

10/90

AEX

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT : METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE ET AMELIORATION DE LA
TECHNOLOGIE DU LAMINAGE DES RONDS.

Proposé par :

DO NANG TIEN

Etudié par :

M^{ed} BOUDRIES

Dirigé par :

DO NANG TIEN



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنَافِعُ
لِلنَّاسِ ...

ET NOUS AVONS FAIT DESCENDRE LE FER, OU
SE TROUVE UNE DURE RIGUEUR AUSSI BIEN
QUE LES AVANTAGES POUR LES GENS

AND WE SENT DOWN IRON, IN WHICH IS MIGHTY
WAR, AS WELL AS MANY BENEFETS FOR
MANKINDS

صدره والارض

DEDICACES

II-1 MA MERE BIEN AIMEE

II-2 LA MEMOIRE DE MON PERE

II-3 MES CHERS FRERES ET SOEURS

II-4 MES BEAUX FRERES ET BELLES SOEURS

II-5 TOUTE MA FAMILLE ET TOUS MES AMIS

III-1 DEDIE CE TRAVAIL.

M. BOUDRIES.



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

J'exprime ma profonde gratitude à monsieur Do Mang Tien mon promoteur et enseignant qui ma dirigé et tant bien suivi durant mon travail.

Ainsi qu'il me soit permis, en cette circonstance, de remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et en particulier mes professeurs du département METALLURGIE, sans oublier notre secrétaire.

Mes remerciements vont également:aux personnes du service formation ainsi que celles du service LFR et ACO₂ au complexe d'El hadjar.

Première partie

ETUDE THEORIQUE DU LAMINAGE DES PRODUITS RONDS

CHAPITRE I: INTRODUCTION

I-1. IMPORTANCE DU LAMINAGE DES RONDS.....	I
I-2. OBJET DU PROJET.....	I

CHAPITRE 2: LAMINOIRS

2-1. PORTRAIT D'UN LAMINOIR.....	2
2-2. CONDITIONS QUE DOIT REMPLIR UN LAMINOIR.....	5
2-3. TYPES DE LAMINOIRS.....	7
2-4. TYPES DE CAGES.....	7
2-5. DISPOSITION DES CAGES.....	10
2-6. LAMINOIR A PROFILES.....	12
2-7. TYPES DE CANNELURES.....	16

CHAPITRE 3: LINGOTS, DEMI-PRODUITS, RONDS

3-1. ELABORATION DE L'ACIER.....	29
3-2. LINGOTS ET DEMI-PRODUITS.....	45
3-3. CLASSEMENT DES PRODUITS LAMINES.....	46
3-4. LES PROFILES RONDS.....	47

CHAPITRE 4: DEFORMATION LORS DU LAMINAGE

4-1. MECANISMES DE DEFORMATION.....	49
4-2. PARAMETRES PRINCIPAUX DE DEFORMATION.....	56
4-3. ASPECTS METALLURGIQUES DU LAMINAGE A CHAUD.....	64

CHAPITRE 5: CHAUFFAGE DU METAL

5-1. INTERVALLE THERMIQUE DU TRAVAIL DES ACIERS PAR DEFORMATION.....	69
5-2. CHAUFFAGE DES LINGOTS ET DEMI-PRODUITS.....	70

Deuxième partie

AMELIORATION DE LA TECHNOLOGIE DU LAMINAGE DES RONDS

CHAPITRE 6: ELABORATION DE LA TECHNOLOGIE AVANTAGEUSE

6-1. ATELIE ACTUEL.....	72
6-2. CHOIX DES GAMMES DE CANNELURES.....	75
6-3. CALCUL DES VITESSES DE LAMINAGE.....	97

6-4. CALCUL DES PUISSANCES DE LAMINAGE	I03
6-5. OPTIMISATION DE LA CHAINE DE LAMINAGE	I08
6-6. CALCUL D'UNE GAMME DE CANNELURES POUR PETITS RONDS.	I20
CONCLUSION	I28

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PREMIERE PARTIE

ETUDE THEORIQUE DU LAMINAGE DES
R O N D S

CHAPITRE I

Introduction

I-1. IMPORTANCE DU LAMINAGE DES RONDS.

Le laminage à chaud est une technique très puissante de mise en forme et dont les applications sont nombreuses. Environ 98 % de l'acier élaboré subit à un stade ou à un autre de sa transformation une opération de laminage.

Le laminage à chaud a donc une position importante par rapport à d'autres procédés de mise en forme et ne cède le pas que pour des applications particulières qui relèvent d'autres techniques de mise en forme telles que forgeage, filage etc... De plus, il n'est pas lié à un matériau métallique donné et présente des applications aussi bien en siderrurgie que dans les industries des matériaux non ferreux (Aluminium, zinc, plomb, etc ..).

Dans notre pays, le laminage fait l'objet d'un point de départ d'une industrie siderrurgique qui doit composer largement l'inconvénient que constitue le coût d'investissements. Les arguments en faveur de la filière des produits ronds sont nombreux et doivent parvenir à ce but et se manifester dans le maximum de secteurs. En effet, les produits ronds sont partout présents; les ronds à béton font partie prenante de l'entreprise de génie civil, le fil machine présente des applications nombreuses et variées (ressorts, électrodes, trombones etc...). La satisfaction des besoins du pays en ces produits constitue un pas vers le développement économique.

I-2. OBJET DU PROJET.

En partant d'un atelier existant (complexe d'El hadjar), nous étudions les paramètres dimensionnels, les paramètres dynamiques (vitesse de laminage) et les paramètres énergétiques (puissance de laminage) d'une gamme de cannelures de dégrossissage rectangulaires et d'une gamme de semi-finition ovale-ronde pour améliorer la technologie de laminage des profilés ronds.

CHAPITRE 2

Laminoirs

2-I. PORTRAIT D'UN LAMINOIR:

Les ensembles principaux d'un laminoir sont:

- Une ou plusieurs cages de laminoirs;
- le moteur;
- la cage à pignons;
- les pièces d'accouplement reliant les ensembles.

Cage de laminoirs: C'est un bâti en fonte ou en acier coulé comportant quatre montants disposés de façon à recevoir les cylindres de travail dans un même plan vertical. Les cylindres sont reliés à la cage par des pièces appelées empoises recevant elles-mêmes les coussinets. Ces derniers assurent le glissement des tourillons des cylindres au cours de leur rotation. Ils sont parfois remplacés par des roulements.

Attaque des cylindres: L'attaque des cylindres se fait avec un moteur par l'intermédiaire d'une cage à pignons.

Allonges: Elles relient les cylindres à la cage à pignons.

Auxiliaires de manutention: Ils comportent les rouleaux pour amener et évacuer le matériel, les règles de guidage et les dispositifs de retournement.

Cylindre de travail: C'est l'élément de base du laminoir. Il assure la réduction du métal et lui donne la forme souhaitée. Il est exécuté en fonte ou en acier. Il comprend les éléments suivants: la table (1) qui est en contact direct avec le métal, celle-ci est lisse pour le laminage des plats, et dotée de cannelures pour le laminage des profilés. Les tourillons (2) qui se trouvent des deux côtés de la table et qui reposent sur les coussinets. Les trèfles (3) qui rattachent le cylindre à l'arbre.

La robustesse du cylindre est le rapport entre la longueur de la table au diamètre de celle-ci. Ce coefficient conditionne la gamme de profils laminables, ainsi les cylindres ayant ce rapport grand (2,7 à 3) laminent à diamètre égal des profils plus petits que ceux l'ayant plus petit (2 à 2,5).

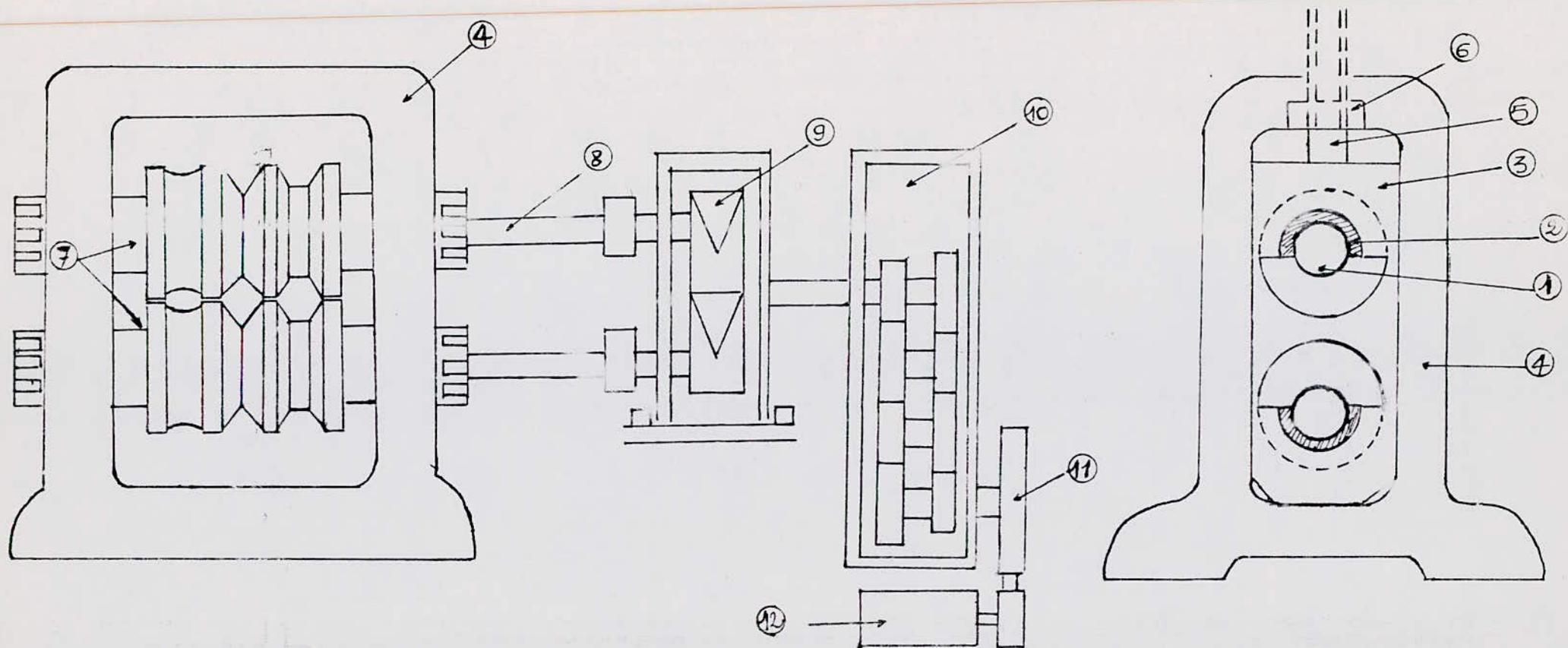


Fig. 1. Cage de laminoir.

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1 - tourillon | 10 - reducteur |
| 2 - Palier | 11 - transmission par courroie |
| 3 - Empoise | 12 - moteur électrique. |
| 4 - Montant de cage | |
| 5 - Vis de serrage | |
| 6 - ecrou | |
| 7 - cylindre de travail | |
| 8 - allonge | |
| 9 - cage à pignon | |

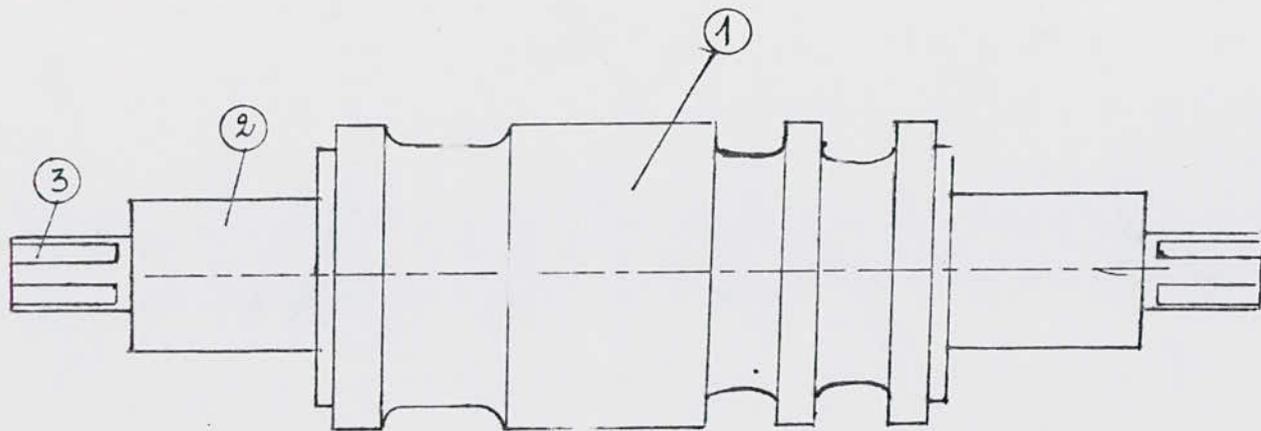
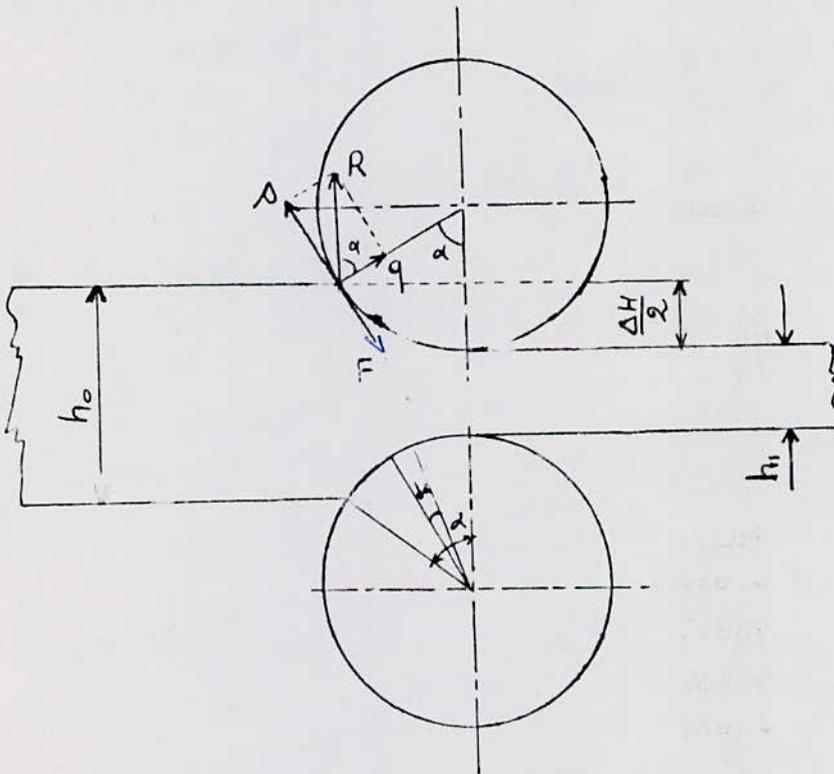


Fig. 2. Cylindre de travail.

2-2. CONDITIONS QUE DOIT REMPLIR UN LAMINOIR:

Considérons le laminoir le plus simple c'est à dire celui qui est constitué de deux cylindres lisses sans cannelures. Supposant pour simplifier que l'élargissement est négligeable. Cette hypothèse est à peu près exacte dans le cas du laminage d'un lingot.

Conditions théoriques d'engagement et d'entraînement de la barre dans les cylindres: Considérons le schéma suivant:



L'effort R sur les cylindres se décompose en:

- Une composante radiale q passant par l'axe et est reportée enfin sur les tourillons;
- une composante tangentielle s qui s'oppose à la force d'entraînement du cylindre et qui engendre une force de frottement F.

$$F = f \cdot q$$

$$s = q \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Pour qu'il y ait engagement il faut que $F \geq s$ c'est à dire $f \cdot q \geq q \cdot \operatorname{tg} \alpha$ d'où $f \geq \operatorname{tg} \alpha$ et enfin $f \geq \alpha$.

L'angle de frottement doit être supérieur à l'angle de laminage. Cependant si l'angle de laminage est supérieur

de laminage. Cependant si l'angle de laminage est supérieur à l'angle de frottement, on peut encore engager la barre à condition de la pousser entre les cylindres.

Lorsque l'emprise est faite, il faut que l'entraînement se poursuive. Soit l'élément de surface $ds = r d\alpha$ de contact cylindre-métal. Soit u la force radiale unitaire. La force tangentielle est $v = f \cdot u \cdot r \cdot d\alpha$.

Il faut donc réaliser:

$$\int_0^\alpha f \cdot u \cdot r \cos \alpha \, d\alpha - \int_0^\alpha u \cdot r \cdot \sin \alpha \, d\alpha > 0 \quad \text{qui aboutit à l'inéquation } f > \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right).$$

Lorsque l'élargissement n'est pas négligeable, ces conclusions restent valables.

Réduction maximale admissible: On voit sur la figure que:

$$\frac{\Delta H}{2} = R - R \cdot \cos \alpha$$

$$\Delta H = 2R (1 - \cos \alpha)$$

A l'équilibre on a : $f = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha \iff \sin \alpha = f \cdot \cos \alpha$. En élevant cette relation au carré on aura: $\sin^2 \alpha = f^2 \cos^2 \alpha$

Or on a $\cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \alpha$, en remplaçant on aura:

$$1 - \cos^2 \alpha = f^2 \cos^2 \alpha \text{ d'où } \cos \alpha = \sqrt{\frac{1}{1+f^2}}$$

$$\text{Enfin on a : } \Delta H = 2R \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1+f^2}} \right).$$

Le maximum de réduction admissible est donc directement proportionnel au diamètre des cylindres et croit avec le coefficient de frottement. Comme ce dernier varie en sens inverse de la vitesse circonférentielle des cylindres celle-ci influe également sur la réduction maximale.

De tout ce qui précède on déduit que:

Les fortes réductions seront réalisées sur des cylindres de gros diamètre à surface rugueuse et tournant lentement.

La poursuite du dégrossissage et du profilage demandant des réductions de plus en plus faibles seront effectués sur des cylindres de plus en plus petits. De plus la vitesse de rotation des cylindres pourra aller en augmentant au fur et à mesure de la réduction de la section de la barre.

2-3. TYPES DE LAMINOIRS: Il existe deux grandes classes de laminoirs.

- Laminoirs primaires ou à demi-produits;
- laminoirs finisseurs.

Laminoirs primaires: Ils ont pour but de réduire la section du lingot et d'allonger ce dernier. On en distingue plusieurs types:

Blooming: C'est un duo réversible à levée variable de diamètre allant de 700 à 1350 mm, destinés à produire des blooms de section carrée $120 \times 120 \text{ mm}^2$.

Slabing: Ce même blooming développé pour le laminage des larges lames de section rectangulaire jusqu'à $1,8 \times 0,3 \text{ m}^2$.

Train à billettes: Il transforme les blooms en billettes

Train à largets: Il transforme les blooms en largets

Laminoirs finisseurs: Parmi eux, ceux dont la table est lisse sont destinés au laminage des tôles, tandis que ceux dont la table comporte des cannelures sont destinés au laminage des barres rondes, carrées, hexagonales, des profilés divers: en L, U, ...

2-4. TYPES DE CAGES:

La classification qui suit est faite selon le nombre et la disposition des cylindres.

Duo: Ce^{sont} des cages à deux cylindres à axes horizontaux. On en distingue:

-Duo ordinaire: Le sens de rotation des cylindres est constant;

-Duo réversible: Les cylindres tournent tantôt dans un sens tantôt dans l'autre.

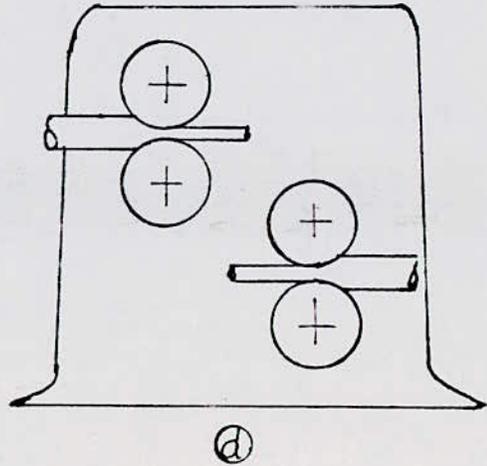
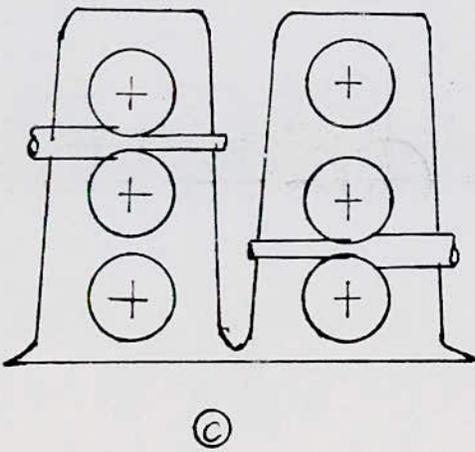
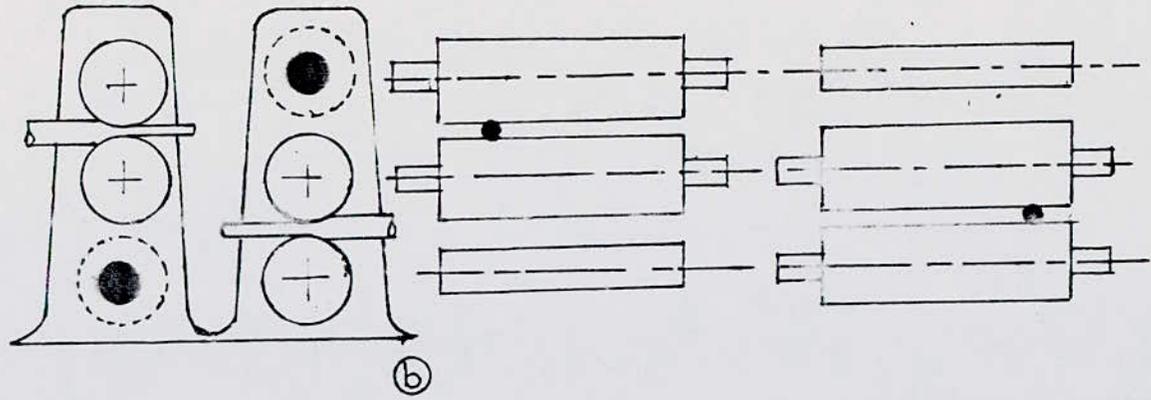
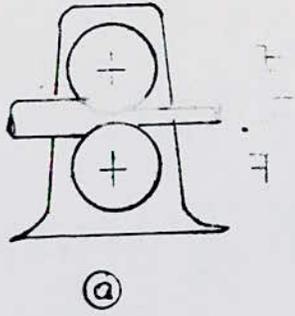
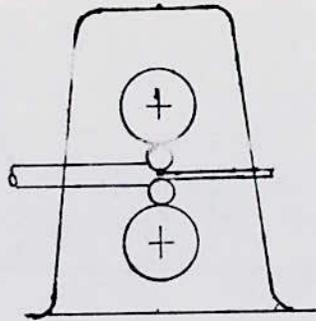
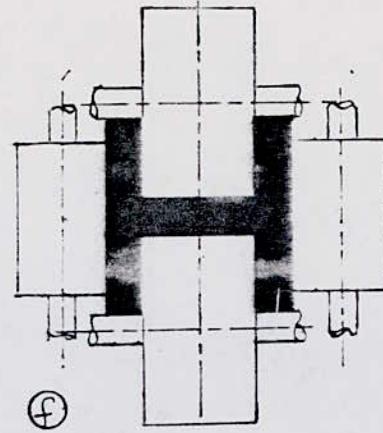


Fig 3a

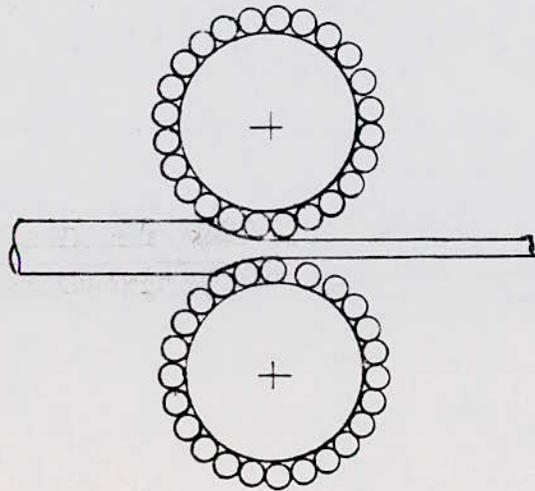
-8-



e)



f)



g)

Fig. 3 Différents types de cages.

- a)- Duo
- b)- Duo alterné
- c)- Trio
- d)- Double duo
- e)- Quarto
- f)- Cage universelle
- g)- Laminor planétaire.

Trio:Cage à trois cylindres horizontaux placés dans un même plan vertical.

Double duo:Elle comprend deux duos superposés dans une même cage mais dans deux plans différents et parallèles .

Duos alternés:Cage contenant deux cylindres et un troisième qui constitue l'arbre de transmission.

Quarto:Il comprend dans le même plan deux cylindres de travail de faible diamètre s'appuyant sur deux autres de diamètre supérieur.Ilest destiné uniquement au laminage des tôles.

Cage universelle:Elle comprend quatre cylindres,deux horizontaux et deux verticaux.Ils sont destinés au laminage des poutrelles et des larges plats.

Laminoir planétaire:Il comporte une série de petits cylindres de travail disposés autour des cylindres d'appui montés en duo et destinés également au laminage des tôles .

2-5. DISPOSITION DES CAGES:

Tous les laminoirs se composent d'une ou de plusieurs cages citées ci-dessus.S'ils contiennent plusieurs cages , on les désigne suivant la disposition de ces dernières par train ouvert,train continu.

Train ouvert:c'est un ensemble de cages en ligne sur un même axe ou sur deux axes parallèles très voisins.Un cas particulier est le train zigzag.

Train continu:Il a toute ses cages disposées l'une derriere l'autre.Si le produit est en prise dans toute les cages à la fois,c'est alors un pur continu.Si le produit est en prise successivement dans chaque cage,c'est alors un semi-continu.

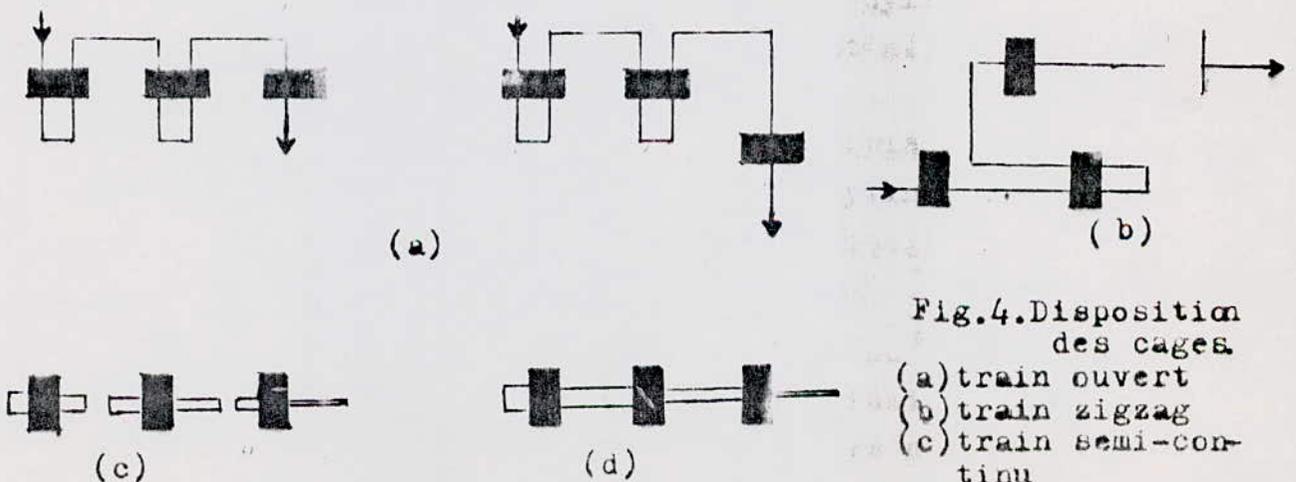


Fig.4.Disposition des cages
 (a) train ouvert
 (b) train zigzag
 (c) train semi-continu
 (d) train continu .

Marcne du processus sur le train:

Pendant le laminage continu, le métal se trouve simultanément dans plusieurs ou dans toutes les cages de travail.

Suivant la condition de la constance du volume par seconde du métal à laminier dans chaque cage de travail, il ya l'équation suivante:

$$V_1 \cdot F_1 (I + A_1) = V_2 \cdot F_2 (I + A_2) = \dots = V_n \cdot F_n (I + A_n) \\ = \text{const.}$$

$V_{1,2,n}$ - Vitesses de laminage dans chaque cage

$F_{1,2,n}$ - Séction transversale du métal à laminier dans chaque cage

$I, 2, n$ - Indice de chaque cage.

L'observation exacte de cette equation permet d'effectuer le processus de laminage sans traction ni formation de boucle du metal à laminier.

Pourtant à cause de la variation des conditions de laminage à savoir température, frottements, usure, effort de laminage..., l'exécution de la constance du volume par seconde du métal à laminier est très difficile. C'est la raison pour laquelle la première équation devient:

$$F_1 \cdot V_1 = V_2 \cdot F_2 = \dots = V_n \cdot F_n = \text{const.}$$

Cette formule nous permet de calculer la vitesse du produit après chaque cage et de la la vitesse de rotation des cylindres de travail de chaque cage et ce par la formule:

$$v = \frac{\pi \cdot D_t \cdot N}{60}$$

C étant la constante de laminage. Elle se détermine à partir de la vitesse de la dernière cage, du diamètre des cylindres de la dernière cage et de la section du produit sortant de dernière cage.

2-6. LAMINOIRS A PROFILÉS: Ils sont destinés à la production des profilés divers:Ronds, carrés, cornières, rails etc...

Selon les dimensions des profils laminés, les diamètres des cylindres vont de 250 à 750 mm , et de là on distingue les laminoirs à gros profilés, les laminoirs à profilés moyens et les laminoirs à petits fers.

Suivant que le produit subit une ou plusieurs passes de laminage dans une même cage, on distingue différents types de dispositions de ces dernières.

La disposition en train ouvert est la plus simple et la moins onéreuse. Les cages sont des duos en cas de laminage des gros profilés (rails, poutrelles...) et sont des trios ou des doubles duos dans le cas du laminage des profilés moyens ou fins (cornières, ronds ...).

Ce type de disposition présente un grand inconvénient qui réside dans le fait que la vitesse de laminage est la même dans toutes les cages. Cet inconvénient est éliminé par les trains continus à profilés où les cages sont disposées l'une derrière l'autre. De cette façon la barre peut être laminée dans plusieurs ou dans toutes les cages simultanément ce qui permet d'augmenter la vitesse de rotation de chacune des cages proportionnellement à la réduction de section de la barre, et d'automatiser complètement les opérations de laminage.

Train combiné à profilés du complexe d'Elhadjar: C'est un train continu qui possède 50 cages réparties de la façon suivante:

- Un Groupe dégrossisseur :8 cages de travail;
- un premier groupe intermédiaire:6 cages de travail;
- deux deuxième groupes intermédiaire:4 cages;
- quatre groupes finisseurs-8 paires de galets chacun;

Toutes les cages sont du type duo, Leur construction est identique. Parmi ces cages on distingue 3 cages (580×800) du groupe dégrossisseur qui sont fixes et toutes les autres (480×800, 380×630 et 320×500) sont mobiles.

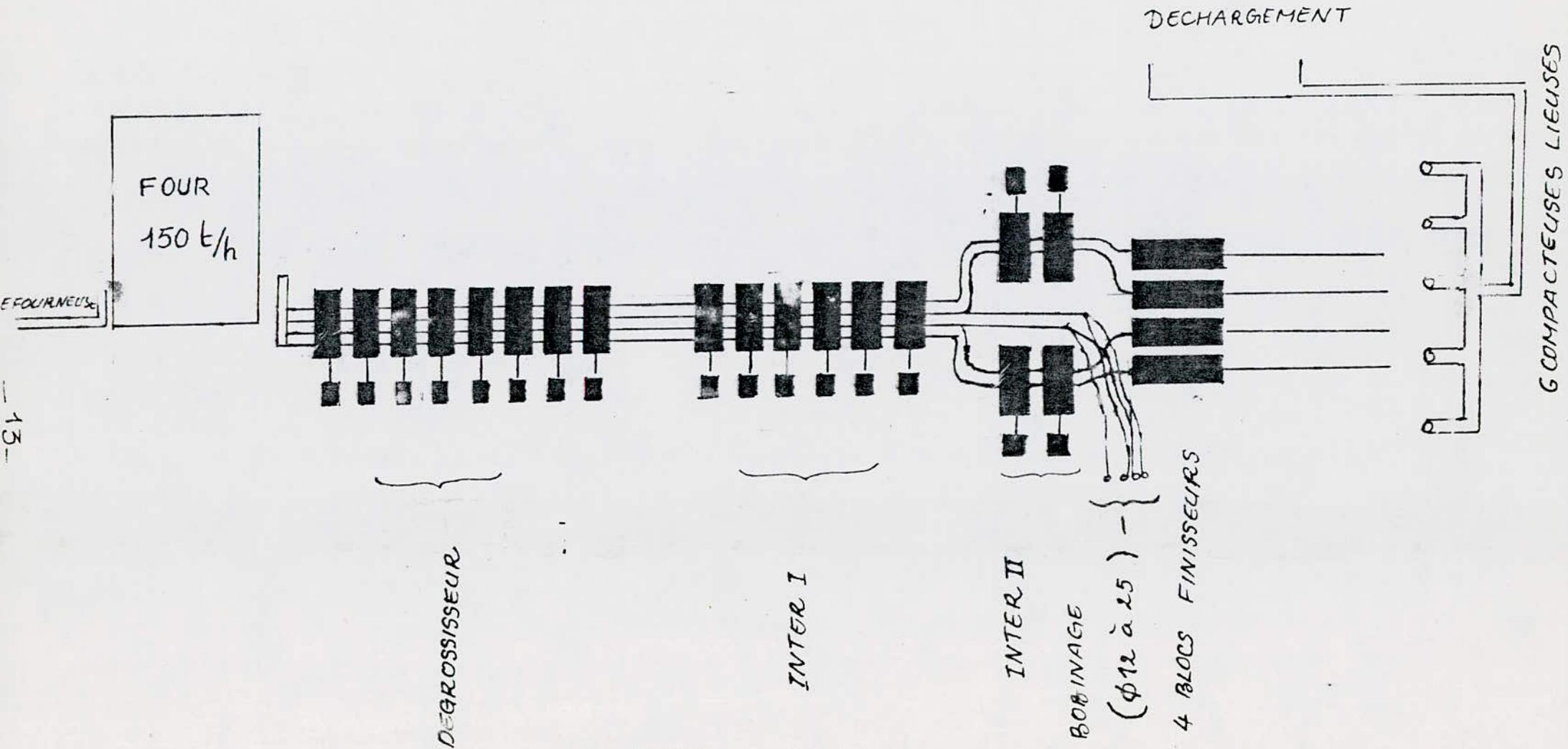


Fig. 5. Train combiné à fil et rond
du complexe d'El Hadjar.

