

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
—oOo—

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique  
—oOo—

17/87

1EX

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة —  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : Mines & Metallurgie

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

ETUDE ET REALISATION  
D'UN LAMINOIR A  
FROID DE LABORATOIRE

1 PLANCHE

Proposé par :

Abadli K.

Etudié par :

Hammache A. Naït Abdelaziz

Dirigé par :

PROMOTION: JUIN 87



## DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail :

- A mes très chers parents
- A mes frères et soeurs
- A mes beaux-freres et belles-soeurs
- A tous mes amis

## REMERCIEMENTS

Je remercie tous les professeurs et responsables du département mines et métallurgie; M<sup>r</sup> ABADLI, M<sup>r</sup> SAADA, M<sup>r</sup> SALHI, M<sup>r</sup> CHITROUB, M<sup>r</sup> DJEGHLAL et M<sup>r</sup> BOUABDALLAH, qui ont contribué à ma formation en particulier M<sup>r</sup> NAIT ABDELAZIZ pour les conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer durant toute la période de préparation de mon projet de fin d'études.

Je remercie également les responsables de la fonderie et du C.F.S de la S.N.V.I-C.V.I de Rouiba, ainsi que les agents de l'atelier du département mécanique (E.N.P) qui m'ont aidé dans la réalisation de mon projet.

R E S U M E

L'objet de mon travail , consiste à concevoir et à réaliser un laminoir à froid du type duo destiné au laboratoire .

Ce travail paraissant de prime-abord comme étant surtout mécanique , il m'a semblé nécessaire en tant qu'étudiant en option "metallurgie" d'ajouter une partie relative à ce domaine .

C'est ainsi que j'ai partagé ce projet en deux grandes parties :

\* La première relative à la conception et la réalisation du laminoir lui même soit les différents éléments de la cage de travail ainsi que le système de réduction de vitesse ,

\* La seconde , à l'étude métallurgique des cylindres de travail .

A B S T R A C T

The purpose of my study concerns both conception and realization of a cold rolling mill for laboratory's studies and experiential investigation .

Therefore mechanical study takes a long part of my work , but it seems me interesting , as specialized in metallurgy , to carry out an experimental investigation in this area .

So , my study is composed of two parts :

\* First concerns conception and realization of rolling mill composed of several mechanical organs ,

\* Second , concerns metallurgic investigation on rollings .

. الملخص .

لمن موضوع عملي يتمثل في دراسة وادجاز المصفاة تعمل تحت البرد من الكهراز  
المزدوج المؤهلة للسحب .

وهذا العمل يبدو لأول وهلة آتية عمل في إطار "الميكانيكا" ، وقد بدالي ضروريا  
- بما أنني طالب في تخصص الهندسة - أن أضيف فسمنا قايما لهذا المجال ، لذلك  
قسمت مشروعى ، إذا إلى قسمين :

القسم الأول يتمثل في دراسة وادجاز المصفاة في ذاتها ، أي دراسة مختلف  
الغناصر المكونة لوقف العمل مع جهاز تخفيف السرعة .  
والقسم الثاني في دراسة تعددية لأسطوانات العمل .

# SOMMAIRE:

INTRODUCTION .....	:	
1 - GENERALITES .....	:	1
2 - IMPORTANCE ET PLACE DU LAMINAGE A FROID DANS L'INDUSTRIE .....	:	9
3 - OBJECTIF DU PROJET .....	:	12
PREMIERE PARTIE ETUDE ET CONCEPTION DU LAMINOIR		
I - PRESENTATION DU LAMINOIR CONÇU POUR LABORATOIRE.....	:	14
I - 1 - ELEMENTS PRINCIPAUX DE LA CAGE DE TRAVAIL.....	:	14
I - 2 - ELEMENTS EXTERIEURS A LA CAGE DE TRAVAIL.....	:	15
II - LES FACTEURS DETERMINANT L'EFFORT DE LAMINAGE .....	:	17
II - 1 - ETAT DE SURFACE DES CYLINDRES DE TRAVAIL.....	:	17
II - 2 - EPAISSEUR INITIALE DE LA BANDE A LAMINER.....	:	18
II - 3 - DIAMETRE DES CYLINDRES DE TRAVAIL.....	:	19
II - 4 - RESISTANCE A LA DEFORMATION DU MATERIAU A LAMINER.....	:	21
II - 5 - TAUX DE DEFORMATION.....	:	22
III - CALCUL DE L'EFFORT DE LAMINAGE ET CHOIX DU MOTEUR ELECTRIQUE.....	:	24
IV - CALCUL DES ELEMENTS DE LA CAGE A LA RESISTANCE.....	:	28
IV - 1 - CALCUL DU BATI A LA RESISTANCE.....	:	28
IV - 2 - CALCUL DES CYLINDRES DE TRAVAIL A LA RESISTANCE..	:	35
IV - 3 - CALCUL DE LA VIS DE PRESSION A LA RESISTANCE.....	:	38
IV - 4 - CALCUL DE L'ECROU DE LA VIS DE PRESSION A LA RESISTANCE.....	:	
DEUXIEME PARTIE ETUDE METALLURGIQUE DES CYLINDRES DE TRAVAIL		
I - ETUDE METALLURGIQUE A L'ETAT BRUT DE COULEE.....	:	42
I - 1 - ESSAI DE TRACTION.....	:	42
I - 2 - ESSAI DE RESILIENCE.....	:	44
I - 3 - ESSAI DE DURETE.....	:	46
II - TRAITEMENT THERMIQUE DES CYLINDRES.....	:	49
III - ETUDE METALLURGIQUE DES CYLINDRES APRES TRAITEMENT THERMIQUE.....	:	51
IV - INTERPRETATION DES RESULTATS.....	:	55
CONCLUSION.....	:	56

frottement . Les outils déformants sont appelés "cylindres de travail" . les différents types de laminoirs qui existent sont les suivants : ( voir fig.1 )

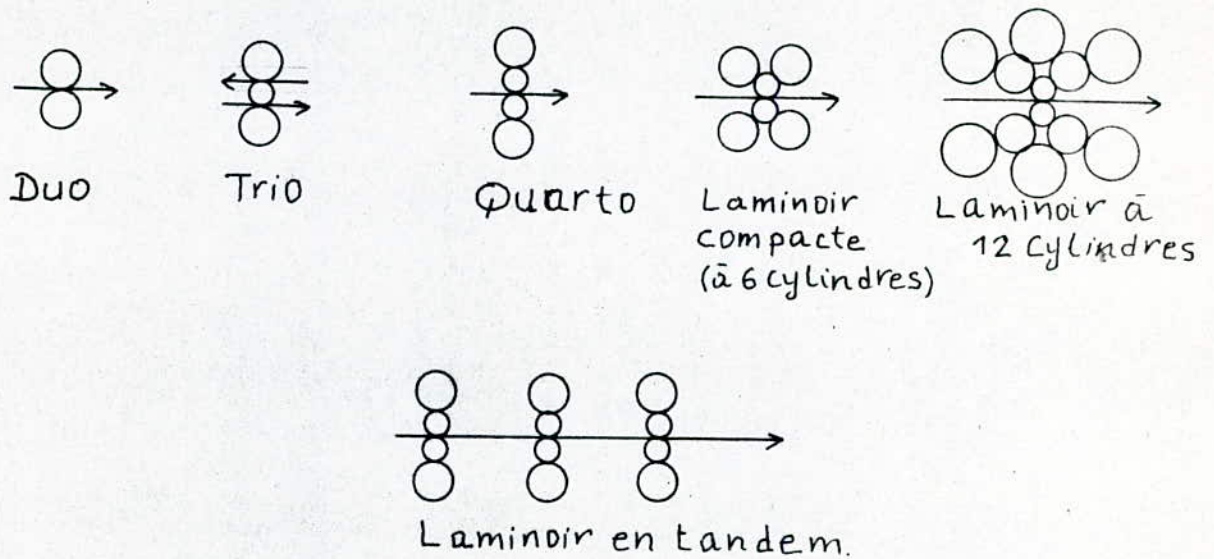


fig.1 : schéma des différents types de laminoirs montrant le nombre et la disposition des cylindres .

Suivant le nombre et la disposition des cylindres , on distingue les laminoirs duo ( à deux cylindres ), trio ( à trois cylindres ), quarto ( à quatre cylindres ) et les laminoirs multicylindres ( à six , douze et vingt cylindres ) . Dans les duos , les deux cylindres sont en général rendus solidaires du moteur par l'intermédiaire d'une cage à pignons ; il n'y a d'exception que pour les duos à tôles fines dans lesquels le cylindre du bas est seul entraîné par le moteur , le cylindre du haut n'étant entraîné que par frottements .

Pour le laminoir trio , chaque cylindre tourne toujours dans le même sens et le produit à laminer passe alternativement dans un sens entre le cylindre supérieur et le cylindre médian et dans l'autre entre le cylindre médian et le cylindre inférieur

Il est important , avant de considérer l'évolution des laminoirs multi-cylindres de noter la place aussi importante qu'occupe le quarto parmi tous les types de laminoirs qui existent actuellement dans l'exploitation . Il est établi qu'il est difficile au laminoir multi-cylindres de remplacer le quarto , mais il est vrai aussi que le laminoir à cylindres multiples occupe une place importante dans les installations de laminage des métaux en bande , surtout ceux de fines épaisseurs , c'est à dire inférieures à 0.13mm et dont la résistance à la déformation est élevée . Compte tenu de ces remarques , nous pouvons maintenant étudier l'évolution du laminoir multi-cylindres .

\* Le laminoir compact : l'unique fonction des cylindres d'appui d'un quarto est de diminuer la flexion des cylindres de travail , dans une direction verticale par rapport à celle du laminage . Ces frêles cylindres , cependant , tendent aussi à flechir dans la direction horizontale et la limite inférieure de la valeur du diamètre dépend de ce facteur . Pour diminuer le diamètre des cylindres et en même temps leur fournir un support convenable contre la flexion , on a été conduit à créer un laminoir dans lequel chaque cylindre de travail est supporté par deux cylindres d'appui .

Les cages à six cylindres sont connues sous le nom de laminoirs compacts . Ces cages sont appréciées particulièrement pour le laminage du laiton et du cuivre en bandes minces , c'est à dire entre 0.025 et 0.05 mm . Et sans aucun doute , il est confirmé que les variations d'épaisseur transversale et longitudinale pouvaient être tenues dans d'étroites limites . L'unique raison de ces contraintes est que , dans la pratique , il y a une valeur limite en dessous de laquelle le diamètre des cylindres de tra-

-vail , ne peut pas descendre . Cette limite , comme le montre la figure 2 , est atteinte quand le plan tangent aux cylindres de travail coïncide avec celui des cylindres d'appui .

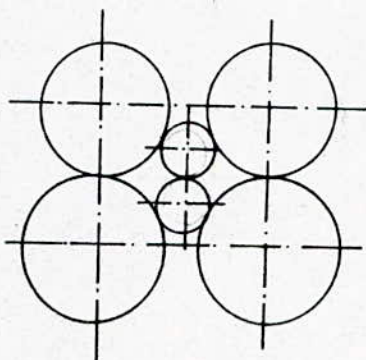


fig 2 . diamètre limite des cylindres de travail d'un laminoir compact .

Les avantages liés à l'emploi de cylindres de travail de faible diamètre sont :

1 - pour des conditions de laminage déterminés , les efforts auxquels sont soumises les diverses parties du laminoir , et en particulier les cylindres de travail sont réduits pour des diamètres très faibles de ces cylindres .

2 - puisque l'aplatissement de l'arc contact est moindre pour des cylindres de faible diamètre , des laminoirs munis de tels cylindres conviennent particulièrement pour le laminage des métaux de haute résistance à la déformation .



3 - l'emploi des cylindres de petit diamètre entraîne une diminution des proportions du laminoir et de sa surface au sol .

4 - la tendance à l'élargissement du métal est réduite quand on utilise des cylindres de petit diamètre , ce qui entraîne la réduction , sinon l'élimination de la tendance au criques latérales présentées par certains métaux .

Dans le cas du laminoir compact , pour utiliser des cylindres de travail plus faibles , on est amené à diminuer le diamètre des cylindres ~~étant~~ d'appui , le seul intérêt des cylindres d'appui <sup>étant</sup> annulé puisqu'il ne sont plus assez résistants pour prévenir la flexion des cylindres de travail . C'est à ce stade de l'évolution que le laminoir à cylindres multiples est véritablement né . On eut l'idée d'entourer les cylindres de travail très faibles par des groupes de cylindres d'appui .

Pour permettre la réduction du diamètre des cylindres du laminoir compact , Rohn , un ingénieur allemand , proposa vers 1925 , d'utiliser des laminoirs à 10 ou 18 cylindres d'appui . Le diamètre des cylindres de travail peuvent atteindre les 10 mm .

Pour le laminoir Sendzimir , on emploie des groupes de 06 , 12 ou 20 cylindres . Ces deux derniers sont appelés , respectivement laminoirs 3-2-1 et laminoirs 4-3-2-1 ; celui qui compte 6 cylindres est appelé laminoir 2-1 .

