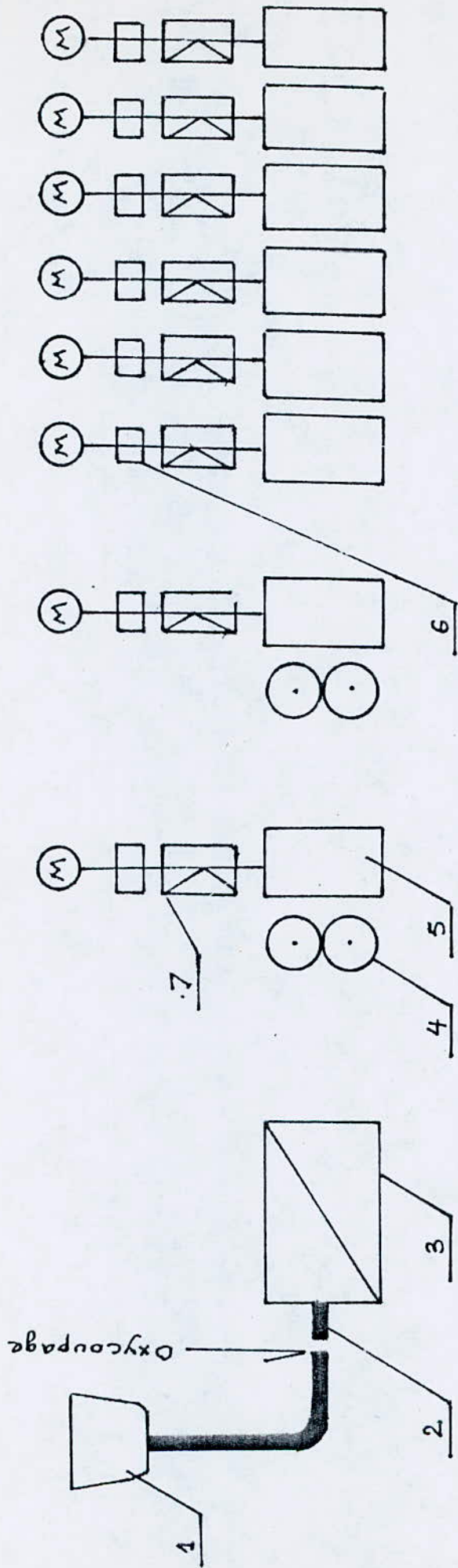
Pour le laminage dans le blooming, la pression inférieure:

$m_i = 10 \text{ mm}$; avec $(D_i - D_s = 10 \text{ mm})$ et le nombre de cannelures sur les cylindres $(3 \dots 5)$ cannelures.

5-3. Disposition des cylindres:

-Dimensions des cages:





1. Coulée Continue.
2. Brame Coulée.
3. Four Poussant.
4. Cylindres Verticaux (edger).
5. Cylindres Horizontaux
6. Réducteur.
7. Cage à Pignons.

Fig. 15. Disposition des Cages actuelles.

D'après le schéma nous avons:

$$D_{os} = D_{cs} + S$$

$$D_{oi} = D_{ci} + S$$

La distance entre 2 axes des cylindres est:

$$D_o = 0.5 \times (D_{os} + D_{oi}).$$

Si les angles d'inclinaison des allongements sont égaux:

$$D_o = (D_{max} + D_{min}) \times 0.5 + S.$$

Coefficient de réaffûtage:

Le degré de variation des valeurs de diamètre des cylindres:

$$K' = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_o}$$

En appliquant la deuxième relation nous avons:

$$D_{max} = D_{min} + K' D_o = 2 D_o - D_{max} - 2 S + K' D_o.$$

Par conséquent:

$$D_{max} = \left(1 + \frac{K'}{2} \right) D_o - S$$

$$D_{min} = \left(1 - \frac{K'}{2} \right) D_o - S$$

Pratiquement : $K' = (0.08 \dots 0.12)$.

5-4. Cannelure:

Les profilés en acier sont laminés dans les cylindres dont la table comporte des rainures spéciales obtenues par tournage et qui correspondent à la forme à donner au métal. Ces rainures circulaires s'appellent cannelures. Les cannelures des 2 cylindres forment l'empreinte reproduisant le tracé du profilé à obtenir.

Groupe de forme compliqué:

-cannelures de dégrossissage:

Ils sont destinés à réduire encore la section de la barre ou des lingots; c'est le premier laminage.

-cannelures d'étirage (intermédiaire):

Ils sont aussi destinés à réduire la section.

-cannelure de préparation (avant la finition):

-cannelures de finition:

Elles forment l'empreinte reproduisant le tracé de profilé à obtenir (dernière passe).

Les dimensions de cannelures de finition correspondante à

celle du profilé fini (produit) en tenant compte des facteurs influencants:

$$C = \left[C_f - (0.6 \dots 0.8) D \times C \right] (1 + 0.12 \times 10^{-4} T)$$

Si la température à la fin de laminage n'est pas connu, on prend:

$$(1 + 0.12 \cdot 10^{-4} T) = (1.013 \dots 1.012) T.$$

5-5. Paramètres calculés au cours du laminage:

-Paramètres de déformation:

cage duo: $D = 1220 \text{ mm.}$

$$h_0 = 220 \text{ mm.}$$

$$h_1 = 210 \text{ mm.}$$

$$\Delta h = 10 \text{ mm.}$$

$$b_0 = 1050 \text{ mm.}$$

$$b_1 = 1055 \text{ mm.}$$

$$\Delta b = 5 \text{ mm.}$$

Calcul de α :

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D}.$$

A.N: $\cos \alpha = 1 - \frac{10}{1220} = 0,992 \Rightarrow \alpha = 7,341^\circ.$

Calcul de l_a : Puisque α est petit ($\alpha < 20^\circ$) d'où: $l_a \approx \sqrt{R\Delta h}$.

A.N: $l_a \approx \sqrt{610 \cdot 10} = 78,102 \text{ mm.}$

Calcul de l_d :

$$l_d = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}.$$

A.N: $l_d = \sqrt{610 \cdot 10 - \frac{10^2}{4}} = 77,942 \text{ mm.}$

Calcul de μ :

$$\mu = \frac{S_0}{S_1} = \frac{h_0 b_0}{h_1 b_1};$$

A.N: $\mu = \frac{220 \cdot 1050}{210 \cdot 1055} = 1,043.$

Calcul de ν :

$$\nu = \frac{h_1}{h_0};$$

A.N: $\nu = \frac{210}{220} = 0,954$

calcul de λ :

$$\lambda = \frac{b_1}{b_0};$$

A.N: $\lambda = \frac{1055}{1050} = 1,005.$

calcul de ϵ_h :

$$\epsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\%;$$

A.N: $\epsilon_h = \frac{10}{220} \cdot 100 = 4,545\%.$

calcul de ϵ'_h :

$$\epsilon'_h = \frac{\Delta h}{h_1} \cdot 100\%;$$

A.N: $\epsilon'_h = \frac{10}{210} \cdot 100 = 4,760\%.$

calcul de ϵ''_h :

$$\epsilon''_h = \frac{\Delta h}{h_{\text{moy}}} \cdot 100\%;$$

A.N: $\epsilon''_h = \frac{10}{215} \cdot 100 = 4,651\%.$

calcul de ε_h'' : $\varepsilon_h'' = \frac{\Delta h}{\sqrt{h_0 h_1}} \cdot 100\%$; A.N: $\varepsilon_h'' = \frac{10}{\sqrt{220 \cdot 210}} \cdot 100 = 4,652\%$.

calcul de ε_b : $\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_1} \cdot 100\%$; A.N: $\varepsilon_b = \frac{5}{1055} \cdot 100 = 0,474\%$.

calcul de ε_b' : $\varepsilon_b' = \frac{\Delta b}{b_0} \cdot 100\%$; A.N: $\varepsilon_b' = \frac{5}{1050} \cdot 100 = 0,476\%$.

calcul de ε_l : $\varepsilon_l = \varepsilon_s = \frac{l_1 - l_0}{l_1} \cdot 100 = \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \cdot 100 = \frac{\mu - 1}{\mu} \cdot 100\%$.

A.N: $\varepsilon_l = \varepsilon_s = \frac{1,043 - 1}{1,043} \cdot 100 = 4,122\%$.

calcul de ε_l' :

$\varepsilon_l' = \varepsilon_s' = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 = (\mu - 1) \cdot 100\%$.

A.N: $\varepsilon_l' = \varepsilon_s' = (1,043 - 1) \cdot 100 = 4,300\%$.

calcul de e_h :

$e_h = \ln \frac{1}{\nu} = -\delta_h$; A.N: $e_h = -\delta_h = \ln \frac{1}{0,954} = 0,047$.

calcul de δ_b : $\delta_b = \ln \lambda$.

A.N: $\delta_b = \ln 1,005 = 4,987 \cdot 10^{-3}$.

calcul de δ_l : $\delta_l = \ln \mu$.

A.N: $\delta_l = \ln 1,043 = 0,042$.

calcul de i_b : $i_b = \frac{\Delta b}{\Delta h}$; A.N: $i_b = \frac{5}{10} = 0,5$.

Pour les 7 passes suivant la cage quarto, nous avons calculé les paramètres ci-dessus et nous avons dressé un tableau:

Valeurs absolues :

Tableau: 1.

Laminaires	Duo φ 1220	Quarto Reversible φ 950						
nombre de Passes, n	1	2	3	4	5	6	7	8
R_0 (mm)	220	210	175	145	100	75	50	35
b_0 (mm)	1050	1055	1060	1065	1070	1075	1080	1085.
R_1 (mm)	210	175	145	100	75	50	35	23
b_1 (mm)	1055	1060	1065	1070	1075	1080	1085	1090
ΔR (mm)	10	35	30	45	25	25	15	12
Δb (mm)	5	5	5	5	5	5	5	5
α (degrés)	7,341	15,601	14,437	17,706	13,173	13,173	10,195	9,116
l_a (mm)	78,102	128,938	119,373	146,202	108,972	108,972	84,410	75,498
l_d (mm)	77,942	127,745	118,427	144,460	108,253	108,253	84,076	75,259

Valeurs relatives :

Tableau: 2

Laminaires	Duo φ 1220	Quarto Reversible φ 950							
nombre de, n Passes	1	2	3	4	5	6	7	8	
μ	1,043	1,194	1,201	1,443	1,327	1,493	1,422	1,515	
ν	0,954	0,833	0,828	0,690	0,750	0,667	0,700	0,657	
λ	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	
$\xi_R \%$	4,545	16,667	17,143	31,034	25,000	33,333	30,000	34,286	
$\xi'_R \%$	4,760	20,000	20,690	45,000	33,333	50,000	42,857	52,174	
$\xi''_R \%$	4,651	18,182	18,750	36,735	28,571	40,000	35,294	41,379	
$\xi'''_R \%$	4,652	18,257	18,833	37,370	28,867	40,825	35,857	42,294	
$\xi_b \%$	0,474	0,472	0,469	0,467	0,465	0,463	0,441	0,459	
$\xi'_b \%$	0,476	0,474	0,472	0,469	0,467	0,465	0,463	0,461	
$\xi_e \% = \xi_s \%$	4,122	16,248	16,736	30,700	24,642	33,021	29,676	33,993	
$\xi'_e \% = \xi'_s \%$	4,300	19,400	20,100	44,300	32,700	49,300	42,200	51,500	
$e_R = -\delta_R$	0,047	0,183	0,189	0,371	0,288	0,405	0,357	0,420	
$\delta_b \cdot 10^{-3}$	4,987	4,987	4,987	4,987	4,987	4,987	4,987	4,987	
δ_e	0,042	0,177	0,183	0,367	0,283	0,401	0,352	0,415	
i_b	0,500	0,143	0,167	0,111	0,200	0,200	0,333	0,417	

Valeurs absolues:

Tableau: 3

Laminaires	Duo ϕ 1220	Quarto Reversible ϕ 950				
nombre de Passes (n)	1	2	3	4	5	6
R_0 (mm)	220	200	145	100	65	35
b_0 (mm)	1050	1055	1060	1065	1070	1075
R_1 (mm)	200	145	100	65	35	23
b_1 (mm)	1055	1060	1065	1070	1075	1080
ΔR (mm)	20	55	45	35	30	12
Δb (mm)	5	5	5	5	5	5
α (degrés)	10,388	19,592	17,706	15,601	14,437	9,116.
l_a (mm)	110,450	161,632	146,202	128,937	119,373	75,498
l_d (mm)	110,000	159,275	144,460	127,745	118,427	75,259

Valeurs relatives :

Tableau : 4

Laminaires	Duo ϕ 1220	Quarto Reversible ϕ 950				
nombre de Passes, n	1	2	3	4	5	6
μ	1,094	1,372	1,443	1,531	1,848	1,514
ν	0,910	0,725	0,689	0,650	0,538	0,657
λ	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
ϵ_R %	9,100	27,500	31,030	35,000	46,150	34,280
ϵ'_R %	10,000	37,930	45,000	53,840	85,710	52,170
ϵ''_R %	9,524	31,884	36,735	42,424	60,000	41,379
ϵ'''_R %	9,535	32,297	37,370	43,412	62,897	42,294
ϵ_b %	0,476	0,474	0,471	0,469	0,467	0,465
ϵ'_b %	0,474	0,471	0,469	0,467	0,465	0,463
$\epsilon_l = \epsilon'_s$	8,600	27,170	30,690	34,680	45,880	33,950
$\epsilon'_l = \epsilon'_s$	9,400	37,200	44,300	53,100	84,800	51,400
$e_R = -\delta_R$	0,095	0,321	0,372	0,430	0,619	0,420
$\delta_b \cdot 10^{-3}$	4,987	4,987	4,987	4,987	4,987	4,987
δ_R	0,090	0,316	0,366	0,426	0,614	0,414
i_b	0,250	0,090	0,111	0,142	0,166	0,416

Valeurs absolues :

Tableau: 5.