Le train considéré est un train à quatre veines de laminage.

Le laminage du fil machine et du rond de 5,5 à 13 mm de diamètre s'effectue en 18 à 24 passes à 4 veines du groupe dégrossisseur et du premier groupe intermédiaire, à 2 veines du deuxième groupe intermédiaire et à une veine du groupe finisseur. Le laminage du rond de diamètre 14 à 25 mm se fait en 16 passes à 2 veines du groupe dégrossisseur et du premier groupe intermédiaire et en une veine du deuxième groupe intermédiaire.

Argumentation du choix du type de train et sa productivité:

Si nous prenons le cas concret de la SNS, on sait que d'après l'extension du complexe d'El hadjar, celui-ci sera en mesure de fournir 2000000 de tonnes/an d'acier. Sur ces 2000000t/an une capacité de 560000t/an sera destinée au train à fil et rond du complexe.

Pourquoi une capacité de 560000t/an d'acier?

Cela peut être expliqué par un recensement effectué au près des clients utilisant le fil machine et le rond.

Ce recensement avait pour but de déterminer et de savoir à quel point peut-on définir la capacité de production de l'atelier à fil et rond. Citons quelques clients utilisant ces produits:

-Treillis soudés(Régaia SNS) :14000 t/an fil en couronne;

-Treillis soudés(Oran SNS):8000 t/an fil en couronne;

-Treillis soudés(Annaba SNS):14000 t/an fil en couronne;

-Tréfilé galvanisé(El eulma):13900t/an fil en couronne;

-Tréfilé recuit(El eulma):7450t/an fil en couronne;

-Fil pour électrodes(Courbin Sig):4000t/an fil en couronne.

Il existe d'autres clients qu'on ne cite pas ici, utilisant le fil machine afin de le transformer en produit fini.

Pour revenir au recensement, ce dernier a prévu une capacité de l'ordre de 350000t/an de fil machine pour satisfaire

toutes les demandes.

Maintenant expliquons pourquoi un train combiné c'est à dire produisant en même temps du fil machine et rond.

Pour un atelier à fil et ronds comme celui du complexe d'El hadjar, on voit bien que 350000t/an peuvent être obtenues sans pleinement utiliser le temps d'exploitation du train (il faut préciser que le temps brut annuel d'exploitation du train est de 5700 heures). D'autre part on a cité que 560000t d'acier sont destinées au train c'est pourquoi la différence entre ces chiffres sera destinée à produire le rond sur le même train.

Toutes ces données nous mènent donc à choisir un train combiné pour le laminage du fil et rond.

Sa capacité de production sera au juste de 540000t/an.

En effet sur les 560000t de matière première, il faut compter les pertes de métal au cours de l'obtention du produit fini. Ces pertes sont évaluées à 20000 tonnes de métal par an.

Choix de l'assortiment du train:

Comme la production du train ayant été prise égale à 540000t/an, le projet prévoit un programme de production qui est le suivant:

-180000t/an de fil machine de diamètre 5,5 à 12 mm en couronnes.

-54000t/an de fil et rond de diamètre 6 à 14 mm en couronne.

-306000t/an de fil et de diamètre 6 à 25 mm en barre.

Plus précisément on va donner le programme de production des différents diamètres, avec capacité horraire et taux d'exploitation du train:

Produits laminés	Production moyenne		Taux d'exploitation h/an
	t/h	t/an	
fil machine Ø5,5 mm	88	70000	795
fil et rond Ø 6 mm	98	96000	980
// // Ø 8 mm	104	70000	670
// // Ø 10 mm	118	60000	500
// // Ø 12 mm	120	73000	600
// // Ø 13 mm	120	26000	215

//	//	∅ 14 mm	94	63000	670
//	//	∅ 20 mm	135	50000	370
//	//	∅ 25 mm	135	32000	240
			total	540000	5040

2-7. TYPES DE CANNELURES:

Le laminage des tôles et des produits plats est assuré par des cylindres à table lisse et légèrement bombée.

Les profilés en acier courant ou spéciaux sont laminés dans ^{des cylindres} dont la table comporte des rainures spéciales exécutées par tournage et qui correspondent à la forme à donner au produit. Ces rainures le long du diamètre du cylindre s'appellent cannelures. Les cannelures des deux cylindres forment l'empreinte reproduisant le tracé du profil désiré.

Le tracé des cannelures a pour but d'effectuer le laminage correct du produit en utilisant le minimum de passages compatibles avec la qualité, et également en réalisant l'engagement sans patinage de la barre (influence sur la production), et enfin il doit rechercher l'usure minimale des cannelures.

On distingue plusieurs types de cannelures selon le produit final à obtenir.

2-7-I. Cannelures dégrossisseuses: Elles ont pour but unique d'allonger et de réduire la section du lingot ou du demi-produit jusqu'à la prise de fer des cannelures finisseuses.

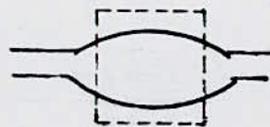
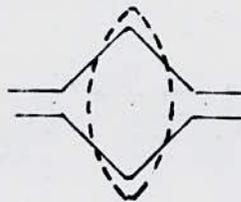
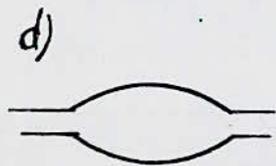
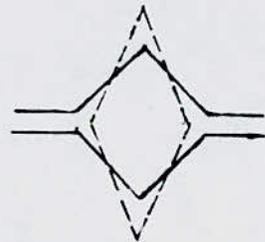
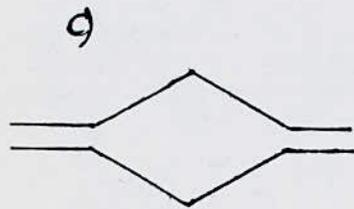
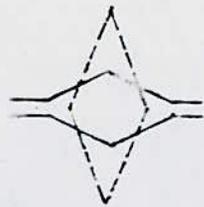
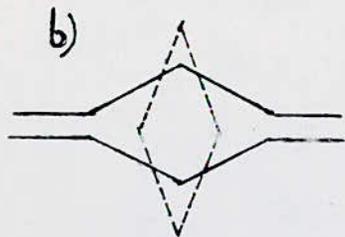
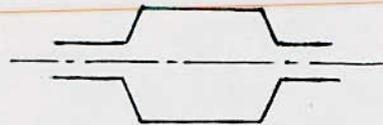
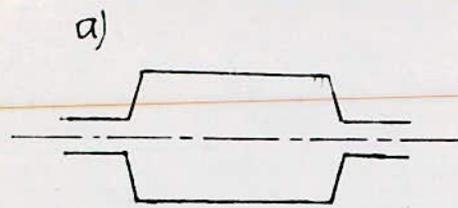
Elles sont de plusieurs types: Rectangulaires, carrées, losange, ovale...

La séquence de dégrossissage s'effectue sur des systèmes de ces cannelures dont on distingue :

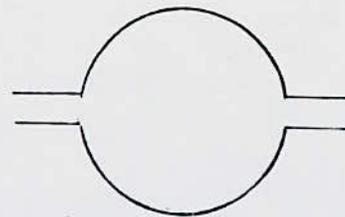
Système de cannelures rectangulaires: Le lingot ou le demi-produit est écrasé dans une première cannelure rectangulaire, puis retourné de 90° et ripé devant la seconde cannelure. Le retournement permet l'écrasement de la barre de ses deux faces.

Le taux de réduction est de 10 à 30 %, l'allongement est de 1,1 à 1,25.

Ce système est employé dans des bloomings et des trains de dégrossissage.



e)



f)

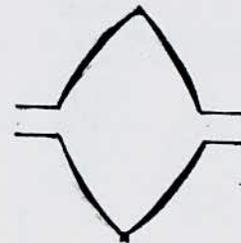


Fig. 6. Gammes de cannelures.
 a)- carré ou quadrangulaire
 b)- losange-losange
 c)- losange-carré
 d)- ovale-carré

e)- cannelure ronde
 f)- cannelure ogivale.

Système losage-carré: Il assure des allongements allant de 1,25 à 1,5. Le produit issu du losange passe après quartier dans le carré. Ce système est utilisé pour la fabrication des carrés et des plats.

Système ovale-carré: C'est le système le plus répandu.

Il permet de réaliser les plus grands allongements: 1,5 à 2,5 et même plus. La forme de l'ovale joue ici un grand rôle pour augmenter les possibilités d'écrasement du carré.

2-7-2. Cannelures finisseuses: Ces cannelures terminent la formation du profil final en tenant compte du retrait du métal. Leurs formes sont très diverses et dépendent des profils à laminier et épousent la forme de ceux-ci.

Les types de cannelures utilisés sur le train combiné d'El hadjar sont les suivants:

- Les 5 premières cages ainsi que la 7^é cage du groupe dégrossisseur utilisent les cannelures rectangulaires tandis que les cages 6 et 8 de ce même groupe utilisent des cannelures carrées.

- Les groupes intermédiaires I et II utilisent le système ovale-ogive.

- Les blocs finisseurs utilisent le système ovale-rond.

2-7-3. Cannelures pour ronds: Il existe plusieurs méthodes pour le laminage du rond; la plus ancienne est la méthode au laminage à la tenaille. C'est la première méthode utilisée en laminage et qui dérivait de l'étampage au pilon ou au martinet. Cette méthode, partant d'un demi-produit de forme carrée ou ogivale (carré à flancs arrondis), consiste en somme à le déformer dans une série de passages à faibles allongements dans des cannelures rondes allant en décroissant.

Un train de laminage à la tenaille est formé de 2 cages. La première comporte une série de cannelures ogivales dont le rapport des diagonales est de l'ordre de 7/8 conduisant d'une cannelure à la suivante à un allongement de $8^2/7^2 = 1,3$. La deuxième cage comporte des cannelures rondes s'étageant en progression arithmétique de raison D/12.

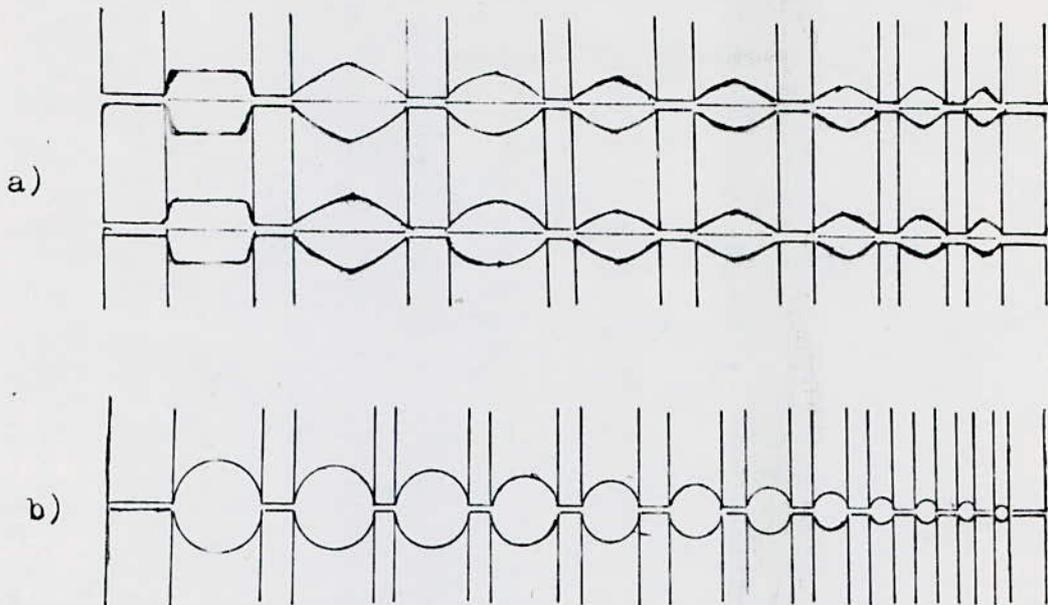


Fig. 7. Laminage à la tenaille.

- a)- Première cage du train
- b)- Deuxième cage du train

Cette méthode ne permettant que le laminage d'une gamme de \varnothing 40 à 150 mm et d'une longueur de 5 à 8 m n'est plus utilisée que dans certaines usines d'aciers spéciaux.

Ces inconvénients concernant le laminage à la tenaille ont conduit les lamineurs à chercher d'autres méthodes permettant le laminage des ronds de petits et moyens diamètres. On se rendit compte très rapidement qu'une section ovale ou elliptique présentée dans une cannelure ronde, grande diagonale verticale était à même de remplir parfaitement la section ronde, mais à condition d'être maintenue, d'être parfaitement guidée, d'où la méthode dite au guide. Cette méthode permet le laminage des ronds de \varnothing de 5 à 550 mm.

Méthodes au guide:

Les différentes méthodes au guide sont représentées dans le schéma de la figure 8.

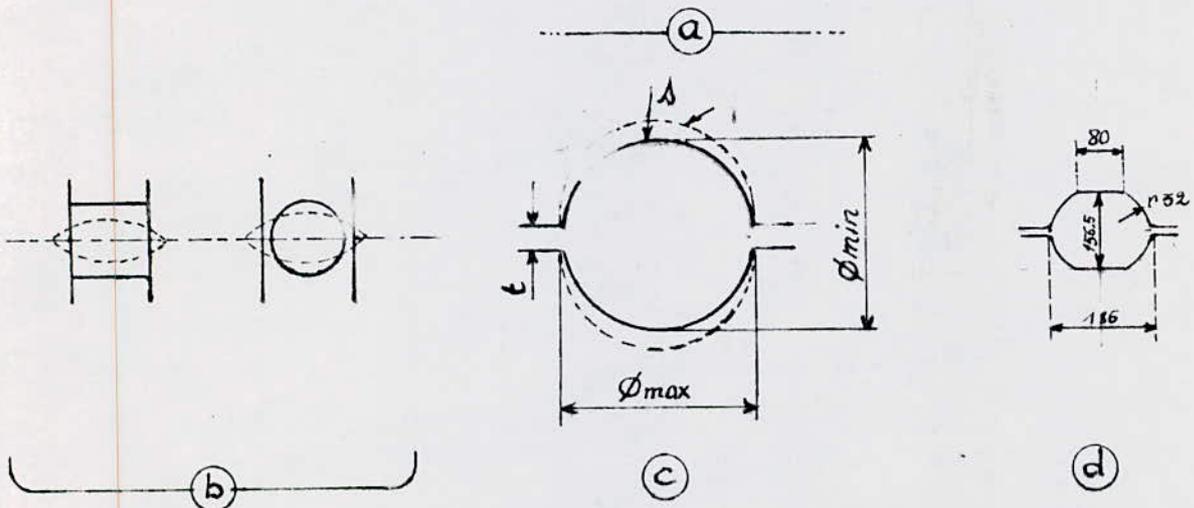
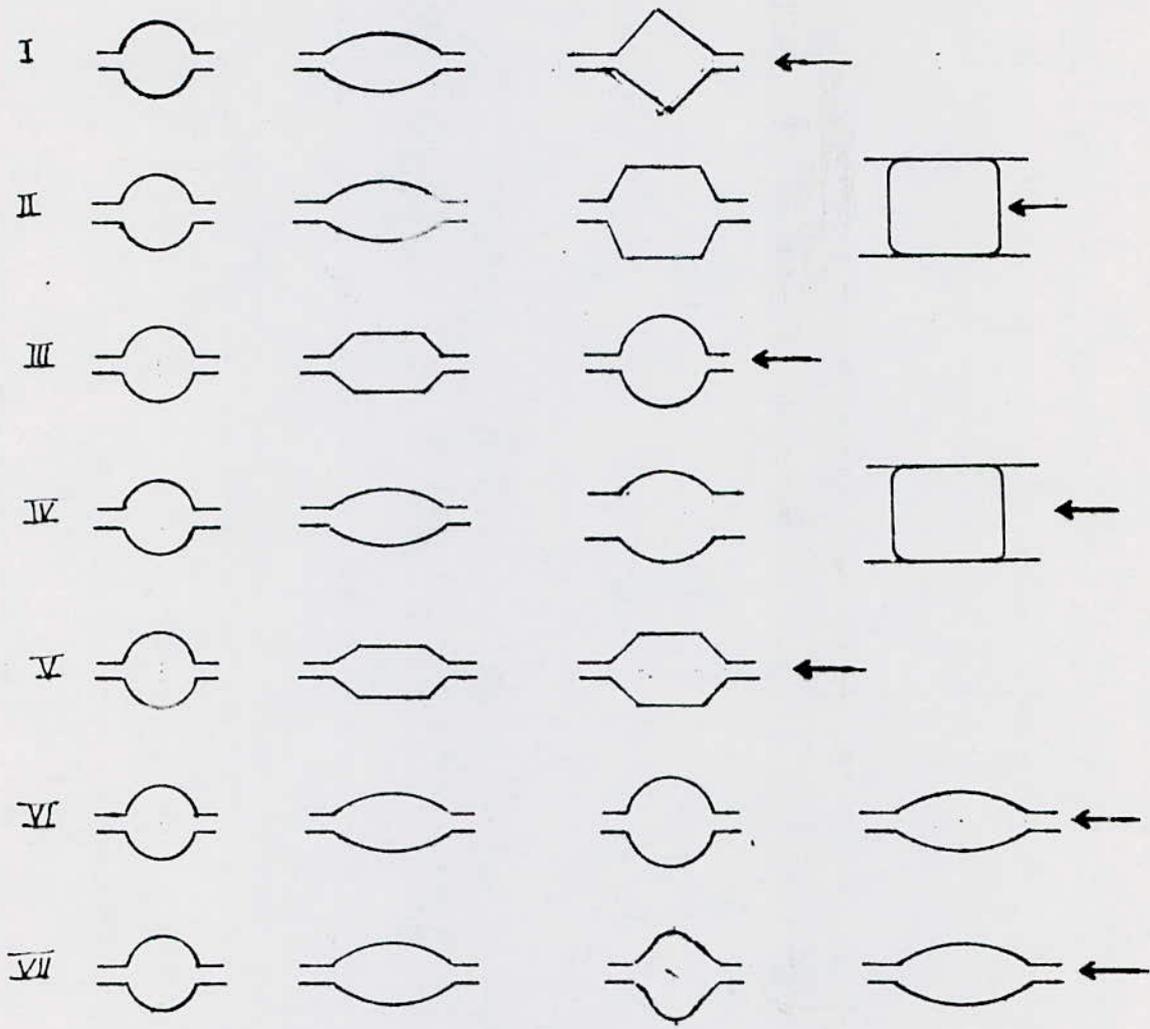
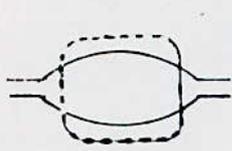
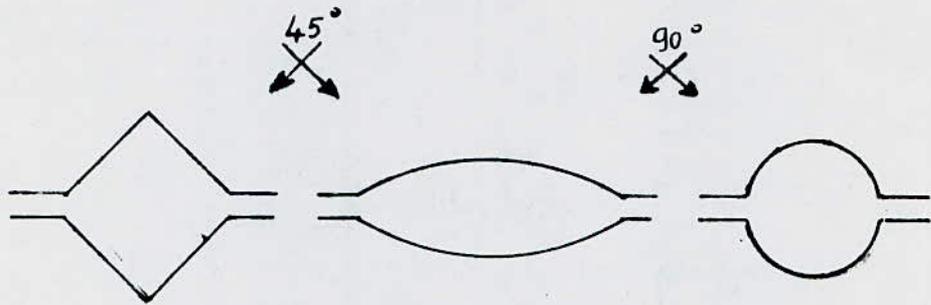
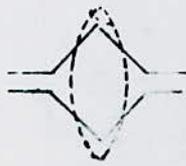


Fig. 8. Laminage des ronds.
 a- Différentes méthodes
 b- Rond au guide, formation de l'ovale: guidage serré au carré préparateur dans l'ovale; guidage avec jeu au rond préparateur dans l'ovale
 c- Rond finisseur maximum-minimum
 d- Ovale plat pour rond de 160

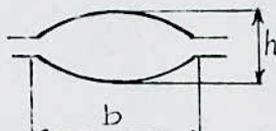
Systeme ovale-carré:



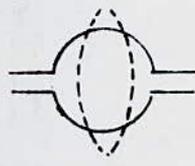
1^{re} paire (ébauche)



2^e paire

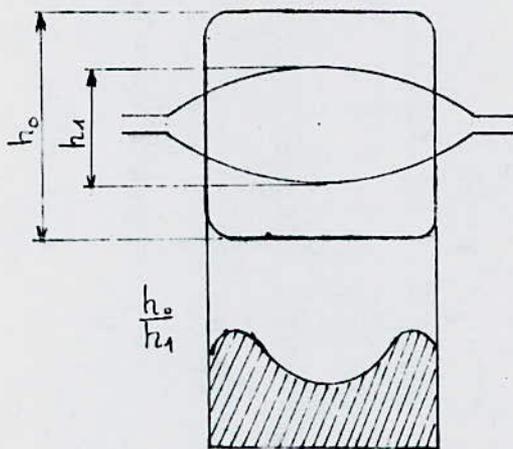


cannelure avant finisseuse



3^e paire, cannelure finisseuse

Répartition des réductions sur la largeur de la cannelure ovale:



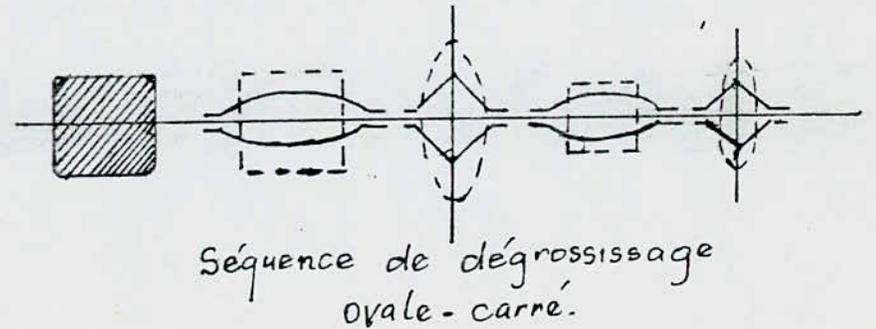
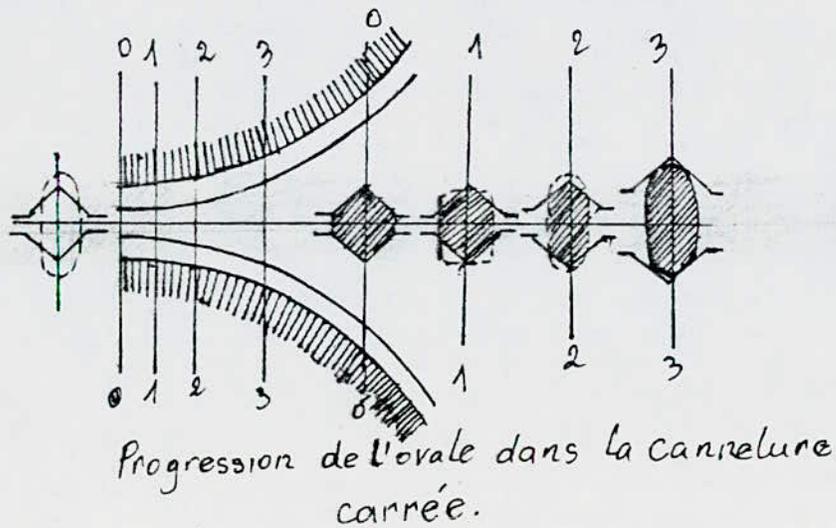
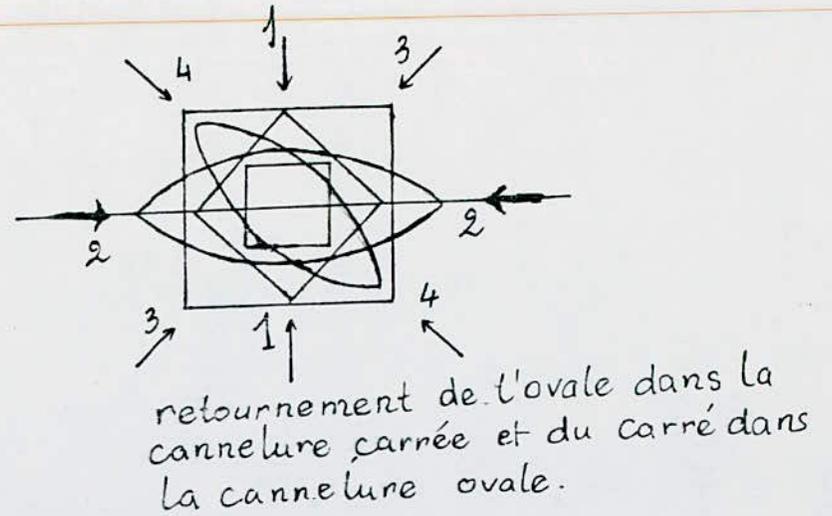
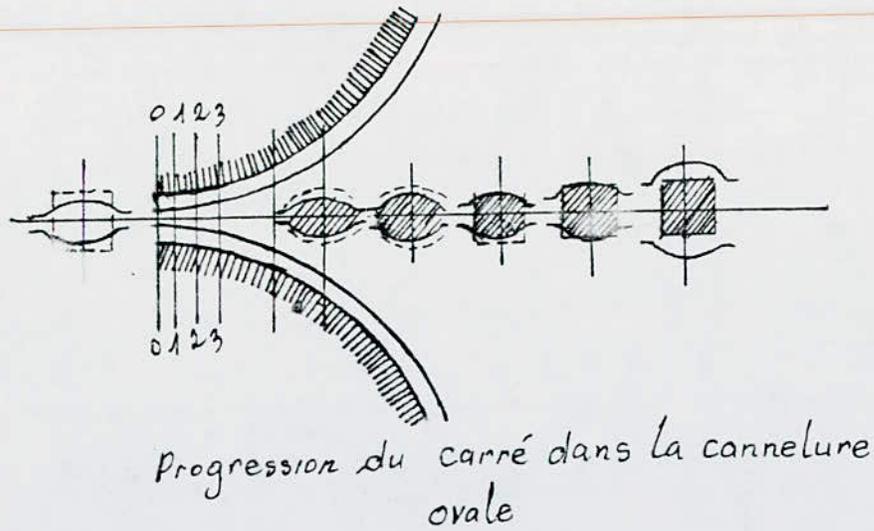


Fig. 10. Système ovale-carré.

Coéfficient de forme de la cannelure et de la barre pour l'ovale:

- ovale ordinaire:

$$C_o = \frac{S_o}{b_I h_I} = 0,33 \left(\frac{m_I}{h_I} + 2 \right)$$

- ovale elliptique:

$$C_{oe} = \frac{S_{oe}}{b_I h_I} = 0,25 = 0,735$$

- ovale plat:

$$C_{op} = \frac{S_{op}}{b_I h_I} = 1 - \frac{h_I}{b_I} (1 - 0,25)$$

Pratiquement $\frac{m_I}{h_I} = 0,1 + 0,3$. Si l'on prend la valeur moyenne $\frac{m_I}{h_I} = 0,2$ on aura: $C_o = 0,735$; pour l'ovale plat, $\frac{h_I}{b_I} = 0,65$

$$C_{op} = 0,85.$$

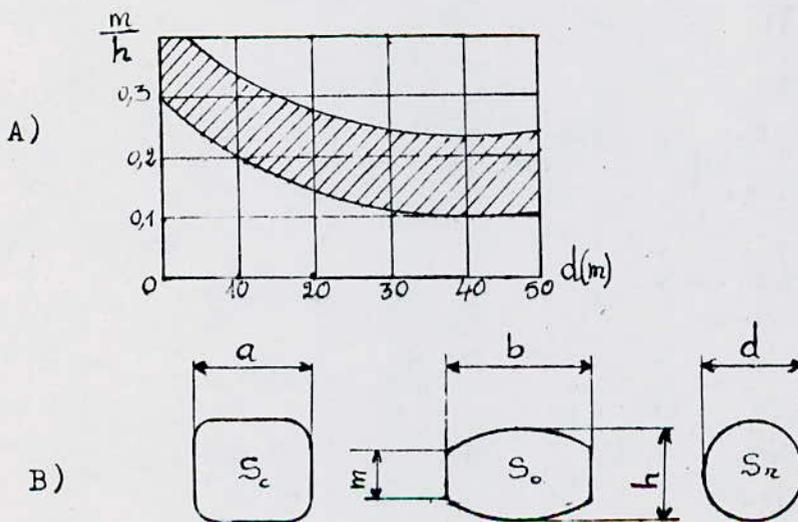


Fig. 11. Schéma du diagramme donnant le rapport m/h en fonction du diamètre du rond final, (A); dimensions du produit laminé pour ses trois dernières passes, (B).

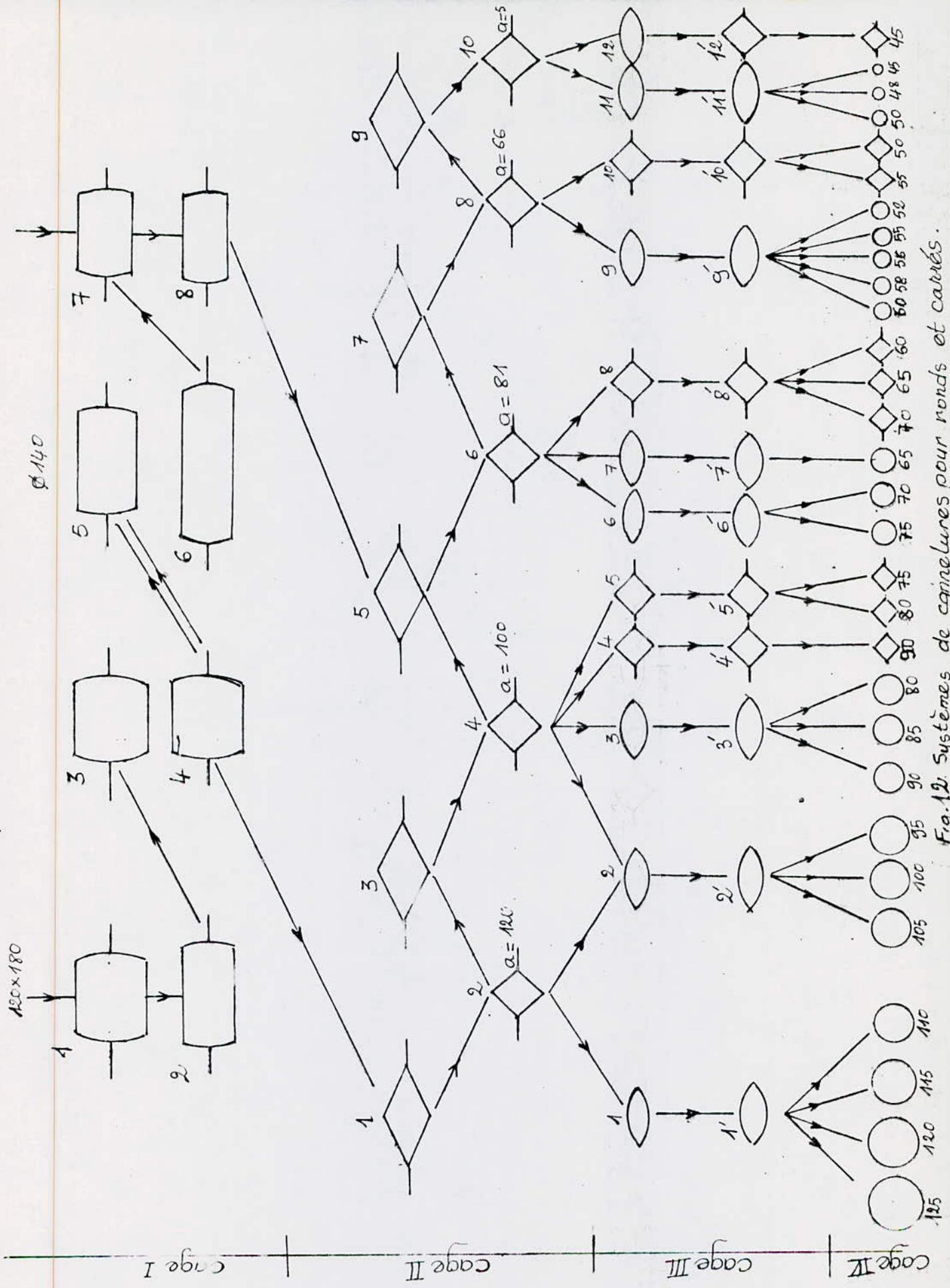


Fig. 12. Systèmes de cannelures pour ronds et carrés.

Dimensions principales

Tableau 1

Colonne cages	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	Ø 180	132x208	164x150	140x150	116x170	99x170	132x174	105x114	—	—	—	—
II	140	120	122x165	100	97,6x149	81	77x118	66	54x95	55	—	—
III	114,5x153	97,5x134,5	112x153,5	98,5x110,5	74,5x100	69x100	69x100	78x116,4	53,5x85	65x94	45x73	62,5x80
IV	125 120 115 100	105 100 95	90 85 80	a = 90	a = 80 a = 75	75 70	65	a = 70 a = 65 a = 60	60 58 56 55	a = 55 a = 50	50 48 45	a = 45
12	404x153	89x134,5	77x120	—	—	—	63x100	58x110	44x85	—	40x73	—

Systèmes de cannelures pour ronds et carrés:

Le métal est laminé dans les cannelures dégrossisseuses (rectangulaires, carrées), puis dans les cannelures intermédiaires (rectangulaires, losanges, ovales), puis dans les cannelures avant-finisseuses (losanges, ovales) et enfin dans les cannelures finisseuses (rondes, carrées), (voir figure 12),

Les dimensions des ovales et des carrés correspondant aux ronds de diamètres 8 à 120 mm sont données par les graphes de la figure 13. La figure 14 donne les dimensions de l'ovale pour les ronds atteignant 250 mm

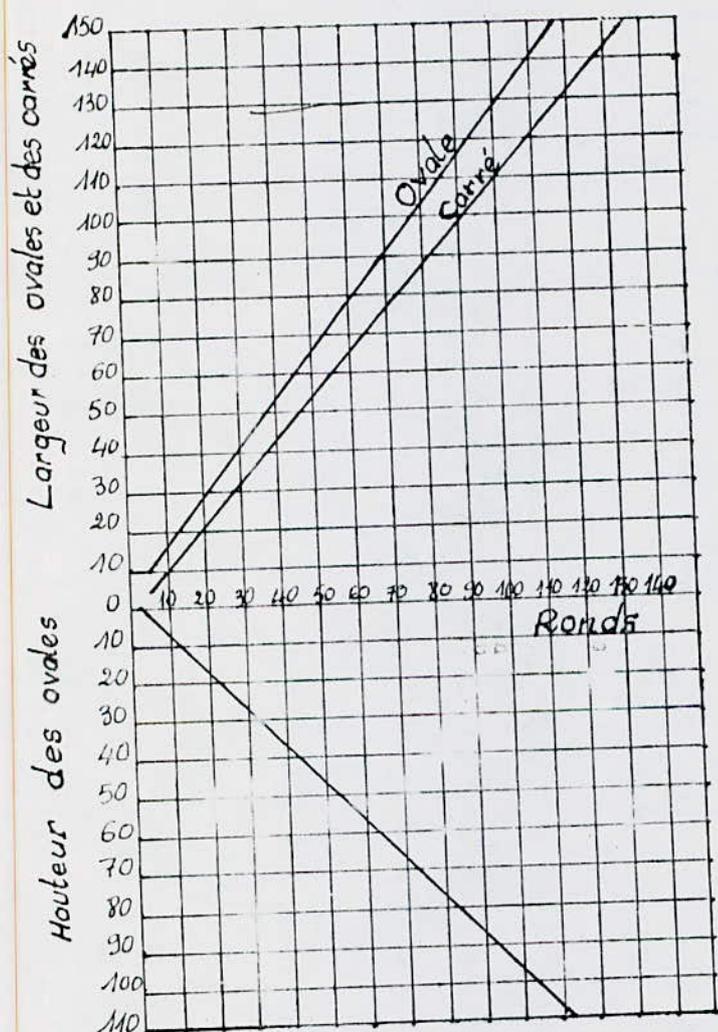


Fig. 13. Dimensions des ovales et des carrés correspondant aux ronds de 8 à 120 mm.