Comme nous l'avons vu , Rohn employa le premier de tels groupements de cylindres , mais les méthodes imaginées par Sendzimir pour transmettre l'effort de séparation des cylindres de travail à la cage du laminoir et sur toute sa longueur ainsi que pour régler l'écartement des cylindres , utilise la méthode conventionnelle de transmission de l'effort appliqué sur les tourvillons des cylindres d'appui par l'intermédiaire des vis .

En resumé , le XXème siècle est caractérisé par les idées révolutionnaires apparues en architecture , en musique , en peinture et dans d'autres arts . Que le meme phenomene soit apparu dans la conception des laminoirs semble bien être démontré par l'idée téméraire et audacieuse de Sendzimir dans la mise en oeuvre d'un laminoir Sendzimir compact à quatre cages .

Conditions théoriques d'engagement et d'entraînement  
de la bande dans les cylindres :

Considérons la figure 3 : soit un point A quelconque de l'arc de contact . Définissons sa position sur cet arc par son angle au centre O . La longueur d'un élément d'arc au voisinage de A est  $Rd\theta$  , R étant le rayon du cylindre .

Cet élément est soumis à deux forces :

- La force F due à la pression radiale exercée par le cylindre , telle que  $F = pRd\theta$  , étant la radiale unitaire supposée constante tout le long de l'arc de contact .

- La force de frottement P dont le sens depend de la position du point A par rapport au point neutre H . Si  $\mu$  est le coefficient de frottement métal-cylindre , on a

$$P = \mu F .$$

La composante horizontale des forces P et F a pour valeur au point A :

$$P\cos\theta - F\sin\theta$$

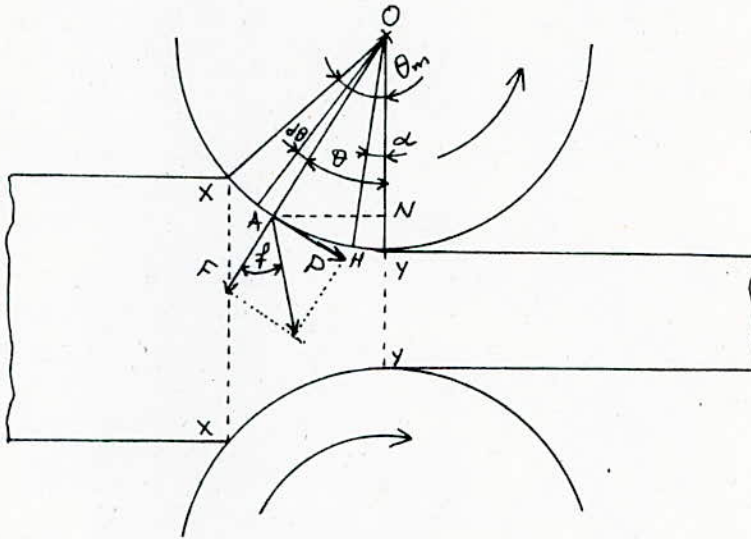


fig.3 : Condition d'engagement et d'entraînement de la bande .

Dans le plan d'entrée XX , le métal ne s'engagera entre les cylindres que si cette composante est dirigée vers l'avant , c'est à dire si :

$$P \cos \theta_m - F \sin \theta_m > 0$$

En posant  $\theta_m$  angle du point X , ou encore angle de laminage , la condition d'engagement est donc :

$$P/F > \text{Tgt} \theta_m \text{ et comme } P/F = \mu = \text{Tgt} f ,$$

$$\text{il vient finalement : } f > \theta_m$$

L'angle de frottement doit donc être supérieur à l'angle de laminage . Cependant , si l'angle de laminage est supérieur à l'angle de frottement , on peut encore engager la bande à condition de la pousser entre les cylindres .

A quelle condition la bande engagée dans les cylindres par poussée, sera-t-elle entraînée ? Au point A , de longueur  $R d\theta$  , le métal est soumis à une force qui est la résultante des forces P et F , c'est à dire égale à :

$$\sqrt{P^2 + F^2} = \mu R \sqrt{1 + \mu^2} d\theta = R_c d\theta$$

La composante horizontale de cette résultante a pour valeur entre X plan d'entrée et H plan neutre :

$$R_H = R \cos [(\theta-f) - \pi/2] d\theta$$

Et entre H plan neutre et Y plan de sortie :

$$R_H = R \cos [(\theta+f) + \pi/2] d\theta$$

Il y aura entraînement de la bande si la somme de ces composantes horizontales élémentaires, lorsque  $\theta$  varie de  $\theta_m \tilde{\alpha}$  et de  $\alpha \tilde{0}$ , est dirigée de l'entrée des cylindres vers leur sortie. Compte tenu des sens, cette condition

s'écrit :

$$\int_{\theta_m}^{\alpha} R \sin(\theta-f) d\theta + \int_{\alpha}^0 R \sin(\theta+f) d\theta > 0$$

soit :

$$[-\cos(\theta-f)]_{\theta_m}^{\alpha} + [-\cos(\theta+f)]_{\alpha}^0 > 0$$

soit :

$$-\cos\theta_m \cos f + \sin\theta_m \sin f - \cos f - 2\sin\alpha \sin f > 0$$

En divisant par  $\cos f$ , et puisque  $\operatorname{tg} f = \mu$ , coefficient de frottement,

il vient :

$$\cos\theta_m + \mu \sin\theta_m - 1 - 2\mu \sin\alpha > 0$$

ou :

$$2\mu \sin\alpha + (1 - \cos\theta_m - \mu \sin\theta_m) > 0$$

La discussion du signe de cette expression est délicate. Mais on peut dire très rapidement, puisque le premier terme est nécessairement positif, que la somme ne peut pas être négative si la somme des autres termes est elle-même positive

soit :

$$1 - \cos\theta_m - \mu \sin\theta_m > 0$$

$$\mu \sin\theta_m > 1 - \cos\theta_m; \mu > (1 - \cos\theta_m) / \sin\theta_m$$

$$\operatorname{tg} f > \operatorname{tg}\theta_m / 2$$

soit :

$$\theta_m > 2f$$

Ainsi, quand cette condition est réalisée, c'est à dire quand l'angle de laminage est compris entre l'angle de frottement et le double de l'angle, on est certain qu'il y aura entraînement de la bande après que celle-ci aura été

engagée volontairement entre les cylindres . Cependant , cette condition n'est pas exclusive . Pour chaque cas de laminage , la condition d'entrainement dépend de la position du plan neutre , autrement dit de la valeur de  $\alpha$  , elle même fonction des conditions de tension .

I - 2 - IMPORTANCE ET PLACE DU LAMINAGE A FROID  
-----  
DANS L'INDUSTRIE :  
-----

Le laminage à froid s'applique à la fabrication des tôlesminces et des feuillards en tous métaux : acier , cuivre , laiton , aluminium , zinc . Il tend à ce faire de plus en plus en continu .

Le laminage à froid de l'acier nécessite des pressions considérables , ce qui exige des cages tres robustes et des cylindres très rigides pour éviter les flexions et obtenir une épaisseur uniforme du produit avec une tolérance pouvant atteindre +/- 0.02 mm pour une épaisseur de 2 mm .

Les cylindres de gros diamètres permettent de faire de fortes passes , tandis que les cylindres de petit diamètre demandent pour la même réduction de section des pressions plus faibles et donnent moins d'écrouissage , ce qui permet de réduire le nombre des traitements thermiques intermediaires .

La flexion des cylindres de petit diamètre doit être empêchée au moyen de cylindres d'appui .

Les cylindres de travail qui sont toujours au nombre de deux , ont un diamètre qui peut descendre à 12 mm ; les cylindres d'appui pouvant avoir 650 mm de diamètre .

La vitesse de laminage qui était au début de 150 m/mn avec les laminoirs duo , elle atteint 300 m/mn avec les laminoirs multicylindres .

Le procédé ancien de laminage des tôles consistait à transformer le lingot en larget plat de 180 à 250 mm de largeur et d'une épaisseur de 10 mm , soigneusement calibré suivant le poids de la tôle à obtenir ; la longueur du larget doit correspondre à la largeur de la tôle , le laminage du larget s'opérant en travers . Après chaque passe , sur un laminoir à deux cylindres , le produit était renvoyé par dessus le cylindre supérieur . Pour obtenir des tôles de plus en plus minces , on procédait au laminage en parquet ; après l'opération , les tôles étaient cisailées puis décollées .

Le développement de la consommation de tôles minces pour l'industrie automobile , n'a plus permis la mise en oeuvre de ce processus ; par ailleurs , les progrès accomplis des 1925 dans le laminage continu à froid de bandes de 600 mm , ayant nécessité pour leur alimentation de longues bandes laminées à chaud , des grandes installations de laminage continu à chaud ont été réalisées .

Pour la fabrication des tôles d'emboutissage pour carrosserie automobile , les installations importantes et complexes comportent une succession d'ateliers pour le dégraissage , laminage à chaud des lingots et obtention d'ébauches en bobines ( voils ) après rechauffage intermédiaire . Un décapage acide en continu doit précéder les opérations de laminage à froid en continu suivies de recuit . Des systèmes d'asservissement et de contrôle en continu de l'épaisseur des produits ( jauges électroniques , jauges à rayons X ou  $\gamma$  ) complétés par de nombreuses inspections ,

permettent des productions importantes de qualité .

- fabrication des feuillards :

On appelle feuillard une longue bande de métal généralement enroulée en bobines ou voils ( laminage à chaud ) ou en rouleaux ( laminage à froid ) .

Pour la fabrication de feuillard laminés à froid le feuillard laminé à chaud est decapé , d'abord mécaniquement par passage dans des cylindres en quinconce puis à l'acide sulfurique chaud à 70 degrés C . Le feuillard passe ensuite entre une succession de cages de laminoirs dont les cylindres sont parfaitement polis . La bande qui se déroule avant la première cage s'enroule après la dernière cage .

Suivant la dureté du métal , on peut réduire l'épaisseur de 50 à 70 % en 2 , 3 ou 4 passes . Pour obtenir des réductions plus fortes de l'épaisseur , il faut procéder à un recuit intermédiaire . Il s'opère dans des fours à cloches permettant d'obtenir un "recuit blanc" sous atmosphère contrôlée .

Le feuillard se livre à l'état recuit ou écroui à différents degrés : dur , 1/2 dur , 1/4 dur .

En résumé , un très grand pourcentage de l'acier élaboré à un stade ou à un autre de sa transformation une opération de laminage . La plupart des organes en acier dont la civilisation industrielle a besoin , s'obtiennent à partir de produits laminés qui sont des produits plats ou profilés .

après conception et étude des différents éléments constituant le laminoir , du moteur électrique fournissant l'énergie nécessaire pour vaincre les forces de résistance et de frottements engendrés par le laminage à froid aux cylindres de travail qui doivent avoir certaines caractéristiques mécaniques donnant à ces derniers l'aptitude de laminer certains métaux comme l'aluminium et le cuivre .

Cette réalisation a été envisagée vue le grand profit qu'on peut tirer d'un laminoir à froid à l'échelle laboratoire , comme par exemple l'étude de l'aluminium et du cuivre ; de la déformation plastique , de la recristallisation , des textures d'écrouissage etc ... .

Ce laminoir n'est conçu que pour laminer l'aluminium et le cuivre ainsi que certains de leurs alliages , vue les grands efforts qui peuvent être mis en jeu lors du laminage de certains autres matériaux dont la résistance à la déformation est assez élevée .