Paramètres	Cage train finisseur $\phi 700$					
	1	2	3	4	5	6
V_3 (m/s)	3,000	5,350	7,500	10,600	13,500	15,000
ω (tr/mn)	81,851	145,968	204,628	289,207	368,330	409,255
R_0 (mm)	23,000	15,333	8,600	6,135	4,341	3,408
R_1 (mm)	15,333	8,600	6,135	4,341	3,408	3,067
ΔR (mm)	7,667	6,733	2,465	1,794	0,933	0,341
Δb (mm)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
S_i (mm ²)	25070,000	16712,970	9374,000	6687,150	4731,690	3714,720
S_f (mm ²)	16712,970	9374,000	6687,150	4731,690	3714,720	3343,030
α (degré)	8,488	7,953	4,810	4,103	2,958	1,788
l_a (mm)	51,802	48,544	29,373	25,058	18,071	10,925
l_d (mm)	51,660	48,427	29,347	25,042	18,065	10,923

Valeurs relatives :

Tableau: 6

Paramètres	Cage train finisseur $\phi 700$					
	1	2	3	4	5	6
V_3 (m/s)	3,000	5,350	7,500	10,600	13,500	15,000
μ	1,500	1,783	1,402	1,413	1,274	1,111
λ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
ρ	0,667	0,561	0,713	0,707	0,785	0,900
ϵ_r %	33,335	43,912	28,663	29,242	21,493	10,006
ϵ'_r %	50,003	78,296	40,179	41,327	27,377	11,118
ϵ''_r %	40,002	56,265	33,458	34,250	24,080	10,533
ϵ'''_r %	40,827	58,633	33,936	34,763	24,257	10,547
ϵ_b %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ϵ'_b %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\epsilon_r \% = \epsilon_s$	33,333	43,915	28,673	29,228	21,567	9,991
$\epsilon'_r \% = \epsilon'_s$	50,000	78,300	40,000	41,300	27,400	11,100
$e_r = -\delta_r$ $= \delta_r$	0,405	0,578	0,338	0,347	0,242	0,105
e_b	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
i_b	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Valeurs absolues :

Tableau: 7.

Paramètres	Cage train finisseur $\phi 700$					
	1	2	3	4	5	6
V_1 (m/s)	1,200	2,000	2,900	4,400	5,200	6,100
V_2 (m/s)	2,100	3,675	5,200	7,500	9,350	10,550
ω (tr/mn)	32,740	54,567	79,123	120,048	141,875	166,431
R_0 (mm)	23,000	14,950	8,970	6,186	4,077	3,450
R_1 (mm)	14,950	8,970	6,186	4,077	3,450	2,940
Δh (mm)	8,050	5,980	2,784	2,109	0,627	0,509
Δb (mm)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
S_i (mm ²)	25070	16295,5	9777,30	6742,74	4443,93	3760,500
S_f (mm ²)	16295,5	9777,30	6742,74	4443,93	3760,500	3204,600
α (degie)	12,312	10,606	7,231	6,293	3,430	3,090
l_a (mm)	53,088	45,749	31,215	27,169	14,814	13,347
l_d (mm)	52,927	45,651	31,184	27,148	14,810	13,345

Valeurs relatives :

Tableau : 8

Paramètres	Cage train finisseur $\phi 700$.					
	1	2	3	4	5	6
V_1 (m/s)	1,200	2,000	2,900	4,400	5,200	6,100
μ	1,538	1,667	1,450	1,517	1,182	1,173
λ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
D	0,650	0,600	0,690	0,659	0,846	0,852
$\epsilon_R \%$	35,000	40,000	31,037	34,093	15,379	14,754
$\epsilon'_R \%$	53,846	66,667	45,005	51,729	18,174	17,313
$\epsilon''_R \%$	21,217	50	36,738	41,100	16,660	15,931
$\epsilon'''_R \%$	43,413	51,64	37,380	41,100	16,718	15,982.
$\epsilon_b \%$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\epsilon'_b \%$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\epsilon_{\ell} \% = \epsilon_s \%$	34,980	40,012	31,034	34,080	15,398	14,748
$\epsilon'_{\ell} \% = \epsilon'_s \%$	53,800	66,700	45,000	51,700	18,200	17,300
$e_R = -\delta_{\ell} = \delta_{\ell}^R$	0,431	0,511	0,371	0,417	0,167	0,159
e_b	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
i_b	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Train finisseur:

$$h_0 = 23 \text{ mm.}$$

$$h_1 = ?.$$

Nous supposons que la variation de la largeur est négligeable, donc nous prendrons $b_0 = b_1 = 1090 \text{ mm}$.

Cage 1:

En considérant le volume constant nous avons:

$$S \times v = \text{constante.}$$

S : Section de la brame.

v : Vitesse de rotation des cylindres.

$$\text{D'où : } S_0 v_0 = S_1 v_1 \Rightarrow \frac{S_0}{S_1} = \frac{v_1}{v_0}.$$

La vitesse minimale d'entrée est donnée $v = 0.8 \text{ m/s}$.

$$\Leftrightarrow S_1 = S_0 \cdot \frac{v_0}{v_1} \Leftrightarrow h_1 b_1 = h_0 b_0 \cdot \frac{v_0}{v_1} \Leftrightarrow h_1 = h_0 \cdot \frac{v_0}{v_1}.$$

$$\text{A.N: } h_1 = 23 \cdot \frac{0,8}{1,2} = 14,95 \text{ mm.}$$

$$\text{d'où : } \Delta h = h_0 - h_1 = 23 - 14,95 = 8,05 \text{ mm.}$$

Nous avons calculé les valeurs de h pour les 5 autres cages et nous avons dressé un tableau:

Remarque:

Pour les calculs de h en considérant la vitesse maximale d'entrée ($v = 2 \text{ m/s}$) sont donnés dans un autre tableau.

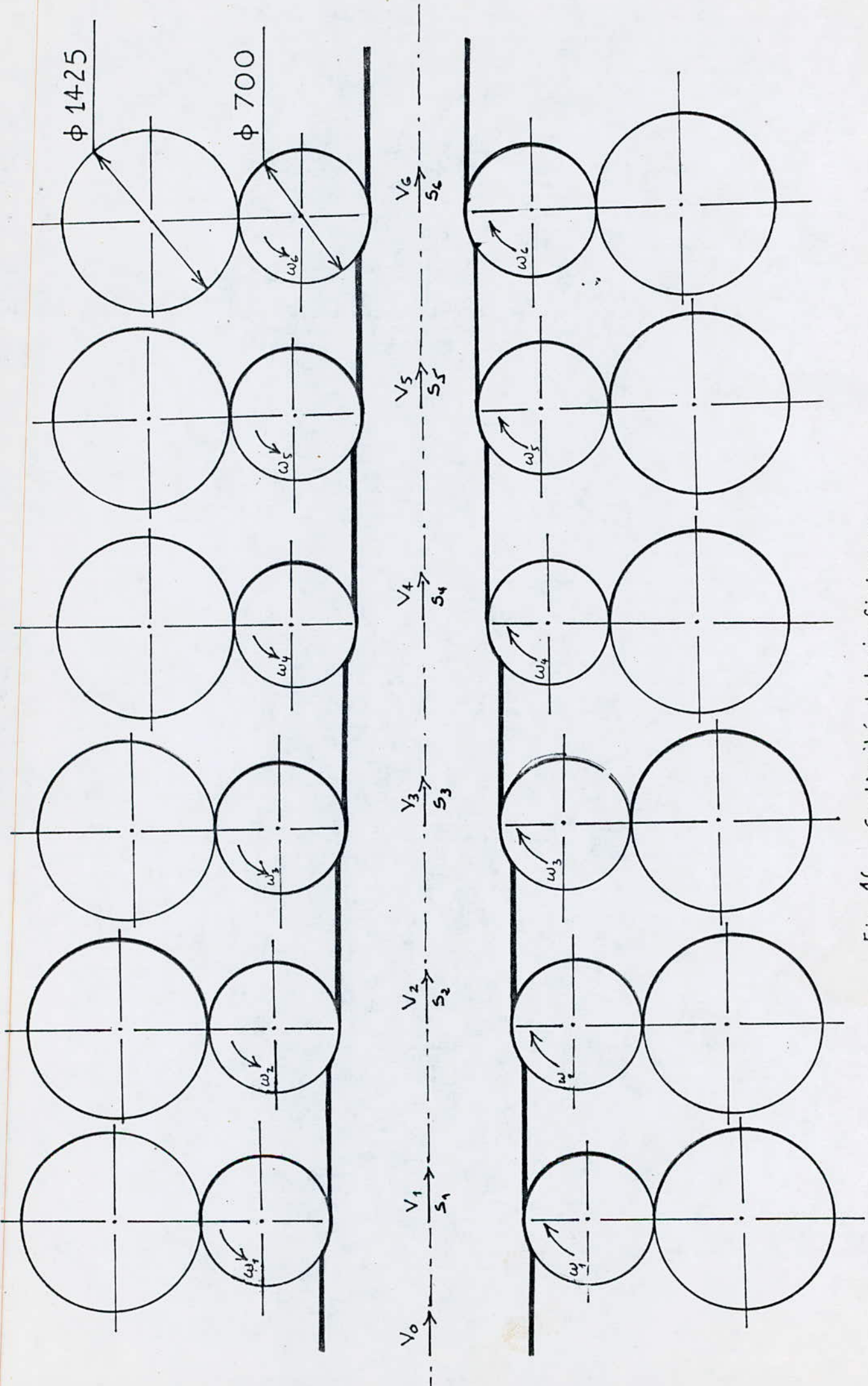


Fig. 16. Continuité du train finisseur

Tableau : 9

Paramètres	Cage train finisseur $\phi 700$					
	1	2	3	4	5	6
$\log v$ (m/s)	0,477	0,728	0,875	1,025	1,130	1,176
$\log S$ (mm ²)	4,223	3,972	3,825	3,675	3,570	3,524
$\log C$	4,700	4,700	4,700	4,700	4,700	4,700