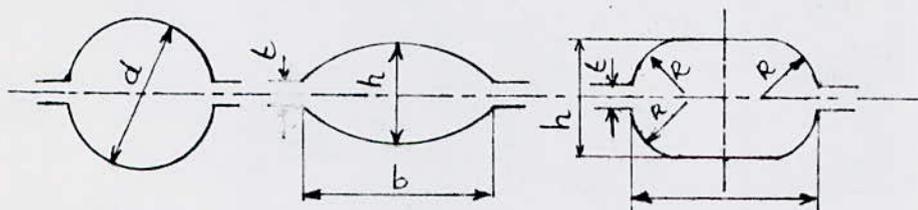
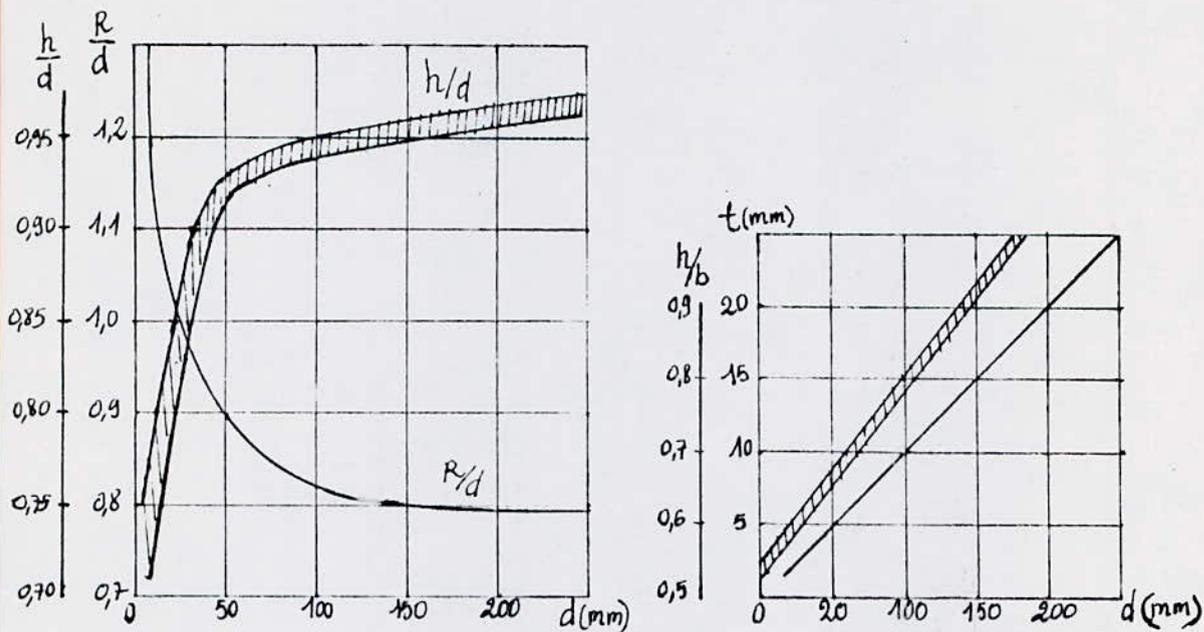


Fig. 14. Variation des dimensions de l'ovale en fonction du rond.

Contrôle des produits ronds: Le système ovale-carré a, outre son avantage d'obtenir les plus grands coefficients d'étirage, certains inconvénients qui sont:

- on ne peut pas appliquer ce système pour les barres de grandes sections;
- l'irrégularité de déformation des barres carrées sur la largeur de la cannelure ovale provoque des défauts de la surface de barre laminée.

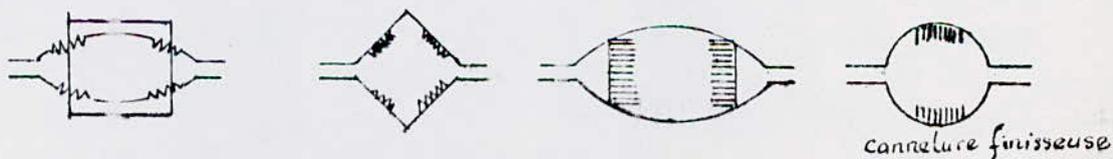


Fig. 15. Formation des rides lors du laminage des ronds.

CHAPITRE 5

Lingots, demi-produits, ronds

3-I. ELABORATION DE L'ACIER:

En résumé, la fabrication de l'acier liquide à partir de minerai comporte 4 opérations.

La première qui produit la fonte par réduction de minerai, se passe aux hauts fourneaux.

Les trois autres se déroulent à l'aciérie et sont: l'affinage, la désoxydation et la mise au point.

3-I-I. Obtention de la fonte: La fonte est élaborée dans le haut fourneau. Les matières premières constituant la charge du HF sont:

Minerai de fer: Le fer se trouvant dans la nature essentiellement sous forme d'oxydes sera extrait par réduction. Les oxydes de fer sont:

.Oxyde magnétique Fe_3O_4

.Oxyde ferrique Fe_2O_3

.Oxyde ferrique hydraté: $2Fe_2O_3, 3H_2O$.

Les ferrailles: ce sont des chutes d'acier récupérées de part et d'autre du domaine de l'industrie sidérurgique.

Le coke: Il permet la fusion de minerai et de sa gangue, puis réduit par son carbone l'oxyde de fer.

Les fondants: Ils permettent de réduire la température de fusion de la gangue et l'éliminent sous forme de laitier.

L'oxygène: Matière indispensable. Il est introduit par l'intermédiaire de l'air à raison de 4 tonnes d'air par tonne de fonte.

Avant d'être chargé, le minerai subit les opérations suivantes:

-une suite de concassage et de criblage destinés à obtenir à partir des blocs (0-200mm), du minerai calibré (8-25 mm) alimentant directement le HF.

-une homogénéisation pour fournir un mélange aussi constant que possible à partir des minerais de diverses origines.

-une agglomération des fines homogénéisées mélangées à du poussier de coke et de castine.

du bain produite par la combustion neutre et sans perte de chaleur de 1% de cet élément.

Affinage à l'oxygène: Ce procédé actuellement le plus répandu, est basé sur l'insufflation d'oxygène pur dans un bain de fonte liquide. On peut ainsi transformer celle-ci en acier liquide, en assurant simultanément l'élimination de C, Si, Mn, P, S et l'élévation de température nécessaire pour passer de la fonte liquide (1250°C en moyenne) à l'acier liquide (1600°C en moyenne). Le réglage de la température finale se fait par introduction de ferrailles à refondre.

Les appareils (convertisseurs) sont des cornues, garnies de réfractaire. Les convertisseurs sont en général immobiles au cours du soufflage et les divers procédés se distinguent par le mode d'insufflation de l'oxygène:

.Insufflation par des tuyères réfractaires placées dans le fond du convertisseur: procédé OBM (oxygen: Boden Maxhütte) et LWS (Loire-wendel-Sidélor).

.Insufflation par le bec de la cornue à l'aide d'une lance métallique refroidie à l'eau: procédé LD (Linz-Donawitz) et son dérivé le procédé OLP (oxygène-lance-poudre) dans lequel de la poudre de chaux est introduite simultanément pour traiter les fontes très phosphoreuses.

Remarque: Une amélioration des procédés à lance consiste à brasser le bain par insufflation de gaz ($\text{CO}_2, \text{O}_2, \text{Ar}, \text{N}_2$) par le fond: procédé LBE (lance-brassage-équilibre), procédé STB (Sumimoto Top and Bottom blowing process).

Procédé Martin: Le procédé Martin ou d'affinage sur sole 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 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.

L'affinage a lieu essentiellement par oxydation.

Acier électrique:

La filière de la refusion des ferrailles utilise un four à sole réfractaire sur laquelle sont placées les matières à refondre. L'énergie thermique est fournie par production d'arcs électriques entre trois électrodes et la charge. Naguère réservé à l'élaboration d'aciers spéciaux, le procédé électrique assure actuellement une part importante du tonnage des aciers courants. Il a, dans ce domaine, définitivement remplacé l'élaboration sur sole au four Martin. Le procédé électrique basique est le plus répandu, il est caractérisé par:

.Une haute température du bain ($\rightarrow 1800^{\circ}\text{C}$) facilement réglable, ce qui facilite la fusion des laitiers très réfractaires et la réduction des oxydes.

.La non-intervention de l'atmosphère du four qui est neutre. Les réactions ont lieu uniquement entre le bain et les additions à l'aide desquelles on peut réaliser un milieu oxydant ou réducteur. On peut en outre réaliser la fusion d'éléments oxydables comme le Cr sans perte par formation d'oxydes.

A la SNS d'El hadjar, l'acier est élaboré dans deux aciéries à oxygène dénommées ACO_1 et ACO_2 . La première produit des brames destinées au laminage des tôles, la seconde produit des billettes pour le laminage au fil et rond.

A l' ACO_2 les différentes opérations d'obtention de l'acier sont les suivantes:

La fonte en provenance du HF a pour composition: C% = 4,3 ; Mn% = 2,5 ; Si% = 1 ; S et P %: très faibles quantités. L'affinage consiste donc à en diminuer la teneur et obtenir à partir d'un bain de fonte liquide un bain d'acier liquide.

L' ACO_2 est dotée de 3 convertisseurs ayant chacun une capacité de 64 tonnes. Deux seulement sont en service le troisième étant en réfection.

Les matières principales du convertisseur sont:

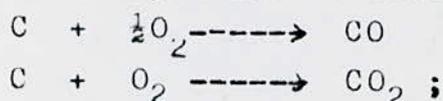
.Fonte d'affinage: La poche tonneau de capacité 240 t déverse dans des poches à fonte recevant chacune 80 à 85 % de la charge totale du convertisseur, le reste sera occupé par la ferraille. La poche à fonte passe au stand de décrassage ^{Pour} enlever la scorie et procéder aux prises de températures et d'échantillons pour analyse chimique.

.Ferrailles:Elles sont chargées selon les exigences suivantes:

/ /	L(mm)	l(mm)	e(mm)
Chutes de brames	1060	600	200
Chutes de billettes	1000	115	115
Ferrailles empactées	600	600	600

Les matières secondaires sont les agents scorifiants , fondants et oxydants qui sont également ajoutés au convertisseur en cas de nécessité.Ces éléments sont: chaux,castine , spath fluor,minerai...

.Soufflage d'oxygène: Chaque convertisseur est équipé de deux lances refroidies à l'eau,disposées à une hauteur bien définie du bain.Au cours du soufflage le silicium brûle à la 4^é minute selon la réaction : $Si + O_2 \rightarrow SiO_2$, en suite vient l'oxydation du carbone selon:



puis l'oxydation du fer et d'autres impuretés.

Dés que la nuance visée est atteinte, on arrête le soufflage et on procède au versement de l'acier dans des poches à acier préalablement réchauffées et au barbotage à l'azote pendant environ 5 mn.

3-1-3. Coulée de l'acier:

Quelle que soit la nuance de l'acier élaboré et en particulier son degré de calage,l'opération de coulée est pratiquement toujours exécutée en deux étapes.

Dans le premier temps,le métal provenant du four ou de la cornue dans lesquels il a été élaboré est versé une poche de coulée.

Dans une deuxième opération,ce métal est coulé dans une lingotière de coulée continue ou dans des lingotières ordinaires pour s'y solidifier sous forme de lingots.

La poche de coulée a un volume suffisant pour recevoir sur garnissage neuf,tout le métal de l'opération et une certaine épaisseur de laitier(10 à 15 mm).

Dans la poche de coulée le métal s'homogénéise, reçoit le plus souvent des additions (en particulier les additions de calmage, de réglage de la grosseur du grain) et se sépare du laitier.

Coulée en lingotière: Les lingotières sont en fonte et leur forme préfigure celle des produits laminés à obtenir: Lingots à section carrée pour les produits longs et à section méplate pour les produits plats. La coulée en lingotière se fait selon deux procédés:

.Coulée en chute: Le métal est versé directement dans la lingotière.

.Coulée en source: L'acier liquide aboutit à plusieurs lingotières par un jet central qui lui-même s'engage dans des chenaux plus étroits. Cette dernière technique donne les produits de meilleur qualité.

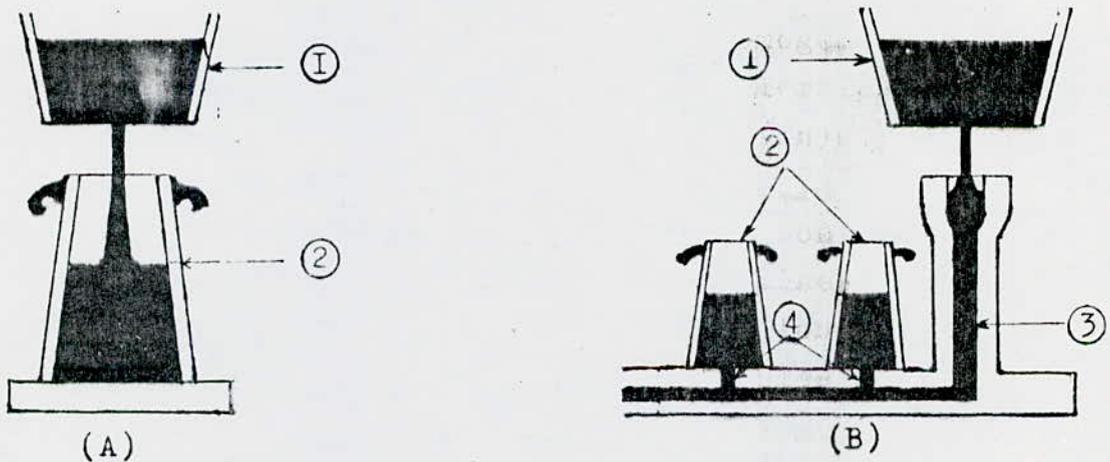


Fig. 16. Coulée en lingotière

(A) - Coulée en chute

(B) - Coulée en source

① - Poche de coulée

② - Lingotières

③ - Chenal principal

④ - Chenaux secondaires

Coulée en continue: Elle consiste à verser de façon régulière et ininterrompue, l'acier liquide dans un récipient sans fond énergiquement refroidi appelé lingotière, à la base duquel on retire également de façon continue, une barre dont le coeur encore liquide achève de se solidifier sous l'action d'un refroidissement secondaire.

Le produit obtenu a ainsi sensiblement la même section que la lingotière dont il forme le fond.

La coulée est dite verticale si l'axe du produit coulé est orienté verticalement.

Les différents éléments dont se compose une machine de coulée continue sont (fig. 17) :

- Un récipient contenant le métal à couler (poche de coulée) (A);
- Un petit récipient régulateur du débit: le panier (B);
- Une lingotière refroidie énergiquement par une intense circulation d'eau (C);
- Une zone de refroidissement secondaire (à l'air ou par arrosage direct à l'eau pulvérisé) (D).
- Un mécanisme extracteur à rouleaux réglant la vitesse de descente du produit coulé (E);
- Un système de tronçonnage (cisaille ou chalumeau oxy-coupeur), éventuellement précédé d'un dispositif de cintrage permettant de ramener la barre à l'horizontal (F).

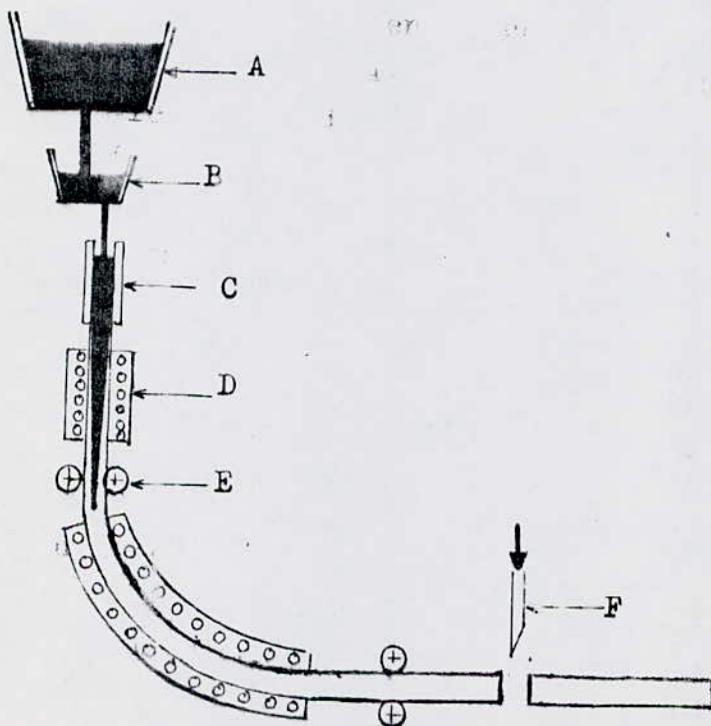


Fig. 17. Machine de coulée continue.

L'ACO₂ est dotée de 3 machines de coulée continue à 4 lignes chacune. Les différentes nuances d'acier qui y sont coulées sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau. 2.

...	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Al
F5	0,06	0,25-0,4	0,10-0,20	0,03	0,03	0,03
F8	0,05-0,10	0,40-0,55	0,10	0,03	0,03	0,03
F10	0,08-0,12	0,30-0,60	0,12-0,25	"	"	"
F15	0,13-0,18	0,45-0,60	0,12-0,25	"	"	"
RB24	0,08-0,15	0,50-0,80	0,12-0,25	0,40	0,40	"
RB40 ^A	0,28-0,32	1,10-1,40	0,15-0,30	"	"	"
RB40 ^B	0,30-0,37	1,20-1,50	0,15-0,30	"	"	"
S ₂ M ₀	0,08-0,12	0,80-1,20	0,08-0,15	"	"	"

Ces nuances, à destination du laminoir à fil et rond sous forme de billettes, serviront pour fabriquer les produits suivant, avec leur destination:

Tableau. 3.

Norme AFNOR	Appellation LFR	Profil ϕ (mm)	Utilisation
FM5	F5	5,5 et 6	Fil machine pour la clouterie de SIG
FM8	F8	5,5 et 6	Fil machine pour électrodes, trombones, agraffes
FM10	F10	5,5 et 6	Fil galvanisé
FM15	F15	5,5 à 12	Treillis soudés
FM40	F40	5,5 à 8	Cables
FM70	F70	5,5 à 8	Cables
FeE24	RB24	6 à 12	Rond à béton
FeE24	RB24	T6 à T12	
FeE40	RB40 ABC	N6 à N25	

Solidification du métal:

L'étape de solidification est capitale pour la qualité du produit fini et l'on sait par expérience qu'il est encore trop fréquent de perdre le bénéfice d'une élaboration soignée du métal par quelques négligences dans ce processus de solidification.

Quand il s'agit d'un corps pur, la solidification s'effectue à température constante avec contraction (ou gonflement) et le phénomène est simple.

Quand l'on a à faire à un alliage, il se complique du phénomène de ségrégation, avec germination et croissance de cristaux de composition variable au sein d'une liqueur mère de composition différente.

Dans le cas de l'acier il se complique encore du fait des réactions secondaires entre les différents éléments présents dans le métal au cours du refroidissement, la plus importante étant la formation d'oxyde de carbone qui provoque le phénomène d'effévescence.

Solidification d'un lingot:

Le métal liquide en contact du fond et parois de la lingotière se refroidit rapidement formant ainsi un sac de métal dans lequel est logé le reste du métal liquide. Cette couche se contracte et se décolle de la lingotière laissant passer une couche d'air entre elle. Ce film de gaz ralentit considérablement les échanges thermiques ultérieurs, de sorte que le refroidissement par le pied du lingot devient prépondérant.

La solidification progresse des parois vers le centre et du pied vers la tête, les premières couches de métal solidifié seront beaucoup plus pures que les zones centrales formées à partir d'une liqueur mère de plus en plus chargée en impuretés: C, P, Mn, S et bulles de gaz. Cette hétérogénéité chimique entre la peau et le cœur et entre la tête et le pied du lingot est la ségrégation majeure. La ségrégation mineure est une hétérogénéité chimique à l'échelle des dendrites. La solidification se faisant autour d'un grand nombre de germes qui se développent en dendrites emprisonnant dans l'espace inter-dendritique un liquide très riche en impu -

retés. Ainsi chaque dendrite se trouve auréolée d'une zone enrichie en éléments d'alliage.

Un autre type de ségrégation est également observé dans certaines parties au bas du lingot. Des cristallites de métal assez pur tombent dans la zone de pied du lingot où ils forment une zone de métal plus pur que ce qui l'entoure. Certaines zones moins pures s'expliquent par l'enveloppement par la liqueur mère d'une soufflure dont le gaz s'est finalement échappé. Cette inversion de l'ordre normal de la ségrégation directe constitue ce que l'on appelle la ségrégation inverse ou négative.

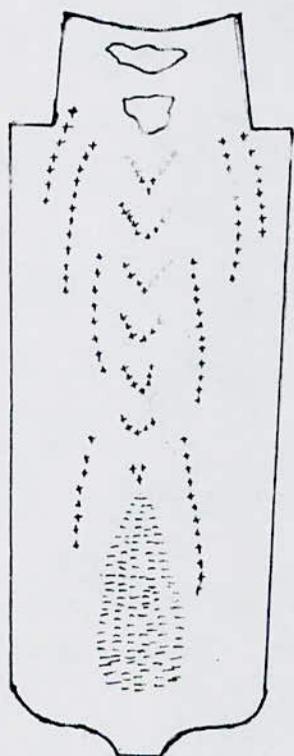


Fig. 18. - Schéma montrant les divers hétérogénéités habituellement présentes dans un lingot.

- + Zone de ségrégation positive
- Zone de ségrégation négative

Germination et naissance des cristaux:

Sur une coupe grossièrement polie d'un lingot, surtout d'un lingot calmé, on distingue habituellement à l'œil nu trois zones différentes dont on peut schématiser ainsi la formation (fig. 19).

• La peau: elle est très mince d'environ 5mm. C'est le sac qui s'est solidifié tout de suite au contact de la lingotière. Les centres de cristallisation étant très nombreux, la croissance des cristaux a été vite limitée. Les cristaux formés sont équiaxes et très petits d'orientation quelconque.

.La zone basaltique. Dans cette zone, le développement des cristaux s'effectue dans le sens de l'évacuation de la chaleur. Les dendrites croissent de la périphérie vers le centre, d'où leur forme allongée.

.La zone centrale.- Formée de cristaux sans orientation préférentielle. Cela est dû au fait que le refroidissement du liquide dans cette zone est de plus en plus lent.

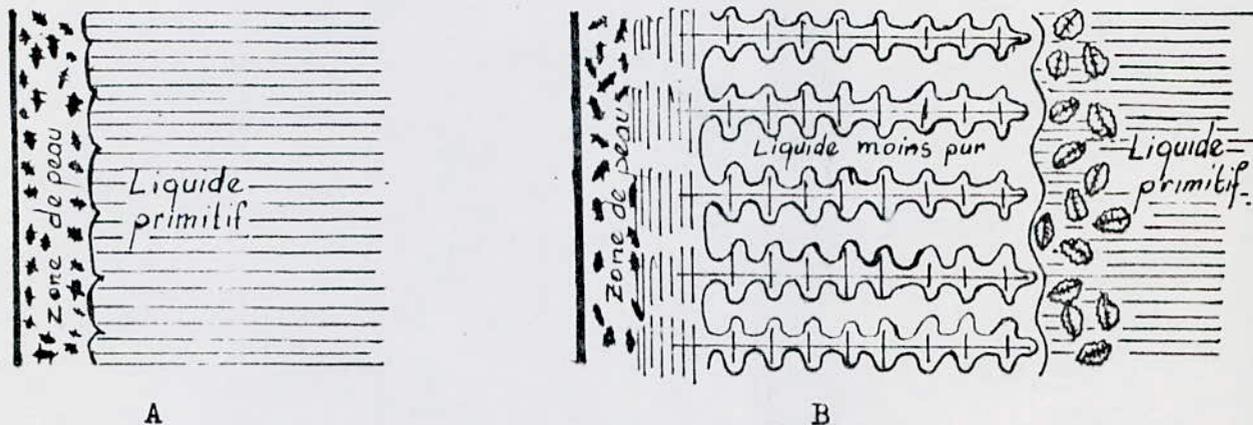


Fig.19 .

Schéma montrant la formation des cristaux.

Zone de cristallisation basaltique et zone de cristallisation équiaxe.

3-I-4. Défauts de lingots.

Le lingot constitue le début du produit fini et sa qualité a des répercussions sur la qualité et le prix de revient du produit final. Les principaux défauts du lingot sont:

Défauts de composition: Ces défauts de composition peuvent consister en une analyse inexacte au four, des défauts de composition provenant d'une hétérogénéité du métal mis en poche, d'une évolution de la composition du métal en cours de coulée. Cette évolution peut consister en une perte ou enrichissement en C, P, Si.

Défauts internes: On en distingue:

.Retassure.- Elle est localisée à la partie supérieure du lingot.

.Ségrégation: Les principaux paramètres de la ségrégation sont: l'aptitude de l'élément à entrer en solution solide, la taille du lingot, le mode de coulée et l'intensité de l'effervescence.

.Inclusions: Ce sont des corps étrangers ou des combinaisons de métaux et de métalloïdes insolubles dans l'acier. Elles se présentent sous de nombreux aspects: plages sableuses, croûtes noyées, lignes apparaissant sur les demi-produits, inclusions microscopiques, alignements de carbures métalliques, etc, dont nocivité varie considérablement avec la nature des sollicitations auxquelles le métal est soumis. On en distingue:

-les inclusions exogènes provenant des réactions du bain avec les réfractaires ou l'air ambiant;

-les inclusions endogènes provenant des réactions dans le sein du métal.

La taille du lingot, le mode de coulée au jet et en source ont une importance dans la position des inclusions au sein du métal. Dans les lingots coulés au jet, le pied est généralement plus sale, surtout dans le cas des gros lingots où on signale des accumulations d'oxydes. Dans le cas de la coulée en source, le pied des lingots effervescents est souvent très enrichi en inclusions venant de l'attaque des réfractaires de coulée.

Défauts superficiels:

.Criques et tapures: Ce sont des fissurations intervenant par dépassement de la charge de rupture à chaud sous l'action des contraintes. Les criques se produisent à plus hautes températures et en tout début de solidification. Les tapures après complète solidification.

.Piqures et soufflures: Ce sont des cavités résultant de l'emprisonnement de bulles de gaz lors de la solidification du métal.

D'autres défauts divers peuvent aussi être rencontrés dans les lingots. Citons: les gouttes froides, les doubles peaux, les croûtes noyées et empreintes de lingotières.

Solidification en coulée continue:

On peut distinguer 4 phases principales au cours de la solidification d'une barre de coulée continue:

Phase de contact direct métal-lingotière: Dès l'arrivée du métal dans la lingotière froide, une croûte de métal solide se forme et va en s'épaississant au fur et à mesure que le produit descend. Cette croûte se décolle de la lingotière du fait de la contraction thermique.

Phase de refroidissement par rayonnement et convection: dans la partie inférieure de la lingotière: Le décollement de la peau laisse passer une gaine gazeuse entre la lingotière et le métal. Cette gaine gazeuse est de loin l'obstacle le plus important à l'écoulement de la chaleur de la barre vers l'eau de refroidissement. De ce fait, on passe des pertes calorifiques par conductibilité aux pertes par rayonnement et peut être par convection. Le ralentissement des échanges thermiques a pour conséquence un léger ralentissement de la solidification, mais surtout un réchauffement de la peau. La température superficielle qui était tombée très bas (300-600°C) dans la zone de contact direct solide-métal, s'élève assez rapidement (jusqu'à 700-1200°C) à la sortie de la lingotière.

Phase de refroidissement secondaire: C'est dans cette zone que doit se terminer la solidification de la barre. C'est donc l'influence du refroidissement secondaire qui sera prépondérante en ce qui concerne les défauts internes, tout comme la zone de contact direct régit l'état de surface.

Sous l'effet du refroidissement violent dû à l'aspersion d'eau, cas le plus fréquent, la température superficielle de la barre décroît brusquement et tombe entre 200 et 800 °C suivant l'intensité du refroidissement qui lui est appliqué. Le refroidissement intense de la barre se fait surtout au détriment de la chaleur sensible de la partie solidifiée.

Phase d'homogénéisation de la température: Cette phase se produit à l'air libre après la sortie du refroidissement secondaire, c'est à dire dans la zone des rouleaux extracteurs et du tronçonnage.

Le refroidissement intense qui entretenait un fort gradient thermique ayant cessé, on observe un réchauffement superficiel de la barre assez rapide et un refroidissement lent de sa partie centrale, maintenant solidifiée. Il y a égalisation progressive des températures et il en est ainsi jusqu'à ce que la répartition des températures dans la barre corresponde au gradient thermique normal, assez faible, caractéristique du refroidissement libre à l'air de la barre considérée. La température superficielle remonte jusqu'aux environs de 950 - 1150 °C, puis décroît lentement.

Épaisseur de la croûte solidifiée:

Comme en coulée classique, l'épaisseur solidifiée en coulée continue en fonction du temps est très bien représentée par la relation parabolique de Lightfoot:

$$e = K \sqrt{t}$$

e - épaisseur, cm

t - temps, mn

K - coefficient de solidification (dimension $LT^{-\frac{1}{2}}$)

en prenant pour K la valeur moyenne on a:

K=25 dans le cas de la coulée en lingots

K=29 dans le cas de la coulée en continue.

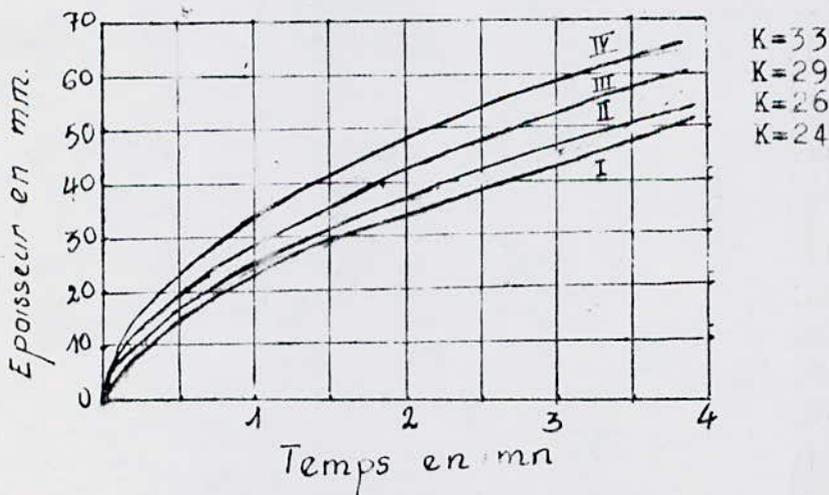


Fig. 20. - Épaisseur solidifiée en fonction du temps.

Cristallisation et ségrégation en coulée continue:

.Macrostructure.- La structure transversale des barres de coulée continue est identique sur toute la longueur du produit, sauf à l'extrémité en fin d'opération. Par rapport au lingot, c'est un avantage substantiel. D'autre part, vu la similitude des processus de solidification en coulée classique et en coulée continue, on retrouvera sur les produits coulés à l'état calmé les trois zones habituelles:

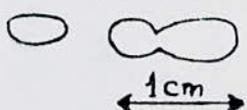
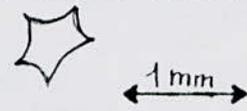
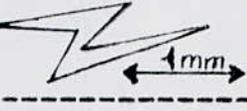
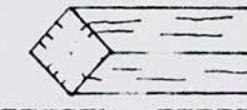
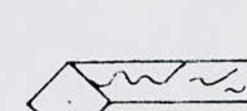
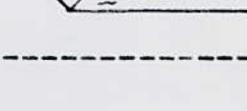
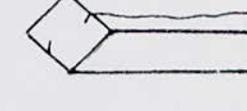
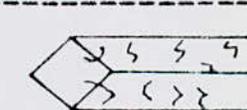
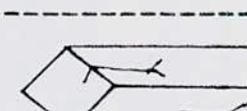
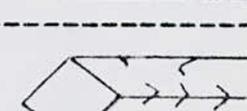
- une peau à cristallisation fine;
- une zone basaltique;
- une zone centrale globulaire.

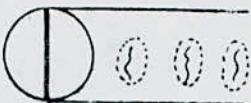
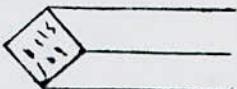
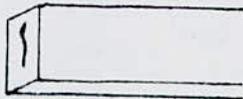
.Ségrégation.- La ségrégation transversale dans une barre de coulée continue est généralement moins importante que dans un lingot. Le refroidissement plus rapide, la section assez faible et surtout le renouvellement et le brassage constants du liquide en cours de solidification sont évidemment autant de facteurs favorables. Quant à la ségrégation longitudinale, elle est quasi nulle, donc bien meilleure que dans un lingot et, souvent, les différences constatées entre tête et pied sont inférieures à la dispersion des analyses.

On peut donc admettre qu'en coulée continue, la ségrégation est faible ou inexistante. Les ségrégations sont généralement réparties avec un maximum au centre autour des porosités, ce qui est normal.

3-I-5. Défauts des demi-produits.

Les défauts les plus courants rencontrés sur les demi-produits sont résumés dans le tableau ci-dessous:

Types de défauts	Nom	Forme	Défauts		Origine du défaut
			int.	ext.	
POROSITES (défaut à 3 dimensions)	Soufflure		x	x	Bulles de gaz emprisonnée pendant la solidification
	Micro-retassure			x	Vide dû à un retrait partiel du liquide pendant la solidification
	Micro-crique ouverte		x	x	Décohérence à chaud du métal
FISSURES (défauts à 2 dimensions)	Lignes		x		Nombreuses fissures peu profondes dues à des soufflures de peau des produits coulés
	Pailles		x		Fines écailles de métal, terme ultime de la déformation de la plupart des petits défauts de surface du produit coulé: soufflures (piqûres), rides, etc
	Repliures		x		Lèvres de métal recouché dans la section du produit laminé ou forgé. Défauts favorisés par un creux (dédoublure) interne non ressoudé
	Gerçures		x		Criques maillées ou déchirures nombreuses dues au manque de forgeabilité de la peau du métal
	Criques en Y		x		Déchirures dues à des criques travers de la peau d'un lingot
	Criques d'angles		x		Déchirures transversales apparaissant pendant le laminage sur les angles froids du demi-produit
	Tapure débouchant en surface		x	x	Fissure profonde due au réchauffage trop rapide d'un produit de forme trapue, ou à la trempe martensitique, ou à la transformation perlitique (refroidissement non uniforme des lingots).