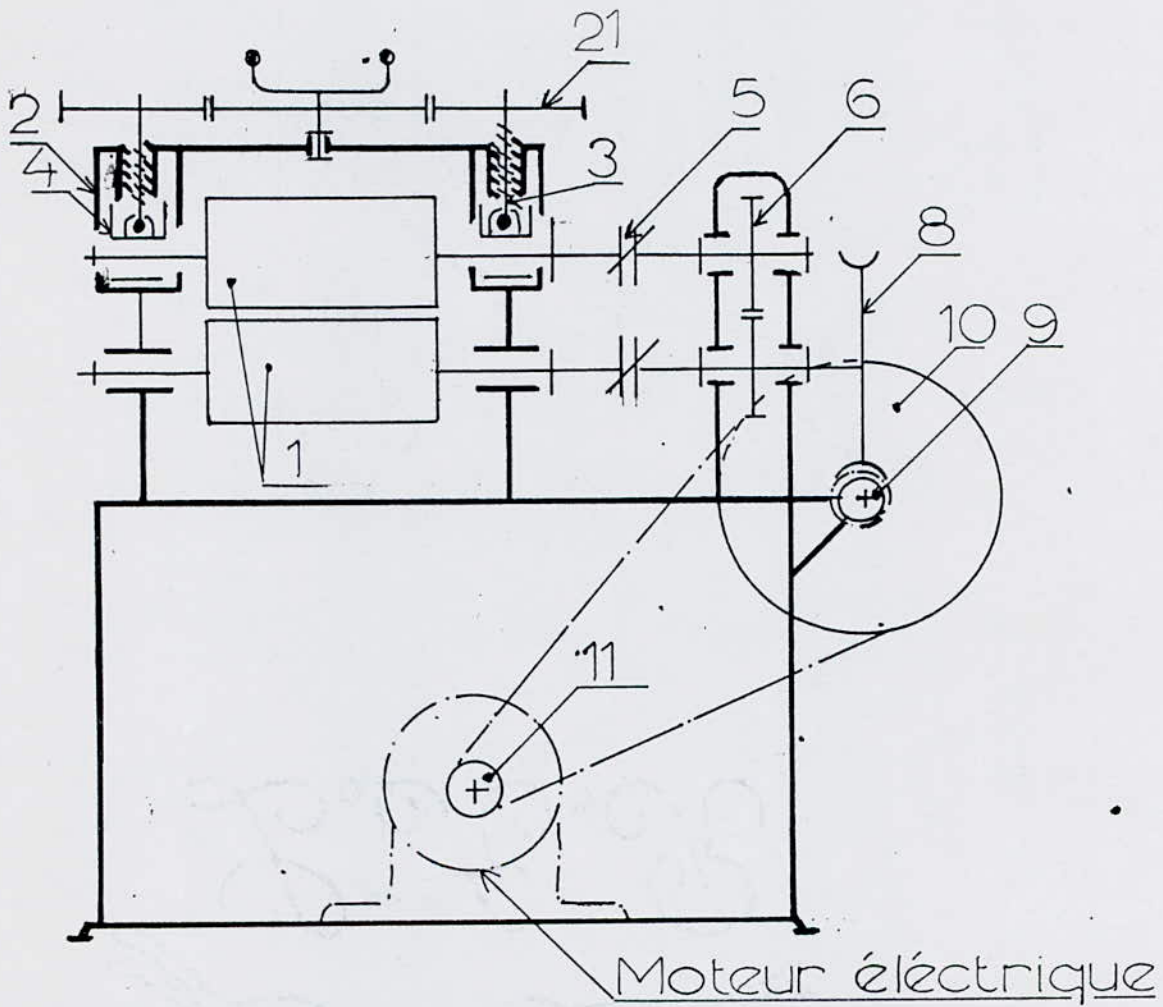


---

PREMIERE PARTIE

ETUDE ET CONCEPTION DU LAMINOIR

---



SCHEMA DU LAMINOIR A FROID  
( PROTOTYPE )

I - PRESENTATION DU LAMINOIR CONCU POUR LABORATOIR :

-----  
( VOIR DESSIN D'ENSEMBLE )

I - 1 - ELEMENTS PRINCIPAUX DE LA CAGE DE TRAVAIL :  
-----

Les éléments principaux de la cage sont :

- les cylindres de travail
- le bâti
- les supports des cylindres
- le mécanisme de réglage d'écartement des cylindres

\* Les cylindres de travail (1) sont les éléments principaux dans les laminoirs et surtout dans ceux du duo .

Ce sont les premiers organes de la cage qui subissent les efforts de laminage puisque ce sont eux qui réduisent l'épaisseur de la tôle en contact direct avec leur surface .

Donc , l'état de surface de la tôle et l'uniformité de l'épaisseur ainsi que sa précision dépendent essentiellement des cylindres .

Ces éléments déformant doivent avoir donc des caractéristiques mécaniques bien particulières pour être aptes à déformer un matériau quelconque ( le cuivre par exemple ) sans subir le même sort .

Nous avons donc optés pour le choix suivant :

Matériau des cylindres de travail (1) : XC110 cementé .

Diamètre :  $D_t = 70 \text{ mm}$

Longueur pratique :  $L_t = ( 2.5 \div 4 ) D_t .$

Dans notre cas :

$L_t = 140 \text{ mm}$

Dureté superficielle :  $60 \div 64\text{HRC} .$

de réduction et de transmission de mouvement d'autre part , est assurée par un moteur électrique dont la puissance est largement suffisante pour laminier à froid le cuivre , l'aluminium et certains de leurs alliages .

La transmission du mouvement de rotation du moteur aux cylindres de travail , se fait en deux étapes et ceci dans le but d'obtenir un rapport de transmission égal à :

$$I = 1 / \dot{I} = 1 / 250 .$$

La première étape est réalisée par deux poulies à double courroies , la première poulie (11) , dont le diamètre est de 50 mm , est solidaire avec l'axe du moteur et la seconde (10) est en liaison complète avec l'axe de la vis sans fin (9) et son diamètre est égal à 250 mm .

La seconde étape se fait à l'aide d'un système roue (8) et vis sans fin (9) .

Le cylindre inférieur du laminoir est entraîné par l'axe de la zone (8) du système roue-vis , cet axe coïncidant avec celui du cylindre inférieur .

L'arbre de la roue dentée est solidaire d'un pignon à denture droite qui entraîne un autre pignon identique , afin d'assurer la rotation simultanée à la même vitesse et en sens opposé des deux cylindres du laminoir .

Le cylindre supérieur étant amené à translater verticalement , nous avons prévu un joint OLDHAM pour assurer l'entraînement de ce même cylindre sans modification aucune dans le système de transmission .

II - FACTEURS DETERMINANT L'EFFORT DE LAMINAGE :

II - 1 - ETAT DE SURFACE DES CYLINDRES DE TRAVAIL :

La figure 4 représente quelques unes des forces appliquées dans l'inter-cylindre . Dans le plan d'entrée X-X le métal se déplace à une vitesse inférieure à celle des cylindres . Cette différence diminue graduellement jusque dans le plan neutre H-H où les deux vitesses sont égales . Cela signifie qu'entre X et H la surface des cylindres essaie d'entraîner le métal entre les cylindres , tendance représentée par les forces de frottement  $P_1$  tangentes en tout point aux cylindres telle qu'en A-A . Du plan H-H au plan de sortie Y-Y , la vitesse du métal augmente graduellement et par conséquent , la surface des cylindres tend à retenir le métal entre les cylindres ce qui crée d'autres frottements  $P_2$  , de sens opposé à celui de  $P_1$  . En tout point situé entre H et X , le métal tend à fluer en arrière de H , les forces de frottement  $P_1$  s'y opposant . De même , entre H et Y le métal tend à fuir à une vitesse supérieure à celle des cylindres , les forces de frottement  $P_2$  , s'y opposant à cette tendance . Et par conséquent , si on réduit de la même quantité les épaisseurs de deux bandes de métal identiques , l'une sur un laminoir équipé de cylindres finement rectifiés et l'autre sur des cylindres à surface rugueuse , l'effort de laminage pour cette dernière bande , sera plus grande que pour la première , toutes les autres conditions restant égales par ailleurs . D'où l'état de surface des cylindres de travail a une influence sur l'effort de laminage .

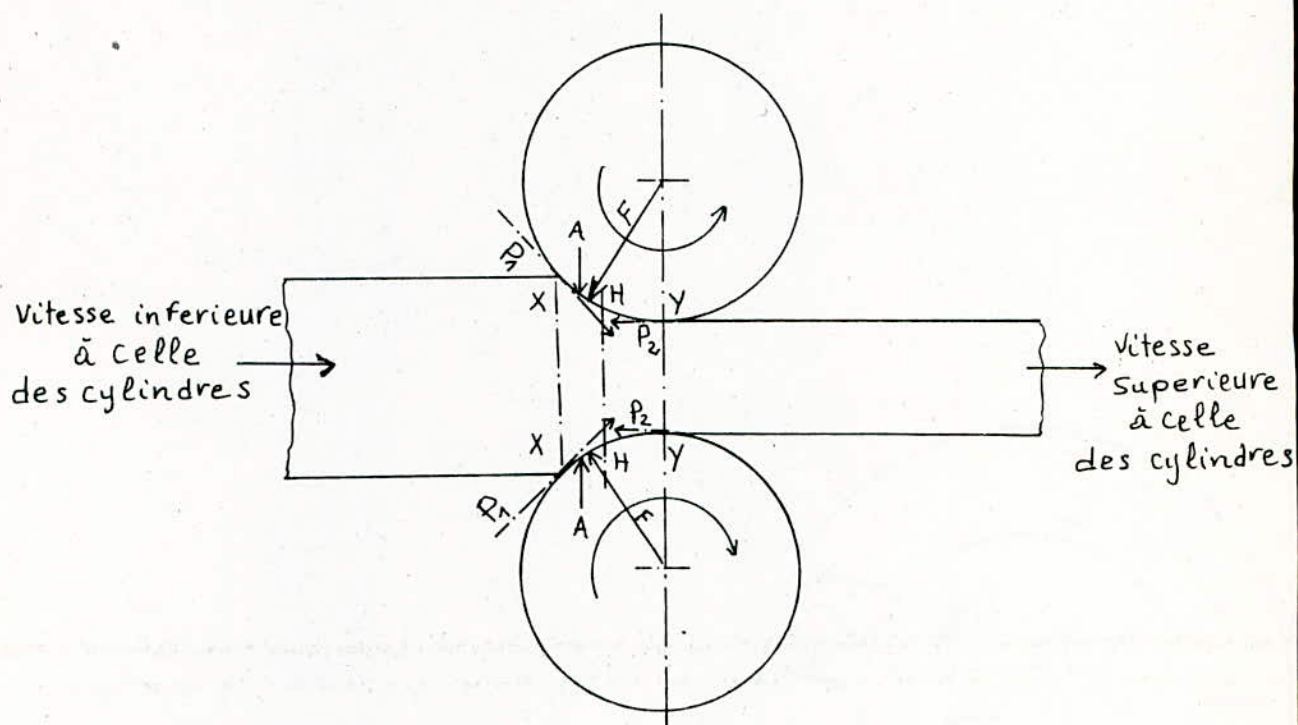


fig. 4

II - 2 - EPAISSEUR INITIALE DE LA BANDE A LAMINER :

Nous n'avons envisagé jusqu'à présent que la variation d'un seul paramètre , les conditions de frottement entre cylindres et métal en cours de laminage , résultant de l'état de surface des cylindres . Nous avons considéré que la surface soumise à la charge , le diamètre des cylindres , le taux de réduction et l'épaisseur initiale étaient des constantes . Si l'épaisseur initiale de la bande varie , les conditions de frottement , le diamètre des cylindres et le taux de réduction étant maintenus constants , l'aire de contact du métal avec les cylindres change et dont la valeur est donnée par l'équation :

$$\text{Aire de contact} = b \sqrt{D/2(e_1 - e_2)}$$

Dans laquelle  $b$  = largeur de la bande

$D$  = diamètre du cylindre

$e_1$  = épaisseur de la bande avant laminage

$e_2$  = épaisseur de la bande après laminage

Pour un taux de réduction donné , si l'épaisseur initiale augmente , l'aire de contact augmente aussi et influence directement sur l'effort de laminage qui varie dans le même sens que l'épaisseur initiale .

II - 3 - DIAMETRE DES CYLINDRES DE TRAVAIL :

Examinons la figure 5.1 si  $e_1$  est l'épaisseur de la bande à l'entrée ,  $e_2$  à la sortie :

$e_1 - e_2 = \rho$  , réduction totale de la passe

$\overline{BC} = 0.5 \rho$  , demi-réduction

$$\overline{AC} = \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{BC}^2}$$

$\overline{AB}^2 = R^2 - (R - 0.5 \rho)^2$  avec  $R$  = rayon du cylindre

$$\overline{AC} = \sqrt{R^2 - (R - 0.5\rho)^2 + (0.5 \rho)^2} = \sqrt{R \rho}$$

Cette formule donne la valeur approchée de la longueur du contact entre le cylindre et le métal . On a confondu la longueur de l'arc et celle de la corde , mais l'erreur est négligeable si on compare le diamètre du cylindre à l'amplitude de la réduction .

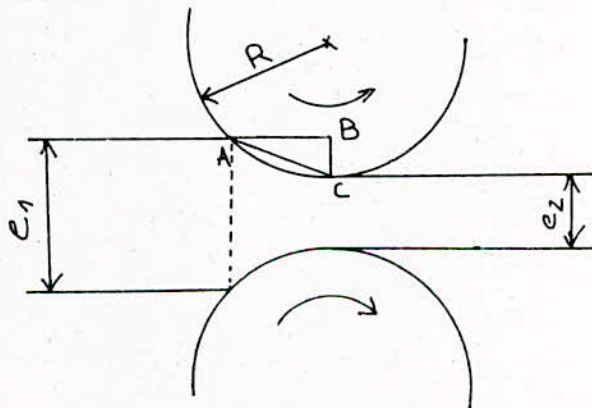


fig. 5.1

Il s'ensuit que pour une même réduction sur des cylindres de diamètres différents, les surfaces de contact de deux bandes de même largeur - en première approximation - sont dans le rapport :  $\sqrt{R'/R}$  (fig. 5.2)

La figure 5.1 représente deux bandes de même largeur et de 5 mm d'épaisseur qui subissent une réduction de 30% sur des cylindres de 300 et 600 mm de diamètres respectifs. Les surfaces de contact sont évidemment différentes ; la surface nominale dans le cas des gros cylindres est de 42% ( $\sqrt{600/300} \times 30\%$ ) supérieure à celle qui est relative aux petits cylindres.