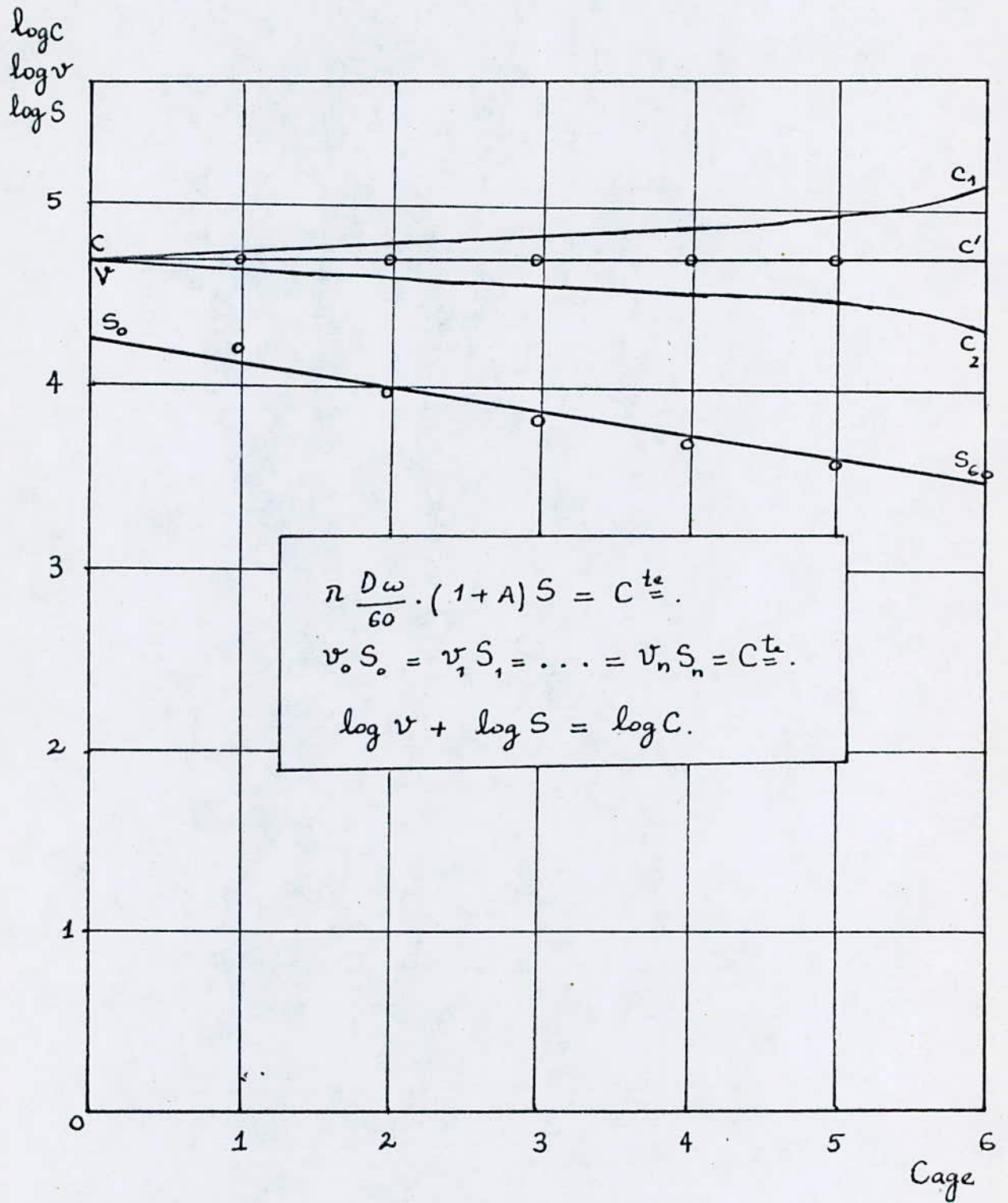


Fig. 17. Modèle logarithmique du train finisseur.

En observant le diagramme, nous pouvons conclure ce qui suit:

- $O S_0 S_6 6$: épure de la section de la barre S.
- $O C C' 6$: épure de la constante C.
- $S_0 C C' S_6$: épure de la vitesse v.

Si l'on trouve une " traction primordiale " faible de la barre, c'est que la ligne de la constante C occupe la position $C C_1$; par contre si l'on trouve le phénomène de la formation de la " boucle " , c'est que la ligne de la constante C occupe la position $C C_2$.

-Calcul pratique: (p):

En raison de la nature complexe du problème de calcul de la charge, aucune analyse théorique exacte du processus de laminage n'a encore été établi mathématiquement. Les formules et procédés de calcul proposés ne présentent pas une concordance générale suffisante, avec les résultats expérimentaux. La méthode la plus utilisée pour calculer la charge dans le laminage à chaud est celle de S. EKELUND.

Formule d'EKELUND pour la charge des cylindres : [7]

La formule d'EKELUND peut-être utilisée pour calculer la charge des cylindres pour les profils rectangulaires laminées dans les cannelures plates, ou entre des cylindres lisses. La formule suppose que le matériau peut s'étaler librement; des restrictions à cet étalement augmentent la charge des cylindres.

Dans le cas du laminage à chaud ($T > 700^\circ C$), pour les aciers au carbone et au chrome, on a la formule empirique de la pression spécifique:

$$p' = (K + \eta w')(1 + m).$$

Avec:

$$K = (14 - 0,01 T)(1,4 + C + Mn + 0,3 Cr). \quad [Pa \cdot s]$$

$$\eta = 0,01 (14 - 0,01 T) Cr. \quad [Pa \cdot s]$$

$V (m/s)$	< 6	$6 \dots 10$	$10 \dots 15$	$15 \dots 60$
Cr	1	0,8	0,65	0,6

$$m = \frac{1,6 f \sqrt{R \cdot \Delta h} - 1,2 \Delta h}{h_0 + h_1} \quad [7]$$

formule d'EKELUND.

$$w' = 2v \frac{\sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{h_0 + h_1} \quad [s^{-1}] :$$

- Paramètres dynamiques :

Facteurs influençants: Les propriétés mécaniques du métal : épaisseur de la barre, diamètre des cylindres, température du métal, vitesse de laminage.

Les frottements: pour le laminage des tôles fortes nous avons une forte influence de frottement externes.

- Si f augmente (0,05 ... 0,15) \Leftrightarrow μ' augmente (30...40)%.

- plus l'épaisseur diminue, plus f augmente.

- plus f augmente, plus σ_2 augmente.

- plus σ_2 augmente, plus μ' augmente.

- Si $\Delta h = \text{cte}$, plus R augmente, plus l augmente.

- plus l augmente, plus f augmente.

d'où : plus R augmente, plus f augmente,
plus μ' augmente.

- plus v augmente, plus ξ augmente.

- Plus la résistance à la déformation augmente,
plus μ' augmente.

cage duo:

calcul de S_c :
$$S_c = \left(\frac{b_0 + b_1}{2}\right) \sqrt{R \Delta h - \left(\frac{\Delta b}{2}\right)^2} \quad [mm^2].$$

A.N:
$$S_c = \left(\frac{1050 + 1055}{2}\right) \sqrt{610 \cdot 10 - \left(\frac{5}{2}\right)^2} = 82158,15 \text{ mm}^2.$$

calcul de S_{cx} :

$$S_{cx} = \left(\frac{b_0 + b_1}{2}\right) \sqrt{R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad [mm^2].$$

A.N:
$$S_{cx} = \frac{1050 + 1055}{2} \sqrt{610 \cdot 10 - \frac{(10)^2}{4}} = 82034,256 \text{ mm}^2.$$

calcul de $S_{cz/2}$:

$$S_{cz/2} = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \frac{\Delta h}{2} \quad [mm^2] ; \quad \text{A.N: } S_{cz/2} = \frac{1050 + 1055}{2} \cdot \frac{10}{2} = 5262,5 \text{ mm}^2.$$

calcul de la pression spécifique par la formule d'EKELUND :

Cage duo :

$$\tau' = (K + \eta \omega')(1 + m).$$

$$K = (14 - 0.01 T) (1.4 + C + Mn + 0.3Cr) \quad [\text{Pa}].$$

$$C = 0.5 \%$$

$$Mn = 0.7 \%$$

$$Cr = 0.9 \%$$

$$T = 1250^\circ\text{C}$$

$$K = (14 - 0.01 \cdot 1250)(1.4 + 0.5 + 0.7 + 0.3 \cdot 0.9) = 2,122 \text{ [Pa]}.$$

$$\eta = 0.01 (14 - 0.01 \cdot 1250) \cdot 1 = 0,015 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}.$$

Cylindres en fonte :

$$f = 0,92 - 0,0005 T - 0,056 v.$$

A.N :

$$f = 0,92 - 0,0005 \cdot 1250 - 0,056 \cdot 1,25 = 0,225.$$

Remarque : Le calcul de f n'est plus valable à partir de la septième passe sur le quarto et sur le train finisseur car la température est $< 700^\circ\text{C}$;
Il faudra donc utiliser la formule universelle :

$$f = K_1 K_2 K_3 (1.05 - 0.0005 T).$$

$K_1 = 0.8$ pour les cylindres en fonte.

K_2 : coefficient de vitesse établi grâce au graphique. (voir fig 18).

$K_3 = 1$ pour les aciers à faible carbone.

$$\text{A.N : } m = \frac{1,6 \cdot 0,225 \sqrt{610 \cdot 10} - 1,2 \cdot 10}{220 + 210} = 0,037.$$

$$\text{A.N : } \omega' = \frac{2 \cdot 1,25}{220 + 210} \sqrt{\frac{10}{610}} = 0,744 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}.$$

$$\text{A.N : } \tau' = (2,122 + 0,015 \cdot 0,744 \cdot 10^{-3}) (1 + 0,037) = 2,20 \text{ kgf/cm}^2.$$

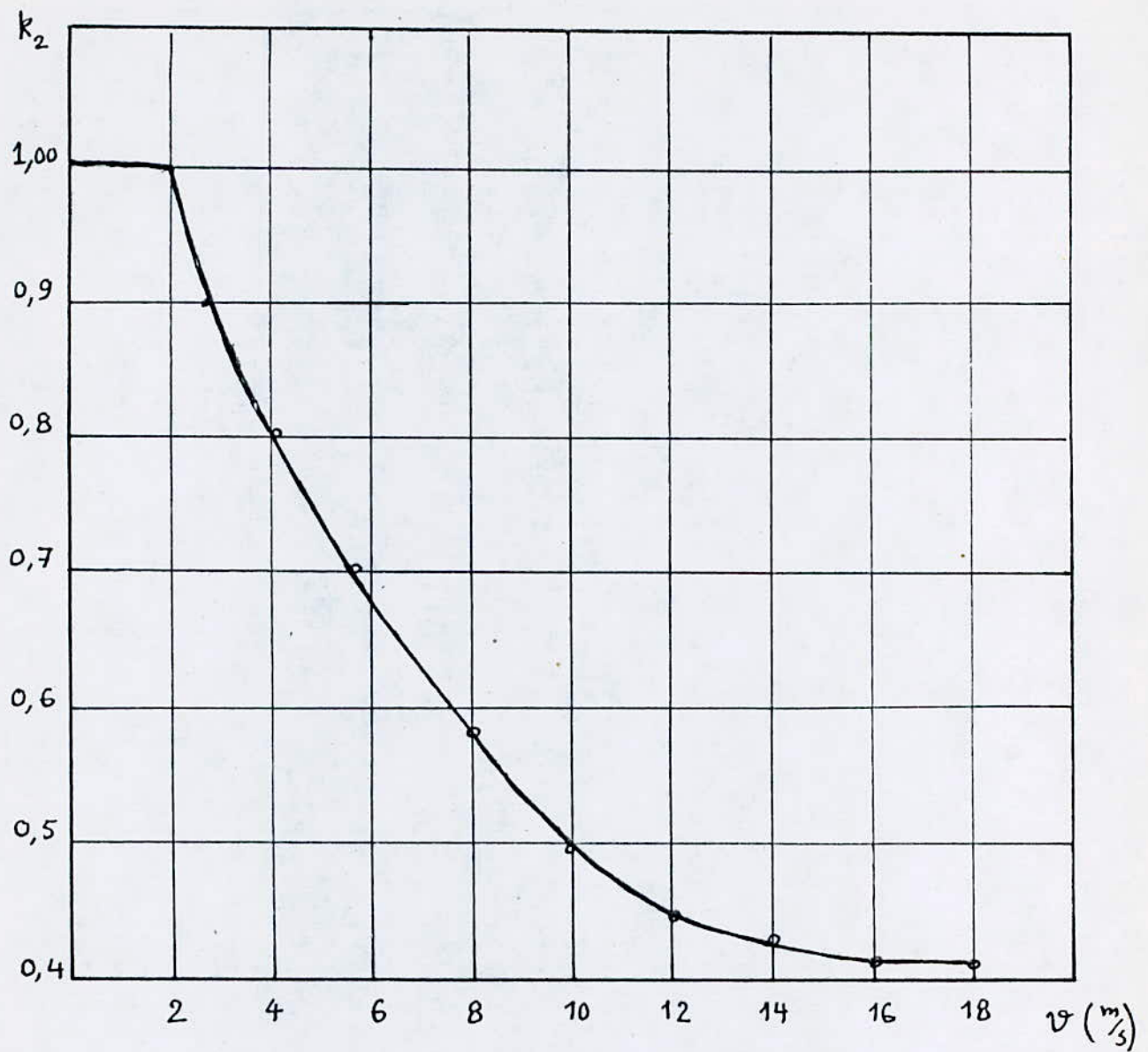


Fig. 18 Influence de La vitesse circulaire
des cylindres sur le coefficient
de frottement (f).

Nous calculerons de la même manière pour la cage quarto réversible et celle du train finisseur en dressant un tableau comme suit: (Voir pages 64 ; 66 ; 67).

Interprétation des résultats : (Voir pages 48 ... 68 : Tableaux):

Pour économiser de l'énergie de façon à utiliser la puissance en excès et d'augmenter la vitesse de laminage donc augmenter la productivité, nous avons pensé à diminuer le nombre de passe sur la cage quarto (de 7 à 5 passes), mais qu'à la fin de laminage (après les cages finisseuses) nous obtenons une bande ayant la même épaisseur que celle de 7 passes ($h_{\text{finale}} = 23 \text{ mm}$).