Fissures	Tapures en cymbales		x	Tapures int. dues à un réchauffage rapide d'aciers durs, ou à une trempe superficielle par induction d'aciers durs. Elles sont perpendiculaires à l'axe du produit
	Flocons		x	Décohésion int. en forme de coupelles, dans les aciers contenant plus de 1 à 3 ppm d'H ₂ ; elles sont orientées par les contraintes de corroyage
	Criques internes		x	Criques axiales en étoile, criques int. arborescentes ayant pour origine les discontinuités physiques du produit coulé
	Dédoublure		x	Queue (extrémité) de retassure non ressoudée par le corroyage.

3-2. LINGOTS ET DEMI-PRODUITS.

3-2-1. Lingots. - Ils sont obtenus par coulée en lingotière. Ils sont caractérisés par leur poids et leur forme.

.Poids des lingots. - Au siècle dernier, les poids des lingots étaient de 200 à 300 kg. Cependant, il a été rapidement reconnu que la méthode la plus économique et la plus favorable aux productions de masse, consistait à couler de gros lingots. Aussi le poids des lingots utilisés augmentait-il rapidement. Actuellement, il est de pratique courante d'utiliser:

-pour les usines d'aciers spéciaux, des lingots de 1 à 5 t ;

-pour les usines à grosses productions orientées vers les barres et profils, des lingots de 5 à 10 t ;

-pour les usines possédant un train Gray à grosses poutrelles ou un train à tôles fines ou fortes, des lingots de 12 à 25 t et aussi, tout récemment, de plus de 40 t.

.Formes des lingots.- La section du lingot est carrée ou voisine du carré pour la production des blooms, et rectangulaire pour la production pour la production des brames.

3-2-2. Demi-produits. - Ce sont des pièces déjà dégrossies au blooming ou au slabing ou encore obtenus directement par coulée continue. Ces demi-produits relativement longs, à section carrée, rectangulaire ou ronde, peuvent se classer ainsi :

-Les blooms: Leur section va de $80 \times 80 \text{ mm}^2$ à plus de $250 \times 250 \text{ mm}^2$; leur longueur très variable peut aller de moins de 1m à plus de 5m. S'ils sont légèrement rectangulaires on les appelle méplats. C'est à partir de blooms que sont laminés tous les profilés courants: rails, poutrelles, fers à U, fers à T, etc. et aussi les billettes et les largets.

-Billettes: Ce sont des blooms de petites sections (allant de $50 \times 50 \text{ mm}$ à moins de $80 \times 80 \text{ mm}$) et d'une longueur très variable aussi. La billette est le plus souvent destinée à alimenter un train à fil machine.

-Brames ou slabes: Ils ont une section rectangulaire accentuée; leur épaisseur va de 75mm à 125mm, leur longueur est très variable, leur largeur, rarement inférieure à 250 mm, peut atteindre 2m. Ces produits sont le point de départ de la fabrication des tôles, en particulier pour les grands trains continus, dans ce cas leur longueur est généralement de 6m.

-Largets ou bidons: Dans la fabrication de la tôle fine à chaud, on réchauffe des produits déjà relaminés qu'on appelle des largets ou bidons et qui sont le résultat de découpage de longues bandes.

3-3. CLASSEMENT DES PRODUITS DE LAMINAGE.

Les produits sidérurgiques en acier courant ou en aciers spéciaux sont classés en deux grandes catégories:

-Les produits plats: Ils sont fabriqués à partir des brames issues du slabing ou de coulée continue. On distingue:

Les tôles: Elles sont divisées en 3 classes: les tôles fortes d'épaisseur supérieure à 5mm, les tôles moyennes, d'épaisseur allant de 2 à 5 mm et les tôles minces, d'épaisseur inférieure à 3 mm.

Les feillards: Produits plats dont la largeur maximale est comprise entre 500 et 600 mm.

Les larges plats: Leur épaisseur est comprise entre 6 et 60 mm et leur largeur comprise entre 150 et 1000 mm.

Les produits longs: Ils sont fabriqués à partir des blooms issus du blooming ou à partir de coulée continue. Ils sont souvent obtenus à chaud et ils sont très divers. Parmi eux, citons: le fil machine, les rails, les poutrelles, les traverses, les palplanches, les gros ronds pour tubes sans soudure, les laminés marchands, etc.

3-4. LES PROFILES RONDS. Parmi ces produits on distingue le fil machine, les ronds à béton, les ronds à tubes, les ronds mécaniques, etc.

3-4-1. Le fil machine. - C'est un produit obtenu exclusivement sur un train de laminoir à fil machine. Ces trains continus font subir au produit un cycle thermomécanique très précis. Après des cages degrossisseuses et finisseuses, le fil, de diamètre 6,5 mm (éventuellement 6 ou 5,5 mm) à 35 mm, s'engage dans des systèmes variés qui comportent des zones de refroidissement, de mise en spires puis de mise en bobines. Ces processus ont pour but de préparer les propriétés mécaniques et l'état de surface pour l'emploi ultérieur du fil.

En effet, la plus grande partie du fil subit des opérations de tréfilage avant d'être utilisé sous des emplois extrêmement diversifiés: fil de fer ordinaire, fil pour frappe à froid, fil carcasse, fil pour béton précontraint, etc.

3-4-2. Ronds à béton et armatures pour béton armé. - Les produits utilisés dans le béton armé et le béton précontraint comprennent:

- les ronds à béton normaux ou à haute adhérence, qui sont des laminés à chaud;

- les armatures de petits diamètre: treillis soudés; les armatures pour béton précontraint.

Les ronds à béton constituent des armatures passives et ont jusqu'à 50 mm de diamètre.

Les ronds lisses ont des limites d'élasticité de 215 et 235 N/mm²

Les treillis soudés sont des armatures planes composées

d'éléments constitutifs en fil ou en barre, assemblés par soudure. Ce type d'armature est préfabriqué en usine sur machine automatique. Les fils tréfilés peuvent être lisses ou crantés. Le fil machine de départ est défini par la norme NF A 35-052.

Il s'agissait encore récemment du produit ordinaire typique, mais l'industrialisation du bâtiment et le coût de la main-d'œuvre ont conduit à utiliser des ronds à béton à caractéristiques élevées. Les ronds lisses ont fait place aux ronds à haute adhérence dont les nervures sont obtenues au laminage.

Les limites d'élasticité élevées des ronds sont obtenues par plusieurs méthodes:

-en utilisant de l'acier doux qui est torsadé à froid, on augmente les caractéristiques par écrouissage;

-en utilisant des aciers au carbone et carbone-manganèse, on a, par refroidissement direct des barres, des ronds dits naturellement durs;

-en utilisant des dispersoïdes ou en effectuant des refroidissements accélérés (procédé Torsid), on a créé récemment soudables à bas carbone; en effet, le soudage des armatures sur chantier a pris une importance considérable, d'où l'intérêt de disposer de nuances soudables sans préchauffage.

3-4-3. les ronds à tubes. - Il s'agit de demi-produit qui sont relaminés à chaud sur des laminoirs à tubes. Les propriétés finales sont déterminées par la composition chimique initiale des ronds et par le cycle thermique et mécanique fabrication.

3-4-4. Ronds mécaniques. - Certaines pièces mécaniques peuvent être réalisées sans traitement thermique soit parce que les sollicitations ne le nécessitent pas, soit parce que les progrès au contrôle des propriétés obtenues directement après laminage ouvrent des possibilités nouvelles. Mais les aciers d'usage général, comme les nuances A 33, A 50, A 60, A 70, de la norme A 35-501, ne garantissant jamais la réponse à un traitement thermique.

Les petites pièces mécaniques sont, en particulier souvent fabriquées par décolletage sur des tours automatiques la propriété essentielle étant l'usinabilité.

CHAPITRE 4

Déformation lors du laminage

4-1. MECANISMES DE DEFORMATION.

La déformation plastique du métal s'effectue essentiellement par glissement suivant les plans et les directions denses. Dans ces plans la résistance au déplacement est minimale. Ce phénomène de glissement résulte du déplacement des dislocations au sein du métal. Les plans et directions de glissement sont définis pour chaque structure, ainsi que les résume le tableau ci-dessous.

Tableau 5.

Structure	Plans de glissement	Direction de gliss.	Vecteur de Burgers	Nbre de systèmes
CFC	$\{111\}$	$\langle 110 \rangle$	$\frac{a}{2} \langle 110 \rangle$	24
CC	$\{110\}, \{112\}, \{123\}$	$\langle 111 \rangle$	$\frac{a}{2} \langle 111 \rangle$	24
HC	$\{001\}, \{101\}$	$\langle 110 \rangle$	$a \langle 110 \rangle$	6

On remarque que plus le nombre de plans et directions de glissement d'un métal est grand, plus son aptitude à la déformation plastique est grande. ainsi les métaux à réseau cubique sont très plastiques, tandis que les métaux à réseau hexagonal se prêtent mal au laminage et à d'autres modes de déformation.

Au début de la déformation, seules les dislocations créées au ^{cours} de la solidification du lingot existent. Mais au fur et à mesure que le métal se déforme, de nouvelles dislocations sont créées par l'écroutissage. La densité de dislocations ^{Passé} de $10^6 - 10^8$ avant déformation à $10^{11} - 10^{12}$ après déformation. Cette multiplication s'effectue selon plusieurs mécanismes. Le plus classique est le mécanisme de Frank-Read dans lequel un segment de dislocation ancré en deux points par un précipité, un autre segment de dislocation ou par une particule étrangère, se courbe sous l'effet de la contrainte, cette courbure s'accroît jusqu'à ce que le segment se referme en formant une boucle. Celle-ci émet alors un au-

tre segment. Ce mécanisme peut ainsi émettre une centaine de dislocations.

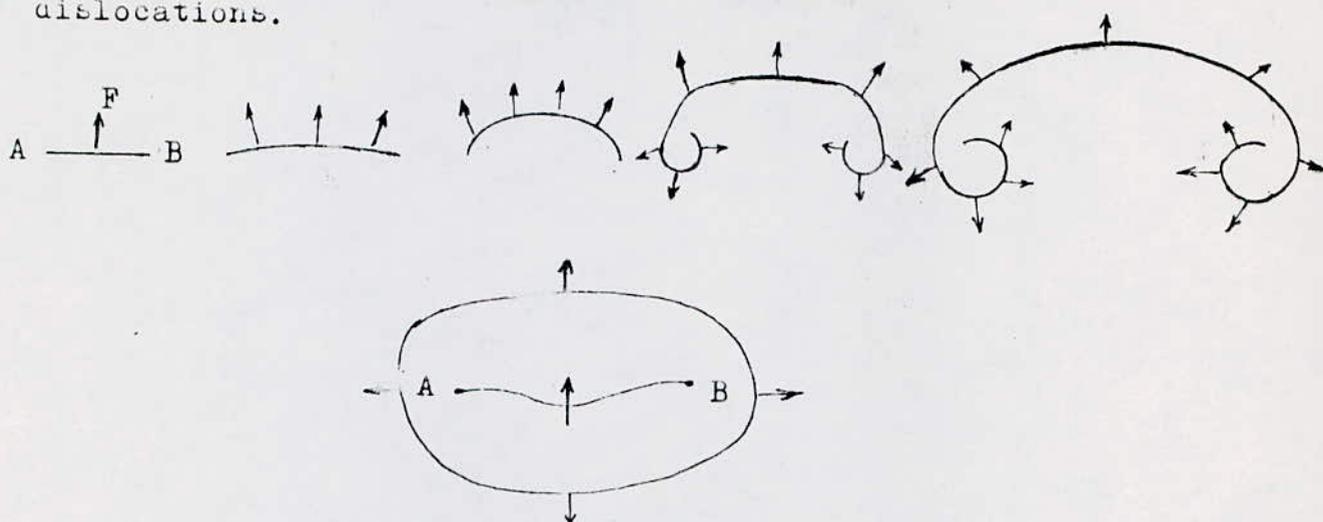


Fig. 21. Mécanisme de Frank-Read.

A froid, ces dislocations émises par les différentes sources ne peuvent s'annihiler ou disparaître mais elles s'empilent sur différents obstacles et en particulier les joints de grains ou les joints interphases en créant sur les sources des tensions antagonistes qui limitent l'émission d'autres dislocations. A ce niveau survient l'écrouissage de la matrice. Ce phénomène diminue la plasticité et élève la résistance et la dureté. Les grains prennent une orientation privilégiée formant une texture dite d'écrouissage.

A chaud, plusieurs mécanismes vont améliorer l'aptitude à la déformation plastique. Ces mécanismes sont activés thermiquement et sont: le glissement thermoactivé et la montée des dislocations, la diminution de la résistance des joints de grains, la recristallisation dynamique, la restauration dynamique et le glissement intergranulaire.

4-I-I. Glissement thermoactivé.

Les principaux mécanismes de glissement thermoactivé sont les suivants:

Le franchissement des "arbres" de forêt de dislocations: Lorsque deux dislocations se croisent, chacune acquiert un cran égal au vecteur de Burgers de dislocation rencontrée.

Le glissement divié: Le changement de plan d'une dislocation vis s'accompagne d'une modification de la configura-

tion atomique au cœur de la dislocation. Ce mécanisme dit de glissement divié, qui permet aux dislocations d'éviter des obstacles et de s'échapper des empilements, est thermoactivé. Donc une élévation de température de déformation fait diminuer la contrainte critique correspondant à l'apparition du glissement divié et facilite le déclenchement de ce mécanisme.

La réaction de jonction: La figure 22 montre réaction de jonction entre une dislocation CD mobile dans son plan de glissement et une dislocation fixe AB. La dislocation de jonction C'D' de vecteur de Burgers $b_3 = b_1 + b_2$ peut diminuer la longueur des dislocations AB + CD. La configuration présentée sur la figure est alors une configuration d'équilibre. Le déplacement de la dislocation mobile nécessite la disparition de la dislocation de jonction. Le mécanisme peut être thermoactivé pour des jonctions de faible longueur. Sous l'effet de la contrainte et de l'agitation thermique, les nœuds C' et D' se déplacent dans le sens de la flèche et la dislocation mobile peut se libérer. Ce mécanisme thermoactivé à forte énergie d'activation semble contrôler le fluage des matériaux durcis par dispersion de particules. La dispersion des particules a pour effet de multiplier la densité des dislocations, donc des réactions de jonction.

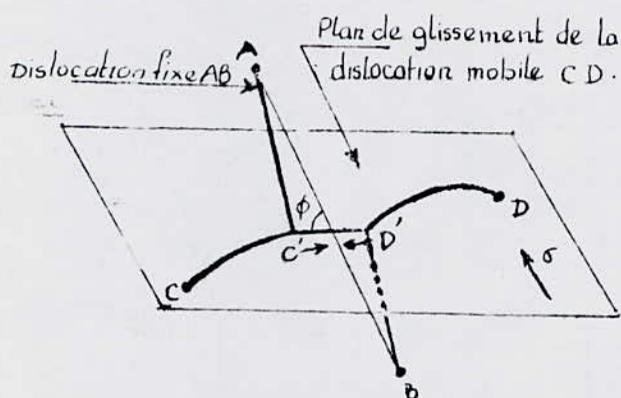


Fig. 22. - Jonction attractive C'D' résultant de l'intersection de la dislocation mobile avec la dislocation fixe AB

Dissociation des dislocations: L'énergie d'une dislocation de vecteur de Burgers b peut être abaissée grâce à sa dissociation en deux dislocations partielles b_1 et b_2 telles que $b = b_1 + b_2$. Cette dissociation peut s'effectuer soit dans le plan glissement de la dislocation de vecteur b soit dans des plans différents. La dissociation s'accompagne d'une modification de la séquence d'empilement des atomes au travers des plans qui séparent les 2 dislocations partielles. De nombreux éléments d'addition abaissent l'énergie de défaut d'empilement et contribuent à dissocier les dislocations (Sn dans Zr, Mo dans acier austénitique,...).

4-I-2. Le déplacement non conservatif des dislocations.

Le déplacement non conservatif des dislocations permet à celles-ci d'éliminer différents effets de blocage.

Déplacement par montée des crans des dislocations vis:

Un cran sur une dislocation vis présente nécessairement un caractère coin. Son déplacement dans la direction de glissement de la dislocation vis impose nécessairement un mécanisme de montée (fig. 23). Le cran ab doit émettre des lacunes tandis que le cran cd doit en absorber.

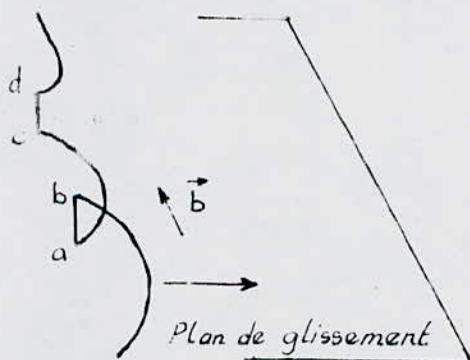


Fig. 23.- Mouvement non conservatif des dislocations vis.

La montée des dislocations coin: c'est un mécanisme essentiel à la déformation à chaud. La montée permet aux dislocations de franchir les obstacles de différentes natures (a) barrière de Cottrell, dislocations sessiles, (b) particules ou précipités, et que les dislocations de vecteurs de Burgers opposés peuvent s'annihiler, (c) double empilement

sur des plans différents .

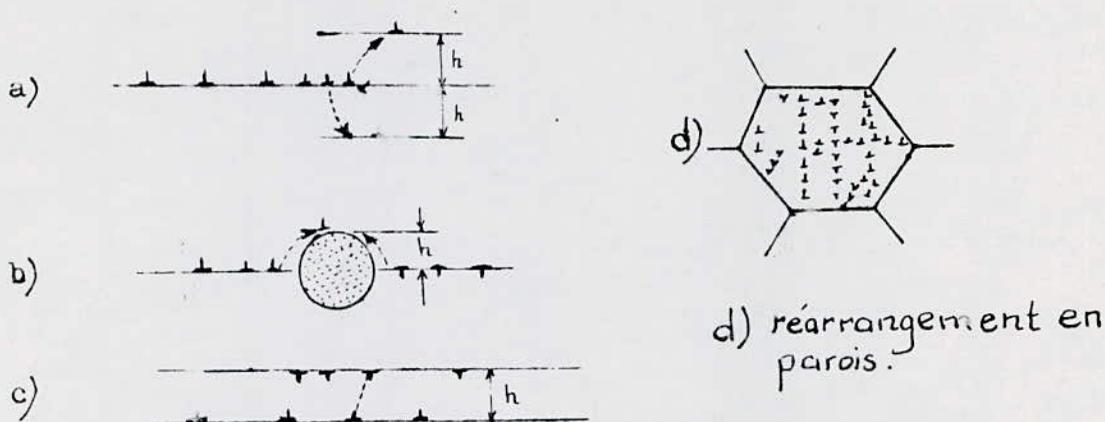


Fig. 24.- Montée de dislocations coins
 a) Barrière de Cottrell
 b) Précipités
 c) Annihilation de dislocations.

Une autre possibilité particulièrement importante est le réarrangement des dislocations en parois délimitant des cellules de polygonisation (fig. 24d). Ce réarrangement permet d'abaisser l'énergie des dislocations.

Enfin l'obstacle au glissement que constitue le joint de grain peut être atténué grâce à la montée de la dislocation long du joint.

Grâce au degré de liberté supplémentaire fourni aux dislocations par la montée, la déformation plastique va être favorisée. Les sources vont pouvoir émettre un plus grand nombre de dislocations.

La restauration dynamique: par ce mécanisme, la densité de dislocations reste constante pendant la déformation. Cela est dû au fait que les dislocations se sont arrangées en parois ou sous-joint délimitant les sous-grains. La structure est dite polygonisée.

Effet de la dissociation des dislocations: Les mécanismes associés à la restauration dynamique supposent que les dislocations peuvent changer de plans de glissement et s'annihiler grâce au mouvement non conservatif de la "montée". Ce mouvement est nécessairement plus difficile pour les dislocations dissociées. En effet comme pour les phénomènes de glissement thermoactive la montée doit être précédée d'un stade de recombinaison des dislocations, la barrière d'énergie associée à ce mécanisme sera plus élevée. Le supplément d'énergie devra être fourni grâce aux fluctuations thermi-

ques et les mécanismes de montée et de restauration dynamique interviendront à plus haute température dans le cas des matériaux à faible énergie de faute d'empilement. A la limite si la dissociation est importante et la vitesse de déformation trop rapide, la restauration dynamique ne pourra pas conquies au régime stationnaire. Le matériau choisira un nouveau mode de restauration: la recristallisation dynamique.

4-I-3. Rôle particulier des joints dans la déformation à chaud.

Le joint est un obstacle au mouvement des dislocations. A froid, les dislocations ne franchissent généralement pas le joint, elles s'empilent et les contraintes qui en résultent permettent l'initiation de dislocations sur de nouveaux systèmes de glissement. Aux températures élevées, la montée des dislocations permet d'atténuer ce durcissement intergranulaire, elles franchissent plus facilement le joint et en outre deux nouveaux mécanismes apparaissent: le glissement intergranulaire et la migration des joints qui faciliteront la déformation plastique.

Le glissement intergranulaire: De nombreuses expériences tant sur des bi-cristaux que sur des polycristaux, montrent qu'une contrainte de cisaillement dans le plan du joint entraîne un déplacement relatif des deux cristaux adjacents au joint. Ce glissement intergranulaire intervient à partir d'une température généralement située aux environs de T_f . Au delà de cette température, le joint de grain présente une résistance inférieure à celle des grains.

Le glissement intergranulaire facilite l'aptitude à la déformation plastique. Malheureusement, il conduit à la fissuration lelong des joints.

La migration des joints: Lorsqu'un joint se déplace ou migre vers une région à haute densité de dislocations, il laisse dans son sillage une structure restaurée, libre de contrainte. Les dislocations ont été absorbées par le joint. Ce mécanisme permet d'accomoder les concentrations de contraintes et les hétérogénéités de déformation au voisinage des joints. Il est contrôlé par la diffusion et ne peut donc intervenir qu'aux températures élevées. La migration des

joint est fréquemment observée dans tous les essais de déformation à chaud par traction ou compression.

Cette migration est limitée par la formation d'ondulation aux niveau des joints qui bloquent ces derniers. Les précipités intergranulaires peuvent également bloquer la migration des joints.

La recristallisation dynamique: La recristallisation dynamique permet la mise en forme à chaud des métaux à faible énergie d'empilement pour lesquels la restauration dynamique est particulièrement difficile. Ce mécanisme alterne avec le mécanisme de durcissement produit par la déformation à ces températures et déconsolide le métal, ce qui permet de poursuivre la mise en forme.

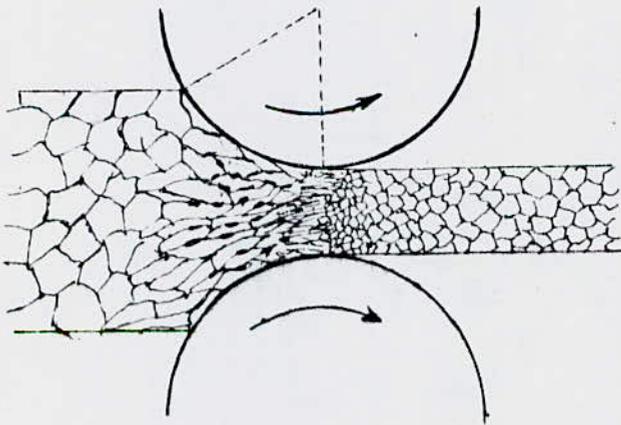


Fig.25.- Exemple de recristallisation dynamique (pendant la déformation).

4-I-4. Conclusion.

Nous avons décrit dans ce paragraphe les principaux mécanismes qui caractérisent la déformation à chaud. C'est grâce à ces mécanismes: mouvement non conservatif des dislocations, glissement intergranulaire, restauration et recristallisation dynamique que la majorités des métaux peuvent être transformés et mis en forme à haute température.

4-2. PARAMETRES PRINCIPAUX DE DEFORMATION.

Le laminage consiste à déformer et allonger un lingot ou un demi-produit porté à la température de laminage entre deux cylindres tournant en sens inverse.

Le volume de métal limité par les arcs AB (fig. 27), les bords latéraux de la barre et les plans d'entrée et de sortie du métal depuis les cylindres s'appelle foyer ou zone de déformation du métal.

Pour une vitesse circonférentielle V constante du cylindre, il existe à l'intérieur de cette zone une section CC où la vitesse du métal est égale à celle du cylindre ($V_0 = V = V_I$). Cette section est dite neutre. A gauche de la section neutre, la vitesse V_0 du métal est inférieure à celle du cylindre V ; cette zone est dite zone de retard. A droite de la section neutre, la vitesse V_I du métal est supérieure à celle du cylindre; cette zone est dite zone d'avance.

L'avance A et le retard R sont calculés par les formules suivantes:

$$A = \frac{V_I - V}{V} \cdot 100 \%$$

$$R = \frac{V \cos \alpha - V_0}{V \cos \alpha} ; \alpha - \text{angle de contact, } (^{\circ})$$

Valeurs absolues et relatives des paramètres de déformation:

Valeurs absolues:

• allongement total: C'est la différence entre la longueur finale et la longueur initiale du produit;

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

• élargissement total: C'est la différence entre la largeur finale et la largeur initial du produit;

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

• réduction totale: C'est la différence entre l'épaisseur initiale et l'épaisseur final de la barre;

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

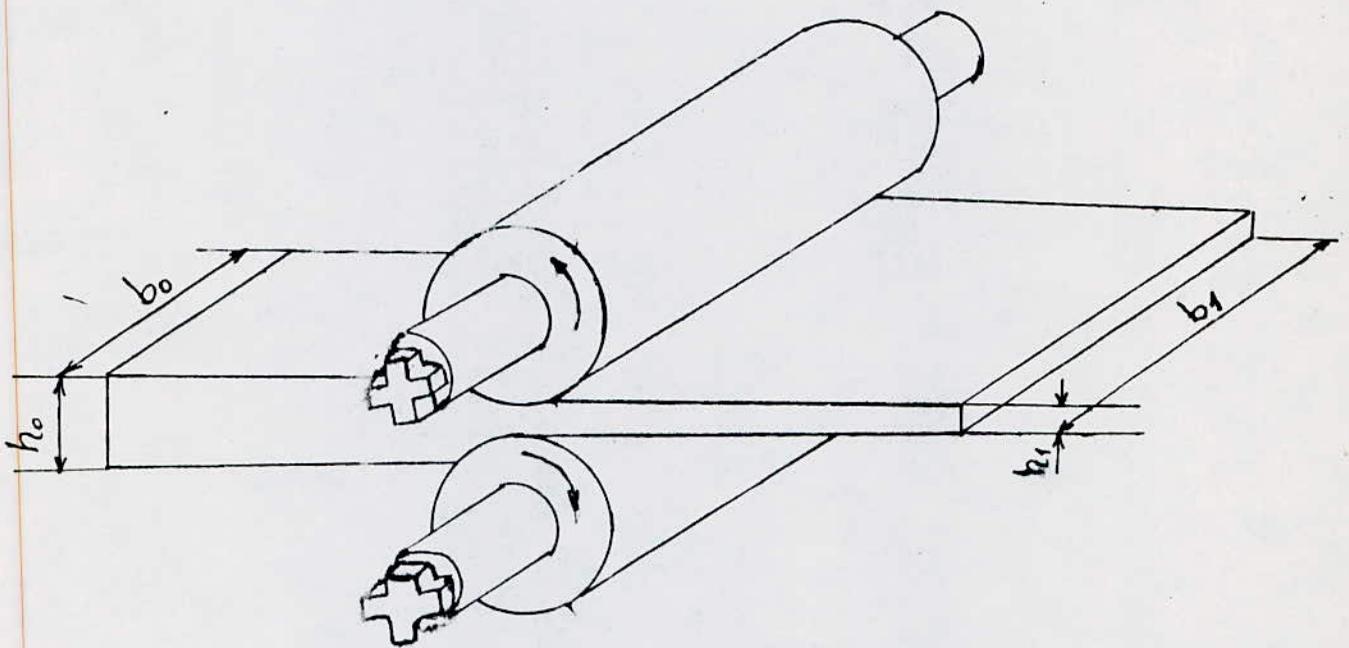


Fig.26. Laminage d'une ébauche

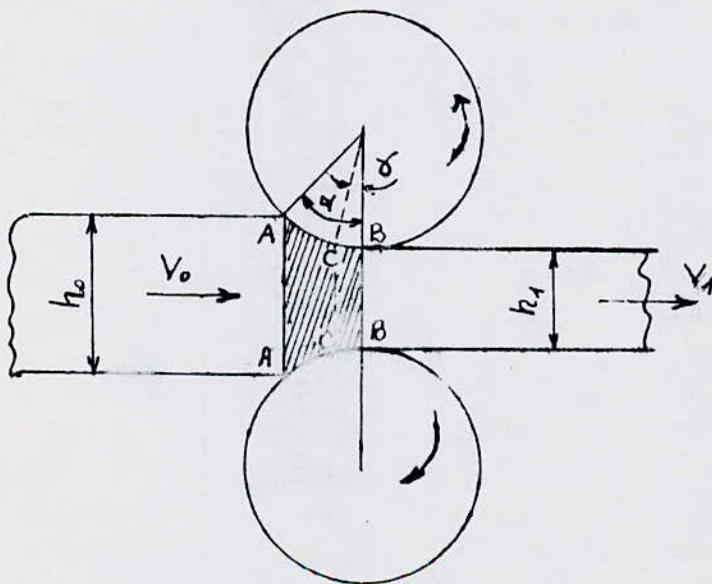


Fig.27. Zone de déformation

Valeurs relatives:

.allongement relatif: C'est le rapport de l'allongement total à la longueur initiale de la barre;

$$\epsilon_l = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \%$$

.élargissement relatif: C'est le rapport de l'élargissement total à la largeur finale;

$$\epsilon_b = \frac{\Delta b}{b_f} \cdot 100 \%$$

.réduction relative: C'est le rapport de la réduction absolue à l'épaisseur initial;

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

Coэффициents de déformation:

.coefficient d'allongement:

$$\mu = \frac{L_f}{L_0}$$

Au cas de laminage: $L_f > L_0$ alors $\mu > 1$. Pratiquement à une passe on a $\mu = 1,1 + 1,6$ parfois $\mu = 3$.

.coefficient de réduction:

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

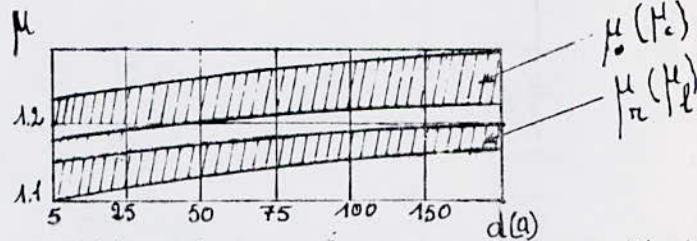
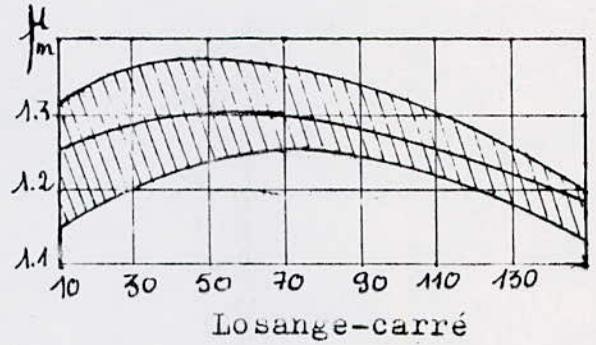
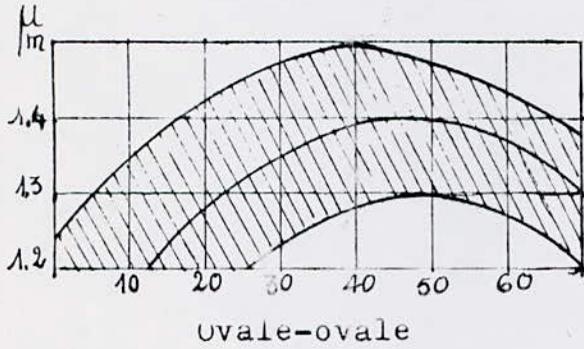
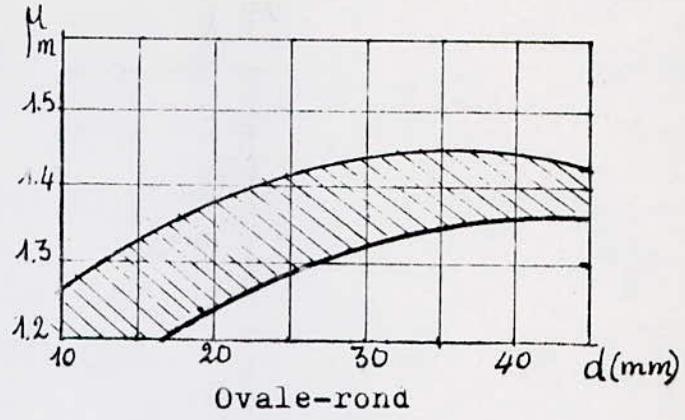
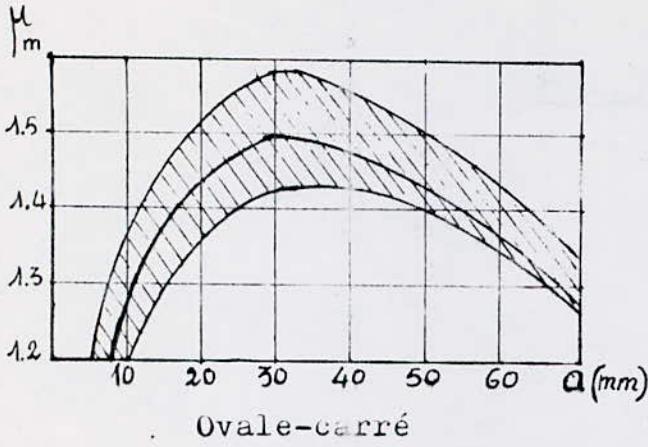
.coefficient d'élargissement

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

Comme le volume de la barre avant et après le laminage reste inchangé, $V_0 = V_f \iff h_0 \cdot L_0 \cdot b_0 = h_f \cdot L_f \cdot b_f = \text{const.}$

La surface de la section de la barre avant et après le laminage est: $S_0 = h_0 \cdot b_0$ et $S_f = h_f \cdot b_f$, par conséquent,

$$S_0 \cdot L_0 = S_f \cdot L_f \quad \text{ou} \quad \frac{S_0}{S_f} = \frac{L_0}{L_f}$$



Coefficient d'étirage pour les cannelures finisseuses rondes (carrés) et avant finisseuses ovale (losange)
 $d(a)$ - diamètre (arête du carré).