Des résultats publiés par COOK et LARKE montrent que l'effort nécessaire pour réduire dans ces conditions une bande de cuivre à haute conductibilité recuit sur des cylindres de 600 mm de diamètre est de 67% supérieure à l'effort nécessaire pour effectuer le même travail sur des cylindres de 300 mm de diamètre.

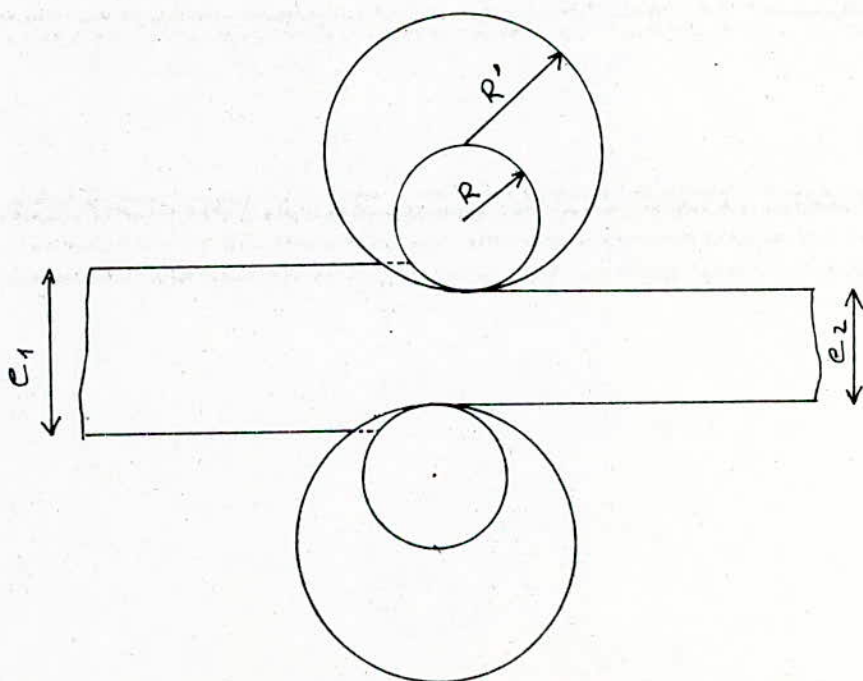


fig. 5.2 : Variation de l'arc de contact avec le diamètre des cylindres



II - 4 - RESISTANCE A LA DEFORMATION DU MATERIAU A LAMINER :  
.....

Quand on réduit l'épaisseur d'une bande de métal par laminage, la force nécessaire pour effectuer la déformation comprend deux composantes distinctes :

- Une force nécessaire pour vaincre la résistance à la déformation homogène offerte par le métal lui même ,
- Une force nécessaire pour combattre l'effet des forces de frottement qui agissent le long des surfaces en contact du métal et des outils de déformation .

Il faut entendre par "déformation homogène" une déformation sans contrainte extérieure de frottement . Par conséquent , le métal est capable de se déformer librement dans toutes les directions . On obtient par exemple la déformation homogène d'une éprouvette cylindrique en compression quand l'augmentation de diamètre est la même sur toute sa hauteur , sans qu'apparaisse la forme de tonneau . De la même manière , après compression d'un bloc parallélépipédique : (le rapport des longueurs initiales et finales , ou des largeurs initiales et finales , est égal à la racine carrée de l'inverse du rapport des épaisseurs initiales et finales) . Le métal a été soumis à une déformation homogène . (Voir démonstration) .

Soient :  $b$  la largeur

$l$  la longueur (du parallélépipède)

$h$  la hauteur

et :  $b'$  ,  $l'$  ,  $h'$  après déformation ,

La déformation homogène de la surface nous donne :

$$b'/b = l'/l$$

Puisque le volume reste constant , on peut écrire :

$$b.l.h = b'.l'.h'$$

La combinaison des deux équations donne :

$$b'/b = l'/l = \sqrt{h/h'}$$

Lors du laminage , le changement dimensionnel n'apparaît que suivant deux directions . La largeur de la bande , en effet , ne varie pas ou varie très peu . Ce type de déformation , quand il n'y a pas de frottements est <sup>appelé</sup> déformation plane homogène . Il a été montré que le rapport de la déformation plane homogène à la déformation homogène est de 1.15 .

Il est bien évident , que plus la résistance (~~la résistance~~) du métal à la déformation est grande , plus l'effort de laminage est assez élevé .

## II - 5 - TAUX DE DEFORMATION :

-----

Le taux de déformation (ou réduction) est donné par le facteur :  $\text{Reduction \%} = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100$

En général , le taux de déformation a une influence significative sur la résistance à la déformation des métaux .

Pour le cuivre et l'aluminium , la résistance à la déformation à température ambiante est nettement plus affectée par le taux de déformation même quand celui ci est très faible .

Il ne faut pas oublier l'influence de la vitesse de laminage sur l'effort de laminage , car si la vitesse croit , alors l'effort de laminage croit lui aussi ceci s'expliquant par l'augmentation du taux de contraintes .

Par définition le taux de contrainte est le rapport de la réduction relative réalisée au temps nécessaire à sa réalisation :

$$\text{Taux de contrainte} = 1/t \cdot (h_1 - h_2) / h_1$$

En conclusion , le laminage est une déformation permanente .  
Le taux de contrainte imposé au métal est donc supérieur à sa propre limite élastique tout en restant , bien entendu , inférieur à sa propre charge de rupture .

Un métal sera d'autant plus facile à laminier que son allongement unitaire sera plus grand , sous faible charge et dans une zone de température étendue ( dépend du système cristallin ) .

Dans le cas du laminage à froid , le métal s'écrouit . La résistance à la rupture augmente . La limite élastique se rapproche de la résistance à la rupture . L'allongement unitaire diminue . Il est alors probable que le taux de contrainte imposé au métal dépasse sa résistance à la rupture . Il devient indispensable que l'allongement unitaire correspondant , n'ait pas de temps de prendre sa valeur maximale . Cette condition est réalisable en diminuant le temps de passage d'une section entre les cylindres , c'est à dire , en augmentant la vitesse de laminage .

Puisque le laminage à froid , fait évoluer les propriétés mécaniques du métal ainsi que la texture d'orientation préférentielle, alors on est amené à pratiquer des recuits intermédiaires pour aboutir le métal , qui sont de plus en plus souvent des restaurations plus ou moins poussées .

III - CALCUL DE L'EFFORT DE LAMINAGE  
-----  
ET CHOIX DU MOTEUR ELECTRIQUE :  
-----

Dans toutes les formules appliquées pour déterminer les efforts engendrés par le laminage à froid d'une tôle de métal (qui est le cuivre dans notre cas) , on a supposé qu'il n'y a aucune déformation élastique des surfaces de contact des cylindres .

Le calcul de l'effort de laminage se fera pour une passe dont le taux de réduction ne dépassant pas 10% , l'épaisseur initiale de la tôle  $h_0$  étant de 10 mm et  $h_1$  l'épaisseur après laminage . D'où :  $h_0 = 10$  mm et  $h_1 = 9$  mm .

\* Corroyage absolu :  $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$  (mm) (1)

$h_{i-1}$  : épaisseur de la tôle avant la ième passe .

A.N :  $h_1 = h_0 - \Delta h_1$  d'où  $\Delta h_1 = 1$  mm

\* Corroyage relatif :

$$\epsilon_i = (h_i / h_{i-1}) \times 100 (\%) \quad (2)$$

A.N :  $\epsilon_1 = (\Delta h_1 / h_0) \times 100$  d'où  $\epsilon_1 = 10\%$

\* Corroyage relatif total :

$$\epsilon_{1\epsilon} = [(h_0 - h_1) / h_0] \times 100 (\%) \quad (3)$$

A.N :  $\epsilon_{1\epsilon} = [(h_0 - h_1) / h_0] \times 100$

d'où  $\epsilon_{1\epsilon} = 10\%$  .

\* Limite d'élasticité du métal après laminage :

$$\sigma_{ei} = \sigma_{0.2} + k \epsilon_{1\epsilon}^n \text{ (daN / mm}^2\text{)} \quad (4)$$

avec :  $\sigma_{0.2} = 0.5$  daN/mm<sup>2</sup> : limite d'élasticité du cuivre à l'état recuit

$k$  ,  $n$  des constantes qui dépendent de la nature du métal .

dans le cas du cuivre ,  $k = 3.49$  et  $n = 0.4$

A.N :  $\sigma_{e1} = \sigma_{0.2} + k \epsilon_{1\epsilon}^n$  d'où  $\sigma_{e1} = 9.27$  daN/mm<sup>2</sup>

\* Résistance à la déformation du métal à laminer à

la i<sup>ème</sup> passe :

$$\sigma_{gi} = \frac{1,15 [\sigma_{ei-1} + \sigma_{ei} + 2(\sigma_{ei}' + \sigma_{ei}'' + \sigma_{ei}''')] }{8} \quad (\text{daN/mm}^2) \quad (5)$$

$\sigma_{ei}$  : limite d'élasticité du métal après la i<sup>ème</sup> passe .

$\sigma_{ei-1}$  : limite d'élasticité du métal après la (i-1)<sup>ème</sup> passe .

$\sigma_{ei}'$ ,  $\sigma_{ei}''$ ,  $\sigma_{ei}'''$  : valeurs intermédiaires de la limite d'élasticité ,

avec :  $\sigma_{ei}' = \sigma_{0,2} + k E_{iE}'^n \quad (6)$

et :  $E_{iE}' = \frac{h_0 - h_i'}{h_0} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$

$E_{iE}'$  : valeur intermédiaire du corroyage relatif total dans la i<sup>ème</sup> passe ,

$h_i'$  : valeur intermédiaire de l'épaisseur de la tôle lors de la i<sup>ème</sup> passe ,

$h_i' = h_{i-1} - \beta_E \Delta h_i \quad (\text{mm}) \quad (8)$

$\beta_E$  : coefficient dont la valeur est : 0.25 ; 0.5 ; 0.75 .

A.N :  $h_1' = h_0 - 0,25 \Delta h_1 \Rightarrow h_1' = 9,75 \text{ mm}$

$E_{1E}' = \frac{h_0 - h_1'}{h_0} \times 100 \Rightarrow E_{1E}' = 2,5 \%$

$\sigma_{e1}' = \sigma_{0,2} + K E_{1E}'^n \Rightarrow \sigma_{e1}' = 5,54 \text{ daN/mm}^2$

$h_1'' = h_0 - 0,5 \Delta h_1 \Rightarrow h_1'' = 9,5 \text{ mm}$

$E_{1E}'' = \frac{h_0 - h_1''}{h_0} \times 100 \Rightarrow E_{1E}'' = 5 \%$

$\sigma_{e1}'' = \sigma_{0,2} + K E_{1E}''^n \Rightarrow \sigma_{e1}'' = 7,14 \text{ daN/mm}^2$

$h_1''' = h_0 - 0,75 \Delta h_1 \Rightarrow h_1''' = 9,25 \text{ mm}$

$E_{1E}''' = \frac{h_0 - h_1'''}{h_0} \times 100 \Rightarrow E_{1E}''' = 7,5 \%$

$\sigma_{e1}''' = \sigma_{0,2} + K E_{1E}'''^n \Rightarrow \sigma_{e1}''' = 8,31 \text{ daN/mm}^2$

D'où la résistance à la déformation du métal lors du

laminage est :

$$\sigma_{g1} = \frac{1,15 [\sigma_{0,2} + \sigma_{e1} + 2(\sigma_{e1}' + \sigma_{e1}'' + \sigma_{e1}''')] }{8} \Rightarrow \sigma_{g1} = 7,43 \text{ daN/mm}^2$$

\* Longueur de l'arc de contact non déformé :

$$l_i = \sqrt{0.5 \times D_t \times \Delta h_i} \quad (\text{mm}) \quad (9)$$

$D_t$  = Diamètre des cylindres de travail

$\Delta h_i$  = corroyage absolu .

A.N :  $l_i = \sqrt{0.5 \times 70 \times D_{h1}} \Rightarrow l_i = 5.92 \text{ mm}$

\* Pression spécifique moyenne :

$$P_{smi} = n_{\sigma} \sqrt{g_i} \quad (\text{daN/mm}^2) \quad (10)$$

$\sqrt{g_i}$  = résistance à la déformation du métal

$n_{\sigma}$  = coefficient de l'état de contrainte (  $n_{\sigma} = 1.1$  )

A.N :  $P_{smi} = 1.1 \times \sqrt{g_i}$  d'où  $P_{smi} = 8.17 \text{ daN/mm}^2$  .

\* Effort de laminage total :

$$P_{l1} = P_{smi} \times l_i \times B \quad (\text{daN}) \quad (11)$$

$P_{smi}$  : pression spécifique moyenne

$l_i$  : longueur de l'arc de contact non déformé

$B$  : largeur de la tôle = 140 mm

A.N :  $P_{l1} = P_{smi} \times l_i \times B$  d'où  $P_{l1} = 6771.3 \text{ daN}$  .