En comparant les valeurs calculées pour les 7 passes sur la cage quarto et les 5 passes sur la même cage nous remarquons:

Pour les 5 passes:

Paramètres de déformations:

- Une grande réduction suivant l'épaisseur et la longueur de la brame.
- Une augmentation des angles d'entrainements ce qui correspond à une augmentation de la longueur de l'arc d'entrainement et de la longueur du foyer de déformation.

Paramètres thermiques:

- Une augmentation du coefficient d'entrainement, d'où une augmentation de l'angle de frottement β .

Tableau: 10

Laminoir	Duo φ 1220	Quarto Reversible φ 950						
Paramètre	1	2	3	4	5	6	7	8
T (°C)	1250	1100	950	850	800	750	700	680
f	0,225	0,300	0,375	0,425	0,450	0,475	0,500	0,710
β (degré)	12,680	16,699	20,556	23,025	24,228	25,408	26,565	35,375.
Entraînement	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$

Tableau: 11

Laminoir	Duo φ 1220	Quarto Reversible φ 950.				
Paramètre	1	2	3	4	5	6
T (°C)	1100	980	930	780	730	700
f	0,300	0,360	0,385	0,460	0,485	0,500.
β	16,699	19,800	21,057	24,702	25,873	26,565.
Entraînement	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$

Tableau : 12.

Cage train finisseur ϕ 700						
Paramètres	1	2	3	4	5	6
V_1 (m/s)	1,200	2,000	2,900	4,400	5,200	6,100.
T (°C)	670	660	650	640	630	620
f	0,572	0,576	0,522	0,423	0,420	0,396
β (degré)	29,769	29,942	27,564	22,928	22,782	21,603
Entraînement.	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$

Tableau: 13

Cage train finisseur ϕ 700						
Paramètres	1	2	3	4	5	6
V_3 (m/s)	3,000	5,350	7,500	10,600	13,500	15,000
T (°C)	670	660	650	640	630	620
f	0,515	0,423	0,362	0,280	0,269	0,260
β	27,248	22,928	19,900	15,642	15,056	14,574
Entraînement.	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$	$\alpha < \beta$

Tableau: 14

Laminoin	Duo ϕ 1220	Quarto Reversible ϕ 950						
nombre de passes n	1	2	3	4	5	6	7	8
T ($^{\circ}$ C)	1250	1100	950	850	800	750	700	680
S_c (mm^2)	82158,15	136326,27	126806,38	156047,73	116842,22	117386,94	95130,203	85454,986
S_{cx} (mm^2)	82034,256	135090,19	125828,89	154211,27	196101,53	116642,8	94795,53	85231,44
$S_{cz/2}$ (mm^2)	5262,50	18506,25	15937,50	24018,75	13406,25	13468,75	8456,25	6795
R (Pascal)	2,122	4,244	6,366	7,781	8,488	9,195	9,903	10,186
η (Pa.s)	0,015	0,030	0,045	0,055	0,060	0,065	0,070	0,072
m	0,037	0,044	0,103	0,172	0,263	0,403	0,560	0,785
ω' (s^{-1})	0,744	2,115	2,356	3,769	3,933	5,506	6,272	8,221
τ' (kgf/m^2)	2,200	4,431	7,022	9,119	10,721	12,901	15,449	18,183
$P \cdot 10^{-6}$ (kgf)	180747,93	604061,70	890434,4	1422999,2	1252665,4	1514408,9	1469666,5	1553828

Tableau : 15

Laminaires	Duo $\phi 1220$	Quarto reversible $\phi 950$.				
	n	1	2	3	4	5
$S_c \cdot 10^5$ (mm ²)	1,162	1,709	1,553	1,376	1,280	0,813
$S_{cx} \cdot 10^5$ (mm ²)	1,160	1,684	1,535	1,364	1,270	0,811
$S_{c2/2} \cdot 10^4$ (mm ²)	1,052	2,908	2,391	0,934	0,804	0,323

Pour 7 passes sur QUARTO :

Tableau : 16

Paramètre	Cage train finisseur ϕ 700					
	1	2	3	4	5	6
V_3 (m/s)	3,00	5,350	7,500	10,600	13,500	15,000.
T (°C)	670	660	650	640	630	620.
S_c (mm ²)	56464,18	52912,96	32016,57	27313,22	19697,39	11968,25
S_{cx} (mm ²)	56309,40	52785,43	31988,23	27295,78	19690,85	11906,07
$S_{c7/2}$ (mm ²)	2089,257	1834,742	671,712	488,865	254,242	92,922
K (Pascal)	10,327	10,469	10,610	10,751	10,893	11,035
η (Pa.s)	0,073	0,074	0,060	0,049	0,050	0,0507.
m	0,873	1,035	0,953	0,866	0,859	0,638.
ω' (s ⁻¹)	0,023	0,062	0,085	0,144	0,180	0,144.
μ' (Kgf/m ²)	19,345	21,313	20,731	20,074	20,266	18,087.
P (Kgf)	1,092	1,128	0,664	0,548	0,399	0,215

Pour 7 Passes sur QUARTO :

Tableau : 17

Parametro	Cage train finisseur $\phi 700$					
	1	2	3	4	5	6
V_1 (m/s)	1,200	2,000	2,900	4,400	5,200	6,100
T (°C)	670	660	650	640	630	620
S_c (mm ⁴)	57857,20	49866,41	34024,35	29614,21	16147,26	14548,23
S_{cx} (mm ²)	57690,43	49759,59	33990,56	29591,32	16142,90	14546,05
$S_{c7/2}$ (mm ⁴)	2193,625	1629,550	758,640	574,702	170,857	138,702
k (Pascal)	10,327	10,469	10,610	10,757	10,893	11,035
η (Pa.s)	0,073	0,074	0,075	0,076	0,077	0,0624
m	1,025	1,462	1,499	1,545	1,222	1,227
ω' (s ⁻¹)	0,0096	0,0028	0,0591	0,066	0,058	0,0728
f' (kgf/m ²)	20,913	25,775	26,525	27,389	24,214	24,585
$P \times 10^6$ (kgf)	1209967,6	1285306,7	902495,88	811103,6	390989,75	357668,23

Pour 5 passes sur QUARTO: $b_1 = 1080 \text{ mm}$.

Tableau : 18

Paramètre	Cage train finisseur $\phi 700$					
	1	2	3	4	5	6
V_3 (m/s)	3,00	5,3500	7,500	10,600	13,500	15,000
S_i (mm ²)	24840	16559,64	9288	6625,8	4688,28	3680,64
S_f (mm ²)	16559,64	9288	6625,8	4688,28	3680,64	3312,36
S_c (mm ²)	55946,16	52427,52	31722,84	27062,64	19516,68	11799
S_{cx} (mm ²)	55792,60	52301,16	31694,76	27045,36	19510,20	11796,84
$S_{cz/2}$ (mm ²)	2070,09	1817,91	665,55	484,38	251,91	92,070

Tableau : 19

Paramètre	Cage train finisseur $\phi 700$					
	1	2	3	4	5	6
V_1 (m/s)	1,200	2,000	2,900	4,400	5,200	6,100
S_i (mm ²)	24840	16146	9687,60	6680,88	4403,16	3726,00
S_f (mm ²)	16146	9687,60	6680,88	4403,16	3726,00	3175,20
S_c (mm ²)	57326,40	49408,92	33712,2	29342,52	15999,12	14414,76
S_{cx} (mm ²)	57161,16	49303,08	33678,72	29319,84	15994,80	14412,6
$S_{cz/2}$ (mm ²)	2173,50	1614,60	751,68	569,43	169,29	137,43

.Paramètres dynamiques:

- Une augmentation de la surface de contact.
- Une augmentation des projections de la surface de contact.

Conclusion:

Une augmentation de l'angle d'entraînement donne une augmentation de la réduction totale.

Nous pouvons donc conclure qu'il y a augmentation de la productivité; d'où, il est préférable d'utiliser 5 passes sur la cage quarto réversible.

CHAPITRE 6

Chauffage et refroidissement des blooms et brames

6-1. Choix des fours:

Le choix des fours recommandés à l'avenir pour le complexe siderurgique d'El Hadjar est donné par le tableau suivant:

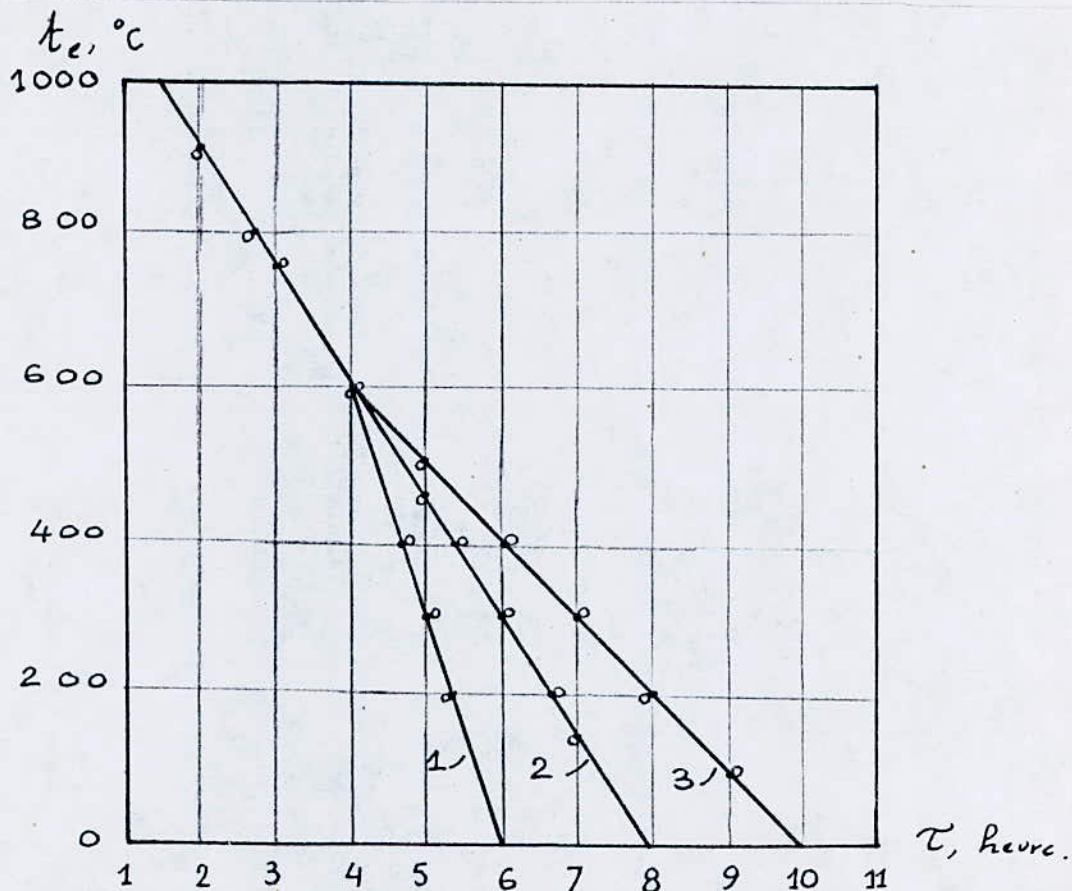
Tableau : 20

Paramètres	Four pour Lingots	Four pour les brames	Four pour les ébauches	
			en acier fin	en acier de Construction
épaisseur, [mm]	200... 450	100 ... 400	45 ... 140	60 ... 140
Longueur, [m]	0,9 ... 1,8	10 ... 12	1,2 ... 4,0	2,0 ... 20,0
Masse, [T]	0,5 ... 3,0	1,5 ... 48	0,03... 0,6	0,2 ... 2,6
largeur du four, [m]	1,2 ... 4,5	2,5 ... 16	1,5 ... 6,0	2,4 ... 22,6
longueur du four, [m]	15 ... 30	12 ... 36	8 ... 18	12 ... 25
Productivité, [T/h]	10 ... 45	12 ... 350	10 ... 60	15 ... 220
Durée de chauffage (de 2 côtés), [h]	2,5 ... 8,0	1,6 ... 6,0	1,5 ... 3,5	0,9 ... 3,0
$T_{\text{ég}}$ du gaz échappé [°C]	700 ... 1000	800 ... 1100	600 ... 900	700 ... 950
$T_{\text{ég}}$ de l'air, [°C]	400 ... 500	500 ... 700	350 ... 500	400 ... 600
Perte au feu, [kg/100kg]	0,8 ... 1,4	1,2 ... 2,6	1,0 ... 2,5	1,2 ... 2,5

Combustibles : gaz ou mazout.