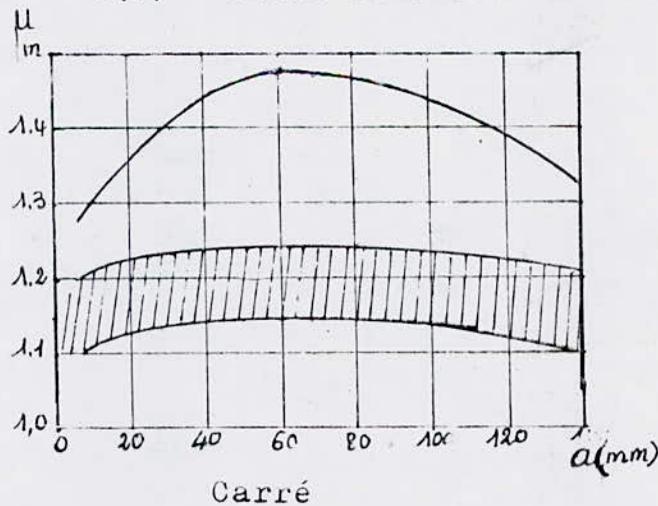


Fig. 28. Coefficients d'étirage moyens pour différents systèmes de cannelures.

Surface hachurée = domaine admissible

Enfin, le coefficient d'étirage μ , devient:

$$\mu = \frac{L_I}{L_o} = \frac{S_o}{S_I}$$

Ainsi, l'augmentation de la longueur de la barre est proportionnel à la diminution de la section au cours du laminage. Ce coefficient nous permet de déterminer le nombre de passes maximal nécessaire pour laminier une barre de section initiale S_o et la ramener à une section finale S_n , n étant le nombre de passes.

Le long de ces n passes, la section de la barre diminue et prend les valeurs: $S_o, S_1, S_2, \dots, S_n$. Les coefficients d'étirage varient comme suite:

$$\mu_1 = \frac{S_o}{S_1}, \mu_2 = \frac{S_1}{S_2}, \dots, \mu_n = \frac{S_{n-1}}{S_n}$$

On a $S_o = \mu_1 \cdot S_1, S_1 = \mu_2 \cdot S_2, \dots, S_{n-1} = \mu_n \cdot S_n$

Alors, $S_o = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_n \cdot S_n$

Le coefficient d'étirage total est

$\mu_t = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_n = \mu_m^n$, μ_m étant le coefficient d'étirage moyen, il est calculé par la formule empirique suivante:

$$\mu_m = 1 + 0,089 \cdot \left(\frac{S_n}{D_m^2} \right)^{-0,191}$$

D_m - Diamètre moyen des cylindres

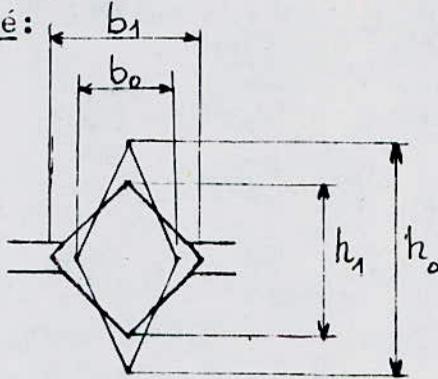
La valeur de μ_m est également tirée des graphes établis expérimentalement.

De la relation $\mu_t = \mu_m^n$, on tire: $n = \frac{\log(\mu_t)}{\log(\mu_m)}$

La figure ci-dessous donne les graphes donnant le coefficient d'étirage moyen pour différents systèmes de cannelures.

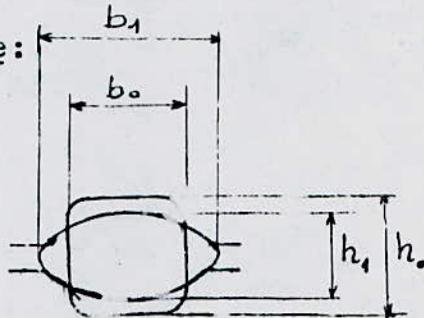
Surface de contact:

- Losange-carré:



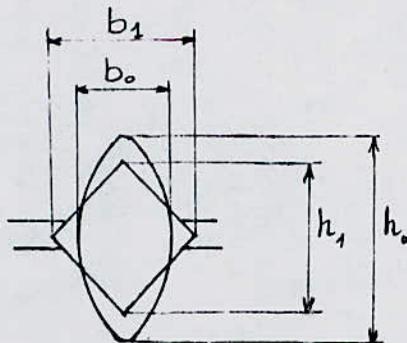
$$F_1 = 0,67 b_1 \sqrt{r_m (h_0 - h_1)}$$

- Carré-ovale:



$$F_0 = 0,54 (b_0 + b_1) \sqrt{r_m (h_0 - h_1)}$$

- Ovale-carré:

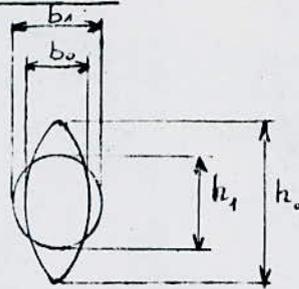


$$F_c = 0,75 b_0 \sqrt{r_m (h_0 - h_1)}$$

F- Surface de contact cylindre-métal

r_m - Rayon moyen au cylindre

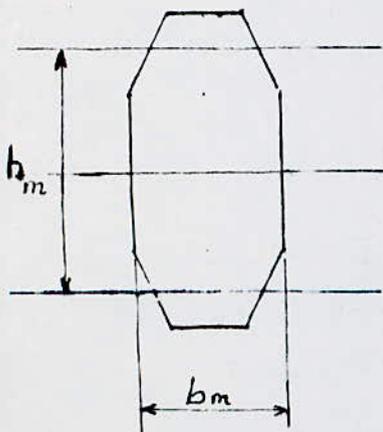
- Ovale-ronde ou ovale-ovale:



En général pour ovale-ronde et les les autres configuration, on peut établir les surfaces de contact suivantes:

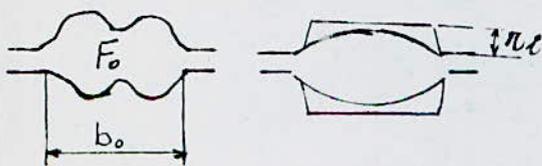
$$F = b_m \sqrt{r_m \cdot \Delta h_m}$$

r_m et Δh_m sont calculés par la méthode de rectangles réduits (de surfaces équivalentes et de même largeur)



$$\Delta h_m = h_{om} - h_{Im} = \frac{F_o}{b_o} - \frac{F_I}{b_I}$$

- Surfaces compliquées:



$$r_m = r_i - \frac{h_{Im}}{2}$$

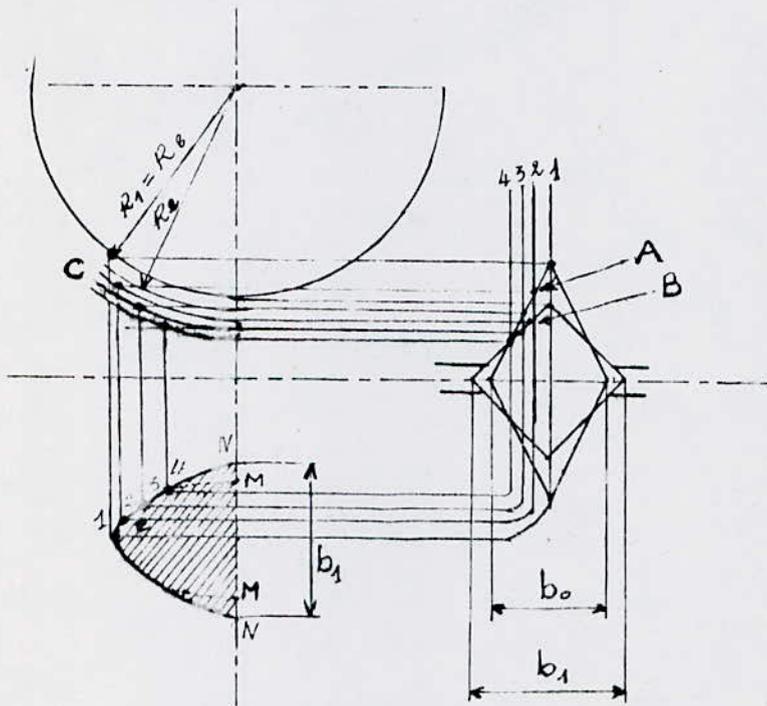
$$r_m = r_i - \frac{F_I}{2b_I}$$

r_i - Rayon idéal = à la moitié de la distance entre les cylindres, h_{om} , h_{Im} - hauteurs moyennes de la barre avant et après le laminage.

de la barre avant et après le laminage.

Il existe une méthode graphique pour déterminer la surface de contact pour différents systèmes de cannelures.

Méthode graphique pour déterminer la surface de contact du système losange-carré :



La réduction est irrégulière sur la largeur de la barre. Tracer des sections verticales 1, 2, 3, 4, ... etc. Sur chaque section on définit la valeur de la réduction, le rayon du cylindre et la longueur du foyer de déformation.

Par exemple, pour la section 2: Réduction: $n_2 = 2$ (AB). De B traçons une ligne horizontale, on trouve le rayon R_2' puis de A, traçons une ligne horizontale, on trouve le point d'intersection C et sa projection E sur le plan horizontal.

Par analogie, on trouve les points correspondants pour autres sections. De cette façon, on peut établir la projection horizontale de la surface de contact (surface hachurée sur le schéma).

4-3. ASPECTS METALLURGIQUES DU LAMINAGE A CHAUD.

Le produit laminé est suivant les cas, un produit fini (qui sera utilisé dans cet état), ou un demi-produit qui suivra d'autres étapes de fabrication (traitement thermique et usinage, etc...) avant utilisation.

Les aspects métallurgiques du laminage à chaud sont très importants dans le premier cas puisque la structure à l'état brut de laminage conditionne les propriétés d'emploi. Dans le second cas le laminage à chaud est surtout une mise en forme géométrique, la structure finale étant obtenue par des étapes ultérieures de traitement (recuit de normalisation, écrouissage à froid et recuit de recristallisation, traitement de trempe et revenu).

4-3-1. Influence des lois de comportements métallurgiques et mécaniques à haute température sur le laminage à chaud.

Pour un métallurgiste le laminage à chaud peut être considéré comme la superposition de deux lois:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \epsilon = f(t) & \text{déformation-temps} \\ T = f(t) & \text{température-temps} \end{array} \right.$$

Pour le laminage classique la loi déformation-temps $\epsilon = f(t)$ est imposée par les limites de l'outil. En effet pour des raisons de productivité on cherche à réaliser les déformations les plus importantes possibles et le plus rapidement possible. Dans ce cas la loi $T = f(t)$ en résulte de l'évolution thermique dépend de la radiation, de la conduction, du décalaminage par l'eau, du contact cylindre froid métal chaud et de l'échauffement adiabatique dû au formage.

Pour des limitations technologiques la déformation totale est le plus souvent fractionnée en plusieurs déformations séparées par des temps variables. La déformation (ϵ) est alors imposée et les contraintes en découlent. Les effets et couples de laminage dépendent des conditions opératoires.

4-3-2. Courbe contrainte-déformation et évolution métallurgique à chaud.

Il existe une dualité parfaite entre la courbe contrainte-déformation et l'évolution métallurgique de la phase stable à haute température. C'est pour cette raison que pra-

tiquement tous les essais simulatifs visent à obtenir ces courbes contrainte-déformations.

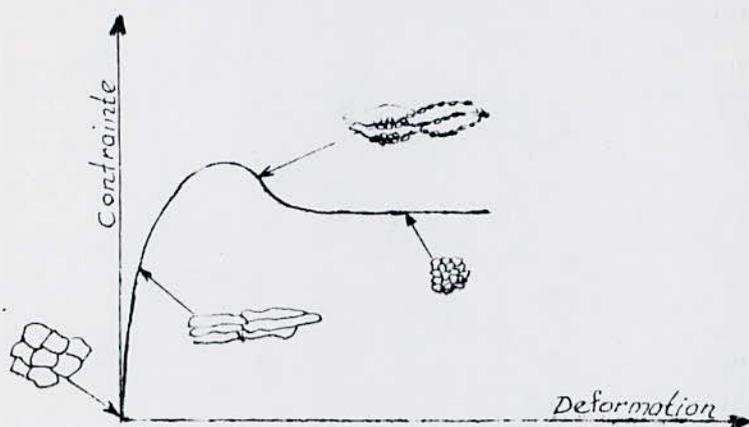


Fig. 29.-Schéma de courbe contrainte-déformation et évolution métallurgique le long de cette courbe.

Deux modèles ont été proposés qui expliquent assez bien la forme de la courbe: l'un est basé sur un mécanisme faisant appel au réarrangement des dislocations, l'autre ne fait intervenir que des contraintes d'écoulement différentes pour la fraction recristallisée et la fraction écrouie avec une hypothèse sur la cinétique de recristallisation.

En fait, une particule de métal chaud suit la courbe contrainte-déformation dans l'emprise entre les 2 cylindres.

La forme de cette courbe dépend de plusieurs facteurs. La température de déformation et la vitesse de déformation sont les principaux. Les facteurs secondaires sont la composition, la taille de grain et l'hérédité d'une passe sur l'autre.

4-3-3. Précipitation à chaud. Certains éléments (tels le Nb ou l'Al pour l'acier) ne se mettent en solution qu'à haute température. Ils se trouvent en sursaturation totale ou partielle pour certaines températures de déformation. En l'absence de déformation, il y aurait précipitation pour des raisons thermodynamiques. La déformation peut initier une précipitation dynamique (si $\dot{\epsilon}$ est faible) ou une précipitation statique induite par l'écrouissage et sensiblement plus rapide que la précipitation normale. Cette précipitation en jouant sur la structure change la forme de la courbe $\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon})$ et donc les efforts de laminage. De plus une telle précipi-

tation involontaire au cours du laminage à chaud, peut avoir une grande influence sur l'utilisation ultérieure du produit si l'élément perdu est un élément durcissant (cas du Nb) ou nécessaire pour un traitement ultérieur (aluminium).

Elle peut aussi avoir une influence sur l'aptitude à la mise en forme (forgeabilité et criquabilité).

4-3-4. Conséquences pour le laminage à chaud industriel.

Après la dernière passe de laminage, le grain peut être fin ou grossier, écroui ou recristallisé, homogène ou non.

Il peut encore subir une évolution ou rester tel quel lors du refroidissement qui, lui aussi, appartient au cycle de traitement thermomécanique à haute température qui caractérise le laminage à chaud.

Un cas très fréquent est celui où la phase stable à haute température est l'objet d'une transformation allotropique lors du refroidissement (cas des aciers entre autres)

4-3-4-I. Influence des conditions de laminage sur l'état de l'austénite et sur la transformation de celle-ci.

L'austénite des aciers subit une transformation en ferrite et perlite qui fait intervenir un mécanisme de diffusion. Les paramètres de cette transformation sont: l'état de mise en solution, la taille moyenne du grain austénitique, la composition et la vitesse de refroidissement.

L'expérience montre que l'écrouissage de l'austénite modifie sensiblement les conditions de germination et de croissance de la nouvelle phase (ferrite). C'est cet effet particulier de l'A sur la transformation qui explique que l'on puisse tirer parti du laminage à chaud d'une phase (γ) stable à haute température pour améliorer les propriétés d'une phase (α) qui en définitif gouverne les propriétés d'emploi.

4-3-4-2. Technique du laminage contrôlé.

Le traitement thermomécanique à haute température est un traitement où les lois $\mathcal{E}(t)$ et $T(t)$ ne sont pas indépendantes, c'est à dire que l'on impose des couples $[\mathcal{E}_i, T_i]$ dans le but de contrôler la structure et par là d'agir sur les propriétés d'emploi.

Le laminage contrôlé des aciers au C-Mn est un cas particulier où la structure visée est une structure ferrite-perlite pour les aciers.

Dans la pratique il faut adapter le schéma de laminage à l'outil dont on dispose et savoir à priori quelle est la structure désirable à la fin du laminage ou au début de la transformation. La structure idéale recherchée est une structure fine, homogène et écrouie. La maîtrise de l'écroutissage et de la recristallisation permet de l'atteindre comme le suggère la figure 30 où l'on constate que l'évolution se fait en trois grandes étapes:

-une première étape d'affinement par recristallisation statiques successives suivies de grossissement de grain. Cette première étape est sans incidence importante sur le résultat final mais permet d'approcher la géométrie désirée.

-une deuxième étape qui, si elle est bien conduite, va amener l'affinement souhaité du grain. Si les conditions sont mal choisies, on peut obtenir une recristallisation trop grossière suivie de grossissement secondaire (2b) ou une recristallisation statique incomplète (2a) qui sont les deux causes principales d'hétérogénéité.

-la troisième étape est une étape d'écroutissage additifs qui, s'ils permettent de modifier la forme des grains et l'énergie emmagasinée, ne permettent plus de faire évoluer le volume moyen (ou la taille moyenne) du grain.

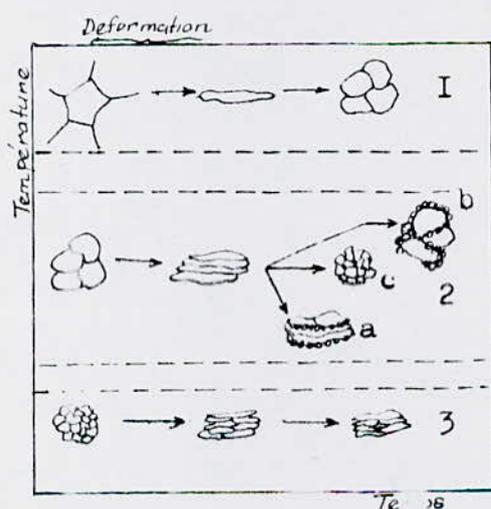


Fig.30. Schéma général de l'évolution de la structure durant le laminage

4-3-5. Relation entre conditions de laminage et propriétés finales.

4-3-5-I. Cas des structures ferrite-perlite

Les propriétés mécaniques des structures ferritoperlitiques sont directement reliées à la taille moyenne du grain ferritique, ce qui fait que toute la métallurgie du laminage des aciers C-Mn et C-Mn micro-alliés vise simplement à l'obtention d'une structure ferritique fine et homogène. On notera que c'est le seul paramètre ayant un aspect bénéfique à la fois sur les caractéristiques de traction et de résilience.

Enfin, signalons que la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ permet un certain héritage et que la transformation d'une austénite écrouie donne une certaine texture à la ferrite.

4-3-5-2. Cas des structures bainitiques et martensitiques

Là encore, l'expérience montre que ce sont les grains fins, homogènes et écrouis qui, par transformation sans diffusion cette fois, conduisent aux martensites présentant les meilleures propriétés après revenu.

4-3-6. Conclusions

Tout ça montre que le laminage ne doit plus être appréhendé comme un simple moyen de mise en forme à chaud mais également comme un moyen métallurgique d'amélioration des matériaux métalliques à chaque fois que ceux-ci doivent être utilisés à l'état brut de laminage à chaud.

La métallurgie du laminage à chaud a permis une bonne compréhension, au moins qualitative et descriptive, des phénomènes et permet d'ores et déjà d'obtenir des caractéristiques que l'on ne saurait obtenir par traitement thermique (cas des aciers C-Mn après recuit de normalisation).

Les problèmes spécifiques du laminage à chaud ainsi que ceux de l'aptitude au forgeage (forgeabilité) laissent ouvert un vaste champ d'investigation.

CHAPITRE 5

Chauffage du métal

5-I. INTERVALLE THERMIQUE DU TRAVAIL DES ACIERS PAR DEFORMATION.

Pour chaque acier, il existe un certain domaine de température au sein duquel le métal devient plastique, donc facile à déformer. Ces différents intervalles sont donnés par le diagramme d'équilibre fer-carbone (domaine hachuré sur le schéma).

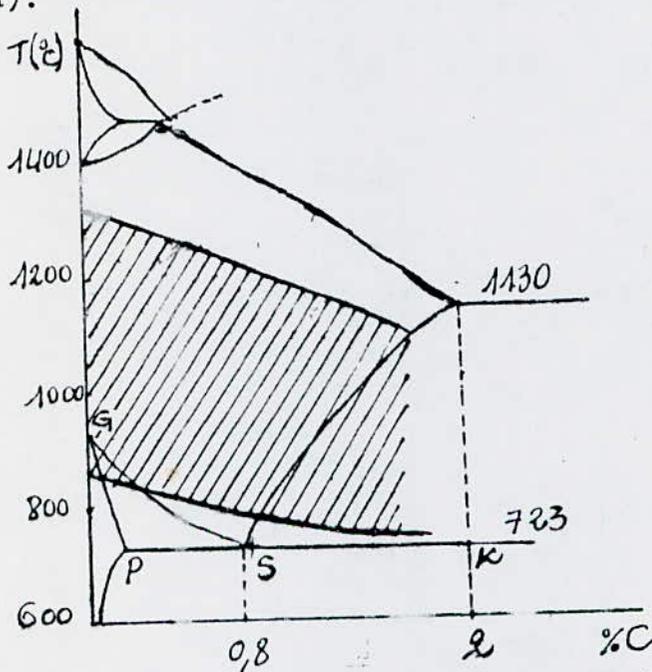


Fig 31. intervalle thermique du travail des aciers.

Pour les aciers hypoeutectoides la température minimale est supérieure de 50 à 100 °C à celle de la ligne GS, pour les aciers hypereutectoides la température minimale est supérieure de 50 à 100 °C à celle de la ligne SK. La température de chauffage maximale se situe de 150 à 200 au dessous de la ligne du solidus.

Température de laminage:

Le tonnage le plus important d'acier laminé est constitué par de l'acier extra-doux, doux et en faible proportion par de l'acier demi-dur. Ces aciers subissent donc sans inconvénient l'effet de la température. Aussi pour des de faciliter le laminage, recherche-t-on la plus haute température possible (1250-1300) mais dans le désir d'éviter la pol

perte sèche du métal par oxydation et l'attaque des maçonnerie par l'oxyde liquide formé à ces hautes températures, on a l'habitude de chauffer à 1200-1250 °C.

5-2. CHAUFFAGE DES LINGOTS ET DEMI-PRODUITS.

Chauffage des lingots: Les lingots sont enfournés debout dans les fours pits constitués par des cellules disposées en batterie. Le nombre de cellules d'une batterie est choisi de manière à assurer l'écoulement normal des lingots entre l'aciérie et le laminoir.

Les fours pits sont dotés de un ou plusieurs brûleurs selon les types de fours, et dont tous les combustibles gazeux ou liquides convient. Mais en pratique, le gaz de haut fourneau est le plus utilisé car il est disposé en abondance dans les grosses usines métallurgiques.

La régulation de la température, la régulation de combustible ainsi que la régulation de pression, sont assurés par des systèmes de contrôle et de régulation.

La durée de séjour des lingots dans ces cellules est donnée par la formule:

$$\tau_c = m \left[1 - 0,000 (t - 200) \right] \text{ heures}$$

t- température d'enfournement du lingot, °C

m- coefficient de correction; m = 1 pour l'acier au carbone.

Réchauffage des demi-produits: Les demi-produits doivent subir un réchauffage à la température de laminage avant leur mise en forme proprement dite en profils désirés et avec une régularité en tous les points des produits. Cette opération s'effectue dans plusieurs types de fours. Le plus répandu à l'heure actuelle est le four poussant. Celui-ci est un four traversé par une nappe de produits progressant sous l'effet d'une pousseuse mécanique et dans lequel le métal s'échauffe progressivement au fur et à mesure de son avancement. Ce chauffage à contre-courant est le plus rationnel, car les fumées sortant du côté où les produits sont froids, elles se trouvent épuisées au maximum et le rendement propre du four est par principe bon et la récupération facile.

A la SNS d'El hadjar, les billettes issues de coulée continue sont réchauffées dans un four à longerons mobiles.

Ce four a la forme et les caracteristiques du four poussant, mais la sole, au lieu d'etre pleine, possede 5 longerons longitudinaux. Ces longerons sont animés d'un mouvement rectangulaire; pendant leur montée, ils soulevent les produits; pendant leur elongation, ils avancent toute la charge, puis la reposent sur la sole fixe en descendant; enfin ils reviennent à leur point de depart en reculant à un niveau inferieur à celui de la partie fixe de la sole. Ce four est composé de trois zones:

- zone de prechauffage
- zone de chauffage
- zone d'egalisation.

Les caracteristiques principales du four sont:

- . Dimension interieure de la sole: Longueur: 2230 mm
Largeur: 13920 mm
Hauteur: 1450 mm
- . Surface active de la sole: 130 m²
- . Quantite de billettes dans le four: 92
- . Productivite du four: 150 tonnes/heure
- . intervalle entre les axes de deux billettes voisines

250 mm

- . Combustible: gaz naturel
- . Nombre de bruleurs: 117, disposes sur la voûte
- . Type de bruleurs: à flamme plate.

Le four est muni d'une installation de refroidissement continu à l'eau. L'air est produit par un ventilateur de puissance 315 kW produisant 90000m³ à l'heure.

DEUXIEME PARTIE

A M E L I O R A T I O N D E L A T E C H N O L O G I E
D U L A M I N A G E D E S R O N D S

CHAPITRE 6

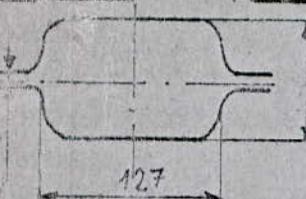
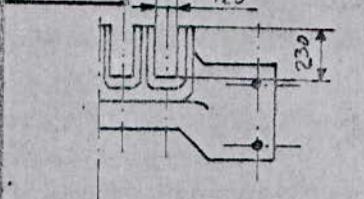
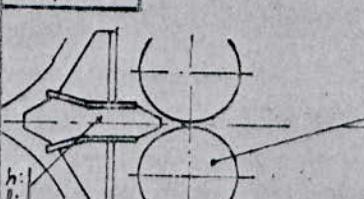
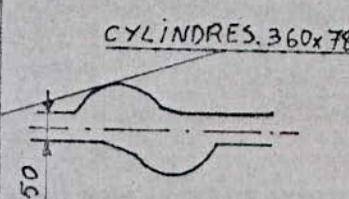
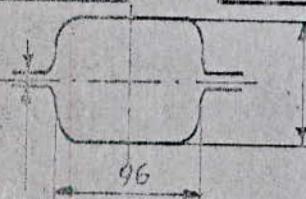
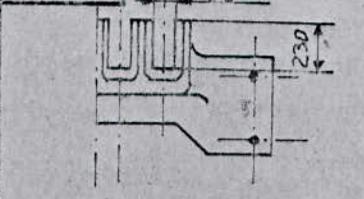
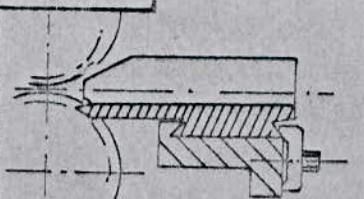
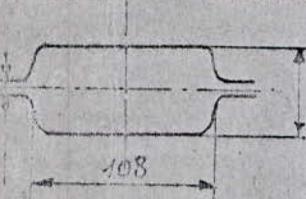
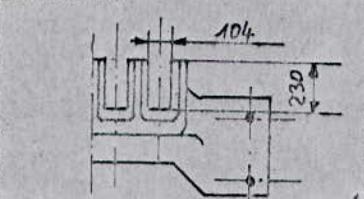
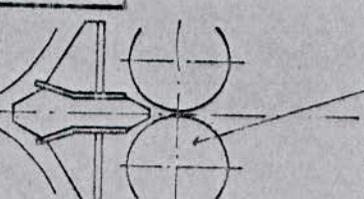
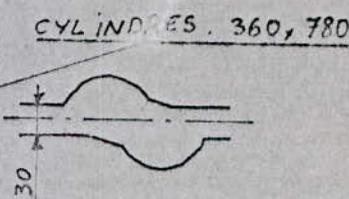
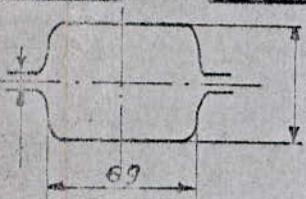
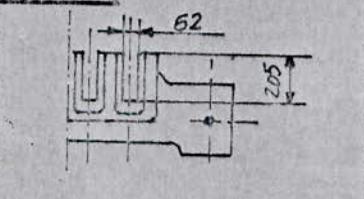
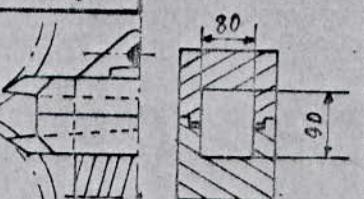
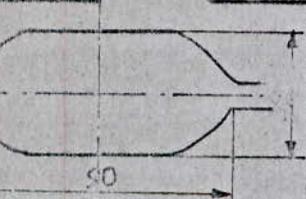
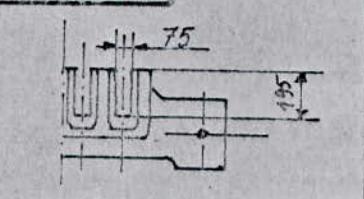
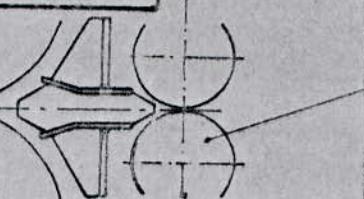
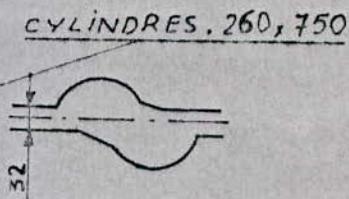
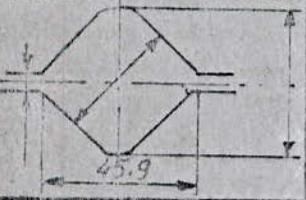
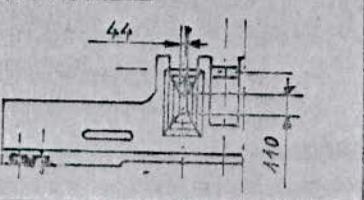
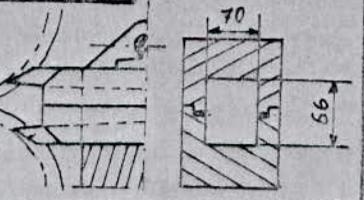
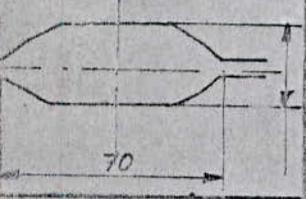
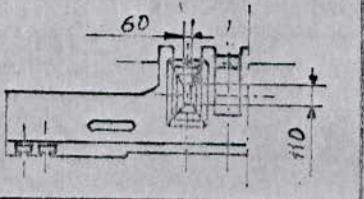
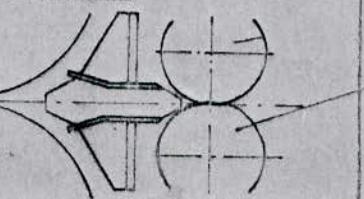
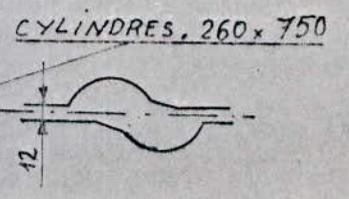
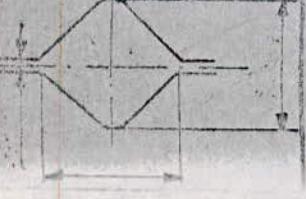
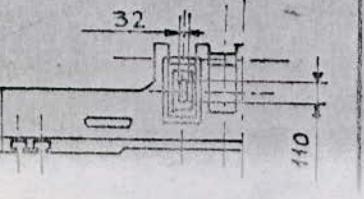
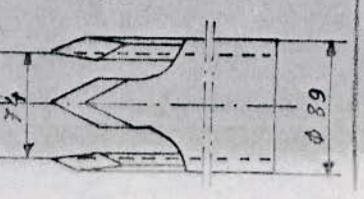
Elaboration de la technologie avantageuse

6-I. ATELIER ACTUEL.

L'atelier produisant du fil machine et rond à béton de la SNS d'El Hadjar se compose d'un train continu. Le stock de billettes est situé dans deux halles longitudinales dont la largeur unitaire est de 36 m. La surface totale au stockage est de 12.100 m². Le stockage du fil et du rond en bobines et en barres se fait dans une halle de 16.500 m² de surface. Les billettes transportées dans le parc de stockage, sont, avant leur mise en four, soumises à l'examen extérieur (visuel), au criquage manuel et au contrôle par l'ultrason à relever les défauts intérieurs. Les billettes en sortant du four entrent dans le groupe dégrossisseur où elles sont laminées dans 8 cages identiques dans leurs construction. Sur les cylindres d'une cage dégrossisseuse sont disposées 4 cannelures. Après le groupe dégrossisseur se trouve une cisaille volante dont le rôle est d'ébouter la tête de chaque barre, afin de faciliter son engagement dans la cage suivante. Ces cisailles sont au nombre de 4 (une pour chaque veine de laminage). Le cisailage effectué, la barre passe sans s'arrêter dans le premier groupe intermédiaire après lequel se trouvent deux tables à boucles à 2 veines chacune. Ces dernières servent à amener les laminés dans le deuxième groupe de cages intermédiaires sans tension. Après le deuxième groupe intermédiaire, le produit laminé doit prendre soit le circuit du fil machine soit le circuit du rond, selon le programme de production.