\* Moment résistant de laminage selon la relation

de PHINK :

$$M_{l1} = 0.5 P_{smi} \times B \times D_t (1+i) \times h_i \ln\left(\frac{h_{i-1}}{h_i}\right) \times 10^{-3} \quad (\text{daN.m}) \quad (12)$$

$i$  : avance ; dans notre cas , on a estimé  $i = 0$

A.N :  $M_{l1} = 0.5 P_{smi} \times B \times D_t \times h_1 \times \ln(h_0/h_1) \times 10^{-3}$

d'où :  $M_{l1} = 37.96 \text{ daN.M}$

\* Energie consommée et puissance développée pendant le laminage à froid :

L'énergie totale à fournir pendant le laminage peut être décomposée en trois groupes à savoir :

- l'énergie nécessaire à la déformation du métal passant entre les cylindres .

- l'énergie nécessaire pour vaincre les frottements dans les paliers lisses des tourillons .

- l'énergie nécessaire pour équilibrer les pertes par frottement dans les pignons , le reducteur , etc ... .

Il est donc très important de connaître les besoins énergétiques du laminoir . Cependant , le nombre de facteurs intéressés , leur indetermination relative , la possibilité du moteur de supporter une surcharge donnée , ne justifie pas des calculs d'une précision extrême . Les résultats obtenus par des methodes de calculs approchées sont en général tout à fait satisfaisants .

\* Couple moteur réduit aux cylindres de travail :

$$C_{mi} = \frac{1}{i} ( M_{li} + M_{pi} + M_{ri} ) \quad (\text{daN.m}) \quad (13)$$

$i = 250$  ; rapport de transmission

$M_{li}$  = moment résistant de laminage

$M_{pi}$  = moment de frottement dans les paliers lisses

$M_{ri}$  = moment de frottement dans les pignons et le réducteur .

on a estimé que :  $M_{pi} + M_{ri} = 1/3 M_{li}$

A.N :  $C_{m1} = 1/250 ( 4/3 M_{l1} )$

d'où :  $C_{m1} = 0.20 \text{ daN.m}$

$$C_{m1} = 2 \text{ N.m}$$

\* Vitesse angulaire du moteur électrique :

$$\omega = \frac{2\pi \times V_c \cdot i}{\pi \cdot D_t \cdot 10^{-3}} \quad (\text{rd/s})$$

d'où  $\omega = \frac{2 \cdot V_c \cdot i}{D_t \cdot 10^{-3}} \quad (\text{rd/s}) \quad (14)$

$D_t = 70 \text{ mm}$  ; diamètre des cylindres

$i = 250$  ; rapport de transmission

$V_c = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$  ; vitesse linéaire de la

surface des cylindres

A.N :  $\omega = \frac{2 \times 2 \times 10^{-2}}{70 \times 10^{-3}} \times 250$  d'où  $\omega = 142.86 \text{ rd/s}$

\* Energie totale a fournir par le moteur lors du laminage  
à froid :

$$P_i = \frac{C_{mi}}{0.8} \cdot \omega \cdot 10^{-3} \text{ (KW) (15)}$$
$$\text{A.N : } P_1 = \frac{C_{m1}}{0.8} \cdot \omega \cdot 10^{-3} \text{ d'où } P_1 = 0.36 \text{ KW}$$

D'où les caractéristiques du moteur électrique du laminoir  
sont :

$$\omega = 142.86 \text{ rd/s soit } 1364.19 \text{ tr/mn}$$

$$P = 0.36 \text{ KW}$$

$$\eta = 0.8 \text{ (rendement)}$$

IV - CALCUL DES ELEMENTS DE LA CAGE A LA RESISTANCE :

-----  
IV - 1 - CALCUL DU BATI A LA RESISTANCE :  
-----

Vue la difficulté de déterminer la direction de l'effort  
de laminage , on la supposera alors verticale , ceci pour  
simplifier les calculs . Dans le même but , le bati peut être  
représenté par deux cadres à caisson rigide , solidaire de  
deux montants et deux traverses .

L'effort de laminage est estimé à 7000daN .

Les calculs qui suivent nous permettent de déterminer les  
moments résistants des différentes sections du bâti puis les  
contraintes des mêmes sections que nous comparerons à la  
contrainte admissible du bâti qui dépend du materiau  
constituant .

a - Section A - A :  
-----

\* Aire de la section FA :

$$FA = F_1 - F_2$$

$$F_1 = b_1 \cdot h_1 \text{ d'où } F_1 = 28 \text{ cm}^2$$

$$F_2 = b_2 \cdot h_1 \text{ d'où } F_2 = 14 \text{ cm}^2$$

$$FA = F_1 - F_2 \text{ d'où } FA = 14 \text{ cm}^2$$



\* Moment statique par rapport à l'axe  $\tilde{X} - X$  :

$$S_A = S_1 - S_2$$

$$S_1 = F_1 \cdot h_1 / 2$$

$$S_2 = F_2 \cdot h_1 / 2$$

$$S_A = (F_1 - F_2) \cdot h_1 / 2 \text{ d'où } S_A = 49 \text{ cm}^3$$

\* Centre de gravité de la section A - A :

$$y_c = S_A / F_A \text{ d'où } y_c = 3.5 \text{ cm} .$$

\* Moment d'inertie de la section A - A par rapport à l'axe  $X_1 - X_1$  :

$$I_a = I_1 - I_2$$

$$I_1 = F_1 \cdot h_1^2 / 12$$

$$I_2 = F_2 \cdot h_1^2 / 12$$

$$I_A = (F_1 - F_2) \cdot h_1^2 / 12$$

$$\text{d'où } I_A = 57.17 \text{ cm}^4 .$$

\* Moment résistant de la section A - A :

$$W_A = I_A / y_c \text{ d'où } W_A = 16.33 \text{ cm}^3$$

b - Section B - B :

\* Aire de la section FB :

$$F_B = b \cdot h \text{ d'où } F_B = 16 \text{ cm}^2 .$$

\* Moment statique par rapport à l'axe  $\tilde{X} - X$  :

$$S_B = F_B \cdot h / 2 \text{ d'où } S_B = 32 \text{ cm}^3 .$$

\* Centre de gravité de la section B - B :

$$y_c = S_B / F_B \text{ d'où } y_c = 2 \text{ cm} .$$

\* Moment d'inertie de la section B - B par rapport à l'axe  $X_1 - X_1$  :

$$I_B = F_B \cdot h^2 / 12$$

$$\text{d'où } I_B = 21.33 \text{ cm}^4 .$$

- \* Moment résistant de la section B - B :

$$W_B = I_B / y_c \text{ d'où } W_B = 10.67 \text{ cm}^3 .$$

c - Section C - C :

- \* Aire de la section C - c :

$$F_c = b \cdot h \text{ d'où } F_c = 20 \text{ cm}^2 .$$

- \* Moment statique par rapport à l'axe X - X :

$$S_c = F_c \cdot h/2$$

$$\text{d'où } S_c = 50 \text{ cm}^3 .$$

- \* Centre de gravité de la section C - C :

$$y_c = S_c / F_c \text{ d'où } y_c = 2.5 \text{ cm} .$$

- \* Moment d'inertie de la section C - C par rapport à l'axe X1 - X1 :

$$I_c = F_c \cdot h^2/12$$

$$\text{d'où } I_c = 41.67 \text{ cm}^4 .$$

- \* Moment résistant de la section C - C :

$$W_c = I_c / y_c \text{ d'où } W_c = 16.67 \text{ cm}^3 .$$

d - Section D - D :

- \* Aire de la section FD :

$$F_D = b \cdot h \text{ d'où } F_D = 28 \text{ cm}^2 .$$

- \* Moment statique par rapport à l'axe X - X :

$$S_D = F_D \cdot h/2$$

$$\text{d'où } S_D = 98 \text{ cm}^3 .$$

- \* Centre de gravité de la section D - D :

$$y_c = S_D / F_D \text{ d'où } y_c = 3.5 \text{ cm} .$$

- \* Moment statique de la section D - D par rapport à l'axe X1 - X1 :

$$I_D = F_D \cdot h^2/12$$

$$\text{d'où } I_D = 58.33 \text{ cm}^4 .$$

- \* Moment résistant de la section D - D :

$$W_D = I_D / y_c \text{ d'où } W_D = 16.67 \text{ cm}^3 .$$

TABLEAU DES RESULTATS :

SECTIONS	Fi (cm <sup>2</sup> )	Si (cm <sup>3</sup> )	yc (cm)	Ii (cm <sup>4</sup> )	Wi (cm <sup>3</sup> )
A - A	14	49	3.5	57.17	16.33
B - B	16	32	2.0	21.33	10.67
C - C	20	50	2.5	41.67	16.67
D - D	28	98	3.5	58.33	16.67

\* Calcul des moments dans les coins rigides du bâti par la relation suivante :

$$M_o = \frac{P_1}{2} \times \frac{\left[ \frac{l_1^2}{8I_1} + \frac{R^2 \pi}{I_3} \left( \frac{1}{2} - 1 \right) + \frac{l_1 R}{2I_1} \right]}{\left[ \frac{l_1}{I_1} + \frac{l_2}{I_2} + \frac{\pi R}{I_3} \right]}$$

( TZELIKOV.A - Equipement de laminage - MOSCOU - 1966 ) .

$$l_1 = l'_1 - 2R$$

R = 3 cm ; rayon de courbure du bâti

$$l'_1 = 13 \text{ cm} \quad \text{d'où } l_1 = 7 \text{ cm} .$$

$$l_2 = l'_2 - 2R$$

$$l'_2 = 22.5 \text{ cm}$$

$$R = 3 \text{ cm} \quad \text{d'où } l_2 = 16.5 \text{ cm} .$$

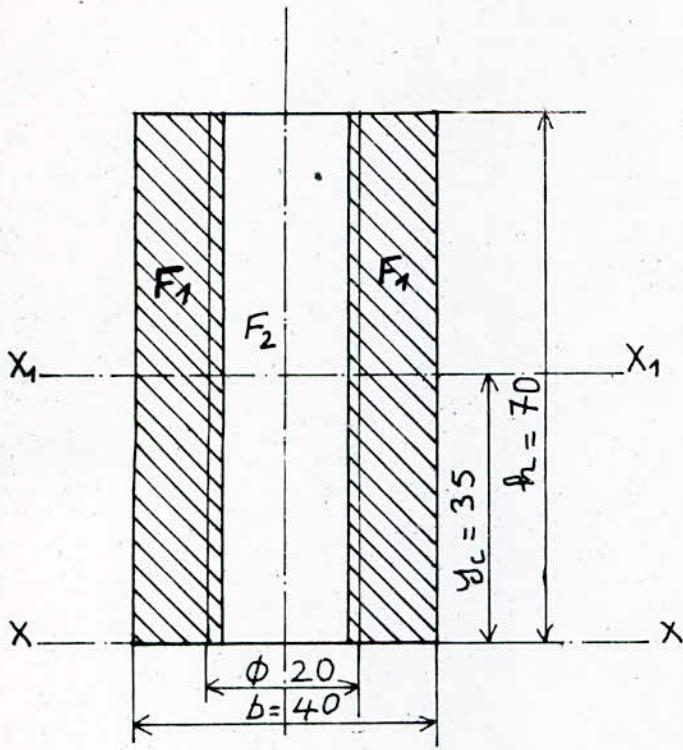
I<sub>1</sub> : moment d'inertie de la section B - B