6-2. Chauffage des lingots avant le laminage:

Le chauffage proposé à l'avenir est donné par les tableaux ci-dessous:



t_e - Température des Lingots au moment de Leur enfournement, $^\circ\text{C}$.

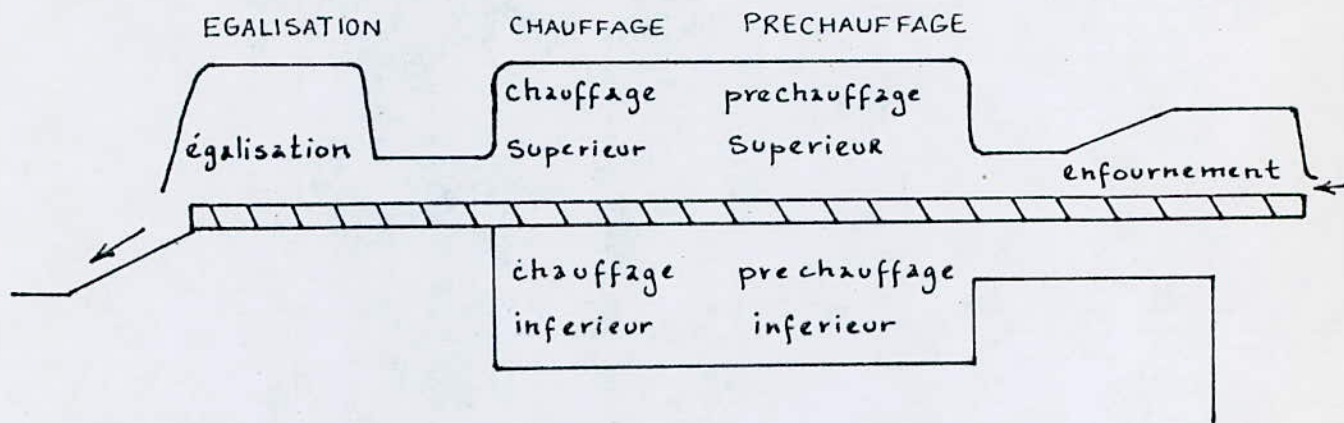
τ - Temps de chauffage, heures.

1 - Acier à bas Carbone.

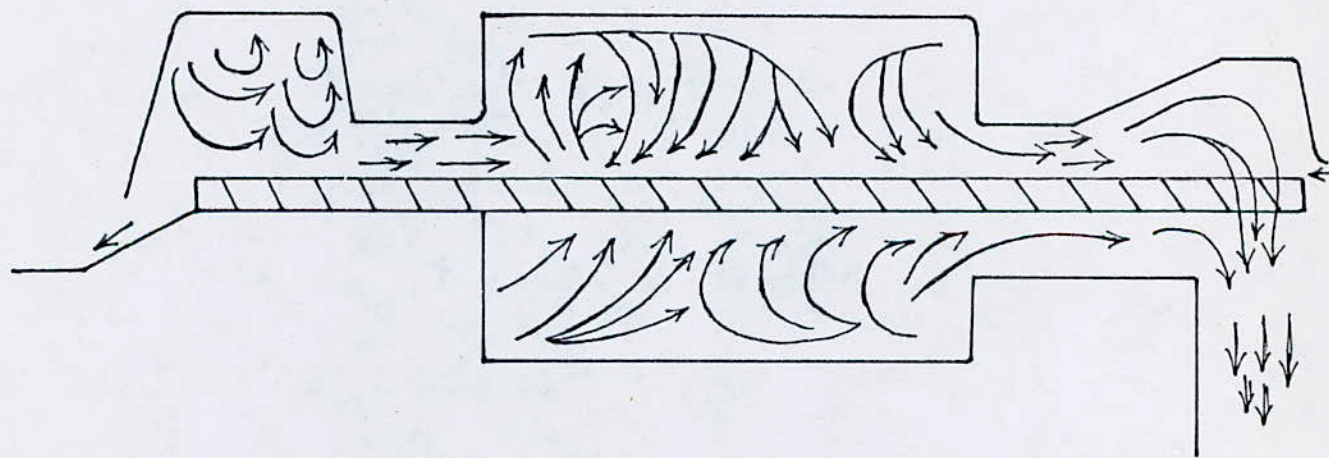
2 - Acier à Carbone moyen.

3 - Acier à Carbone élevé.

Fig. 19 Durée de chauffage
des Lingots dans les fours pits. (Voir page 72).



Les cinq zones du Four



Circulation des gaz chauds dans Le Four

Fig. 20 Chauffage des brames.

TEMPERATURES DES ZONES

Important: Les températures indiquées ci-dessous ne sont valables qu'en marche normale. Elles sont données à titre indicatif.

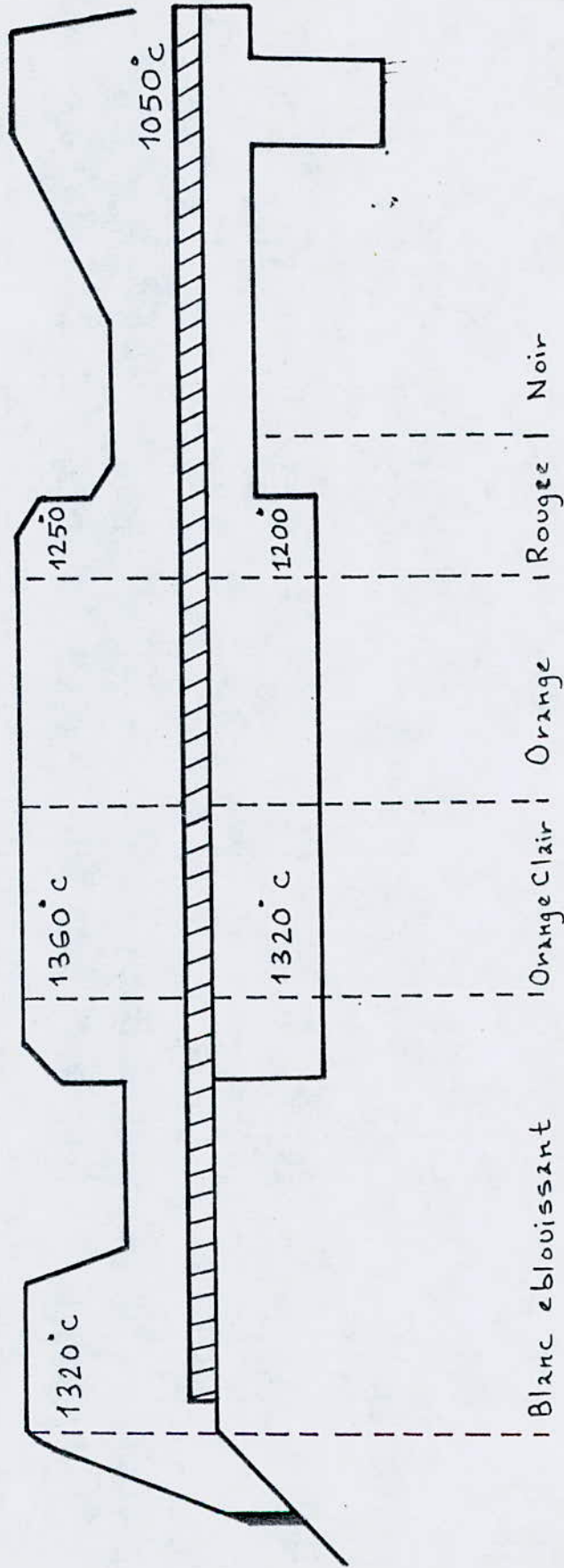


Fig. 21 Couleurs des brames

Variation de la durée de chauffage:

Tableau: 21

$T_c (°C)$	$T_A (°C)$	$\xi_c (h)$	$T_A (°C)$	$\xi_c (h)$	$T_A (°C)$	$\xi_c (h)$
Acier	bas Carbone		Carbone moyen (0,15 ... 0,3% C)		Carbone élevé (0,3 ... 0,8% C)	
20 (à froid)	900	6,0	700...800	8,0	600...700	10,0
400	1000	4,7	900	5,3	800	6,0
500	1000	4,3	1000	4,7	900	5,0
600	1200	4,0	1100	4,0	1000	4,0
700	1200	3,2	1200	3,2	1100	3,0
800	1200	2,5	1200	2,5	1200	2,5
900	1250	1,8	1250	1,8	1250	1,8
1000	1250	1,5	1250	1,5	1250	1,5

Variation de la durée de chauffage ξ_c des lingots de 5,5 ... 7,0 tonnes en fonction de la nuance d'acier, de la T_c d'enfournement du métal T_c et de la T_A maximale possible du volume de travail du four T_A .

τ , [mn]

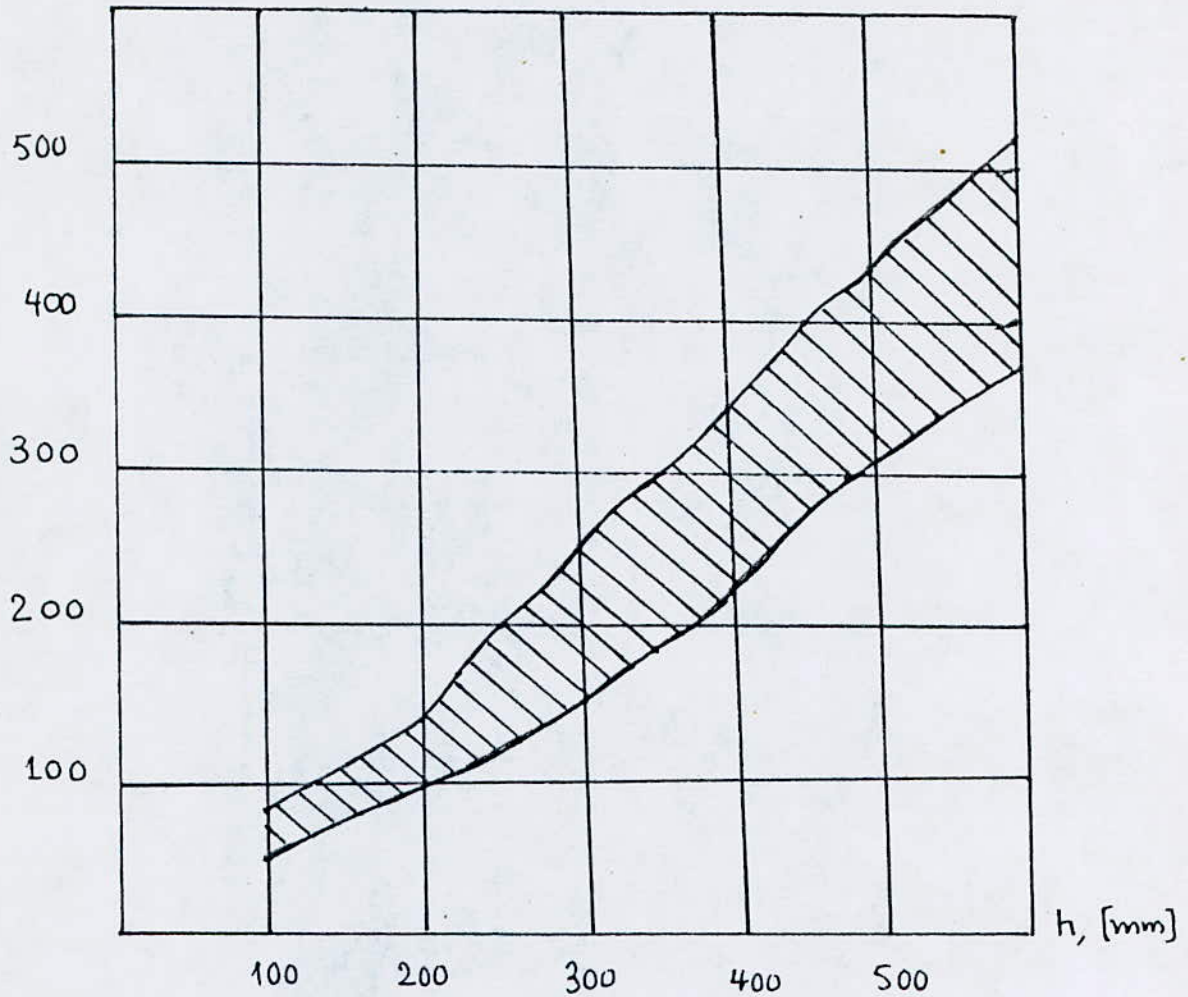
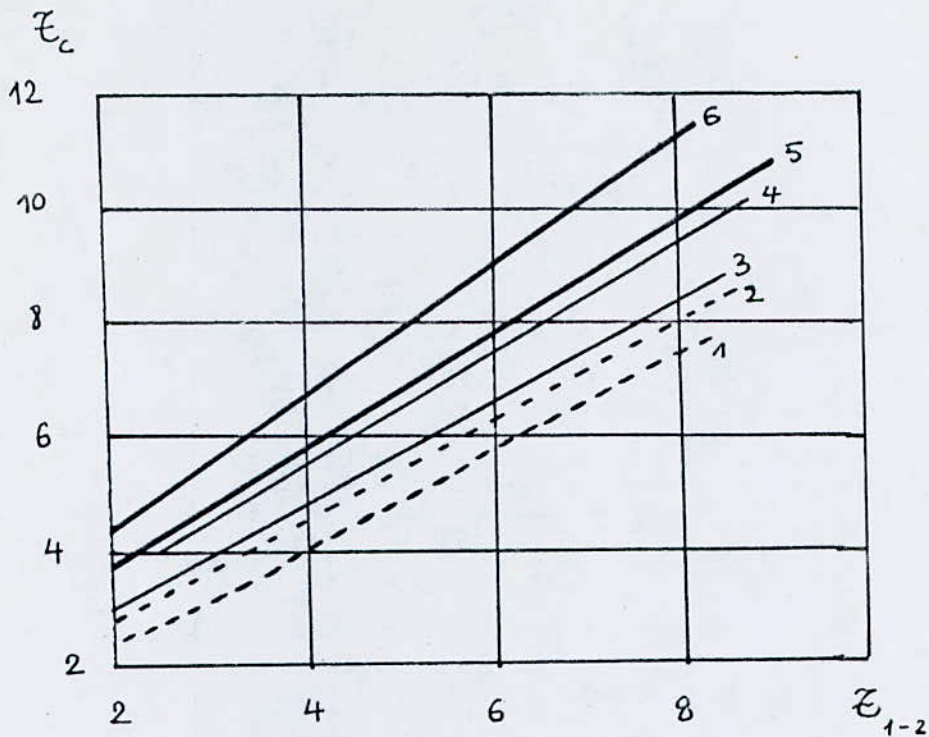