Circuit fil: Le produit sortant du groupe intermédiaire n°2 est acheminé au moyen de guides vers les cisailles à manivelles qui sont au nombre de 4 (une pour chaque veine) et assurent le coupage de la tête du produit afin de faciliter son engagement dans le bloc finisseur. Les blocs finisseurs, au nombre de 4, travaillent à une veine chacun et ceci afin d'améliorer et de donner la meilleure précision des dimensions

MONTAGE DU GROUPE DEGROSSISSEUR POUR Ø5.5 à 25

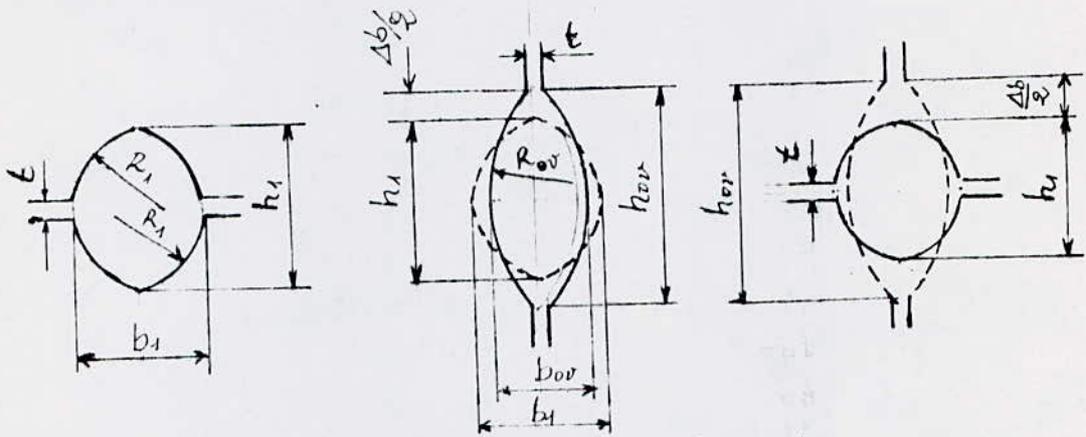
CYLINDRES	GUIDES D'ENTREE	GUIDES DE SORTIE	OBSERVATION
<p>1/15</p>  <p>127</p>	<p>1</p>  <p>125 230</p>	<p>K1/15</p>  <p>h: l:</p>	<p>CYLINDRES. 360x780</p>  <p>50</p>
<p>1/16</p>  <p>96</p>	<p>2 K1/15</p>  <p>86 230</p>	<p>K1/16</p> 	
<p>1/17</p>  <p>108</p>	<p>3 K1/16</p>  <p>104 230</p>	<p>K1/17</p> 	<p>CYLINDRES. 360, 780</p>  <p>30</p>
<p>1/18</p>  <p>69</p>	<p>4 K1/17</p>  <p>62 205</p>	<p>K1/18</p>  <p>80 90</p>	
<p>1/19</p>  <p>50</p>	<p>5 K1/18</p>  <p>75 195</p>	<p>K1/19</p> 	<p>CYLINDRES. 260, 750</p>  <p>32</p>
<p>1/20</p>  <p>45.9</p>	<p>6 K1/19</p>  <p>44 110</p>	<p>K1/20</p>  <p>70 56</p>	
<p>2/3</p>  <p>70</p>	<p>7 K1/20</p>  <p>60 110</p>	<p>K2/3</p> 	<p>CYLINDRES. 260 x 750</p>  <p>12</p>
<p>1/23</p>  <p>74</p>	<p>8 K2/3</p>  <p>32 110</p>	<p>K4/23</p>  <p>89</p>	

ons du fil. Après le bloc finisseur, le fil est dirigé au moyen de guides vers le dispositif à former les spires (emmetteur de spires). Le fil, au cours de son chemin subit un refroidissement à l'eau. les bobines sont ligaturées et acheminées vers le parc de stockage.

Le système de calibrage utilisé sur le train est le suivant:

- Groupe dégrossisseur: voir tableau 5.
- Premier intermédiaire: système ovale-ogive
- Deuxième groupe intermédiaire: système ovale-ogive
- Bloc finisseur: système ovale-rond

Système ovale-ogive:



L'élargissement dans le calibre ovale est:

$$\Delta b = h_{ov} - h_I$$

l'écrasement est donné par:

$$\Delta h = b_I - b_{ov}$$

selon les données sur l'élargissement de l'ovale-ogive dans les calibres ovales, on constate la formule suivante de l'élargissement:

$$\Delta b_{ov} = (0,45 + 0,30) \cdot \sqrt{\Delta hc \cdot R_c \cdot \frac{hc}{b_{1c}}}$$

où $\Delta hc = a_{1c} - b_{ovc}$ - écrasement moyen

R_c - rayon moyen de travail

b_{1c} - épaisseur moyen de l'ovale-ogive du laminé

La surface de l'ogive est: $S = 0,9 \cdot b_1^2$

Tableau de calibrage de la SNS d'EL Hadfan

FINISSEUR	INTER II	INTER-I			DEGROSSISSEUR			GROUPE DE CAGES			N° de cage	CANNELURE			METAL			Moteur			PROFIL																											
		11	12	13	14	15	16	17	18	19		20	21	22	23	24	Profil	Largeur	Profondeur	Jeu	Hauteur	Largeur	Séction	Allongement	Réduction	Elargissement	Ø nominal	Ø laminant	Rotation cylindre	Rapport de transmission	Nominal	mini ÷ maxi	vitesse du lamine	Longueur du lamine	N	Jeu	Haut.	Long.	Moteur									
17	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	115	115	1100	142	37	14	580	520	80	40	323	104 ÷ 960	0.24																				
18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	115	115	1100	142	37	14	580	520	80	40	323	104 ÷ 960	0.24																				
19																																																
20																																																
21																																																
22																																																
23																																																
24																																																

Tableau 6.

PROFIL Ø 14

14	3,5	19,5	15,5	480
15	2	12	24	650
16	2			800

Constante de calibrage : C = 39,18. 10⁶

Allongement total
 et moy. $f = 83,5$
 $m = 1,319$

tolérance : ± 0,25 mm

6.2 - Choix des gammes de cannelures

Le calcul est effectué sur un rond de diamètre 14 mm et lisse, le produit initial est une billette de section 115 x 115 mm et de longueur 13 m

Calcul du nombre de passes n:

La section à chaud de la billette se calcule par la formule suivante :

$$S_{bc} = (1,013)^2 \cdot a^2 - 4 \left(R^2 - \frac{\pi R^2}{4} \right)$$

ou a et R sont respectivement le côté de la section de la billette et l'arrondi de celle-ci :

$$a = 115 \text{ mm}$$

$$R = 12 \text{ mm}$$

$$S_{bc} = (1,013)^2 \cdot (115)^2 - 4 \left(12^2 - 3,14 \frac{12^2}{4} \right)$$

$$S_{bc} = 13447,47 \text{ mm}^2$$

Le diamètre à chaud du rond finisseur se calcule comme suite :

$$d_c = 1,013 \left(d_f + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right)$$

Δ_1 : tolérance positive ; $\Delta_1 = + 0,25$

Δ_2 : tolérance négative ; $\Delta_2 = - 0,25$

d_f : diamètre à froid du rond final ; $d_f = 14 \text{ mm}$

$$d_c = 1,013 \left(14 + \frac{0,25 - 0,25}{2} \right)$$

$$d_c = 14,19 \text{ mm}$$

La section finale du rond est :

$$S_r = \frac{\pi d_c^2}{4} = 3,14 \frac{(14,19)^2}{4}$$

$$S_r = 158,27 \text{ mm}^2$$

Coefficient d'allongement total :

$$\mu_T = \frac{S_{bc}}{S_r} = \frac{13447,47}{158,27}$$

$$\mu_T = 84,96$$

Le coefficient d'allongement moyen μ_m est calculée par la formule empirique :

$$\mu_m = 1 + 0,089 \left(\frac{S_r}{D_m^2} \right)^{-0,191}$$

D_m - Diamètre moyen des cylindres

$$D_m = \frac{580 + 480 + 80 + 320}{4} = 440 \text{ mm}$$

$$\mu_m = 1 + 0,089 \left(\frac{158,27}{(440)^2} \right)^{-0,191}$$

$$\mu_m = 1,32$$

$$\ln \mu_T = n \ln \mu_m \quad n = \frac{\ln \mu_T}{\ln \mu_m}$$

$$n = \frac{\ln (84,96)}{\ln (1,32)}$$

$$n = 16$$

L'obtention du rond $\varnothing 14$ à partir de la billette initiale nécessite un nombre maximal de passes égal à 16.

L'allongement total μ_T se repartit sur ces 16 passes de la façon suivante :

$$\mu_T = \mu_1 \times \mu_2 \times \dots \times \mu_{16} = 84,96$$

avec $1,18 \leq \mu_i \leq 1,40$

Les sections du produit laminé après chaque passe se calculent comme suite :

$$S_r = S_{16} = 158,27 \text{ mm}^2$$

$$S_{15} = S_r \cdot \mu_{16}$$

$$S_{14} = S_{15} \cdot \mu_{15}$$

$$S_2 = S_3 \cdot \mu_3$$

$$S_1 = S_2 \cdot \mu_2$$

Coefficients d'allongement et sections du produit. Tableau 8.

N° de Passe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
μ_i	1.4	1.39	1.40	1.39	1.38	1.38	1.33	1.38	1.33	1.32	1.30	1.26	1.25	1.24	1.22	1.18
S_i (mm ²)	9600.32	6906.93	4933.36	3549.18	2571.83	1863.68	1407.27	1015.42	783.48	578.40	444.93	353.12	282.52	227.83	186.75	158.27

Le calcul est effectué sur les systèmes de cannelures suivantes :

Système quadrangulaire pour les 5 premières cages ainsi que la 7^e cage du groupe dégrossisseur; cannelures carrées pour les cages 6 et 8; système ovale - rond pour les cages du groupe finisseur.

6.2-1. Cannelure rectangulaire

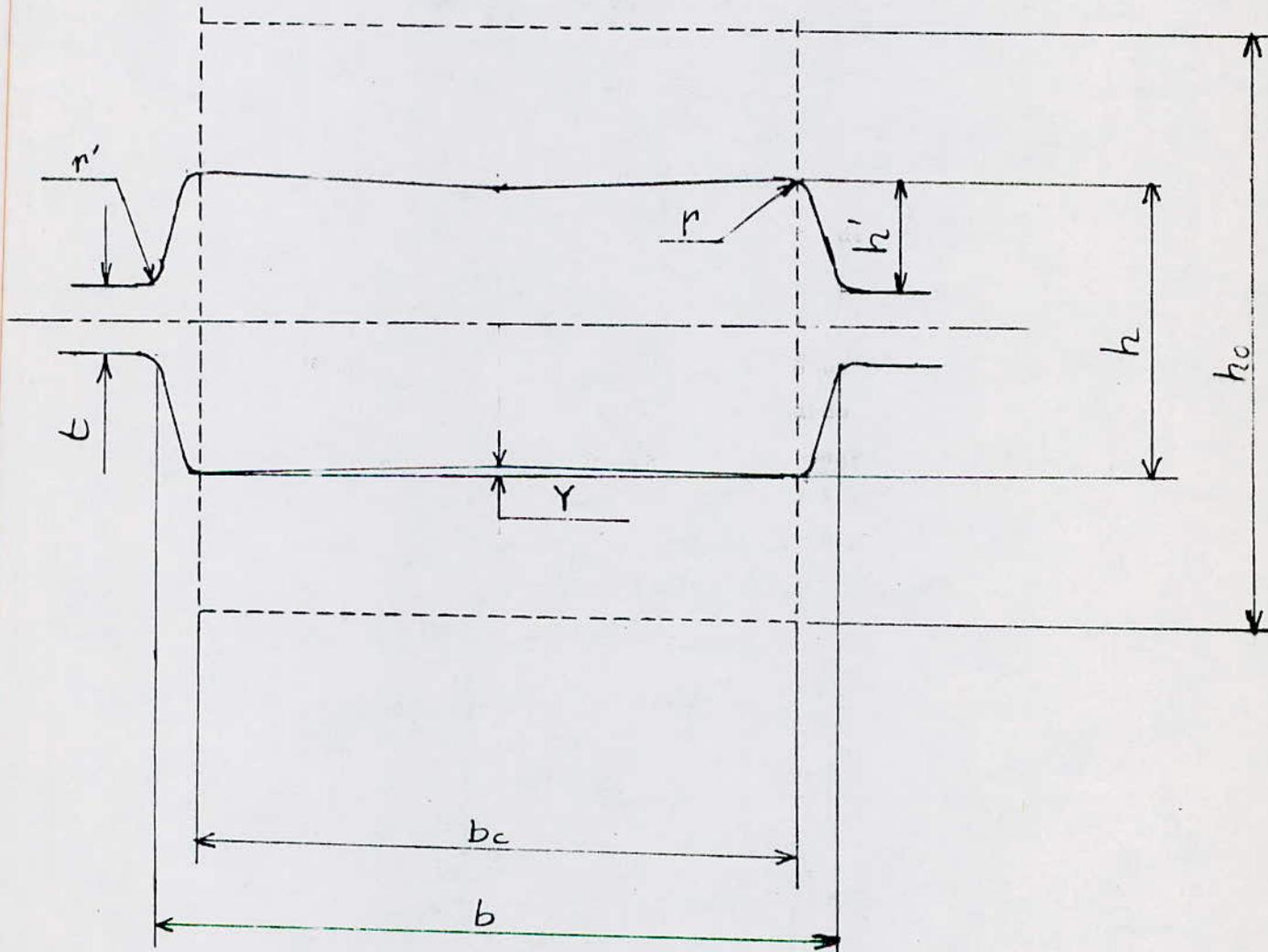


Fig.32 Cannelure rectangulaire

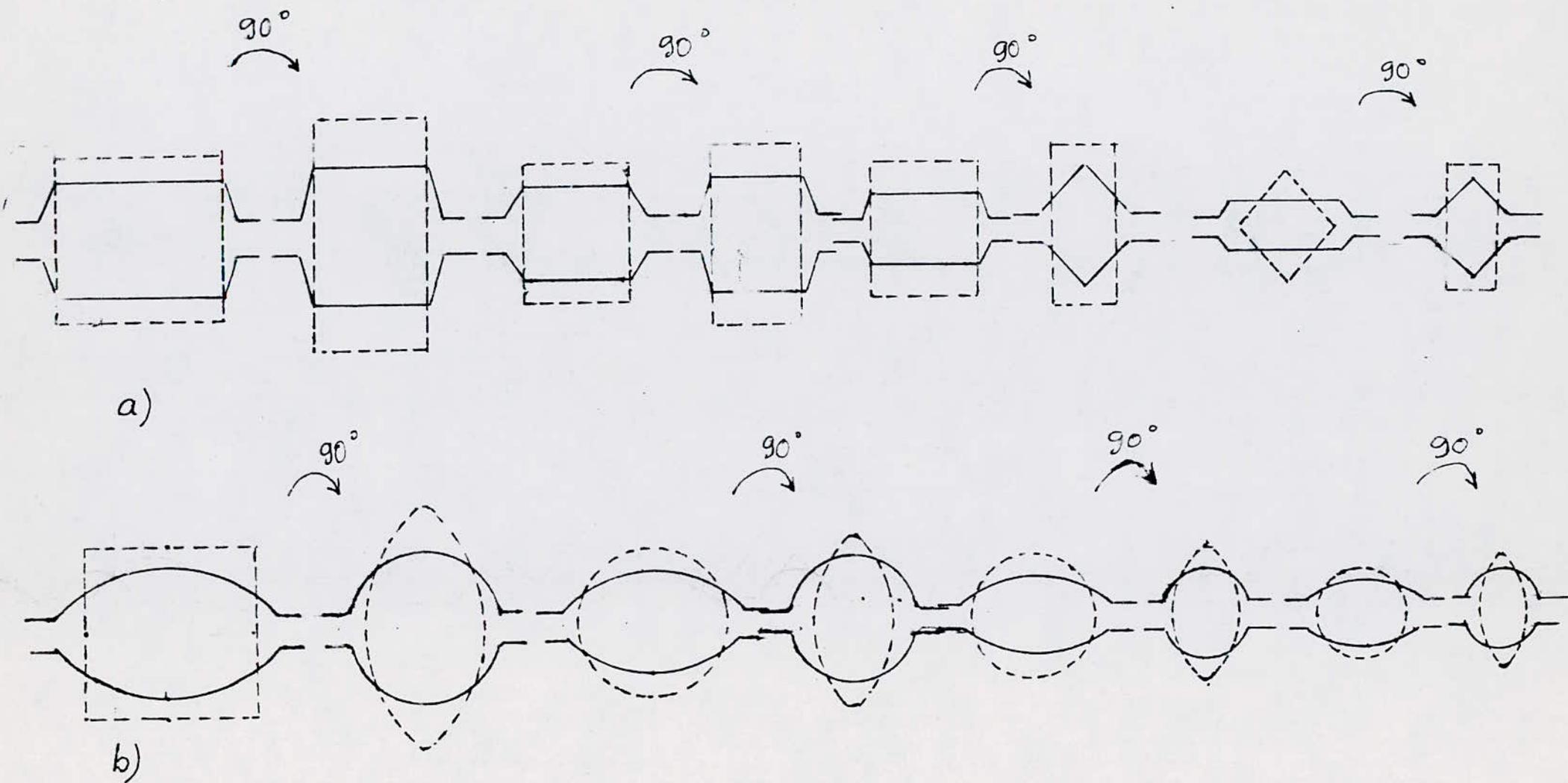


Fig. 33. Système "rectangulaire", dégrossisseur (a) et "Ovale rond", finisseur (b)

Calcul de la reduction

$$\Delta h = (0,7 \div 0,8) \Delta h \text{ max}$$

La reduction maximale admissible $\Delta h \text{ max}$ est donnée par la formule :

$$\Delta h \text{ max} = D_l (1 - \cos \alpha)$$

D_l : Diametre laminant du cylindre

$$D_l = D - h.$$

L'angle d'entrainement α varie de 22 à 29°.

Hauteur de la cannelure

$$h = h_0 - \Delta h$$

Largeur de la barre

$$b = b_0 + \Delta b$$

L'elargissement du metal apres la passe est donnée par la formule de Bakhtionv :

$$\Delta b = 0,575 \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \left(\sqrt{\frac{D_l}{2} \times \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right)$$

Le coefficient de frottement f varie de 0,4 à 0,5
la valeur utilisée est $f = 0,45$

Largeur du fond de la cannelure

$$b_c = (0,98 \div 1) b_0$$

Jeu entre les cylindres

$$t = (0,025 \div 0,04) D.$$

Profondeur de la cannelure :

$$h' = \frac{h - t}{2}$$

Rayons des arrondis

$$r = (0,1 \div 0,2) \cdot b_c$$

$$r' = (0,08 \div 0,12) \cdot b_c$$

Dépouille Y :

$$Y = (0,005 \div 0,025) \cdot h$$

Calcul de la première cannelure

réduction:

$$\Delta h_{\max} = D \ell \cdot (1 - \cos \alpha)$$

$$D = 580 \text{ mm}$$

$$h_0 = 115 \text{ mm}$$

$$\alpha = 25^\circ ; \cos \alpha = 0,9063$$

$$D \ell = 580 - 115 = 465 \text{ mm}$$

$$\Delta h_{\max} = 465 (1 - 0,9063) = 43,56 \text{ mm}$$

$$\Delta h = 0,7 \Delta h_{\max} = 0,7 \times 43,56$$

$$\Delta h = 30,49 \text{ mm}$$

Hauteur de la cannelure :

$$h = h_0 - \Delta h$$

$$h = 115 - 30,49$$

$$h = 84,51 \text{ mm}$$

$$\Delta b = 0,575 \cdot \frac{30,49}{115} \left(\sqrt{\frac{465}{2} \times 30,49} - \frac{30,49}{2,045} \right)$$

$$\Delta b = 7,67 \text{ mm}$$

$$b = b_0 + \Delta b$$

$$b = 115 + 7,67$$

$$b = 122,67 \text{ mm}$$

Largeur de la cannelure :

$$b_c = b_0 = 115 \text{ mm}$$

Jeu entre les cylindres :

$$t = (0,04) D$$

$$t = 0,04 \times 580$$

$$t = 23,2 \text{ mm}$$

Profondeur de la cannelure

$$h' = \frac{h - t}{2}$$

$$h' = \frac{84,5 - 23,2}{2}$$

$$h' = 30,65 \text{ mm}$$

Rayons des arrondis :

$$r = 0,1 \times 115$$

$$r = 11,5 \text{ mm}$$

$$r' = 0,08 \times 115$$

$$r' = 9,2 \text{ mm}$$

Depouille Y : La dépuille est généralement prise égale à 1 mm .

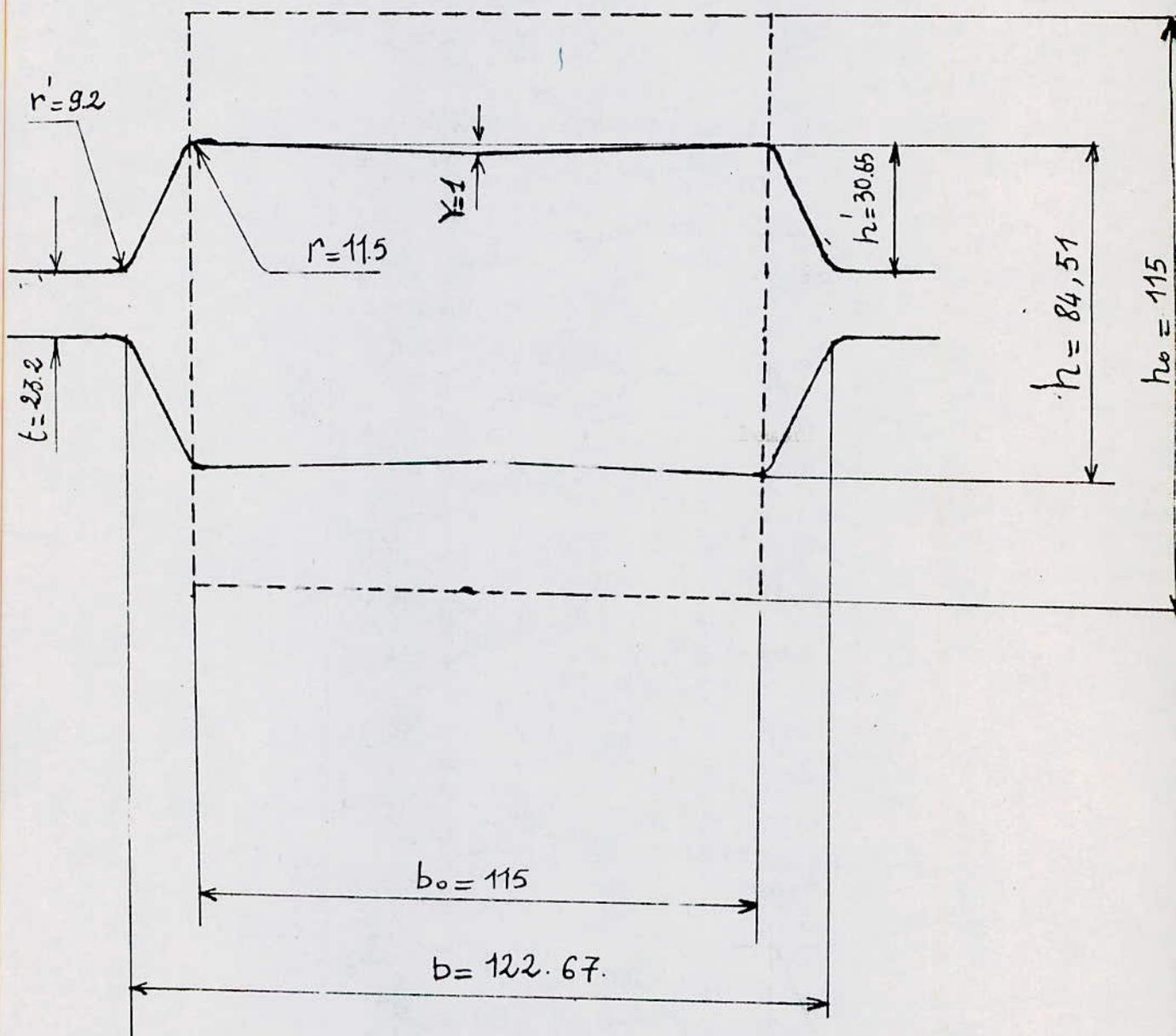


Fig. 34 Première cannelure.

Paramètres des cannelures rectangulaires

Tableau 9.

N° de Passe	h_0 (mm)	h (mm)	Δh (mm)	b_0 (mm)	b (mm)	Δb (mm)	b_c (mm)	h' (mm)	t (mm)	D_f (mm)	r (mm)	r' (mm)	D (mm)	Y (mm)
0	115			115										
1	115	84.50	30.50	115	122.67	7.67	115	30.65	23.20	465	11.50	9.20	580	1
2	122.67	38	34.29	84.51	92.60	8.10	84.51	32.59	23.20	457.33	8.45	6.76	580	1
3	88.38	56.13	32.25	92.60	103.75	11.15	92.60	20.81	14.50	491.62	9.26	7.40	580	1
4	103.75	75.54	28.21	56.13	62.61	6.48	56.13	31.77	12	376.25	5.61	4.49	480	1
5	75.54	49.01	26.53	62.61	71.44	8.83	62.61	18.5	12	404.46	6.26	5	480	1
7	53.92	28.42	25.50	55.72	68.17	12.33	33.90	8.21	12	426	5.39	4.31	480	1

Côté du carré :

$$a = \sqrt{S}$$

Hauteur de la cannelure

$$h_c = a \sqrt{2}$$

$$h_c = b_c$$

Rayons des arrondis

$$r = (0,1 \div 0,2) a$$

$$r' = (0,08 \div 0,12) a$$

Hauteur de la barre

$$h = h_c - 0,82 r$$

Jeu entre les cylindres

$$t = (0,08 \div 0,012) D$$

Largeur de la barre

$$b = b_c - t$$

Calcul de la cannelure n° 6

$$S = 1863,73 \text{ mm}^2$$

$$a = \sqrt{S} = \sqrt{1863,73}$$

$$a = 43,17 \text{ mm}$$

Hauteur de la cannelure

$$h_c = a \sqrt{2} = 43,17 \times 1,41$$

$$h_c = 61 \text{ mm} .$$

Rayons des arrondis :

$$r = (0,2) \times 43,17 = 8,63 \text{ mm}$$

$$r' = 0,12 \times 43,17 = 5,18 \text{ mm}$$

Jeu entre les cylindres

$$t = 0,011 \cdot D = 0,011 \cdot 480$$

$$t = 5,28 \text{ mm}$$

Profondeur de la cannelure

$$h' = \frac{h - t}{2} = \frac{61 - 5,28}{2}$$

$$h' = 27,86 \text{ mm}$$

Hauteur de la bague

$$h = h_c - 0,82 \cdot r$$

$$h = 61 - 0,82 \cdot 8,63$$

$$h = 53,92 \text{ mm}$$

Largeur de la barre

$$b = b_c - t$$

$$b = 61 - 5,28$$

$$b = 55,72 \text{ mm}$$

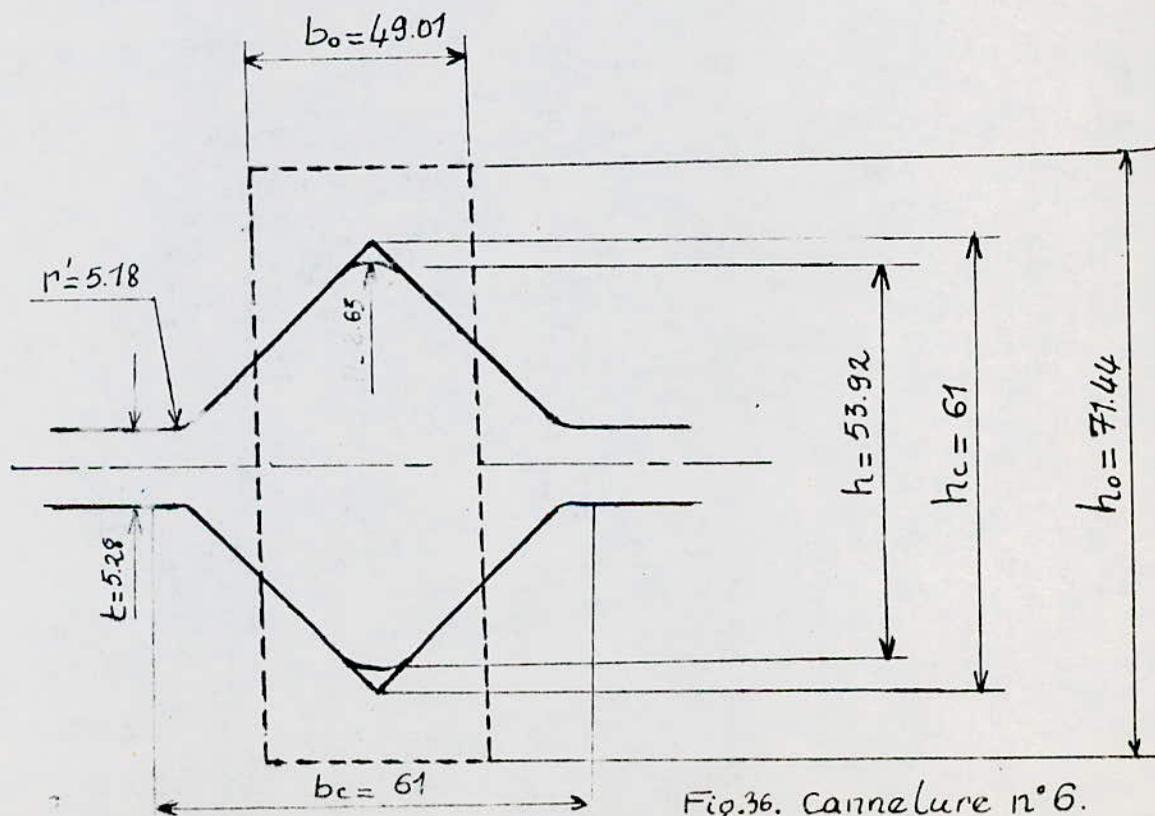


Fig.36. Cannelure n°6.

Parametres des cannelures carrees.

Tableau. 10.

N° de Passe	h_0 (mm)	h (mm)	Δh (mm)	b_0 (mm)	b (mm)	Δb (mm)	b_c (mm)	h_c (mm)	h' (mm)	t (mm)	r (mm)	r' (mm)	a (mm)
6	71.41	53.92	17.52	49.01	55.72	6.71	61	61	27.86	5.28	8.63	5.17	43.17
8	68.17	39.83	28.34	39.78	11.37	45.06	45.06	45.06	17.25	5.28	6.37	3.82	31.85

6-2-3. cannelure ovale.

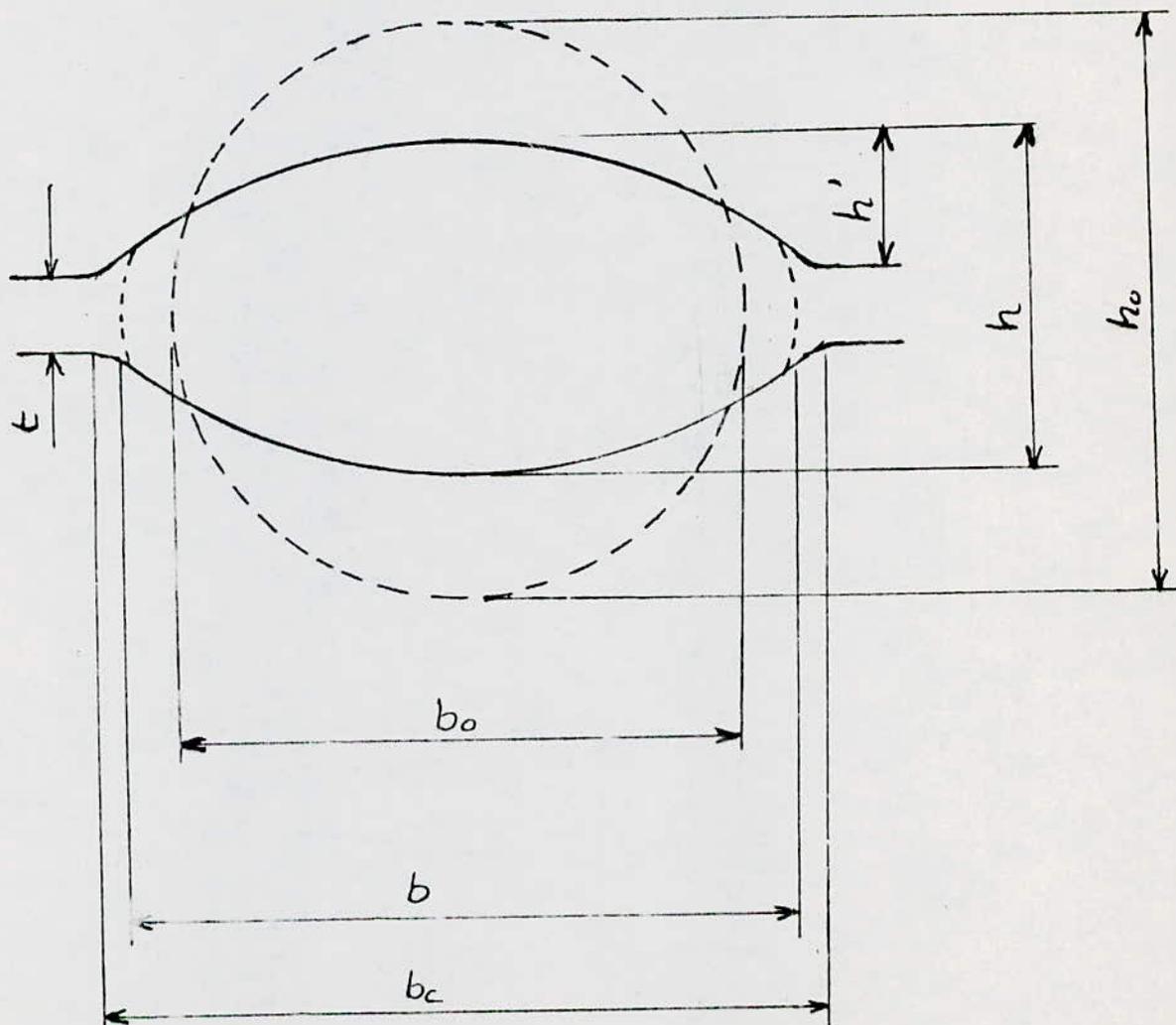


Fig. 37. Cannelure ovale. - 88 -

Calcul du rayon de l'ovale :

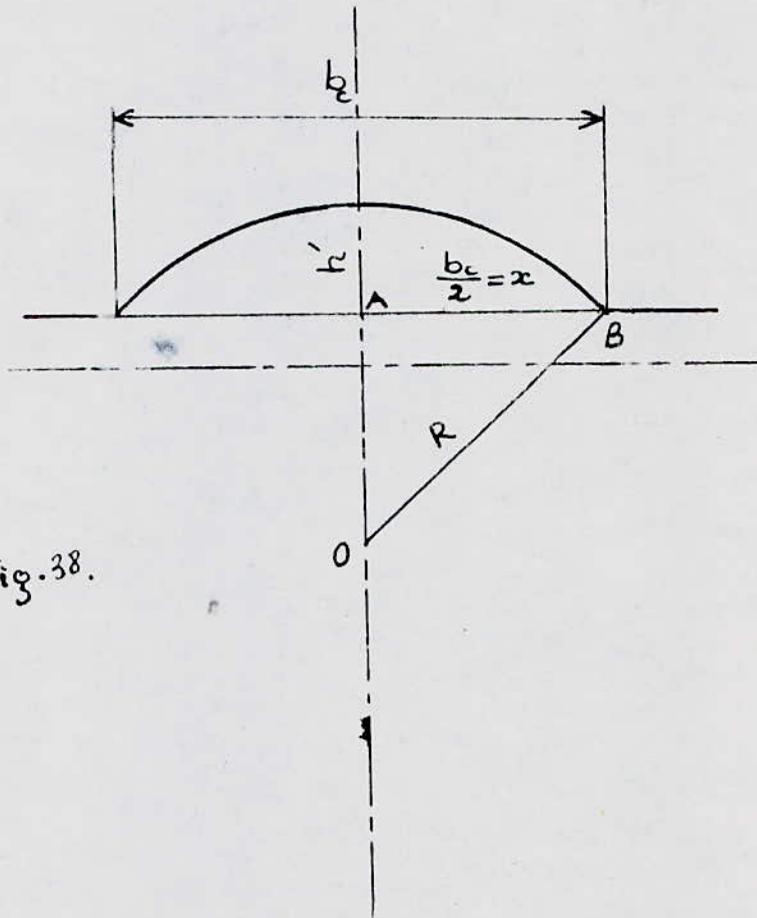


Fig. 38.