I<sub>2</sub> : " " " " C - C

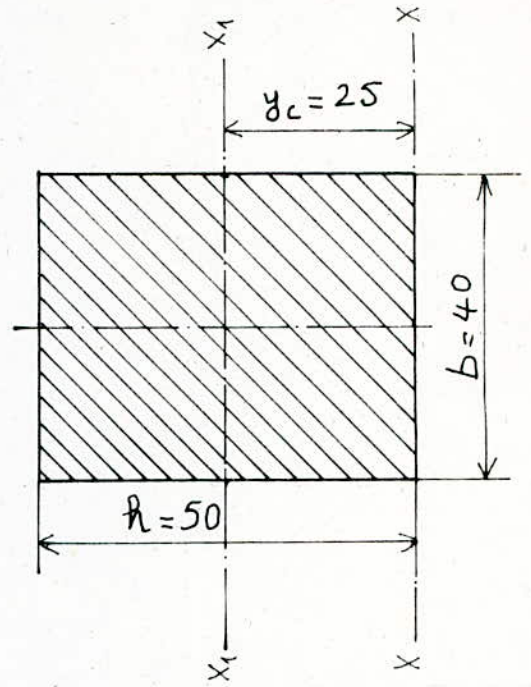
I<sub>3</sub> : " " " " D - D

$$A.N : M_o = 3460 \text{ daN.cm} .$$

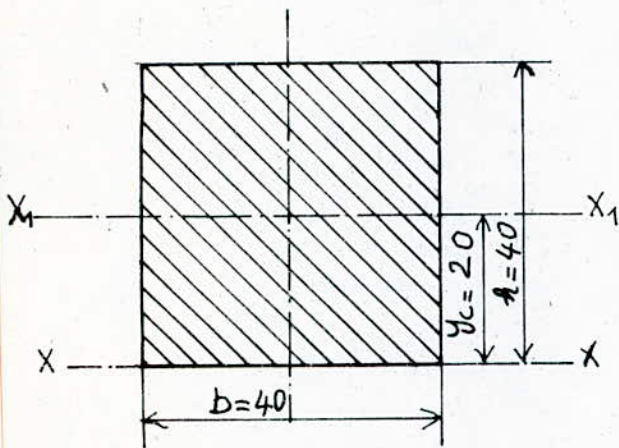




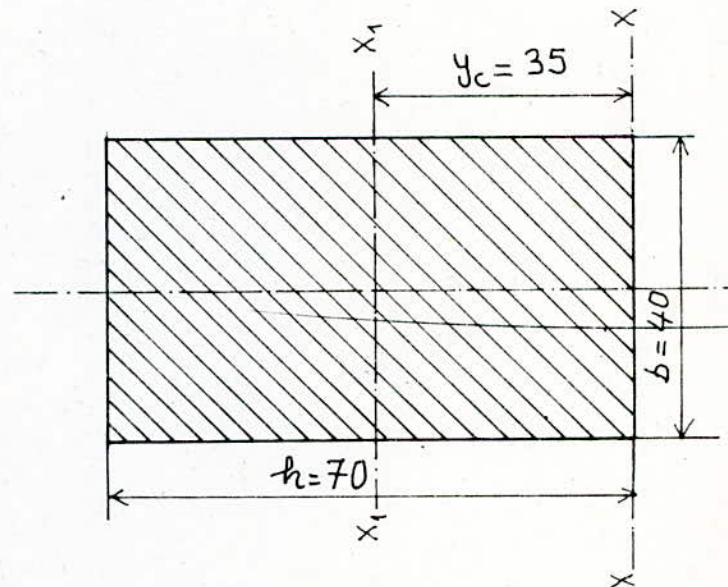
Section A-A



Section C-C



Section B-B



Section D-D

- Les différentes sections du bâti -

\* Calcul du moment maximal dû à l'effort de laminage :

$$M_{\max} = \frac{P_1}{2} \times \frac{l^2}{4} \quad \text{d'où } M_{\max} = 11375 \text{ daN.cm .}$$

\* Calcul du moment résultant agissant sur la traverse :

$$M_c = M_{\max} - M_o \quad \text{d'où } M_c = 7915 \text{ daN.cm .}$$

\* Calcul des contraintes dans les différentes sections :

a - Section A - A (Traverse supérieure) :

$$\sigma_A = \frac{M_c}{W_A} \quad \text{d'où } \sigma_A = 485 \text{ daN/cm}^2$$

b - Section B - B (Traverse inférieure) :

$$\sigma_B = \frac{M_c}{W_B} \quad \text{d'où } \sigma_B = 742 \text{ daN/cm}^2$$

c - Section C - C :

$$\sigma_C = \frac{M_o}{W_C} + \frac{P_1/2}{2.F_c} \quad \text{d'où } \sigma_C = 313 \text{ daN/cm}^2 .$$

Le matériau constituant le bâti est la fonte GS, ayant les caractéristiques mécaniques suivantes :

$$R_e = 2800 \text{ daN/cm}^2 \text{ et } R_r = 3900 \text{ daN/cm}^2 .$$

Les efforts de laminage qui s'engendrent lors du passage d'une tôle de métal entre les deux cylindres de travail, se transmettent au bâti que ce dernier doit pouvoir nécessairement résister lors du travail .

La contrainte admissible dans ce cas est :

$$R \text{ admissible} = \frac{R_e}{1.5} \quad \text{d'où } R \text{ adm} = 1867 \text{ daN/cm}^2$$

\* Calcul du coefficient de sécurité au niveau de chaque section :

a - Section A - A :

$$n_1 = \frac{R_{\text{adm}}}{\sigma_{\text{Amax}}} \quad \text{d'où } n_1 = 3.85$$

b - Section B - B :

$$n_2 = \frac{R_{adm}}{\sqrt{B_{max}}} \quad \text{d'où } n_2 = 2.52$$

c - Section C - C :

$$n_3 = \frac{R_{adm}}{\sqrt{C_{max}}} \quad \text{d'où } n_3 = 5.97$$

On voit bien que les coefficients de sécurité sont supérieurs à 1, d'où la condition de sécurité est bien vérifiée.

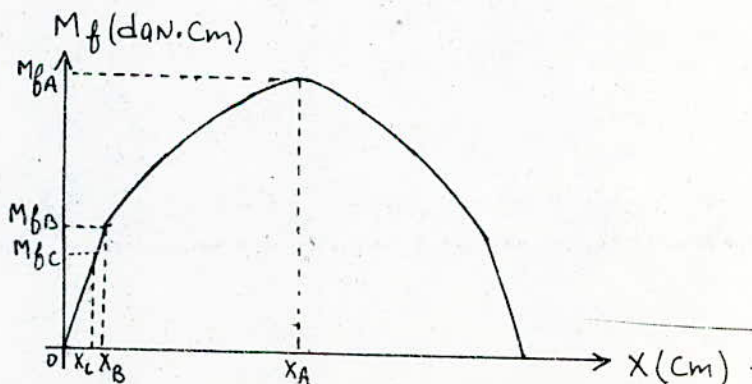
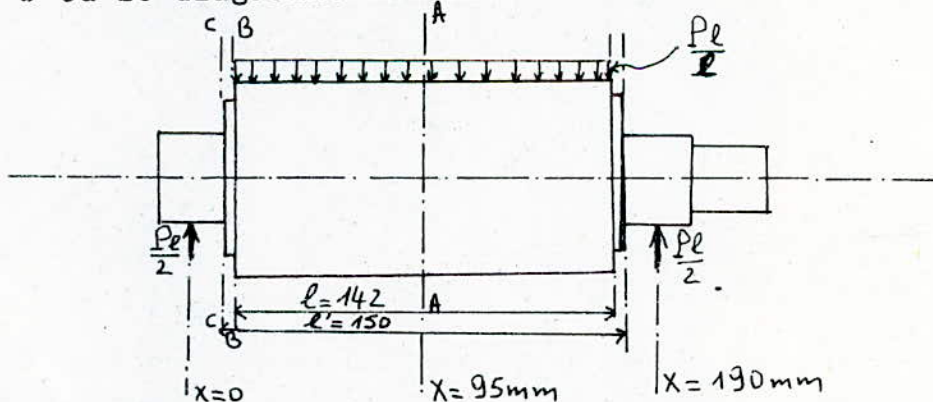
IV - 2 - CALCUL DES CYLINDRES DE TRAVAIL A LA RESISTANCE :

Le moment flechissant au niveau d'un cylindre est de la forme suivante:

$$0 \leq X \leq 2.4 \text{ cm} \quad M_f(X) = \frac{P_1}{2} \cdot X$$

$$2.4 \text{ cm} \leq X \leq 9.5 \text{ cm} \quad M_f(X) = \frac{P_1}{2} \cdot X - \frac{P_1}{2l} (X - 2.4)^2$$

D'où le diagramme du moment flechissant :



\* Calcul des moments flechissants dans les zones dangereuses du cylindre :

Zone A - A :  $M_f(X=9.5) = M_f = 20825 \text{ daN.cm}$   
A

Zone B - B :  $M_f(X=2.4) = M_f = 8400 \text{ daN.cm}$   
B

Zone C - C :  $M_f(X=2) = M_f = 7000 \text{ daN.cm}$

\* Calcul des contraintes normales à la flexion dans les zones dangereuses :

Zone A - A : 
$$\sigma = \frac{M}{f_A} = \frac{M}{0.1d^3} \quad \text{d'où } \sigma_{fA} = 607 \text{ daN/cm}^2$$
  
A

Zone B - B : 
$$\sigma = \frac{M}{f_B} = \frac{M}{0.1d^3} \quad \text{d'où } \sigma_{fB} = 389 \text{ daN/cm}^2$$
  
B

Zone C - C : 
$$\sigma = \frac{M}{f_C} = \frac{M}{0.1d^3} \quad \text{d'où } \sigma_{fC} = 1633 \text{ daN/cm}^2$$
  
C

\* Calcul du coefficient de sécurité à la flexion :

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{adm.f}}{\sigma_f} > 1$$

$\sigma_{adm.f} = \frac{Re}{3} \quad \text{d'où } \sigma_{adm.f} = 16.67 \text{ daN/cm}^2$

d'où :  $n_{\sigma_1} = \frac{\sigma_{adm.f}}{\sigma_{fA}} \quad \text{d'où } n_{\sigma_1} = 2.75$   
A

et :  $n_{\sigma_2} = \frac{\sigma_{adm.f}}{\sigma_{fB}} \quad \text{d'où } n_{\sigma_2} = 4.29$   
B

et :  $n_{\sigma_3} = \frac{\sigma_{adm.f}}{\sigma_{fC}} \quad \text{d'où } n_{\sigma_3} = 1.02$   
C

La condition de sécurité est donc bien justifiée .



- \* Calcul des contraintes de cisaillement dans les zones dangereuses des cylindres de travail :

Zone A - A :

$$\text{Effort tranchant: } T = - \frac{dMf}{dx} \Rightarrow T = - \frac{P_1}{2} + \frac{P_1}{1}(x-24)$$

$$T_A = T(x=9.5) \Rightarrow T_A = 0$$

d'où la contrainte de cisaillement  $\tau_A = 0$

Zone B - B :

$$\text{Effort tranchant: } T = - \frac{dMf}{dx} \Rightarrow T = - \frac{P_1}{2}$$

$$T_B = T(x=2.4) \Rightarrow T_B = - 3500 \text{ daN.}$$

$$\text{d'où la contrainte de cisaillement: } \tau_B = \frac{T_B}{S_B}$$

$$\Rightarrow \tau_B = 31 \text{ daN/cm}^2$$

Zone C - C :

$$\text{Effort tranchant: } T = - \frac{dMf}{dx} \Rightarrow T = - \frac{P_1}{2}$$

$$T_C = - \frac{P_1}{2} \Rightarrow T_C = - 3500 \text{ daN}$$

$$\text{d'où la contrainte de cisaillement: } \tau_C = \frac{T_C}{S_C}$$

$$\Rightarrow \tau_C = 364 \text{ daN/cm}^2$$

- \* Coefficient de securite au cisaillement :

$$n_{\tau_1} = \frac{\tau_{adm}}{\tau_A} \Rightarrow n_{\tau_1} = \infty > 1$$

$$n_{\tau_2} = \frac{\tau_{adm}}{\tau_B} \Rightarrow n_{\tau_2} = \frac{1667}{31} \Rightarrow n_{\tau_2} = 54 > 1$$

$$n_{\tau_3} = \frac{\tau_{adm}}{\tau_C} \Rightarrow n_{\tau_3} = \frac{1667}{364} \Rightarrow n_{\tau_3} = 4,6 > 1$$

La condition de sécurité au cisaillement est bien vérifiée .

IV - 3 - CALCUL DE LA VIS DE PRESSION A LA RESISTANCE :

La nuance de l'acier de la vis de pression est : XC48 dont ;

$$Re = 37 \text{ daN/mm}^2 \text{ et } Rm = 67 \text{ daN/mm}^2 .$$

\* La contrainte à la compression de la vis est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{P1/2}{\pi \frac{de^2}{4}} \ll R_{\text{adm}}$$

P1/2 = 3500 daN : effort s'exerçant sur la vis de pression .

de = 2 cm : diamètre extérieur de la vis .

A.N : 
$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{3500}{\pi \frac{2^2}{4}} \text{ d'où } \sigma_{\text{comp}} = 1114 \text{ daN/cm}^2 .$$

$$R_{\text{adm}} = 2000 + 2500 \text{ daN/cm}^2 .$$

La condition de sécurité est bien vérifiée :  $\sigma_{\text{comp}} \ll R_{\text{adm}}$

La contrainte à la compression des filets de la vis est :

$$\sigma_{\text{comp.f}} = \frac{P1/2}{\frac{\pi}{4} (de - di)^2 Z} \ll R_{\text{adm}}$$

de = 2 cm

di = 1.7 cm ; diamètre intérieur du filet de la vis .

Z = 28 ; nombre de filets en contact avec l'écrou de la vis de pression .

P1 = 7000 daN ; effort de laminage .

A.N : 
$$\sigma_{\text{comp.f}} = \frac{7000/2}{\frac{\pi}{4} (2 - 1.7)^2 28} \text{ d'où } \sigma_{\text{comp.f}} = 143 \text{ daN/cm}^2 .$$

$$R_{\text{adm}} = 2000 + 2500 \text{ daN/cm}^2$$

d'où  $\sigma_{\text{comp.f}} \ll R_{\text{adm}}$

\* La contrainte de cisaillement de la vis de pression est :

$$\tau = \frac{P1/2}{\pi di \cdot h} \ll \tau_{adm.}$$

di = 1.7 cm ; diamètre intérieur du filet de la vis.

h = 7 cm ; longueur de la vis en contact avec l'écrou .