Fig. 22 Durée de chauffage τ des
Brames d'enfournement froid ($T. = 20^{\circ}C$)
en fonction de l'épaisseur h (acier carboné)
dans le four Pousant (chauffage de 4 côtés).



le Point 1 - Moment de la fin de coulée
 le Point 2 - Moment d'enfournement.

- 1 - Pour le lingot de 6,3 tonnes
- 2 - Pour le lingot de 8 tonnes
- 3 - Pour le lingot de 10 "
- 4 - Pour le lingot de 12,5 "
- 5 - Pour le lingot de 16 "
- 6 - Pour le lingot de 20 ".

Fig. 23 Variation de la durée de chauffage E_c en fonction de la durée E_{1-2} de 1 à 2.

6-3. Défauts des produits:

Pli de laminage:

Dans la plupart des cas, les plis de laminage sont dus au manque de connaissances de la technique de laminage ou au manque d'attention.

Le pli se produit de la manière suivante:

La brame laminée se répand à l'extérieur de la cannelure et à une passe suivante, l'excédent est replié le long de la brame. Ce défaut a été observé au complexe d'El Hadjar.

Décarburation:

L'acier étant exposé pendant des périodes prolongées à des températures de plus de 800°C, il est possible que sa couche superficielle se décarbure, c'est-à-dire que la teneur en carbone de cette couche devient inférieure à celle du métal par ailleurs.

De même le régime de chauffage du four joue un rôle pour la décarburation. Aussi faut-il veiller à ce que le chauffage, soit très rapide entre la température de 800°C et la température de laminage.

Ce problème a été remarqué à El Hadjar où des machines du train laminoir ne fonctionnaient plus; donc il est impossible de faire stopper le four poussant. On est obligé finalement de laisser encore la brame dans le four jusqu'à la réparation de ces machines. L'inconvénient c'est que la couche de calamine augmente en fonction du temps de chauffage.

Au complexe d'El Hadjar, le temps de séjour de la brame dans le four (1,5...2,0) heures.

Contrôle visuel des défauts:

Le problème le plus important vécu est le problème d'eau. Le complexe n'a pas fonctionné depuis 1 mois; d'où une chute brutale de la production.

Dans le cas où le débit d'eau distribué n'est pas suffisant, il est recommandé:

- D'obtenir un écoulement laminaire.
- D'essayer de couvrir une partie aussi grande que possible de la surface des cylindres.
- Si l'eau est appliquée sous pression, arroser la table perpendiculairement pour des vitesses périphériques inférieures à 3.5 m / s.
- Diriger l'arrosage dans le sens de rotation du cylindre aux vitesses plus élevées.

Un autre problème à soulever est celui du mauvais fonctionnement des sections des rouleaux, ce qui entraîne l'arrêt total du train laminoir.

Défauts des cylindres:

Au complexe d'El Hadjar, le changement des cylindres se fait une fois tous les 2 jours; ce qui n'est pas conforme avec la théorie (chaque jour).

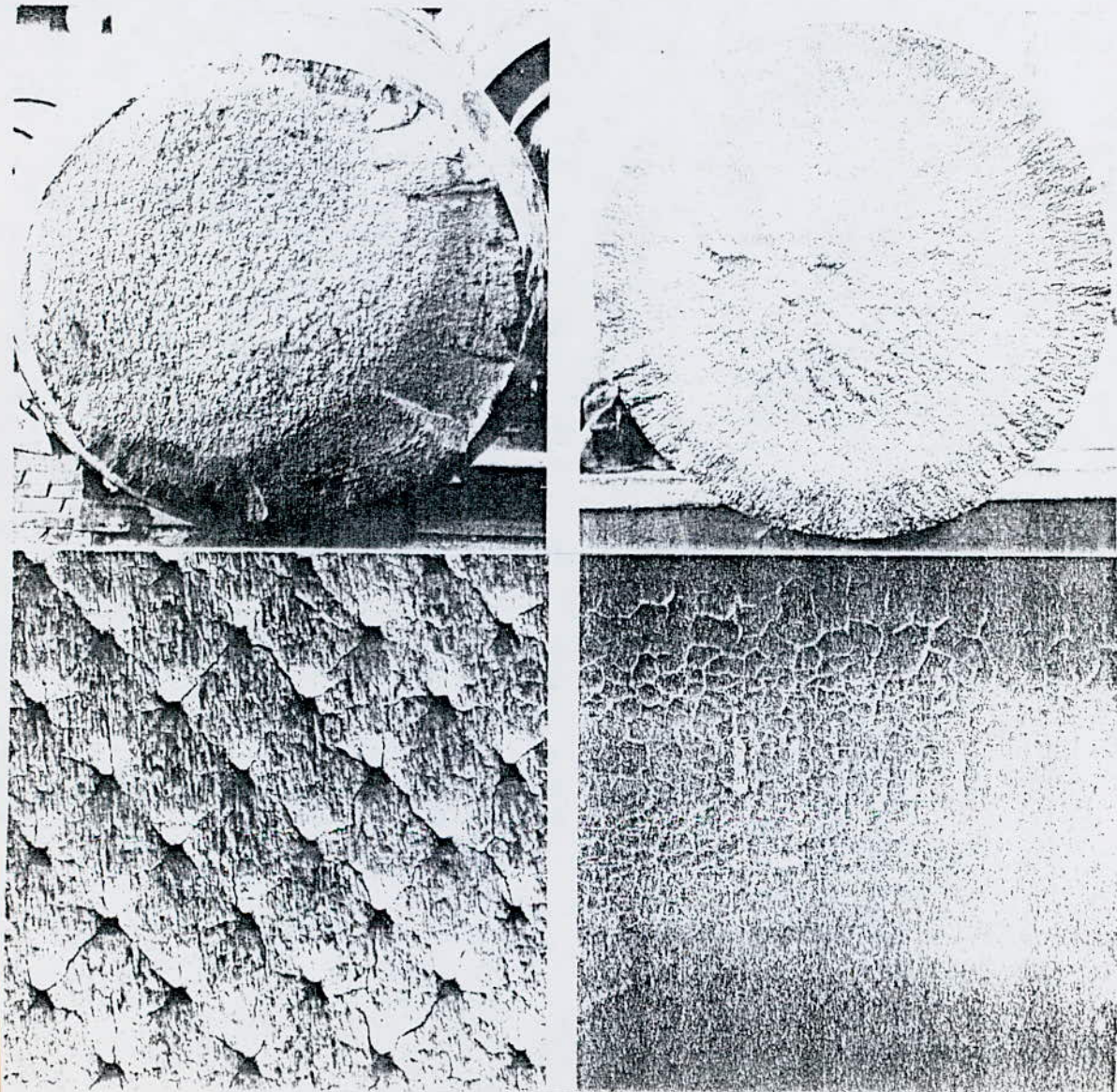
En conséquence les anomalies susceptibles de limiter ou de compromettre définitivement les possibilités ultérieures des cylindres sont:

- Les criques thermiques.
- L'écaillage.
- La cassure.

Les criques thermiques:

Elles se forment autour de la périphérie du cylindre, par exemple dans le fond de la cannelure. En conséquence, elles peuvent conduire à une cassure du cylindre.

Les différents types de criques thermiques sont photographiés ci-dessous:



Le meilleur moyen d'éviter de telles criques ~~criques~~ thermiques, consiste à séparer les cylindres rapidement, procédé qui demande toutefois des moteurs de mécanisme de rapprochement et d'écartement à vis très puissants.

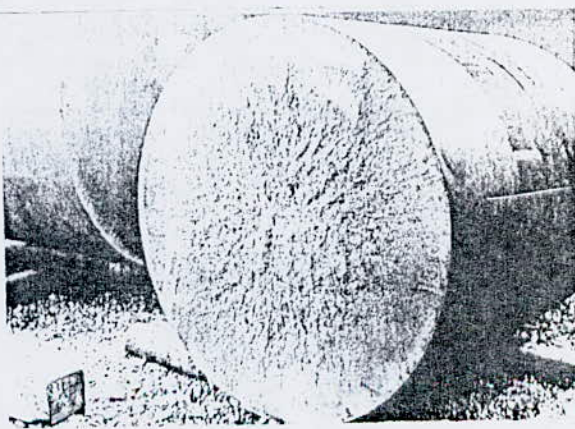
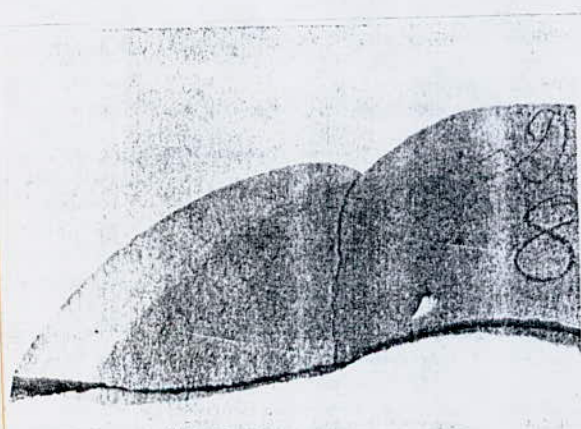
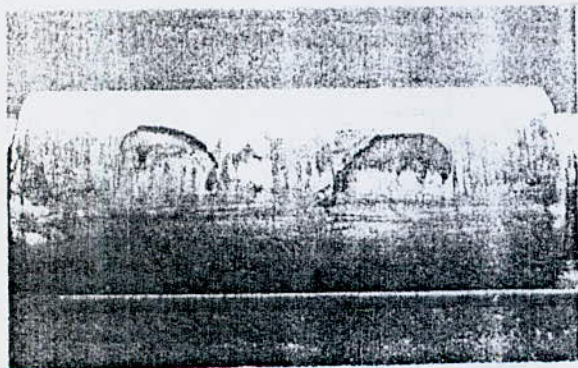
Ecaillage:

Les plus courants sont la fatigue et les surcharges. L'écaillage par fatigue se rencontre souvent sur les cylindres d'appui. Les tables de ces cylindres sont ainsi exposées à des efforts alternés de traction et de compression et si ces efforts dépassent les limites d'endurance de la matière du cylindre, un écaillage est déclenché au-dessous de la surface.

Les cylindres d'appui sont exposés à un certain degré d'écroûissage dans leurs couches superficielles, en fonctionnement. Il appert que cet écroûissage n'a qu'un effet mineur sur l'écaillage, mais il doit être maintenu sous surveillance en contrôlant la dureté chaque fois qu'un cylindre est rectifié.

L'écaillage dû aux surcharges se rencontre généralement sur les cylindres de travail pour produits plats tels que bandes, tôles minces et fortes.

Les 3 photos ci-dessous nous montre la formation d'un écaillage dû aux surcharges.



Cassure.