Soit h' la profondeur de la cannelure . Si on considère $\frac{b_c}{2}$ comme la moitié de la largeur de la cannelure prise pour un des 2 côtés du triangle rectangle OAB , et $R - h'$ l'autre côté on aura :

$$\left(\frac{b_c}{2}\right)^2 + (R - h')^2 = R^2$$

$$\frac{b_c^2}{4} + R^2 + h'^2 - 2Rh' = R^2$$

$$R = \frac{b_c^2 + 4h'^2}{8h'}$$

Largueur de la cannelure

D'après la figure 38 on a :

$$b = 2x$$

$$x^2 + (R - h')^2 = R^2$$

$$x^2 + R^2 + h'^2 - 2Rh' = R^2$$

$$x^2 = 2Rh' - h'^2$$

$$x = \sqrt{2Rh' - h'^2}$$

$$b_c = 2\sqrt{2Rh' - h'^2}$$

Largueur de l'ovale :

$$b = \frac{3S}{h \left(2 + \frac{t}{h} \right)}$$

Jeu entre les cylindres

$$t = (0,008 \div 0,012) D$$

Rayon de l'arrondi

$$r = (0,3 \div 0,4) h$$

Calcul de la cannelure n° 11

$$S = 444,93 \text{ mm}$$

Hauteur de l'ovale : La hauteur h est deduite du graphe de la figure 43, p 110, donnant le rapport de la hauteur de l'ovale h au diametre du rond forme par cet ovale en fonction du diametre du rond .

$$\frac{h}{d} = f(d) .$$

Pour le diametre du rond n° 12 , d = 21,20 mm
 on a ; $\frac{h}{d} = 0,82$

$$d'ou \quad h = 0,82 \times 21,20$$

$$h = 17,38 \text{ mm}$$

Jeu entre les cylindres

$$t = (0,008 \div 0,012) D$$

$$t = 0,008 \times 380$$

$$t = 3 \text{ mm}$$

Largeur de l'ovale

$$b = \frac{35}{h \left(2 + \frac{t}{h} \right)} = \frac{3 \times 444,93}{17,38 \left(2 + \frac{3}{17,38} \right)}$$

$$b = 35,34 \text{ mm}$$

Profondeur de la cannelure

$$h' = \frac{0h - t}{2} = \frac{17,38 - 3}{2}$$

$$h' = 7,19 \text{ mm} .$$

Rayon de l'ovale :

$$R = \frac{b^2 + 4h'^2}{8h'} = \frac{(35,34)^2 + 4(7,19)^2}{8(7,19)}$$

$$R = 25,30 \text{ mm}$$

Largeur de la cannelure :

$$b_c = 2\sqrt{2Rh' - h'^2} = 2\sqrt{2 \times 25,30 \times 7,19 - 7,19^2}$$

$$b_c = 35,35 \text{ mm}$$

Rayon de l'arrondi :

$$r = (0,3 \div 0,4) \cdot h = 0,3 \times 17,38$$

$$r = 5,21 \text{ mm}$$

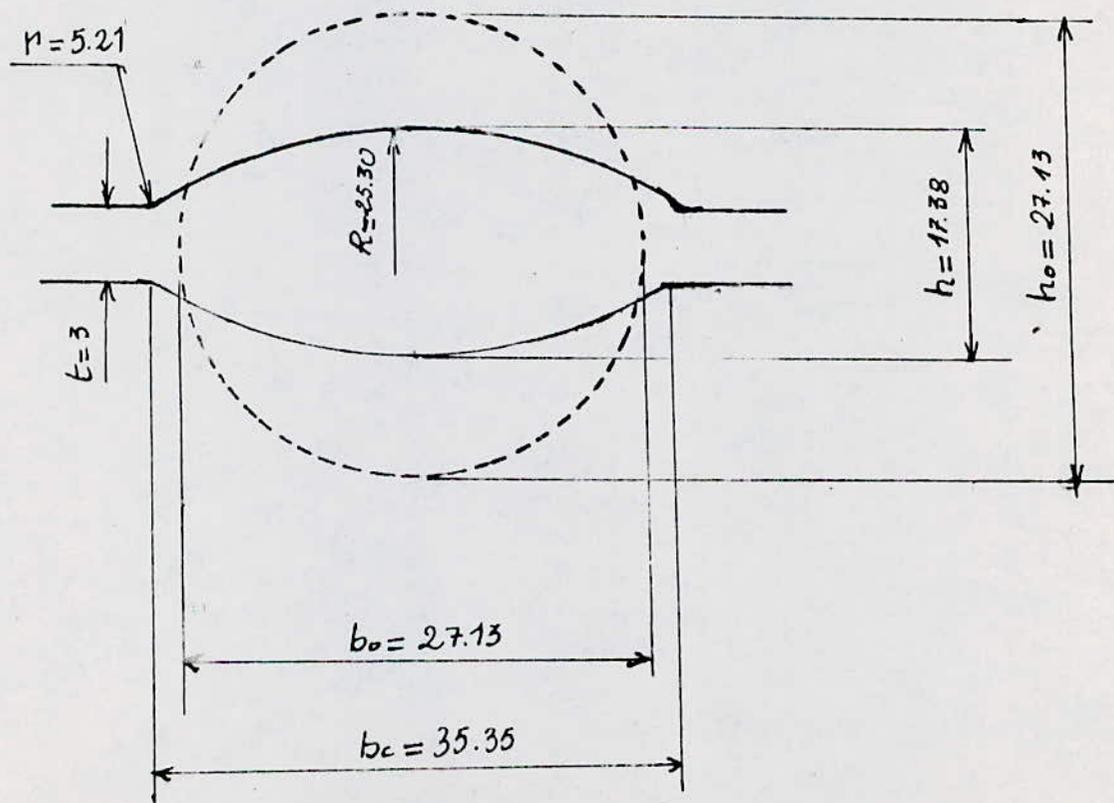


Fig. 39. Cannelure n° 11

Parametres des cannelures ovales.

Tableau. 11.

N° de Passe	h_0 (mm)	h (mm)	Δh (mm)	b_0 (mm)	b (mm)	Δb (mm)	R (mm)	b_c (mm)	h_i (mm)	t (mm)	r (mm)
9	39,38	23.60	16.23	39.77	44.24	4.47	30.46	44.26	9.52	4.56	7
11	27.13	17.38	9.81	27.13	35.33	8.21	25.30	35.35	7.19	3	5.21
13	21.20	12.94	8.26	21.20	29.29	8.10	24.15	29.30	5	3	3.88
15	17.03	11.35	5.68	17.03	20.10	4	15.35	21.10	7.37	2.28	3.40

6-24. Cannelure ronde

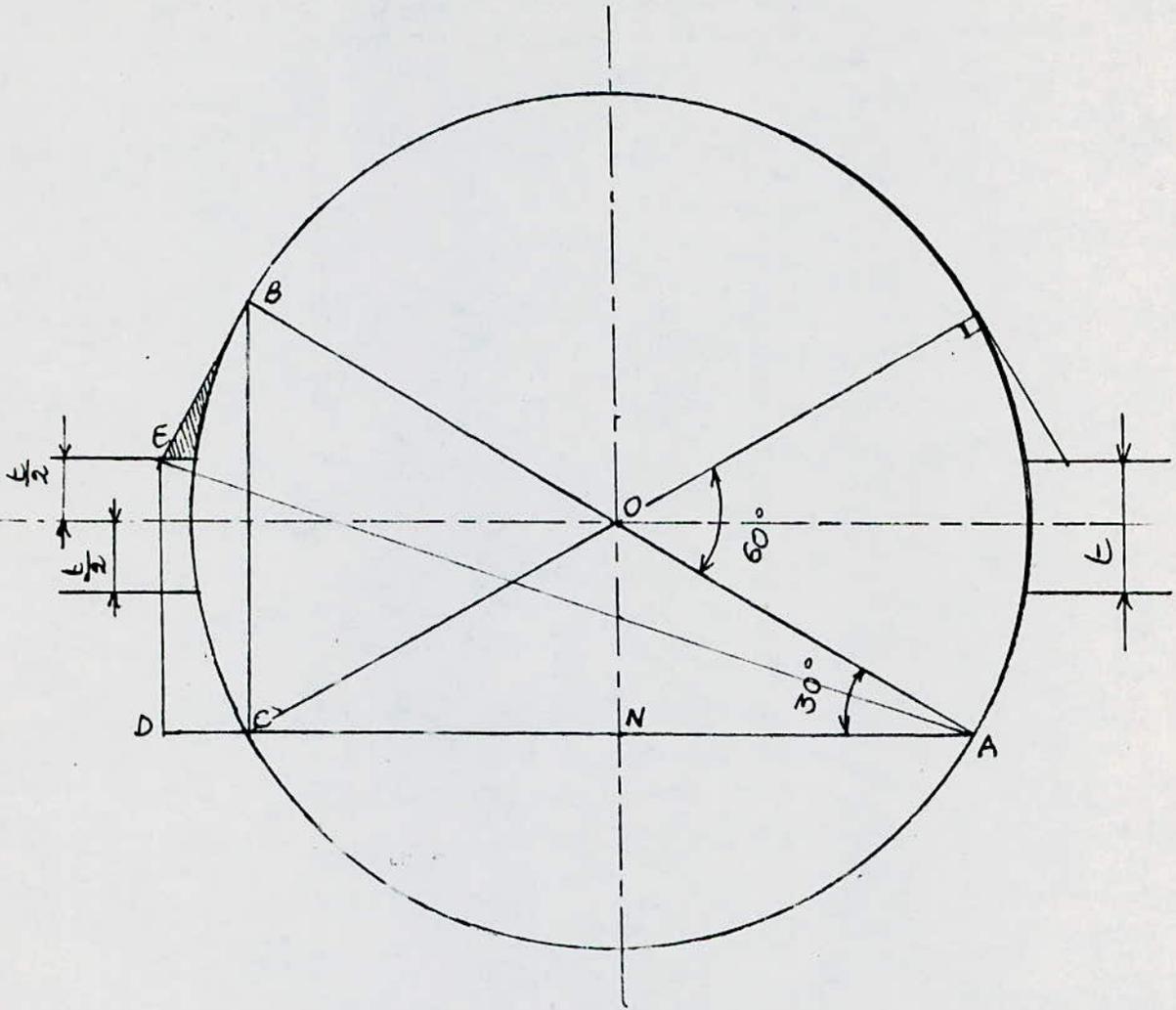


Fig. 40.

Largeur de la cannelure : D'après la figure 40

on a :

$$BA = 2R$$

$$\cos 30^\circ = \frac{NA}{R} \quad \text{et} \quad \sin 30^\circ = \frac{NO}{R}$$

$$NA = R \times 0,866$$

$$NO = R \times 0,5$$

Le triangle rectangle EDA donne :

$$ED = 0,5 R + \frac{t}{2}$$

$$DA = \sqrt{EA^2 - ED^2} = \sqrt{(2R)^2 - \left(\frac{R+t}{2}\right)^2}$$

$$DA = \sqrt{\frac{16 R^2 - R^2 - t^2 - 2Rt}{4}}$$

or $DN = DA - NA = \frac{\sqrt{15R^2 - 2Rt - t^2}}{2} - 0,866 R$

finalement :

$$b_c = 2DN$$

$$b_c = 2 \left(\frac{\sqrt{15 R^2 - 2Rt - t^2}}{2} - 0,866 R \right)$$

avec R - rayon du rond

Diametre du rond :

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

profondeur de la cannelure

$$h = \frac{d - t}{2}$$

Jeu entre les cylindres

$$t = (0,005 \div 0,008) \cdot D.$$

Calcul de la cannelure n° 14 :

Section : $S = 227,83 \text{ mm}^2$

Diametre : $d = \sqrt{\frac{4 \cdot 227,83}{3,14}}$

$d = 17,09 \text{ mm}$

Rayon : $R = \frac{17,09}{2}$

$R = 8,5 \text{ mm}$

Jeu entre les cylindres :

$t = 0,006 D = 0,006 \times 380$

$t = 2,28 \text{ mm}$

Largeur de la cannelure

$b_c = 2 \left(\frac{\sqrt{15 \cdot (8,5)^2 - 2 \times (8,5) \times 2,28 - 2,28^2}}{2} - 0,866 \times 8,5 \right)$

$b_c = 17,54 \text{ mm}$

Profondeur de la cannelure

$h = \frac{17,02 - 2,28}{2}$

$h' = 7,37 \text{ mm}$

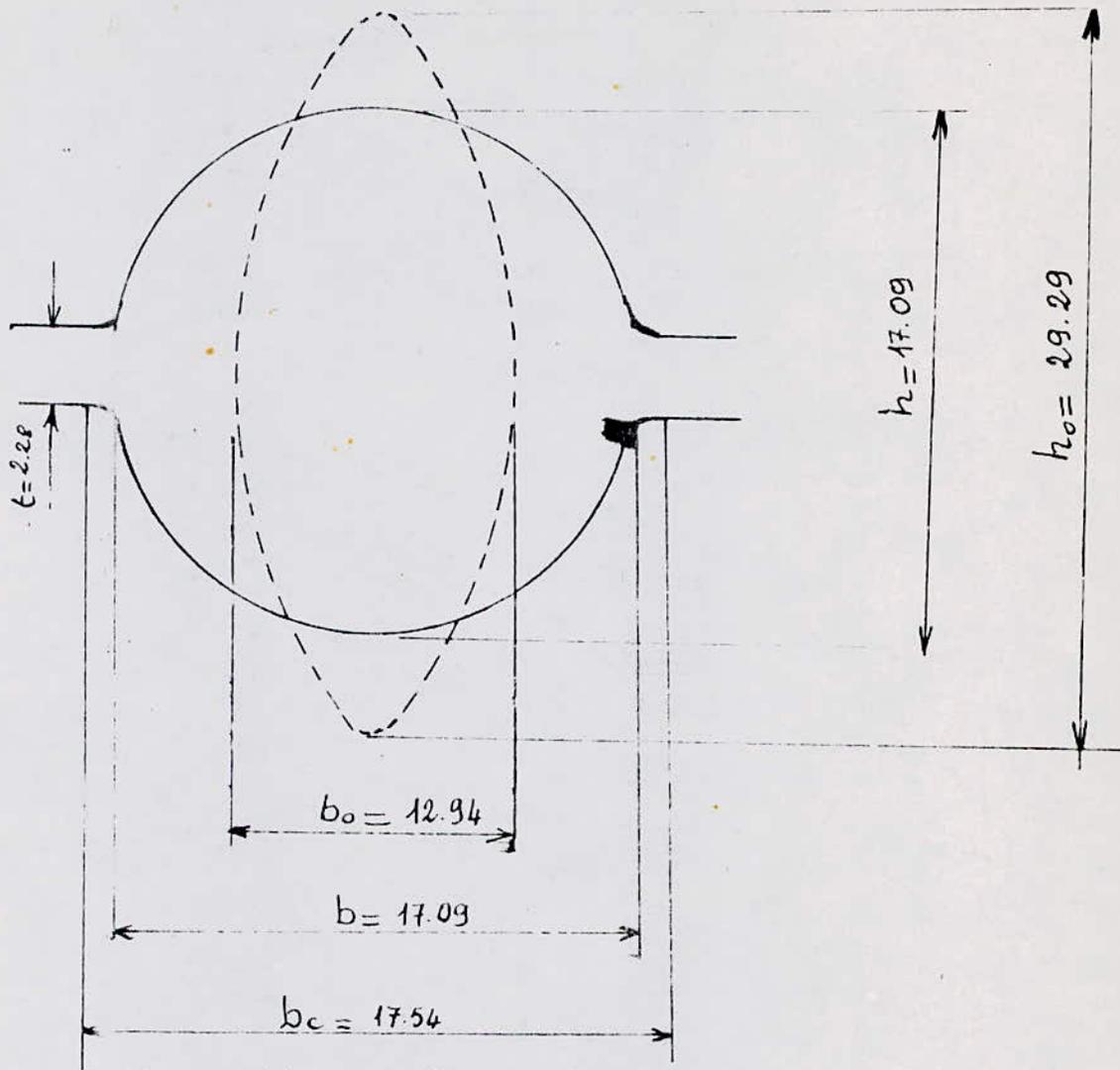


Fig. 41. cannelure n° 14.

Parametres des cannelures rondes Tableau 12.

N° de Passe	h_0 (mm)	h (mm)	Δh (mm)	b_0 (mm)	b (mm)	Δb (mm)	b_c (mm)	h' (mm)	t (mm)	r (mm)
10	44.24	27.13	17.11	23.60	27.13	3.53	28.38	12.42	2.28	
12	35.33	21.20	14.13	17.38	21.20	3.82	22.03	9.46	2.23	
14	29.29	17.09	12.26	12.94	17.09	4.09	17.54	7.37	2.28	
16	20.1	14.19	5.91	11.35	14.19	2.84	14.60	6.09	2	

6-3. CALCUL DES VITESSES DE LAMINAGE

Le calcul des vitesses dans toutes les cages se fait à partir de la vitesse de la dernière cage qui elle-même dépend de la capacité du four.

VITESSE DE LA DERNIERE CAGE : CAGE N° 16 :

La capacité théorique du four est de 150 T/h. Comme le four atteint 70 % de sa capacité théorique, sa capacité réelle est de : $150 \times 0.7 = 105 \text{ T/h}$

$$C = 105 \text{ T/h}$$

En 1 heure le four fait évacuer 105 tonnes de billettes. Le poids net de la billette après le four étant de 1,28 tonnes le temps nécessaire pour évacuer 2 billettes étant :

$$t = \frac{2 \times 1280 \times 3600}{105}$$

$$t = 87,77$$

Le choix de 2 billettes est dû au fait que le laminoir lamine 2 billettes à la fois

Ces 2 billettes sorties du four doivent être laminées dans la 1^{ère} cage avant que les autres ne soient évacuées. Donc $t_{\text{tot}} = t_1 + t_{\text{int}}$ avec :

t_1 - temps pour effectuer 1 passe

t_{int} - temps s'écoulant entre sortie de la billette - et son entrée dans la cage.

$$t_{\text{int}} = 4 \text{ secondes}$$

Le temps de laminage est donc : $t_l = t - t_{int}$

$$t_l = 87,77 - 4$$

$$t_l = 83,77 \text{ secondes}$$

vu la constance du volume de la barre par seconde ce temps de laminage est le même pour toutes les cages du train .

La vitesse à la dernière cage se calcule comme suite :

$$V = \frac{L}{t_l} \quad \text{ou} \quad L - \text{longueur de la billette après la dernière cage}$$

Volume à chaud de la billette

$$L = \frac{\text{Volume à chaud de la billette}}{\text{section du rond de } \varnothing 14 \text{ mm}}$$

$$L = \frac{5_{bc} \cdot 10}{S_{\varnothing 14}} = \frac{13447,47 \times 13 \times 1,013}{158,27}$$

$$L = 1119 \text{ m}$$

La vitesse à la première cage est donc :

$$V = \frac{1119}{83,77} = 13,35 \text{ m/s}$$

Calcul de la constante de laminage

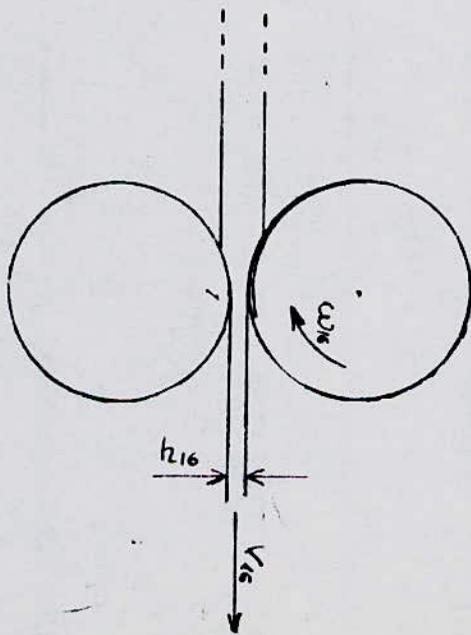
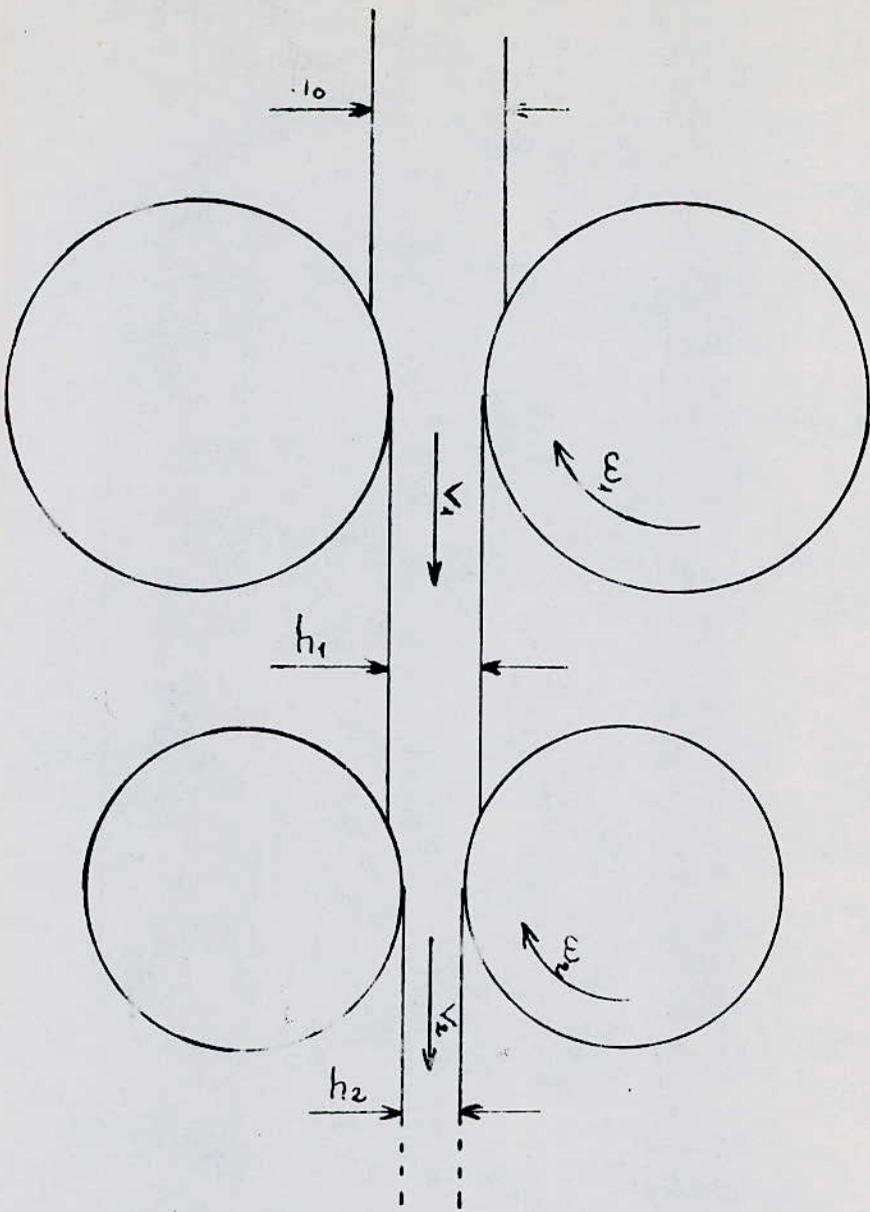
$$K = \omega \cdot S \cdot D_t$$

avec : $\omega = n_{br}$ de tours par min. du cylindre

S - section du laminé

Dt - Diamètre de travail du cylindre .

Fig. 4.8. Procès de laminage.



Il se calcul pas la formule suivante

$$D_t = D - 2h' + t$$

h' - profondeur de la cannelure, mm

t - jeu entre cylindres ; mm

D - diametre nominal du cylindre, mm

$$K = W_1 \cdot S_1 \cdot D_{t_1} = W_2 \cdot S_2 \cdot D_{t_2} = \dots = W_{16} \cdot S_{16} \cdot D_{t_{16}}$$

$$W_{16} = \frac{60 \cdot V_{16}}{D_{t_{16}}}$$

$$V_{16} = 13,35 \text{ m/s}$$

$$D_{t_{16}} = 320 - 2 \cdot 6,09 + 2$$

$$D_{t_{16}} = 309,82 \text{ mm} = 0,30982 \text{ m}$$

$$W_{16} = \frac{60 \cdot 13,35}{3 \cdot 14 \cdot 0,30982} = 823,36 \text{ tr / mm}$$

$$S_{16} = 158,27 \text{ mm}$$

$$K = 158,27 \times 823,36 \times 309,82$$

$$K = 4,037 \cdot 10^7$$

Calcul de la vitesse dans la premiere cage:

$$K = S_1 \cdot D_{t_1} \cdot W_1$$

$$W_1 = \frac{K}{S_1 \cdot D_{t_1}}$$

$$D_{t_1} = D_1 - 2h'_1 + t_1$$

$$D_{t_1} = 580 - 2 \cdot 50,65 + 23,2$$

$$D_{t_1} = 541,9$$

$$S_1 = 9600,32 \text{ mm}^2$$

$$W_1 = \frac{4,037 \cdot 10^7}{9600,32 \times 541,90}$$

$$W_1 = 7,75 \text{ tr/mn.}$$

La vitesse du laminé apres la première cage est

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D_{t1} \cdot W_1}{60} ; D_{t1} \text{ en m}$$

$$V_1 = \frac{3,14 \times 0,5419 \times 7,75}{60}$$

$$V_1 = 0,22 \text{ m/s.}$$

..

vitesse de Laminage

Tableau -13.

N° de passe	D (mm)	D _t (mm)	ω (tr/min)	V (m/s)
1	580	541.90	7.75	0.22
2		538.02	10.85	0.30
3		552.28	19	0.42
4	480	428.46	26.54	0.60
5		455	34.50	0.82
6		429.56	50.42	1.13
7		475.58	60.57	1.50
8		450.70	88.20	2.00
9	380	365.52	144.66	2.76
10		357.44	195.26	3.65
11		368.62	246.74	4.74
12		368.36	314.63	6.00
13		373.14	382.97	7.47
14		367.54	492.10	9.27
15	320	376.34	574.40	11.31
16		309.82	823.36	16.35

-6.4. CALCUL DES PUISSANCES DE LAMINAGE.

Le calcul des puissances de laminage repose sur l'analyse de deux efforts principaux, s'exerçant au cours de laminage.

- L'effort d'écrasement résultant de la pression,
- L'effort de frottement dû à l'adhérence du métal sur les cylindres au cours de la déformation.

- Notations:
- Δh - Réduction moyenne, mm.
 - F - Section déplacée, mm²
 - R - Résistance à la déformation, Kg/mm²
 - L - Largeur moyenne de la barre, m.
 - C_f - Coefficient fonction du frottement
 - Pe - Puissance nécessaire pour réaliser l'écrasement.
 - Pf - Puissance nécessaire pour vaincre le frottement.
 - Pt - Puissance totale.
 - V. - Vitesse circonférentielle des cylindres, m/s.
 - T - Température de laminage.

La puissance totale est donnée par la formule suivante:

$$Pt = Pe + Pf. \quad ; \text{ Kg m/s.}$$

$$Pe = F \cdot R \cdot V \quad ; \text{ Kg m/s.}$$

$$Cf = V \cdot \frac{2 \times 2 \times L \cdot W}{100}$$

$$Pf = Cf \cdot Pe$$

La résistance à la compression R qui correspond à l'effort nécessaire pour créer une déformation permanente du métal est indiquée dans le tableau ci-dessous pour différentes températures comprises entre 750 et 1200 °c.

Tableau. 14.

TEINTE DE L'ACIER	TEMPERATURE(°C)	R (Kg/mm ²).
Rouge sombre	750	12,5
Rouge clair	800	11
Orange sombre	850	10
Orange clair	900	9
Jaune sombre	950	8
Jaune pâle	1000	7
Jaune	1050	6
Jaune clair	1100	5
Jaune blouissant	1150	4
Blanc	> 1150	3

Calcul de la puissance dans la 3^{ème}. cage: Cannelure rectangulaire:

$$\Delta h = 32,25 \text{ mm}$$

$$L = b_0 = 92,6 \text{ mm.}$$

$$F = b_0 \Delta h = 92,6 \times 32,25$$

$$F = 2986,35 \text{ mm}^2$$

$$W = 19 \text{ tr/mm.}$$

$$V = 0,42 \text{ m/s.}$$

$$T = 1050 \text{ }^\circ\text{C} \longrightarrow R = 6 \text{ Kg/mm}^2$$

$$P_e = 2986,35 \times 6 \times 0,42 = 7525,60 \text{ Kgm/s}$$

$$P_e = 7525,60 \times \frac{0,736}{75}$$

$$P_e = 73,85 \text{ KW.}$$

$$C_f = 0,42 - \frac{4 \times 0,0926 \times 19}{100}$$

$$C_f = 0,34$$

$$P_f = 0,34 \times 73,85$$

$$P_f = 25,82 \text{ KW}$$

$$P_t = P_f + P_e$$

$$P_t = 25,82 + 73,85$$

$$P_t = 99,67 \text{ KW}$$

Calcul de la puissance dans la 8^{ème}. cage:

Cannelure carrée:

Comme il s'agit de cannelures profilées, dans le calcul de coefficient d'adhérence C_f , nous assimilerons la largeur du profil à la largeur de la cannelure pour les ovales, à la diagonale pour les carrés, à $\frac{\pi d}{2}$ pour les ronds.

$$\Delta h = 28,34 \text{ mm}$$

$$b_0 = 28,42 \text{ mm.}$$

$$L = bc = 45,06 \text{ mm.}$$

$$F = 28,42 \times 28,34$$

$$F = 805,42 \text{ mm}^2$$

$$W = 88,20 \text{ tr/mm.}$$

$$V = 2 \text{ m/s.}$$

$$T = 1050 \text{ }^\circ\text{C} \longrightarrow R = 6$$

$$P_e = 805,42 \times 6 \times 2 \times \frac{0,736}{75}$$

$$P_e = 94,84 \text{ KW}$$

$$C_f = 2 - \frac{4 \times 0,045 \times 88,2}{100}$$

$$C_f = 1,84$$

$$P_f = 174,61 \text{ KW}$$

$$P_t = 269,45 \text{ KW.}$$

Calcul de la puissance pour la cage N° 12:

Cannelure ronde:

$$b_0 = 17,38 \text{ mm.}$$

$$\Delta h = 14,13 \text{ mm.}$$

$$L = \pi \frac{d_{12}}{2} = 3,14 \frac{21,20}{2} = 33,28 \text{ mm.}$$

$$F = b_0 \Delta h = 17,38 \times 14,13 = 245,57 \text{ mm}^2$$

$$T = 1100 \longrightarrow R = 5 ; V = 6 \text{ m/s} ; W = 314,63 \text{ tr/mn.}$$

$$P_e = F R V = 245,57 \times 5 \times 6 \times \frac{0,736}{75} \text{ KW.}$$

$$P_e = 72,29 \text{ KW.}$$

$$C_f = 5,58$$

$$P_f = C_f \cdot P_e = 5,58 \times 72,29 = 403,49 \text{ KW.}$$

$$P_t = P_e + P_f = 72,29 + 403,49$$

$$P_t = 475,78 \text{ KW.}$$

Calcul de la puissance dans la cage N° 15:

Cannelure ovale:

$$\Delta h = 5,68 \text{ mm.}$$

$$b_0 = 17,03 \text{ mm.}$$

$$L = bc = 21,10 \text{ mm.}$$

$$F = b_0 \Delta h = 17,03 \times 5,68 = 96,73 \text{ mm}^2$$

$$V = 11,31 \text{ m/s.}$$

$$W = 574,40 \text{ tr/mn.}$$

$$T = 1150 \text{ }^\circ\text{C} \longrightarrow R = 4 \text{ Kg/mm}^2$$

$$P_e = F R V \times \left(\frac{0,736}{75} \right) \text{ KW.}$$

$$P_e = 96,73 \times 4 \times 11,31 \times \frac{0,736}{75}$$

$$P_e = 42,94 \text{ KW.}$$

$$C_f = 10,82$$

$$P_f = 10,82 \times 42,94$$

$$P_f = 464,87 \text{ KW.}$$

$$P_t = 507,81 \text{ KW.}$$

On notera la constance de la température le long du train. La variation n'est que de 100 à 150 °C entre l'entrée et la sortie de la billette. Cette constance est due au fait que la chute de température provoquée par le refroidissement à l'eau est compensée par l'élévation de température due aux vitesses croissantes de la première à la dernière cage.

Puissances de Laminage

Tableau 15

N° de cage	L (cm)	F (mm ²)	T (°C)	R (kg/mm ²)	P _e (kW)	C _f	P _f (kW)	P _t (kW)
1	0,1150	3507,50	1050	6	45,43	0,18	8,37	53,81
2	0,08451	2897,84	1050	6	51,18	0,26	13,47	64,66
3	3,26.10 ⁻²	2986,35	1050	6	73,85	0,34	25,82	99,67
4	5,61.10 ⁻²	1583,42	1050	6	55,93	0,54	30,23	86,16
5	6,26.10 ⁻²	1661	1050	6	80,19	0,73	58,83	139,02
6	4,90.10 ⁻²	858,65	1050	6	57,12	1,03	58,90	116,03
7	5,57.10 ⁻²	1420,86	1050	6	125,48	1,36	171,29	296,78
8	2,84.10 ⁻²	805,42	1050	6	94,84	1,89	180,18	275,02
9	4,44.10 ⁻²	645,62	1050	6	104,91	2,50	262,70	367,62
10	4,25.10 ⁻²	403,79	1100	5	72,31	3,31	239,89	312,21
11	3,53.10 ⁻²	266,14	1100	5	61,89	4,39	271,85	333,74
12	3,32.10 ⁻²	245,57	1100	5	72,29	5,58	403,49	475,78
13	2,93.10 ⁻²	173,11	1100	5	64,18	7,02	450,63	514,81
14	2,67.10 ⁻²	158,64	1150	4	57,72	8,75	505,35	563,08
15	2,11.10 ⁻²	96,73	1150	4	42,94	10,82	464,87	507,81
16	2,22.10 ⁻²	67,07	1150	4	35,14	12,61	443,43	478,57

Tableau. 16.

N° de cage	P _t (kW)	Puissances maximales des moteurs (kW)	Taux utilisé (%)
1	53.81	630	8.54
2	64.66	630	10.26
3	99.67	630	15.82
4	86.16	630	13.67
5	139.02	630	22.06
6	116.03	630	18.41
7	296.78	630	47.10
8	275.02	630	45.65
9	367.62	1000	3.67
10	312.21	630	49.55
11	333.74	1000	3.33
12	475.78	630	75.52
13	514.81	1000	5.14
14	563.08	630	89.37
15	507.81	630	80.60
16	478.57	630	75.96

-6-5- OPTIMISATION DE LA CHAÎNE DE LAMINAGE.

En comparant les puissances obtenues P_t aux puissances maximales des moteurs, on déduit que le taux d'utilisation des puissances des moteurs est faible. (tableau 16).

Pour élever ce taux d'utilisation, on doit augmenter les efforts de laminage et cela en augmentant les taux de réduction. L'augmentation des taux de réduction aboutira à la diminution du nombre de passes donc du nombre de cages.