A.N :  $\tau = \frac{3500}{\pi \times 1.7 \times 7} \Rightarrow \tau = 93.62 \text{ daN/cm}^2$   
 $\tau_{adm} = 925 + 1200 \text{ daN/cm}^2$

$\tau \ll \tau_{adm}$  : La condition au cisaillement de la vis est largement vérifiée .

IV - 4 - CALCUL DE L'ECROU DE LA VIS DE PRESSION

-----  
A LA RESISTANCE :  
-----

\* Contrainte de compression des filets de l'écrou :

$$\sigma_{comp} = \frac{P1/2}{\frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) Z} \leq R_{adm}$$

de = 2 cm ; diamètre extérieur du filet .

di = 1.7 cm ; diamètre intérieur du filet .

P1 = 7000 daN ; effort de laminage .

Z = 28 ; nombre de filets de l'écrou .

R<sub>adm</sub> = 1500 + 1800 daN/cm<sup>2</sup>

A.N :  $\sigma_{comp} = \frac{3500}{\frac{\pi}{4} (2^2 - 1.7^2) 28} \Rightarrow \sigma_{comp} = 143 \text{ daN/cm}^2$

La condition  $\sigma_{comp} \leq R_{adm}$  , est bien vérifiée .

\* Contrainte de cisaillement des filets de l'écrou :

$$\tau = \frac{P1/2}{\pi \cdot d_e \cdot h} \ll \tau_{adm}$$

de = 2 cm ; diamètre extérieur du filet de l'écrou .

h = 7 cm ; longueur de contact entre la vis et l'écrou .

A.N : 
$$\tau = \frac{3500}{\pi \cdot 2 \cdot 7} \implies \tau = 80 \text{ daN/cm}^2$$

$$\tau_{\text{adm}} = 700 + 900 \text{ daN/cm}^2 ; \text{ d'où } \tau \leq \tau_{\text{adm}}$$

---

DEUXIEME PARTIE  
ETUDE METALLURGIQUE DES CYLINDRES DE TRAVAIL

---

Les cylindres de travail sont les éléments essentiels de la cage de travail d'un laminoir du type duo . Ces outils déformants doivent avoir des propriétés mécaniques exceptionnelles leur permettant de vaincre la résistance à la déformation du matériau à laminier et d'avoir une bonne résistance à la fatigue , à la flexion ; ces éléments étant soumis à des contraintes cycliques de flexion .

L'état brut de coulée de l'acier constituant les cylindres , ne possèdent pas les caractéristiques mécaniques désirées , c'est à dire , une dureté superficielle assez élevée et une bonne ductibilité à coeur . Cela nous a amené à leur faire subir un traitement superficiel de cémentation par le carbone .

#### I - ETUDE METALLURGIQUE A L'ETAT BRUT DE COULEE :

-----

Cette étude consiste à déterminer les propriétés mécaniques de l'acier XC10 destiné à un traitement thermochimique de cémentation .

Pour connaître ces caractéristiques , nous avons procédé à des essais mécaniques de traction , de résilience et de dureté .

#### I - 1 - ESSAI DE TRACTION :

-----

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture pour en déterminer le maximum de caractéristiques mécaniques , telles que :

- La limite apparente à l'élasticité  $R_e$
- La résistance minimale à la traction  $R_m$
- La résistance à la rupture  $R_r$
- L'allongement  $A\%$  .

Les éprouvettes de traction peuvent être usinées ou brutes de coulée . Elles comportent une partie calibrée et généralement deux têtes d'amarage .

La section droite de l'éprouvette peut être circulaire , carrée , rectangulaire , hexagonale ou d'une autre forme dans des cas spéciaux .

Les éprouvettes de section circulaire sont définies par :

- $d$  = diamètre de la section
- $L_0$  = longueur initiale entre repère
- $L_t$  = longueur totale de l'éprouvette
- $S_0$  = section initiale .

Pour les produits en acier de diamètre  $d \geq 4$  mm ( NFA03-151 ) :

$$L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$$

Dans le cas d'une éprouvette proportionnelle , la longueur initiale  $L_0$  est déduite de la section  $S_0$  par la formule :

$$L_0 = K \sqrt{S_0} \quad \text{avec } K = 5,65$$

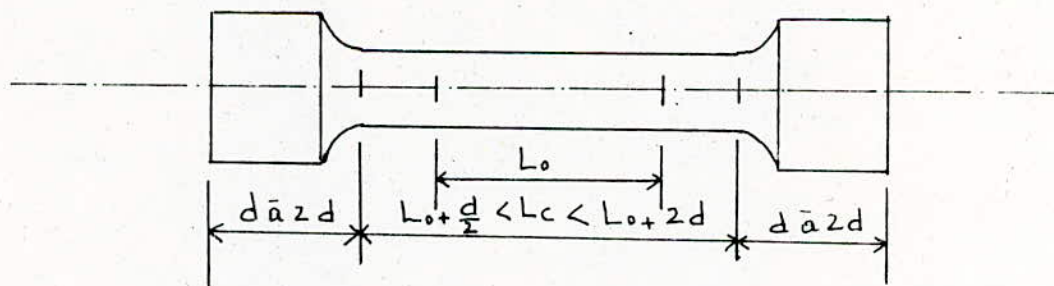


fig.1 dimensions de l'éprouvette de traction circulaire (NF03-151)

Dans notre cas , le diamètre  $d$  est pris égal a 14 mm .  
Lors de notre essai , le diagramme de traction obtenu  
(dit conventionnel) est le suivant : (fig.2)

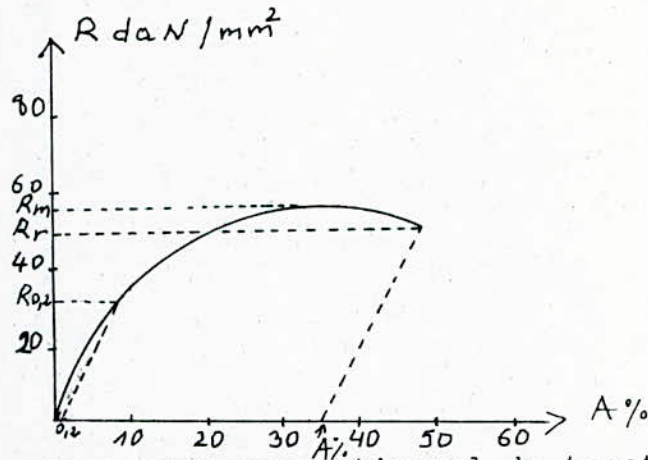


fig.2 - Diagramme conventionnel de traction .

D'où les caractéristiques mécaniques obtenues de cet essai de traction sont :

$$R_r = 49,50 \text{ daN/mm}^2 ; R_m = 54 \text{ daN/mm}^2 ; R_{o,2} = 35,36 \text{ daN/mm}^2$$

et  $A\% = 36$

## I - 2 - ESSAI DE RESILIENCE :

Les caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peuvent s'avérer insuffisantes , car des ruptures sont susceptibles d'être obtenues pour des contraintes inférieures à la limite élastique dans des conditions particulières rendant le métal fragile . Les paramètres fragilisants sont :

- l'abaissement de la température
- l'augmentation de la vitesse de déformation
- l'augmentation de la dimension de la pièce .

Pour caractériser la fragilité du métal sous l'action d'un choc , on utilise l'essai de résilience sur éprouvette entaillée .



L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis .

La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette exprimée en joules par cm<sup>2</sup> .

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Energie absorbée par la rupture } W(\text{joules})}{\text{Section droite de l'entaille (cm}^2\text{)}}$$

Différents types d'éprouvettes ont été définies pour l'essai de résilience . Les plus classiques sont définies par la norme AFNOR . Il s'agit de :

- \* L'éprouvette CHARPY entaillée en U (NF A03-156)
- \* L'éprouvette entaillée en V (NF A03-161) appelée couramment CHARPY V .

Dans notre cas , l'essai de résilience a été fait sur une éprouvette entaillée en U , dont les dimensions sont données par la figure 3 .

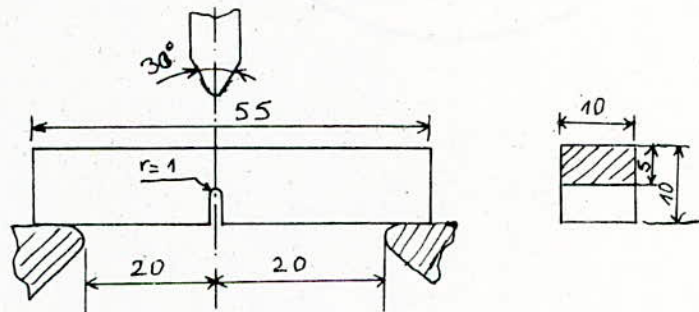


Fig.3 - Dimensions d'une éprouvette de résilience entaillée en U .

Les symboles employés pour le calcul de la résilience sont :

- KU = Energie W absorbée par la rupture (Joules)
- KCU = Résilience (Joules/cm<sup>2</sup>)

Pour l'acier de nuance XC10 constituant les cylindres de travail , l'essai de résilience nous a permis de calculer

la résilience dont la valeur est :

$$KCU = 22 \text{ daJ/cm}^2 .$$

### I - 3 - ESSAI DE DURETE :

.....

Les éssai de dureté ont une grande utilité pour le metallurgiste du fait de leur simplicité et leur caractère non destructif . Toutefois , la dureté n'est pas une propriété simple des materiaux metalliques .

La dureté caractérise la résistance à la déformation des métaux . L' ssai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal .

La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte . Celle ci est d'autant plus grande que le métal est mou .

La dureté s'exprime par le rapport de la force sur la surface projetée de l'empreinte :

$$H = \frac{F}{S}$$

Les  ssais les plus classiques sont les  ssais BRINELL , VICKERS et ROCKWELL .

#### \* Essai VICKERS :

.....

L' ssai consiste à imprimer dans la pièce à tester un penetrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle au sommet  $136^\circ$  sous une charge F et à mesurer la diagonale "d" de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge .(figure 4)

$$HV = 0.189 F/d^2$$

F : Charge d' ssai en Newton

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} ; \text{ Diagonale de l'empreinte (voir fig.5)}$$

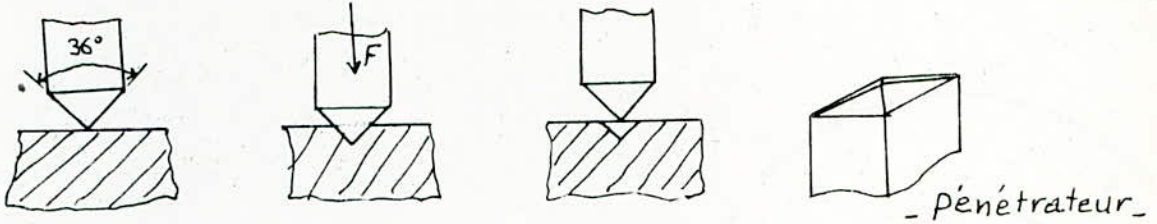


fig.4 - Empreinte de la pyramide droite .

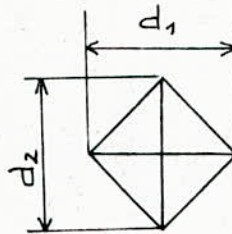


fig.5 - Diagonales d1 et d2 de l'empreinte .

La charge d'essai sera :  $49\text{N} \leq F \leq 981\text{N}$  (pour les aciers)

$49\text{N} \leq F \leq 1180\text{N}$  (pour l'Al, Cu et leurs alliages)

L'essai VICKERS nécessite la réctification et le pollis-  
-sage de surface . Cet essai est le plus précis des dureté .  
essais de

\* L'essai ROCKWELL :  
-----

L'essai consiste à imprimer en deux temps , dans la couche superficielle de la pièce à essayer , un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement rémanent "e" de la profondeur .

L'exécution de l'essai se fait comme suit :

A - Le pénétrateur étant perpendiculaire à la surface de l'essai , est soumis sans choc à une charge initiale de pénétration  $F_0$  . Cette charge entraine une pénétration "a" du pénétrateur qui sert d'origine de mesure de la dureté .

B - On applique au pénétrateur progressivement et sans chocs (en 2 à 8 secondes) une surcharge  $F_1$  qui entraine un accroissement de pénétration "b" .

C - On mesure alors l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration "e", c'est à dire, la différence entre la pénétration "c" sous charge de  $F_0$  à la fin de l'essai et la pénétration "a" sous charge  $F$  au debut de l'essai (figure 6).

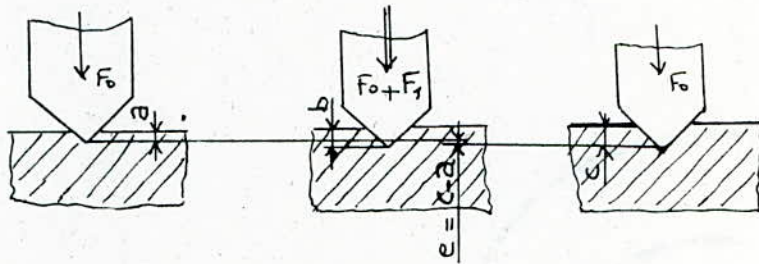


fig.6 - Exécution de l'essai (pénétrateur côneique).