Cassure:

Lorsqu'un cylindre se casse, la cause est souvent évidente: produits incorrectement introduits dans les cannelures, produit trop froid, contrainte résultant d'une application défectueuse d'eau de refroidissement.

D'autres causes comprennent les défauts de table, les criques thermiques...

Si la cause de la cassure n'est pas évidente, il est essentiel que les circonstances qui l'ont entraîné soient soigneusement étudiées pour éviter la répétition d'incidents de telles études.

La photo ci-dessous nous montre la cassure dû à un effort thermique.

Un autre problème à soulever est l'utilisation du four poussant sans récupérateur de chaleur.

On propose le four Pits à récupérateur pour des lingots de plus de 2 Tonnes et des brames coulées.

Technologie de chauffage des lingots et des brames recommandée pour le complexe d'El Hadjar:

Exigence des fours:

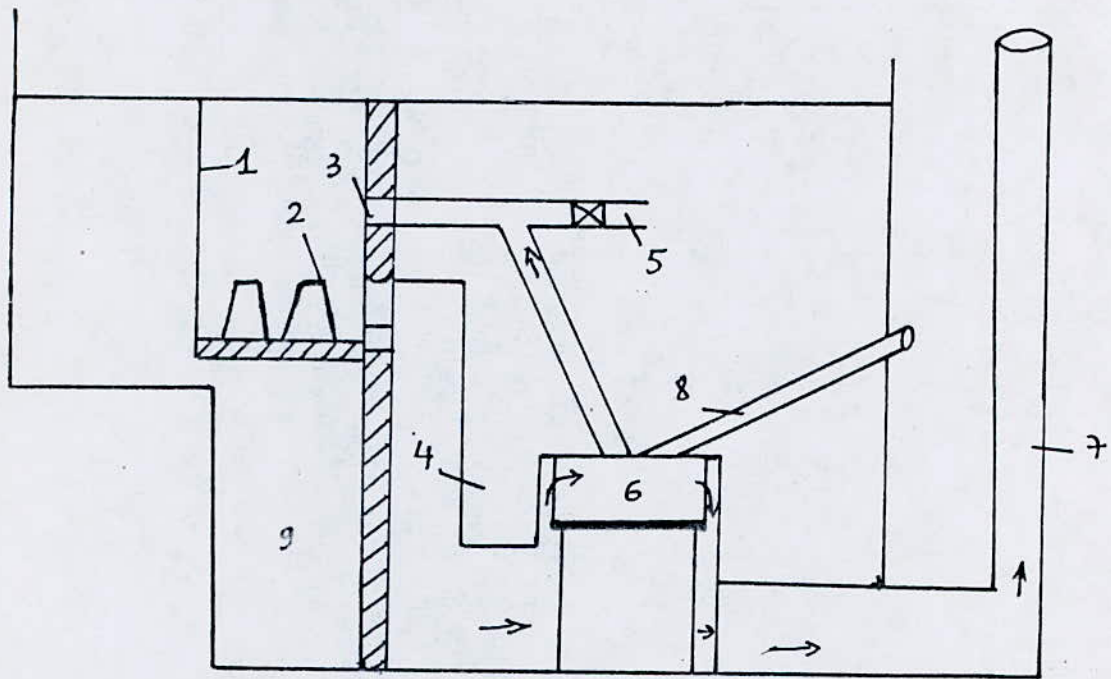
- Se disposer entre l'aciérie et le laminoir et assurer la température nécessaire du début de laminage.
- Assurer l'utilisation complète de l'énergie (disposition optimale des lingots, utilisation de la chaleur des gaz d'échappement).
- Avoir la possibilité de réchauffer des lingots, brames, ébauches, de divers aciers et de modifier la puissance.
- Assurer la bonne qualité de chauffage avec le gradient non considérable de la température et la petite perte au feu.

Technique d'exploitation:

- Sécher le four, avant le chauffage avec la vitesse moyenne et respecter le régime périodique du fonctionnement du four après le changement des assises (60...90) heures.
- Contrôler régulièrement l'alimentation du gaz et d'air à ^{un} rapport nécessaire et le fonctionnement normal de l'appareil de mesure et de régulation.
- Changer périodiquement les pièces du système de refroidissement.
- Contrôler régulièrement la marche des récupérateurs et des brûleurs.
- Réaliser l'entretien préventif, la réparation et la révision générale du four.
- Contrôler les paramètres thermiques et techniques principaux (le combustible nécessaire, la température de l'air, la puissance, la perte au feu, le prix de chauffage...).
- Disposition avantageux du four.
- Préchauffer l'air jusqu'à 800°C par le récupérateur.

-Il faut préchauffer le gaz jusqu'à (400...500)°C.

Utilisation des récupérateurs pour profiter de la chaleur des gaz échappés à réchauffer l'air suivant le schéma ci-dessous:



- 1-Chambre;
- 2-Lingots;
- 3-Bruleur;
- 4-Conduite de depart de la fumee;
- 5-Conduite de gaz;
- 6-Recuperateur;
- 7-Tuyau d'echappement;
- 8-Conduite d'air;
- 9-Sous-sol;

Régime horaire optimal:

La durée totale Z_{Σ} de chauffage doit-être répartie comme-suit:

$$Z_{\Sigma} = (5 \dots 10) \% \times Z_e + (60 \dots 70) \% \times Z_c + \\ + (5 \dots 15) \% \times Z_l + (15 \dots 20) \% \times Z_d .$$

Z_e : Duree d'enfournement, heures.

Z_c : Duree de chauffage, heures.

Z_l : Duree de livraison, heures.

Z_d : Duree de differentes, heures.

Pour économiser le combustible on doit:

-Augmenter la température d'enfournement du métal (régime optimal de la température peut atteindre l'économie jusqu'à (0.3...0.5) HT / Tonnes, de façon à diminuer la perte de chaleur lors du transport des lingots.

Laminage direct:

On peut recommander à l'avenir la pratique du laminage direct sur train à bandes chaud de brames coulées en continu. C'est un laminage direct sans chauffage des brames coulées en continu. Dans la sidérurgie, elle est considérée comme l'une des plus remarquables des techniques d'économie d'énergie et de raccourcissement du circuit de fabrication. En général dans les usines des pays développés, 2 millions de tonnes sont produites par cette technique, d'ou 82% des brames sont laminées directement. En d'autres termes, la consommation d'énergie est juste le 1/10 de celle du réchauffage classique [6].

CHAPITRE 7

Régimes de réduction

7-1. Etude de la réduction maximale:

Vérification de la condition d'entraînement:

$$R = \frac{h_0 - h_1}{2} + R \cos \alpha \quad (\text{formule de base}).$$

En appliquant l'équation : $1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}$.

Nous avons:

$$h_0 - h_1 = 2 D \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

L'angle d'entraînement maximal admissible pour le laminage est fonction du matériau des cylindres et de la barre à laminer, de l'état de leurs surfaces, de la température et de la vitesse de laminage.

C'est ainsi par exemple que pour les blooms et les grandes ébauches l'angle d'entraînement maximal vaut (24...30) degrés, pour le laminage à chaud des tôles et des bandes avec graissage, (2...10) degrés.

Donc:

$$h_0 - h_1 = 2 D \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 = D \frac{\alpha^2}{2} = R \alpha^2.$$

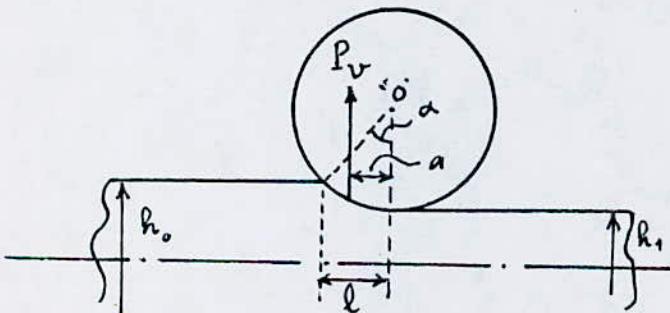
$$\Delta h = R \alpha^2.$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \text{ Rd.}$$

Pour élever l'angle d'entraînement on augmente la rugosité de la surface de contact des cylindres de façon à :

- Entailler.
- Vérser du sable.
- Aiguiser le bout d'avant de la barre à laminer.
- Diminuer la vitesse de laminage au moment de l'entraînement primordial.
- $\alpha > \beta_e$: on applique la force supplémentaire sur la barre au moment de l'entraînement primordial pour la faire entrer dans la zone de déformation.

Vérification de la puissance électrique:



Pour calculer la puissance du moteur électrique, nous déterminons le moment de rotation nécessaire au laminage, pour des laminoirs à vitesse constante de laminage.

où $M_l = M_d + M_f$

et $M_d = 2 a P_v$.

et $a = \psi R \alpha$.

et $\psi = \frac{a}{l}$.

d'où $M_d = 2 P_v \psi R \alpha$.

P_v : composante verticale de la résultante des pressions du métal sur les cylindres.

a : Bras du moment de laminage.

ψ : Coefficient de bras du moment.

l : prolongement de la zone.

Pour un cylindre: $M_d = P_v \cdot a = P_v \psi R \alpha$.

et $M_d = P_v \psi R \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = P_v \cdot \psi \sqrt{\Delta h \cdot R}$.

$m_f = f \cdot P \cdot d_p$.

Puissance du laminage:

$$N_l = M_l \cdot \frac{v}{R} = \frac{M_l \cdot \omega}{0,716} \text{ (CV)}$$

Puissance du moteur électrique N_m :

$$N_m = 1,025 \frac{M_m \cdot \omega}{\eta} \text{ (KW)}$$

où

et $M_m = M_{st} + M_{dy}$.

d'où $M_{st} = M_l + M_v$.

$M_m = M_l + M_v + M_{dy}$.

Productivité de laminage:

Vitesse de laminage:

Pratiquement la vitesse de laminage est égale à la vitesse circulaire du cylindre et aussi égale à la vitesse de la barre à la sortie de la zone de déformation c'est-à-dire qu'on considère l'avancement nul.

Productivité horaire:

$$P_h = Q \cdot K_1 \frac{3600}{T} K_2$$

P_r : Productivité horaire du train (T/h).

Q : Masse du Lingot initial (T).

K_1 : Coefficient d'utilisation des Lingots finaux.

K_2 : Coefficient d'exploitation du laminoir.

Rythme de laminage :

Pour une cage à plusieurs passes:

$$Z = \sum Z_m + \sum Z_p \quad [s].$$

$\sum Z_m$: Temps total de machine.

$\sum Z_p$: Temps entre les pauses.

Temps de machine (cage):

Pour chaque passe d'une barre de longueur l_1 de vitesse de laminage constante avec avancement nul :

$$Z_m = \frac{l_1}{v} = \frac{l_1 \cdot 60}{\pi D \omega} = \frac{19,1 \cdot l_1}{D \omega} \quad [s].$$

Vérification de la résistance des cylindres:

Pour le calcul de la rigidité des cylindres et les autres éléments de la cage (laminoirs) ainsi que pour la détermination de la puissance développée, nous devons définir la pression totale exercée au cours du laminage par le métal sur le cylindre:

$$P = p' \cdot b_m \cdot \sqrt{\Delta h \cdot R}$$

$$P = p' \cdot S_c.$$

$$S_c = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{\Delta h \cdot R}.$$

Le calcul de la pression totale est fait dans les tableaux du chapitre 5.

Cette dernière équation donne la valeur approchée de la surface de contact entre le cylindre et le métal.

Pour le cas des cylindres de différents diamètres: $S_c = \frac{b_1 + b_2}{2} \sqrt{\frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \Delta h}$.

7-2. Réduction moyenne à 1 passe et nombre de passes:

Réduction moyenne à 1 passe:

Elle est définie par:

$$\Delta h_m = (0.8 \dots 0.9) \Delta h_{max}.$$

Pour les brames : $\Delta h_m = 0.8 \Delta h_{max}$.

Nombre de passes:

$$n \Delta h_m = (h_o - h_k) + (b_o - b_k) + \sum \Delta b_h + \sum \Delta b_b$$

$\sum \Delta b_h$ et $\sum \Delta b_b$: Elargissements totaux lors de la réduction sur la hauteur et sur la largeur du lingot.

On admet que la valeur moyenne de l'indice d'élargissement: $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,15$

Ainsi: $\sum \Delta b_h = 0,15 (h_o - h_k)$.

$$\sum \Delta b_b = 0,15 (b_o - b_k)$$

$$n = \frac{0,15 [(h_o - h_k) + (b_o - b_k)]}{\Delta h_m}$$

Pour ces calculs il faut prendre h_o , b_o de la section moyenne du lingot. Le nombre n peut-être pair ou impair; il faut donc arrondir la valeur.