L'obtention d'un produit laminé en un minimum de passages est l'objectif principal visé par le calibreur.

L'étude qui suit est faite sur l'obtention du rond de diamètre 14 en utilisant 14 passes de laminage.

6-5-1. Calcul des paramètres de cannelures pour 14 passes:

Séction de la billette:

$$S_{Bc} = 13447,47 \text{ mm}^2.$$

Séction du rond final:

$$S_r = 158,27 \text{ mm}^2.$$

Nombre de passes fixé:

$$n = 14$$

Coefficient d'allongement total:

$$M_T = \frac{13447,47}{158,27} = 84,96 .$$

$$M_T = M_1 \times M_2 \times \dots \times M_{14} = 84,96$$

M_i = Coefficient d'allongement pour chaque passe

Séction après chaque passe:

$$S_{14} = 158,27 \text{ mm}^2$$

$$S_{13} = S_{14} \cdot M_{14}$$

.....

$$S_2 = S_3 \cdot M_3$$

$$S_1 = S_2 \cdot M_2 .$$

Tableau. 17.

N° de Passe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
M_i	1.4	1.39	1.39	1.39	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.36	1.36	1.36	1.30
S_i (mm ²)	9600.14	6906.57	4968.75	3574.64	2590.32	1877.04	1360.77	985.63	714.22	517.55	380.55	279.82	205.75	158.27
D (mm)	580	580	580	480	480	480	480	480	380	380	380	380	380	380

Calcul de la 14e. cannelure: Ronde:

$$S = 158,27 \text{ mm}^2$$

$$d = 14,194 \text{ mm.}$$

$$R = 7,10 \text{ mm.}$$

Jeu entre cylindres:

$$t = 0,006 \times D = 0,006 \times 380$$

$$t = 2,28 \text{ mm.}$$

Profondeur de la cannelure:

$$h' = \frac{d-t}{2} = \frac{14,19 - 2,28}{2}$$

$$h' = 6 \text{ mm.}$$

Largeur de la cannelure:

$$b_c = 2 \sqrt{15 \times (7,1)^2 - 2 \times 7,1 \times 2,28 - (2,28)^2} - 0,866 \times 7,1$$

$$b_c = 14,50 \text{ mm.}$$

Calcul de la 13e. cannelure: Ovale:

Hauteur de l'ovale:

Pour $d = 14,19$, le rapport $\frac{h}{d}$ est déduit du graphique de la figure 4.3

$$\frac{h}{d} = 0,8 \implies h = 0,8 d = 0,8 \times 14,19$$

$$h = 11,35 \text{ mm.}$$

Jeu entre cylindres:

$$t = 0,012 \times 380 = 4,56 \text{ mm.}$$

Largeur de l'ovale:

$$b = \frac{3S}{h \left(2 + \frac{t}{h}\right)} = \frac{3 \times 205,75}{11,35 \left(2 + \frac{4,56}{11,35}\right)}$$

$$b = 22,64 \text{ mm.}$$

Rayon de l'ovale:

$$R = \frac{b^2 + 4h'^2}{8h'}$$

$$h' = \frac{h-t}{2} = \frac{11,35 - 4,56}{2} = 3,39 \text{ mm.}$$

$$R = \frac{22,64^2 + 4 \times (3,39)^2}{8 \times 3,39}$$

$$R = 20,59 \text{ mm.}$$

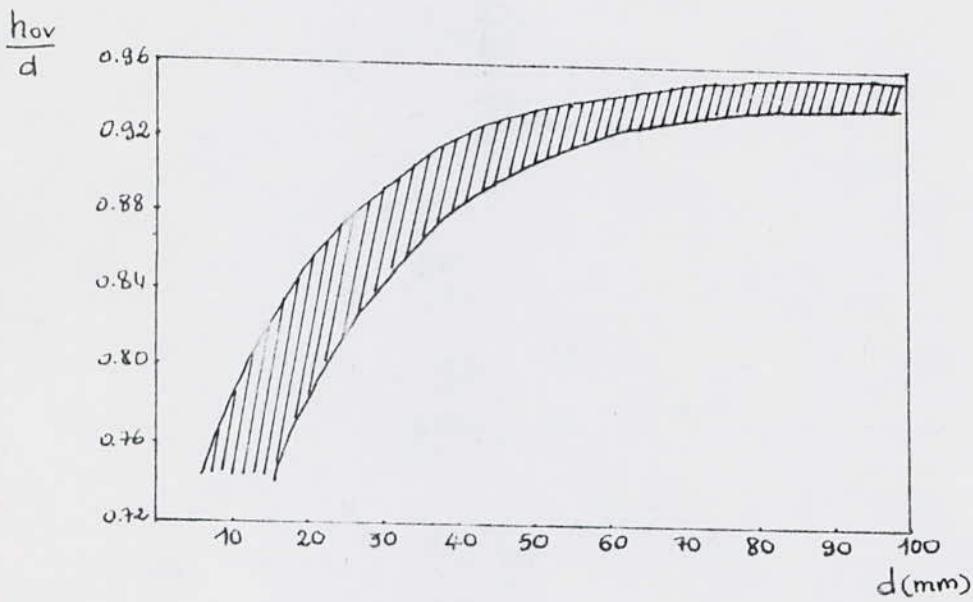


Fig. 43. Diagramme donnant le rapport $\frac{h_{ov}}{d} = f(d)$.

A.

Largeur de la cannelure:

$$b_c = 2\sqrt{2rh' - h'^2} = 2\sqrt{2 \times 20,59 \times 3,39 - 3,39^2}$$
$$b_c = 22,65 \text{ mm.}$$

Rayon de l'arrondi:

$$r = 0,3 h = 0,3 \times 11,35 = 3,40 \text{ mm.}$$

Calcul de la Se. cannelure: carrée.

$$S = 985,63 \text{ mm}^2.$$

$$a = \sqrt{S} = \sqrt{985,63}$$

$$a = 31,39 \text{ mm.}$$

Hauteur de la cannelure:

$$h_c = a\sqrt{2} = 31,39 \times 1,41$$

$$h_c = 44,39 \text{ mm.}$$

Rayon des arrondis:

$$r = 0,2 \times a = 0,2 \times 31,39 = 6,27 \text{ mm.}$$

$$r^* = 0,12 \times a = 0,12 \times 31,39 = 3,76 \text{ mm.}$$

Hauteur du métal:

$$h = h_c - 0,82 r$$

$$h = 44,39 - 0,82 \times 6,27$$

$$h = 39,24 \text{ mm.}$$

Jeu entre les cylindres:

$$t = 0,011 D = 0,011 \times 480$$

$$t = 5,28 \text{ mm.}$$

Largeur du profilé:

$$b = b_c - t$$

$$b_c = h_c = 44,39 \text{ mm.}$$

$$b = 44,39 - 5,28$$

$$b = 39,11 \text{ mm.}$$

Profondeur de la cannelure:

$$h' = \frac{h_c - t}{2} = \frac{44,39 - 5,28}{2}$$

$$h' = 19,55 \text{ mm.}$$

Calcul de la première cannelure: Réctangulaire:

$$S_1 = 9600,14 \text{ mm}^2$$

$$M_1 = 1,4 .$$

On se fixe au préalable une hauteur h de la cannelure:

$$h_1 = 87 \text{ mm} .$$

La largeur du métal est : $b_1 = \frac{S_1}{h_1} = \frac{9600,14}{87}$

$$b_1 = 110,34 \text{ mm} .$$

La hauteur de la billette initiale étant $h_0 = 115 \text{ mm}$.

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 115 - 87 .$$

$$\Delta h = 28 \text{ mm} .$$

Vérifions l'élargissement par la formule de BAKHTINOV:

$$\Delta b = 0,575 \frac{\Delta h}{h_0} \left(\sqrt{\frac{D\Delta}{2} \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) .$$

$$D\Delta = D - h_0 = 580 - 115 = 465 \text{ mm} .$$

$$f = 0,45$$

$$\Delta b = 0,575 \frac{28}{115} \left(\sqrt{\frac{465}{2} \cdot 28} - \frac{28}{2 \times 0,45} \right)$$

$$\Delta b = 6,94 \text{ mm} .$$

Donc finalement on a:

$$b_1 = b_0 + \Delta b$$

$$b_1 = 115 + 6,94$$

$$b_1 = 121,94 \text{ mm} .$$

$$h_1 = \frac{S_1}{b_1} = \frac{9600,14}{121,94} = 78,72 \text{ mm} .$$

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 115 - 78,72$$

$$\Delta h = 36,28 \text{ mm}$$

Jeu entre cylindres:

$$t = 0,04 D = 0,04 \times 580 = 23,2 \text{ mm} .$$

Profondeur de la cannelure:

$$h' = \frac{h_1 - t}{2} = \frac{78,72 - 23,2}{2}$$

$$h' = 27,76 .$$

Rayons des arrondis:

$$r = 0,1 b_c$$

$$b_c = b_o = 115 \text{ mm.}$$

$$r = 11,5 \text{ mm.}$$

$$r' = 0,08 b_c = 0,08 \times 115$$

$$r' = 9,2 \text{ mm.}$$

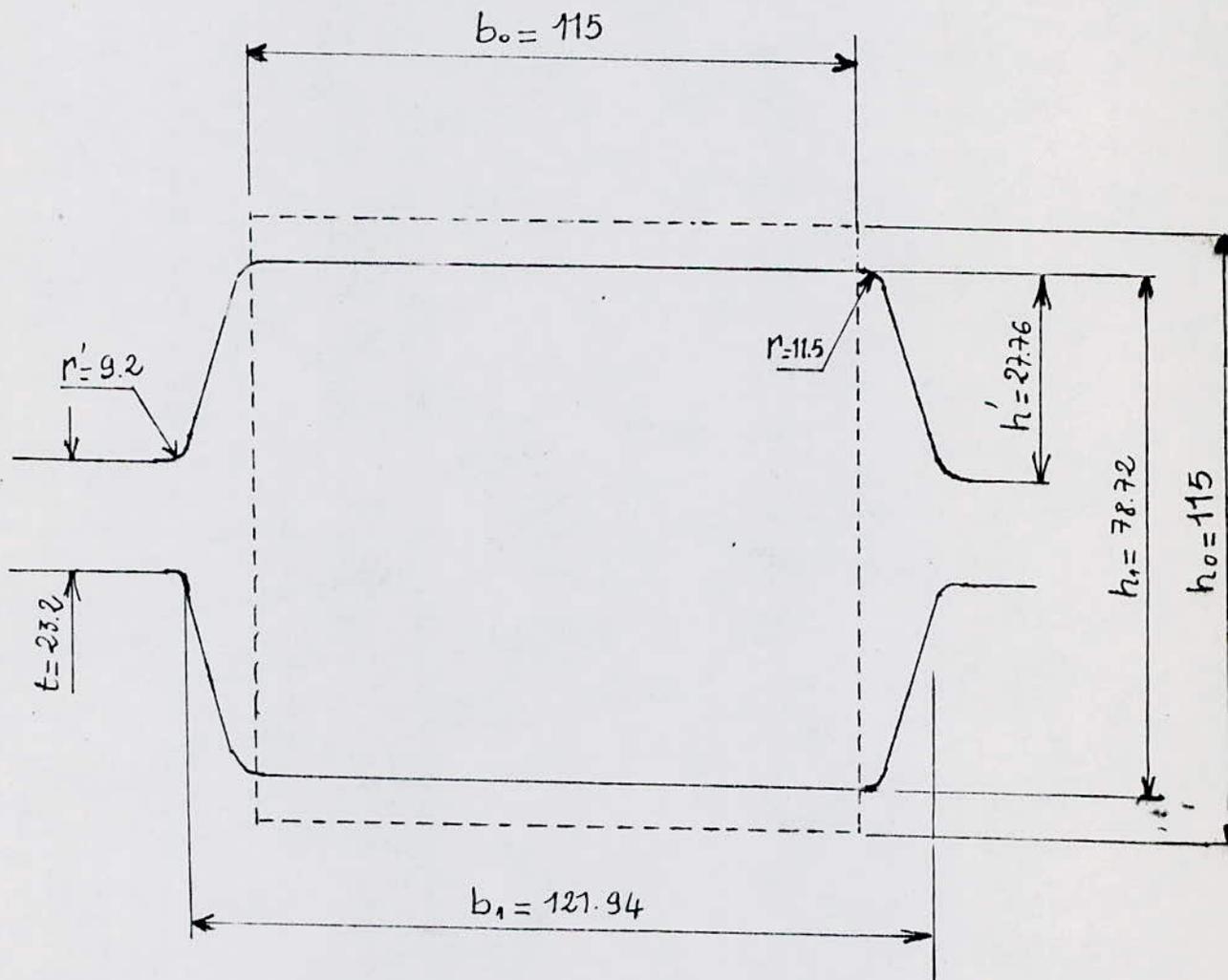


Fig. 44. Première cannelure.

Parametres des rainures.

Tableau 18

N° de Passe	h_0 (mm)	h (mm)	Δh (mm)	b_0 (mm)	b (mm)	Δb (mm)	b_c (mm)	h' (mm)	t (mm)	Dl (mm)	r (mm)	h' (mm)	D (mm)	Y (mm)
0	115			115										
1	115	78.72	36.28	115	121.94	6.94	115	27.70	23.20	465	11.50	9.20	580	1
2	115	75.46	46.48	78.72	91.52	12.80	78.72	26.13	23.20	458.06	8.45	6.76	580	1
3	75.46	52.47	22.99	91.52	94.68	3.16	91.52	14.63	23.20	504.54	9.26	7.40	580	1
4	94.68	54.18	40.50	52.47	65.97	13.50	52.47	17.49	19.20	385.32	5.61	4.49	480	1
5	54.18	37.12	17.06	65.97	69.77	3.80	65.97	8.96	19.20	425.82	6.26	5	480	1
6	69.77	54.16	15.61	37.12	56	18.88	61.27	28	5.28	410.23	8.66	5.19	480	1
7	54.16	22.74	31.42	56	50.79	3.79	56	1.77	19.20	425.84	5.39	4.31	480	1

-114-

Tableau 19

N° de Passe	d (mm)	R (mm)	h _o (mm)	h _c (mm)	Δh (mm)	b _o (mm)	b (mm)	Δb (mm)	b _c (mm)	h _c (mm)	h' (mm)	t (mm)	r (mm)	r' (mm)
8			59.78	39.24	20.55	22.74	39.11	16.37	44.39	44.39	19.55	5.28	6.37	3.76
9		39.82	39.24	21.04	18.20	39.11	47.52	8.41	47.54	21.04	9.02	3.00	6.31	
10	25.67		47.52	25.67	21.85	21.04	25.67	4.63	26.82	25.67	11.69	2.28		
11		25.17	25.67	15.29	10.38	25.67	32.94	7.27	32.94	15.29	6.14	3.00	4.58	
12	18.88		32.94	18.88	14.06	15.29	18.88	3.59	19.54	18.88	8.05	2.28		
13		20.59	18.88	11.35	7.53	18.88	22.64	3.76	22.65	11.35	3.39	4.56	3.40	
14	14.19		22.64	14.19	8.45	11.35	14.19	2.84	14.50	14.19	6	2.28		

6-5-2. Calcul des vitesses de laminage pour 14 passes:

Constante de laminage:

$$K = w_I \cdot S_I \cdot D_{tI} = w_2 \cdot S_2 \cdot D_{t2} = \dots = w_{I4} \cdot S_{I4} \cdot D_{tI4}$$

$$D_{tI4} = D_{I4} - 2h'_{I4} + t_{I4}$$
$$= 380 - 2 \times 6 + 2,28$$

$$D_{tI4} = 370,28 \text{ mm}$$

$$S_{I4} = 158,27 \text{ mm}^2$$

$$w_{I4} = \frac{60 \times V_{I4}}{\pi \cdot D_{tI4}}$$

$$V_{I4} = 13,35 \text{ m/s}$$

$$w_{I4} = \frac{60 \times 13,35}{3,14 \times 370,28 \cdot 10^{-3}}$$

$$w_{I4} = 688,92 \text{ tr/mm} ; K = 688,92 \times 158,27 \times 370,28$$

$$K = 4,037 \cdot 10^7$$

Vitesse de la première passe:

$$K = w_I \cdot S_I \cdot D_{tI}$$

$$S_I = 9600,14 \text{ mm}^2$$

$$D_{tI} = D_I - 2h'_I + t_I$$

$$D_{tI} = 580 - 2 \times 27,76 + 23,2$$

$$D_{tI} = 547,68 \text{ mm}$$

$$4,037 \cdot 10^7$$

$$w_I = \frac{4,037 \cdot 10^7}{547,68 \times 9600,14} = 7,67 \text{ tr/mm}$$

$$V_I = \frac{D_{tI} \cdot w_I}{60} = \frac{3,14 \times 0,54768 \times 7,67}{60}$$

$$V_I = 0,22 \text{ m/s.}$$

Tableau 20

N° de Passe	D_L (mm)	ω (tr/min)	V (m/s)
1	547.68	7.67	0.22
2	550.94	10.60	0.30
3	573.93	14.15	0.42
4	664.22	24.32	0.60
5	481.28	32.38	0.81
6	436.40	49.28	1.12
7	495.66	59.88	1.55
8	451.32	90.75	2.14
9	364.96	154.87	2.95
10	358.90	217.33	4.08
11	370.72	286.15	5.55
12	366.18	394	7.55
13	377.78	519.37	10.26
14	370.28	688.92	13.35

6-5-3. Calcul des puissances de laminage pour 14 passes:

Puissance dans la première cage:

$$h = 8,45 \text{ mm}$$

$$b_0 = 11,35 \text{ mm}$$

$$F = b_0 \cdot h = 8,45 \times 11,35 = 95,90 \text{ mm}^2$$

$$L = \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} = \frac{3,14 \times 14,19}{2} = 22,27 \text{ mm}$$

$$T = 1200 \text{ }^\circ\text{C} \implies R = 3 \text{ kg/mm}^2$$

$$V = 13,35 \text{ m/s}$$

$$W = 688,92 \text{ tr/mm}$$

$$P_e = F \cdot R \cdot V$$

$$= 95,90 \times 3 \times 13,35$$

$$P_e = 3841,08 \text{ kgm/s}$$

$$P_e = 3841,08 \times 0,736 = 37,69 \text{ Kw}$$

$$C_f = 13,35 - \frac{4 \times 0,02227 \times 688,92}{100}$$

$$C_f = 12,73$$

$$P_f = C_f \cdot P_e$$

$$P_f = 12,73 \times 37,69$$

$$P_f = 480,08$$

$$P_t = P_f + P_e$$

$$P_t = 514,77 \text{ Kw}$$

Tableau 2/1

N° de cage	T (°C)	R (kg/mm ²)	P _e (kW)	C _f	P _f (kW)	P _T (kW)	taux utilisé.
1	1050	6	54.04	0.18	9.98	64.02	10.10
2	1050	6	64.63	0.26	17.93	81.86	13
3	1050	6	52.05	0.36	19.16	71.22	11.30
4	1050	6	75.07	0.54	41.21	116.28	18.45
5	1050	6	53.67	0.72	38.89	92.56	14.70
6	1050	6	38.21	1.00	38.21	76.44	12.13
7	1050	6	160	1.41	227	387	61.42
8	1050	6	58.88	1.97	116.52	175.41	27.87
9	1100	5	123.63	2.65	328.31	451.95	45.19
10	1100	5	92.07	3.72	303.40	435.48	69.12
11	1100	5	72.55	5.17	375.34	447.90	44.80
12	1150	4	63.70	7.24	461.38	525.09	83.34
13	1150	4	57.25	9.78	560.47	617.73	61.77
14	> 1150	3	37.69	12.73	480.04	517.73	82.17

6-6. CALCULE D'UNE GAMME DE CANNELURES POUR PETITS ROND

Pour les demi-produits de section inférieure à 50x50 mm et pour la fabrication des ronds de 5 à 20 mm de diamètre, la gamme de cannelures la plus répandue est celle utilisant le système ovale-carré pour les opérations de dégrossissage et le système ovale-rond pour les deux dernières passes.

Le rond calculé a pour diamètre 8 mm à partir d'une ébauche initiale de section 30x30 mm en acier doux laminé sur laminoir trio de diamètre des cylindres en fonte, $D = 260$ mm

Réduction maximale admissible:

$$\Delta h_{\max} = D \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right)$$

$$f = k_1 k_2 k_3 (1,05 - 0,0005 \cdot t)$$

$k_1 = 0,8$ (pour les cylindres en fonte)

$k_2 = 0,9$ (coefficient fonction de la vitesse)

$k_3 = 1$ (coefficient de composition chimique pour l'acier doux $k = 1$)

$t = 1200$ °C (température)

$$f = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1 (1,05 - 0,0005 \times 1200)$$

$$f = 0,42$$

$$\Delta h_{\max} = 260 \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1 + 0,42^2}} \right)$$

$$\Delta h_{\max} = 20,28 \text{ mm}$$

Nombre de passes:

On choisit μ_m d'après le graphe de la figure 28a page 59 pour $a = 30$ mm, $\mu_m = 1,42$. Le coefficient d'étrépage total est:

$$\mu_t = \frac{S_0}{S_n}, \quad S_0 \text{ et } S_n \text{ étant les sections initiale et finale du produit.}$$

$$S_n = 1,015^2 \left(\frac{\pi 8^2}{4} \right) = 52 \text{ mm}^2$$

$$S_0 = 1,015^2 (30^2) = 927 \text{ mm}^2$$

$$\mu_v = \frac{927}{52} = 17,82$$

le nombre de passes est determine par:

$$n = \frac{\ln(17,82)}{\ln(1,42)} = 8$$

Ainsi, l'obtention du rond de $\emptyset 8$ à partir de l'ébauche de 30×30 mm se fait en 8 passes. La repartition des allongements à travers ces 8 passes est:

$$\mu_1 = 1,55 ; \mu_2 = 1,55 ; \mu_3 = 1,6 ; \mu_4 = 1,6 ; \mu_5 = 1,6 ;$$

$$\mu_6 = 1,55 ; \mu_7 = 1,19 ; \mu_8 = 1,13.$$

Calcul pour les trois dernières cannelures:

Cannelure 6: (carrée)

$$S_6 = S_8 \cdot \mu_7 \cdot \mu_8$$

$$S_6 = 52 \times 1,19 \times 1,13$$

$$S_6 = 70 \text{ mm}^2$$

L'arête a de la cannelure est: $a = \sqrt{S_6} = \sqrt{70} = 8,36 \text{ mm}$

Le rayon de l'arrondis est $r = 0,2 \times a ; r = 1,67 \text{ mm}$

Hauteur du métal:

$$h = h_c - 0,82 \times r ; h_c = b_c = a\sqrt{2} = 11,78 \text{ mm}$$

$$h = 11,78 - 0,82 \times 1,67$$

$$h = 10,41 \text{ mm}$$

Largeur du métal:

$b = b_c - t$; le jeu t entre les cylindres est pris égal 1 mm pour toutes les cages.

$$b = 11,78 - 1 = 10,78 \text{ mm}$$

- Cannelure 7 (ovale):

$$S_7 = \frac{S_6}{\mu_7} = \frac{70}{1,19} = 59 \text{ mm}^2$$

Hauteur de la cannelure: D'après les normes établies (tableau), pour $a_6 = 8,36 \text{ mm}$ on prend $\frac{h}{a_6} = 0,72$

$$h = 0,72 \cdot a = 0,72 \cdot 8,36$$

$$h = 6 \text{ mm}$$

Largeur de l'ovale: $b = \frac{3m}{h(2 + \frac{m}{h})}$; le rapport $\frac{m}{h}$ est

donné par les tableaux de normes établis expérimentalement pour $a = 8,36 \text{ mm}$ $\frac{m}{h} = 0,35$ (pour $a = 8 \div 9$)

$$b = \frac{3 \times 59}{6(2 + 0,35)} = 12,55 \text{ mm}, \quad m = 0,35 \cdot h = 0,35 \times 6 = 2 \text{ mm}$$

$$\text{Rayon de l'ovale: } R = \frac{b^2 + (h - m)^2}{4(h - m)} = \frac{12,55^2 + (6 - 2)^2}{4(6 - 2)}$$

$$R = 10,84 \text{ mm}$$

Largeur de la cannelure: $b_c = 2 \sqrt{(h-t) \cdot R - \left(\frac{h-t}{2}\right)^2}$

$$b_c = 2 \sqrt{(6-1) \cdot 10,84 - \left(\frac{6-1}{2}\right)^2}$$

$$b_c = 13,84 \text{ mm}$$

- Cannelure 2: (carrée)

$$S_2 = \frac{S_0}{\mu_1 \cdot \mu_2}$$

$$S_2 = \frac{927}{1,35 \cdot 1,55} = 443 \text{ mm}^2$$

$$a_2 = \sqrt{S_2} = \sqrt{443} = 21 \text{ mm}$$

$$h_{c2} = b_{c2} = a_2 \sqrt{2} = 21 \cdot 1,41 = 30 \text{ mm}$$

$$b_2 = b_c - t = 30 - 1 = 29 \text{ mm}$$

$$r_2 = 0,2 \cdot a_2 = 0,2 \cdot 21 = 4 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_c - 0,82 \cdot 4 = 26,72 \text{ mm}$$

- Cannelure I (ovale):

Hauteur de l'ovale: Elle est donnée par la formule empirique suivante:

$$h_I = (1,05 + 1,1) \cdot a_2 - \frac{a_0 - a_2}{2a_2} \left(\sqrt{R_c(a_0 - a_2)} - \frac{a_0 - a_2}{2f} \right)$$

$$R_c = \frac{D}{2} = \frac{260}{2} = 130 \text{ mm} ; a_2 = 21 \text{ mm} ; a_0 = 30 \times 1,015 = 30,45 \text{ mm}$$

$$h_I = 1,1 \cdot 21 - \frac{30,45 - 21}{2 \times 21} \left(\sqrt{130(30,45 - 21)} - \frac{30,45 - 21}{2 \times 0,42} \right)$$

$$h_I = 18 \text{ mm}$$

Largeur de l'ovale: $b_I = \frac{3S_I}{h_I(2 + \frac{m}{h})}$; $S_I = \frac{S_0}{\mu_I} = \frac{927}{1,35} = 686,66$
mm²

Pour $h = 18 \text{ mm}$, $\frac{m}{h} = 0,25$, $m = 0,25 \times 18 = 4,5 \text{ mm}$

$$b_I = \frac{3 \times 686,66}{18(2 + 0,25)} = 50,86 \text{ mm}$$

Rayon de l'ovale: $R = \frac{50,86^2 + (18 - 4,5)^2}{4(18 - 4,5)}$

$$R = 51,27 \text{ mm}$$

Largeur de la cannelure: $b_c = 2 \sqrt{(18-1) \cdot 51,27 - \left(\frac{18-1}{2}\right)^2}$
 $b_c = 56,54 \text{ mm}$

- Cannelure 3,4 (ovale, carrée):

$$S_4 = \frac{S_2}{\mu_3 \mu_4} = \frac{443}{1,6 \times 1,6} = 173 \text{ mm}^2$$

$$a_4 = \sqrt{S_4} = 13 \text{ mm}$$

$$h_{c4} = b_{c4} = a_4 \sqrt{2} = 18 \text{ mm}$$

$$r_4 = 0,2 a_4 = 0,2 \cdot 13 = 2,6 \text{ mm}$$

$$b_4 = b_{c4} - t = 18 - 1 = 17 \text{ mm}$$

$$h_4 = h_{c4} - 0,82 \cdot r_4 = 18 - 0,82 \cdot 2,6 = 15,86 \text{ mm}$$

$$S_3 = \frac{S_2}{\mu_3} = \frac{443}{1,6} = 276,87 \text{ mm}^2$$

$$\frac{m}{h} = 0,25$$

$$h_3 = 1,1 \cdot a_4 - \frac{a_2 - a_4}{2 \cdot a_4} \left(\sqrt{R_c (a_2 - a_4)} - \frac{a_2 - a_4}{2 \cdot f} \right)$$

Avec: $a_4 = 13 \text{ mm}$; $a_2 = 21 \text{ mm}$; $R_c = 130 \text{ mm}$; $f = 0,42$

$$h_3 = 7,5 \text{ mm}$$

$$b_3 = \frac{2 \cdot 276,87}{7,5 (2 + 0,25)} = 49 \text{ mm}$$

$$R = \frac{49^2 + (7,5 - 2)^2}{4 \cdot (7,5 - 2)} = 110,51 \text{ mm}; \text{ avec } \frac{m}{h} = 0,25$$

$$m = 0,25 \cdot h = 0,25 \cdot 7,5 = 1,875 \text{ mm}$$

$$b_{c3} = 2 \sqrt{(7,5 - 1) \cdot 110,51 - \left(\frac{7,5 - 1}{2}\right)^2}$$

$$b_{c3} = 53,20 \text{ mm}$$

Dimensions des cannelures pour rond de Ø8.

Tableau. 22.

N° de Passe	S (mm ²)	μ	a (mm)	h (mm)	b (mm)	R (mm)	r (mm)	t (mm)	retourne-ments (°)
1	686,66	1,35		18	50,86	51,27		1	90
2	443	1,55	21	26,72	29		4	1	45
3	276,87	1,6		7,5	49	110,51		1	90
4	173	1,6	13	15,86	17		2,6	1	45
5	108,50	1,6		4	36	108,75		1	90
6	70	1,55	8,36	10,41	10,78		1,67	1	45
7	59	1,19		6	12,55	10,84		1	90
8	52	1,13						1	45

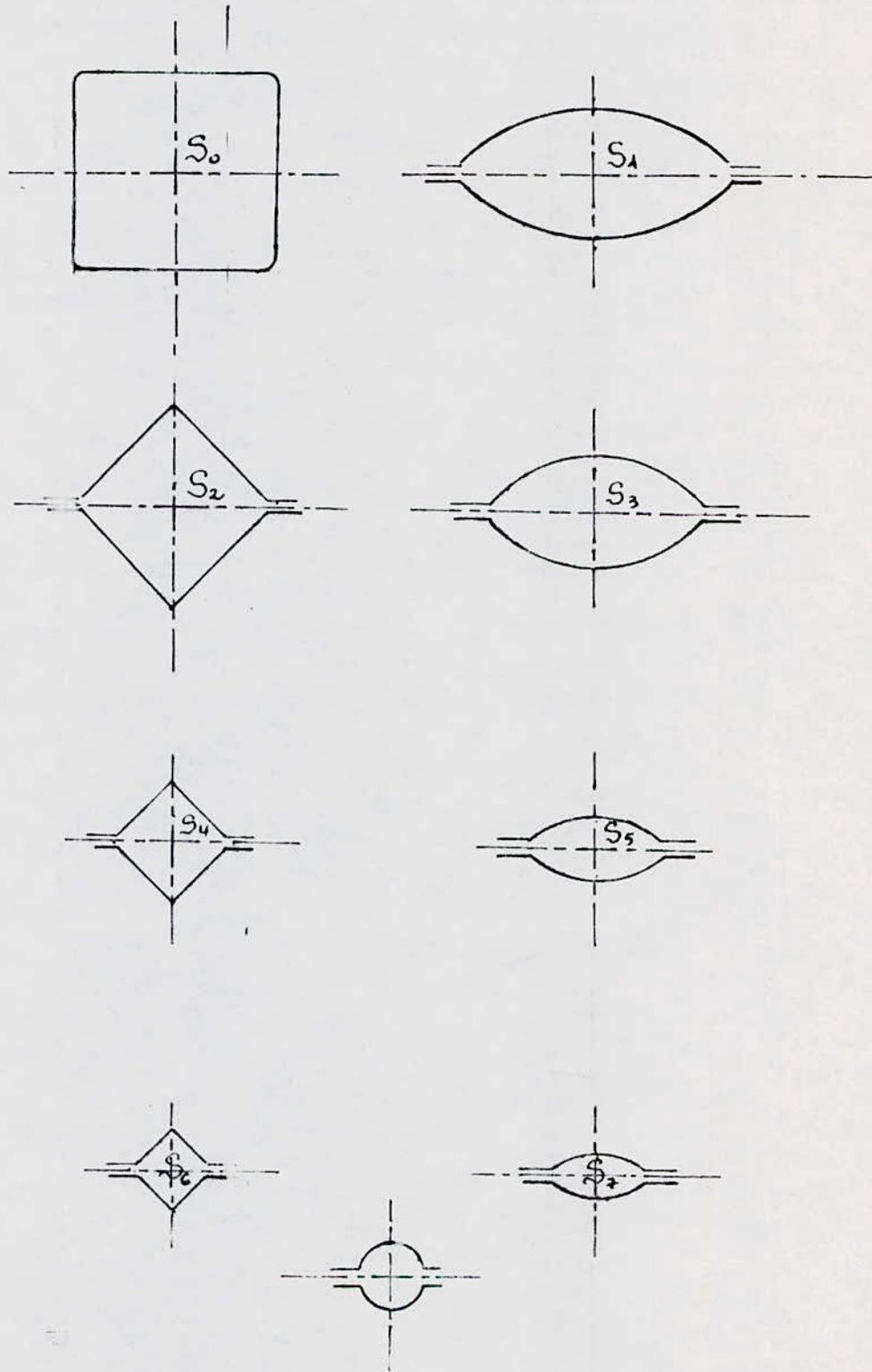


Fig. 45. Gamme de cannelures pour
 rond de $\varnothing 8$.

CONCLUSION

Le but du projet était l'étude et l'amélioration de la technologie du laminage des profils ronds en acier.

Notre séjour au complexe d'El hadjar qui a duré 15 jours nous a été très bénéfique au point de vue métier de l'ingénieur. Nous avons suivi la fabrication depuis la billette coulée en continu jusqu'à la bobine de fil machine et au rond à béton. Ce bref séjour ne nous a pas permis de recueillir le maximum d'information du personnel du site mais nous avons recueilli le nécessaire qui nous a permis de calculer certains paramètres comme:

- Le calcul pratique des paramètres dimensionnels, dynamiques et énergétiques pour la gamme de cannelures de dégrossissage rectangulaire et de finissage ovale-ronde;
- Diminuer, à la base de ces calculs, le nombre de passes de 2;
- Le calcul pratique des paramètres de cannelures pour les ronds de petit diamètre (8 mm);
- Etude des aspects métallurgiques du laminage à chaud pour améliorer les caractéristiques mécaniques du produit final qui peut être utilisé à l'état brut de laminage ou subir d'autres opérations ultérieures. La structure souhaitée par les lamineurs pour parvenir à ce but est une structure ferritique fine et homogène. Celle-ci est obtenue par la technique du laminage contrôlé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- Mise en forme des métaux et alliages. Edition du CNRS.
Sept. 1975:
- G. Sainfort: Comportement à chaud des métaux et alliages. p 87.
 - A. Le Bon: Aspects métallurgiques du laminage à chaud. p 283.
- [2]- Technique de l'ingénieur:
- A. et J. Pokorny: Action du corroyage sur la structure de coulée des aciers. M 610.
 - Michel Bonaux: Laminaires à chaud. M 1990.
 - René Chaurand: Fours pits. Rechauffage des demi-produits. M 2010.
- [3]- P. Poloukhine: Technologie des métaux. Edition Mir Moscou 1967.
- [4]- G. Chaussin: Elaboration des métaux, tome 2.
- [5]- Documentation privée de la SNS d'El hadjar.