L'essai de dureté ROCKWELL C (HRC) se fait à l'aide d'un pénétrateur côneique constitué par un diamant. Cet essai réservé aux aciers, est généralement utilisé pour des duretés HRC 20 à 70.

La dureté ROCKWELL C est déterminée sur une échelle 100.

Dureté HRC =  $100 - e1$  avec  $e1 = e/0.002$  (e mesuré en mm)

\* Essai de microdureté :

Cet essai correspond à des charges inférieures à 98N pouvant aller jusqu'à 0.098N. Le pénétrateur est en général du type VICKERS. La mesure de la dimension de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope (X100 ou X400).

L'essai de microdureté est utilisé pour de petits échantillons avec des surfaces ayant subit un bon polissage.

\* Détermination de la dureté de l'acier XC10 :  
.....

L'essai de dureté nous a donné des valeurs HRA comprises entre 38 et 40 .

\* Caractéristiques mécaniques des cylindres de travail  
.....  
du laminoir (XC10) avant traitement superficiel :  
.....

Rm = 54 daN/mm<sup>2</sup>  
Rr = 49 + 50 daN/mm<sup>2</sup>  
R<sub>0.2</sub> = 35 + 36 daN/mm<sup>2</sup>  
A% = 36  
KCU = 22 daJ/cm<sup>2</sup>  
HRA = 38 + 40

II - TRAITEMENT THERMIQUE DES CYLINDRES DE TRAVAIL :  
.....

Le traitement thermique subi par les cylindres est une cémentation par le carbone dans un bain de sels cyanurés , porté à une température de 875 °C , dans lequel les cylindres sont maintenus pendant une durée de 8 heures .

\* La cémentation par le carbone :  
.....

Les nuances d'acier utilisés pour la cémentation sont des aciers pour traitement thermiques non alliés ou alliés de teneur en carbone ne dépassant pas 0.2 % .

Cette opération consiste à chauffer l'acier doux à température élevée , dans un milieu carburant appelé ciment , de façon à augmenter la teneur en carbone superficiellement et sur une certaine épaisseur . La température de chauffage est

supérieure au point de transformation de l'acier , de telle sorte que le fer , étant a l'état austénitique ( $\gamma$ ) , a la propriété de dissoudre le carbone . La solubilité du carbone en phase austénitique étant beaucoup plus élevée qu'en phase ferritique ( $\alpha$ ) .

La cémentation proprement dite est toujours suivie d'une trempe . On peut ainsi , en cémentant et en trempant des pièces en acier doux , obtenir des structures en surface très dures et résistantes à l'usure (formation de martensite) et ductiles à coeur .

Lors de la cémentation d'un acier donné , deux phénomènes interviennent simultanément :

- Une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface du métal .
- Un processus de diffusion de l'élément carbone dans la zone superficielle de la surface vers l'intérieur .

La teneur en carbone en surface peut atteindre 0.7 a 1.7 % .

Dans le cas d'un ciment liquide , le bain cémentant est constitué d'un mélange à base de cyanure de sodium (60%) et de cyanure de potassium (40%) .

Les propriétés de la couche cimentée dépendent directement de sa constitution qualitative et quantitative après trempe . Les caractéristiques métallurgiques obtenues sont fonction de la trempabilité de cette couche et du traitement thermique appliqué : (Après trempe , les pièces peuvent subir un revenu de détente vers 150 a 200 °C conduisant à une augmentation de la tenacité de la couche) .

La constitution peut comprendre en plus de la martensite :

(Voir structure micrographique de l'acier XC10 cementé)

- De l'austénite résiduelle
- De la bainite et de la perlite
- Des carbures soit en nodules soit en réseaux .

Enfin , la cémentation en milieu liquide (bain de sels cyanurés) est utilisé pour des aciers non alliés ou faiblement alliés qui demandent peu d'investissement ; ce procédé demeurant toutefois très dangereux car les bains sont toxiques (cyanures) .

### III - ETUDE METALLURGIQUE DES CYLINDRES

-----  
APRES TRAITEMENT THERMIQUE :  
-----

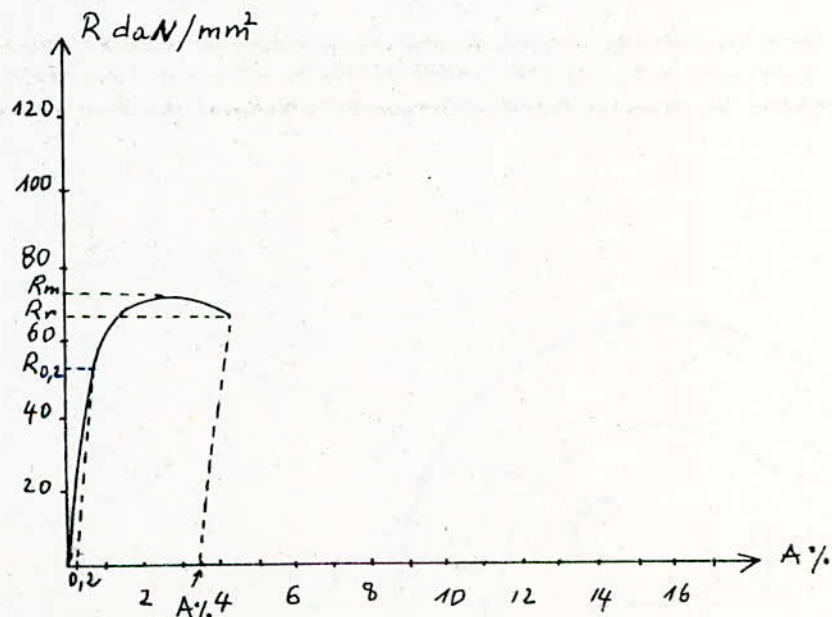
En plus des essais de traction , de résilience et de dureté , nous avons procédé à des essais de microdureté dans la zone superficielle d'un échantillon en acier XC10 , cementé dans les mêmes conditions que les cylindres de travail , afin de déterminer l'épaisseur de la couche cimentée .

\* Essai de résilience : KCU = 5 daJ/cm<sup>2</sup>

\* Essai de dureté : HRC = 60 + 64 (à la surface)

\* Essai de traction :

- Courbe de traction conventionnelle :



Nous en déduisons les caractéristiques mécaniques suivantes :

$$R_{0.2} = 52 + 53 \text{ daN/mm}^2$$

$$R_r = 66 + 67 \text{ daN/mm}^2$$

$$A\% = 3.5$$

\* Essai de microdureté :

-----  
Les essais de microdureté sont faits dans la zone superficielle de surface vers l'intérieur avec un déplacement d'un essai à l'autre, à <sup>égal</sup> 1/10ème de millimètre .

x(mm)	1/10	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	7/10	8/10
HV(500g)	851	736	659	642	609	594	565	538

L'épaisseur de cémentation est conventionnellement fixée à l'épaisseur de la zone qui , après trempe , a une dureté supérieure à 550 HV .

D'après nos résultats , l'épaisseur de la zone cémentée est de l'ordre de 7/10ème de millimètre .

Remarque :

Les résultats obtenus étaient prévisibles , car en général dans le cas de la cémentation , les duretés en surface et les épaisseurs de cémentation peuvent atteindre respectivement 700 à 900 HV et 0.5 à 2 mm environ .

\* Structure micrographique de l'acier XC10 cémenté :

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon lors de l'observation au microscope optique .



- Préparation micrographique de l'échantillon :

L'obtention de la surface d'examen a nécessité une suite d'opérations allant du prélèvement de l'échantillon à l'attaque micrographique .

Lors du prélèvement de l'échantillon , des précautions ont été prises pour éviter une modification de la structure du métal qui peut résulter d'un échauffement .

L'échantillon est découpé de façon à obtenir une surface d'examen . Le polissage effectué a été réalisé en deux étapes :

- Le prépolissage
- Le polissage de finition

Afin d'obtenir une surface plane et d'éviter un arrondissement des bords , l'échantillon est enrobé . Le prépolissage est réalisé par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie 320 - 400 - 600 - 1000 - qui sont placés sur des disques en rotation avec un arrosage a l'eau . Le polissage de finition a été fait à la pate diamantée avec lubrifiant . Lorsque l'état de surface est jugé bon , on procède à l'attaque chimique au nital qui dure 15 secondes environ .

Au microscope optique , l'attaque micrographique , nous permet de distinguer les différentes phases constituants la surface de l'échantillon .

- Structure micrographique : (voir photos)

Les structures observées sont :

- Dans la zone cimentée : la martensite ; la bainite supérieure et l'austenite résiduelle
- Au coeur (au delà de la couche cimentée) : ferrite et perlite



Couche cémentée : - martensite ; bainite ;  
- austénite résiduelle ;

(X 500) Nital



Cœur : ferrite  
- perlite

IV - INTERPRETATION DES RESULTATS :

\* Tableau recapitulatif des resultats :

!Caracteristiques! !mecaniques .	!RedaN/mm2!	!RrdaN/mm2!	! A%	! Durete	!KCUdaJ/cm2!
!Avant cementa- ! -tion	! 35+36	! 49+50	! 36	! HRA=38+40	! 22
!Après cementa- ! -tion	! 52+53	! 66+67	! 3.5	! HRC=60+64 ! *HRA=81+83	! 5

Remarque : (\*) La valeur de HRA a été déterminée du tableau de correspondance entre mesures de dureté selon la norme NF A03 - 172 pour les aciers non alliés ou faiblement alliés .

\* Interpretation :

La cémentation par le carbone , dans un bain de sels cyanurés porté à une température de 875 °C , augmente fortement la limite apparente d'élasticité (Re) , la resistance à la rupture (Rr) de l'acier XC10 , ainsi que sa dureté superficielle , mais il fait diminuer considérablement son allongement et sa résilience .

Ces nettes variations des caracteristiques mécaniques de l'acier XC10 sont dues a la présence de la martensite et de la bainite superieure dans la couche cementée .

La martensite est un constituant de dureté élevée . Cette dureté est due à une forte densité de dislocations associée a un cas extrême de durcissement par mise en solution solide d'insertion du carbone . A cette dureté élevée sont associés de très faibles allongements et resiliences .

Les carbures de fer fragiles , précipitant entre les lattes de ferrites , confèrent à la bainite supérieure de mauvaises caractéristiques de résilience .

La présence d'austénite résiduelle dans la couche cementée , diminue la dureté . Par contre , elle semble favorable à la résistance à la fatigue à la flexion . Par contre les structures bainitiques supérieures et perlitiques ainsi que les carbures en réseaux diminuent la résistance à la fatigue à la flexion .

En conclusion , ce traitement superficiel des cylindres de travail ne semble pas <sup>être</sup> très satisfaisant , car il présente quelques inconvénients principalement vis à vis de la résistance à la fatigue à la flexion des cylindres .

#### C O N C L U S I O N :

.....

Ce projet m'a permis de mettre en application les connaissances acquises au cours du cycle secondaire et universitaire et de les améliorer principalement dans les domaines suivants :

- Métallurgie : traitement superficiel
- Fonderie : moulage
- Mécanique : conception , usinage , calcul R.D.M ... .

Il m'a permis aussi d'appréhender le monde industriel au cours de mes fréquents passages à la S N V I (Rouiba)

La réalisation d'un tel laminoir est d'un grand intérêt tant au niveau de l'enseignement qu'au niveau de la recherche expérimentale dans le domaine de l'étude de la plasticité de certains métaux non ferreux tels que les alliages d'aluminium et de cuivre .

Il faut préciser cependant que beaucoup de modifications ont du être apportées par rapport au projet initial dans certains organes composant le laminoir : ces modifications sont dues a certaines difficultés d'usinage ainsi que la disponibilité du matériau et de certaines pièces indispensables à l'ensemble du mécanisme .

Ce prototype que nous avons réalisé peut faire l'objet , dans l'avenir , d'une fabrication en série en utilisant des moyens industriels plus adéquats ( bâti entièrement moulé , organes mécaniques de transmission usinés en sous traitance , etc ... ) .

- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -

- LAMINAGE DES PRODUITS PLATS : LARKE E.C édition 1963
- LAMINAGE A FROID ET CONTROLES NON DESTRUCTIFS : ROCHETTE J.B
- CONCEPTION D'UN LAMINOIR REVERSIBLE DE BANDE A FROID TYPE 1700 :  
( Thèse d'ingeniorat étudiée par : HADJOUT M.O
- PRECIS DE METALLURGIE : Elaboration , structures , propriétés  
et normalisation . AFNOR - NATHAN
- METALLURGIE : CONNAISSANCE DES MATERIAUX : M.FONTANNAZ  
éditions DELTA & SPES
- TECHNOLOGIE EN OUVRAGES METALLIQUES : J.BASSINO - FOUCHER
- GUIDE DU DESSINATEUR INDUSTRIEL : A.CHEVALIER
- MEMENTO DE DESSIN INDUSTRIEL (Tome 2) : LENORMAND & TINEL-FOUCHER