2 cas se présentent:

Differentes formes des sections du lingot et du bloom:

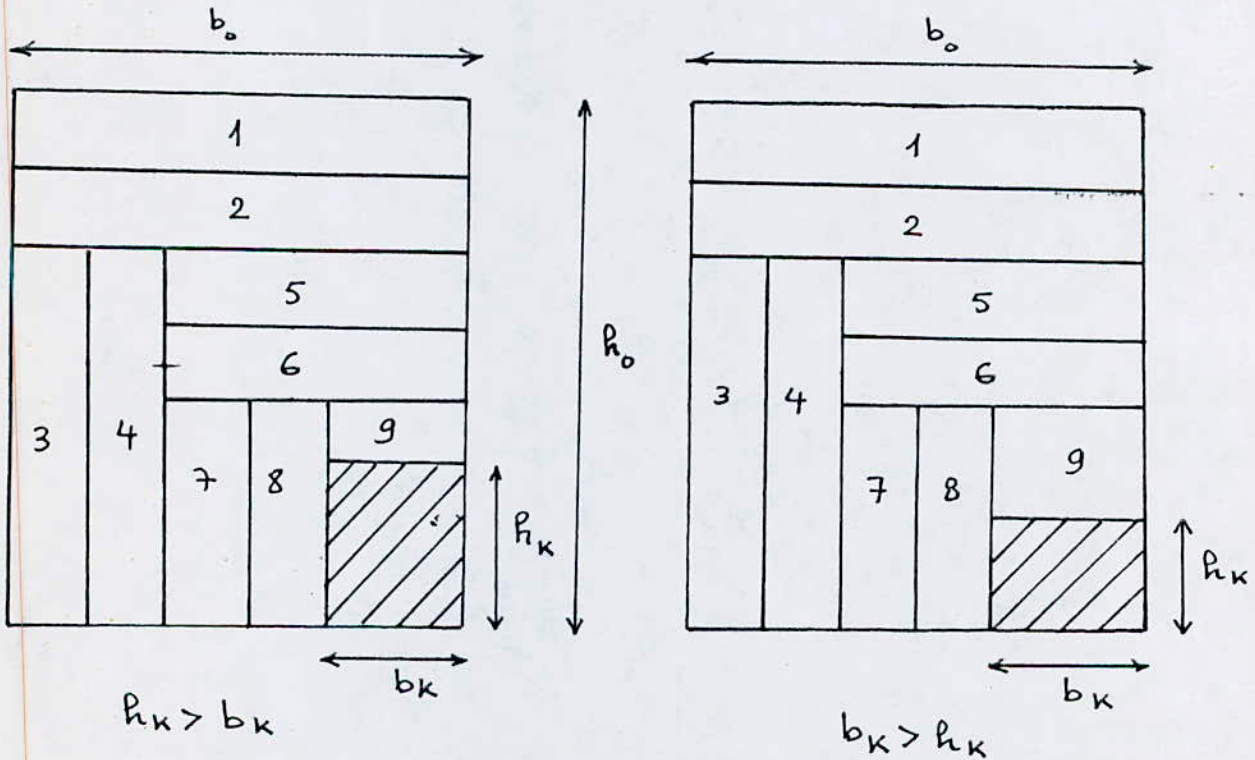
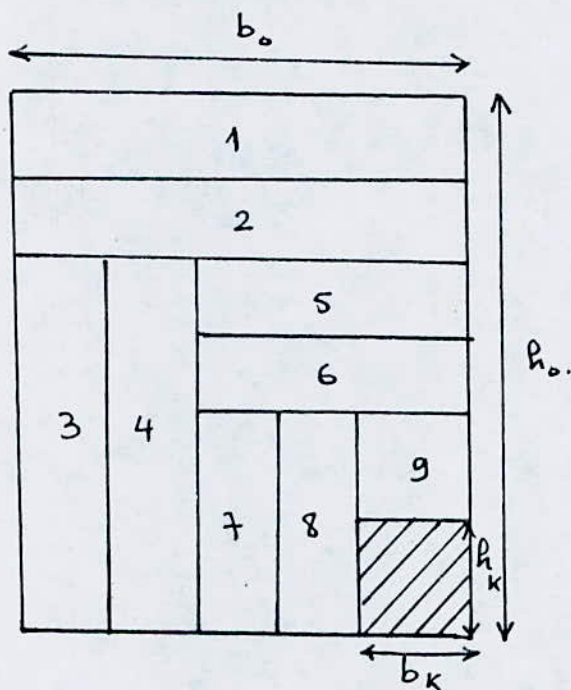


Fig 24 Laminage à 9 passes.

$$\Delta h_m = \frac{1,15 [(h_o - h_k) + (b_o - b_k)]}{n}$$

^
Même forme des sections de lingot et de bloom:



$$b_k = h_k.$$

Pour n grand:

$$\Delta h_m = \frac{1,15 [(h_o - h_k) + (b_o - b_k)]}{n + 1}$$

Pour n petit:

$$\Delta h_m = \frac{1,15 [(h_o - h_k) + (b_o - b_k)]}{n - 1}$$

7-3. Nombre et ordre de retournement:

Pour les lingots en acier ou alliages de bonne qualité, il faut réaliser le premier retournement après la deuxième passe.

Le retournement se réalise avant l'entrée du blooming, c'est

pourquoi on peut l'effectuer seulement qu'après les passes paires.

Il faut assurer pour les cylindres lisses:

$$\frac{b}{R} \leq 1.3 \text{ (dans la première cannelure) .}$$

$$\frac{b}{R} \leq (1.7 \dots 1.8) \text{ dans les autres cannelures.}$$

Il faut faire 1 passe dans la dernière cannelure (finisseuse).

Remarque:

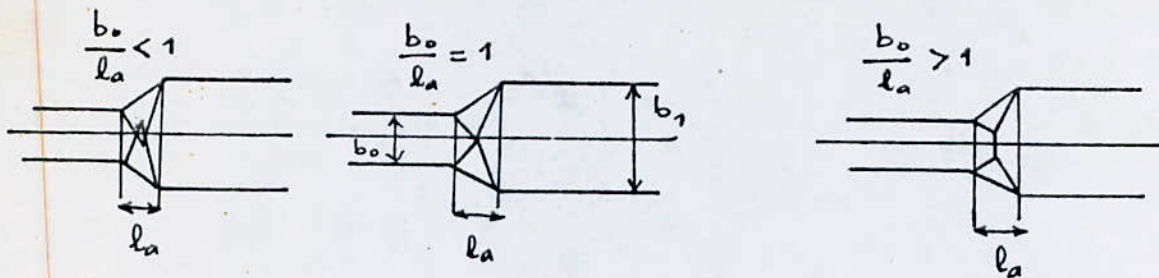
Le retournement ne se fait pas au complexe d'El Hadjar car il y a un manque d'équipement; mais à l'avenir il est recommandé de l'utiliser pour augmenter la productivité.

Méthode de retournement:

Tableau : 23

	Nombre de Retournement.
2 x 4 x 8 x 10 x 12 x 13	5
2 x 4 x 6 x 10 x 12 x 13	5
2 x 6 x 8 x 10 x 12 x 13	5
2 x 8 x 10 x 12 x 13	4
6 x 10 x 12 x 13	3

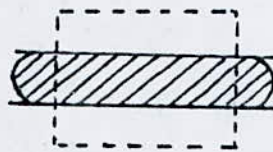
Elargissement lors du laminage dans les cylindres lisses:



Les recommandations à suivre pour comprendre le phénomène d'élargissement sont:

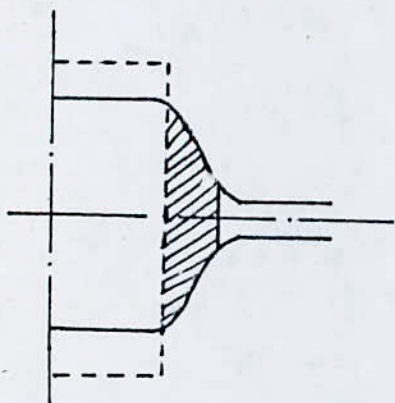


$$\frac{l_d}{h_m} < 0,1 \dots 0,2 \quad (\text{Barre épaisse}).$$



$$3 \dots 4 > \frac{l_d}{h_m} > 0,6 \dots 0,8. \quad (\text{Barre mince}).$$

Elargissement lors du laminage dans les cannelures quadrangulaires ou carrées.



Répartition sur la hauteur du métal à laminer:

Elle présente une forme dessinée ci-dessous: c'est la forme de la section transversale de la barre après le laminage.



$$\frac{l_d}{h_m} > 3 \dots 4,$$



$$3 \dots 4 > \frac{l_d}{h_m} > 0,6 \dots 0,8,$$



$$\frac{l_d}{h_m} < 0,1 \dots 0,2.$$

7-4. Régimes de réduction pour les blooms et les brames:

Dimensions initiales:

Blooms: (140 x 140 ... 450 x 450) mm.

Demi-produit: de section carrée.

Brames $h_0 \times b_0 = (100 \dots 300) \text{ mm} \times (330 \dots 1000) \text{ mm}$
parfois 1400.

Réduction maximal:

Vitesse circulaire des cylindres V_c [m / s],
Angles d'entraînement admissibles α [degrés].

Tableau: 24.

α (degrés)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4...7
Vitesses Circulaires des cylindres Lisses (m/s).	25,5	24,5	23,5	22,5	21,5	20	16	14	13
Vitesses Circulaires des cylindres à Cannelures. ^(mb)	29,0	27,5	26	24,5	24	23	19	17	15

Il est recommandé d'utiliser ce tableau à l'avenir.

Réduction maximale Δh_{max} :

$$\Delta h_{max} = 2 D \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cdot [\text{mm}].$$

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

7-5. Conclusion générale:

Le but du projet était d'étudier la technologie du laminage des demi-produits et des tôles fortes en acier.

Au point de vue métier de l'ingénieur, notre séjour au complexe de la S.N.S d'El Hadjar nous a permis de visiter certaines installations les plus modernes.

Durant notre séjour qui n'a duré que 15 jours, nous avons suivi la production depuis la brame obtenue par coulée continue jusqu'à la bobine apte à la confection de produits finis. Nous nous sommes attardés surtout dans l'atelier laminoir à chaud (LAC) où nous avons recueilli certaines informations du personnel du site.

A l'aide de ces informations, nous avons étudié le calcul pratique de certains paramètres comme:

- Le calcul des paramètres supplémentaires proposés ($\epsilon'_h, \epsilon''_h, \epsilon'''_h$) calculés sur ordinateur HP Vectra (U.S.A) permettent des études plus approfondies.
- Premier pas de l'étude de la zone de déformation; elle montre que la zone technologique de déformation est pratiquement plus grande que la zone géométrique de déformation et a une forme particulière.
- Le calcul d'élargissement à l'aide des formules de Johz, Ziebel, et Bakhtinov.
- Les paramètres optimales, de cinétiques (v_1, v_2, v_3, \dots), de dynamiques et thermiques.
- Le modèle logarithmique de la continuité du train finisseur.
- La proposition de diminuer le nombre de passes sur la cage quarto réversible.
- La nécessité d'utiliser le phénomène de retournement qui n'existe pas dans l'atelier laminoir à chaud, pour augmenter la productivité.
- Le schéma général proposé pour l'entreprise d'El Hadjar.
- Le phénomène d'extracontact par déformation, ainsi que la proposition de calcul de l'aplatissement des cylindres, par la formule de Hertz.

- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -

[1] - P. POLOUKNINE : TECHNOLOGIE DES METAUX. Edition Mir MOSCOU 1967

[2] - TECHNIQUE DE L'INGENIEUR :

+ MICHEL BONAUX: LES LAMINOIRS A CHAUD. M 1990.

+ PIERRE CALLEWAERT: LAMINOIRS CONTINUS EN LARGES
BANDES.

[3] - P. BAQUE : MISE EN FORME DES METAUX. CALCUL DE LA PLASTICITE I
DUNOD.

[4] - ETUDE DES CONDITIONS DU LAMINAGE A CHAUD DES LARGES PLATS
ET LEURS CONSEQUENCES AU RELAMINAGE A FROID.

(THESE D'INGENIORAT ETUDIEE PAR: YOUCEF CHABI.)

[5] - G. CHAUSSIN : ELABORATION DES METAUX TOME 2.

[6] - REVUE DE METALLURGIE (AVRIL 1984):

PRATIQUE DU LAMINAGE DIRECT DU TRAIN A BANDES
CHAUD DE BRAMES COULEES EN CONTINU.

(DOCUMENTATION A LA D.E.A S.N.S EL HADJAR).

[7] - BOFORS AKERS 21/ 06/ 1976:

POUR UNE ETUDE PRELIMINAIRE RELATIVE A LA
FABRICATION DE CYLINDRES DE LAMINOIRS A CHAUD.

