

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN GENIE MECANIQUE

SUJET

CONCEPTION D'UN LAMINOIR REVERSIBLE

DE BANDE A FROID TYPE "1700"

3 PLANS

Proposé par :

Mr IGOR TROITSKI

Maître Assistant à l'E.N.P.A.

Etudié par :

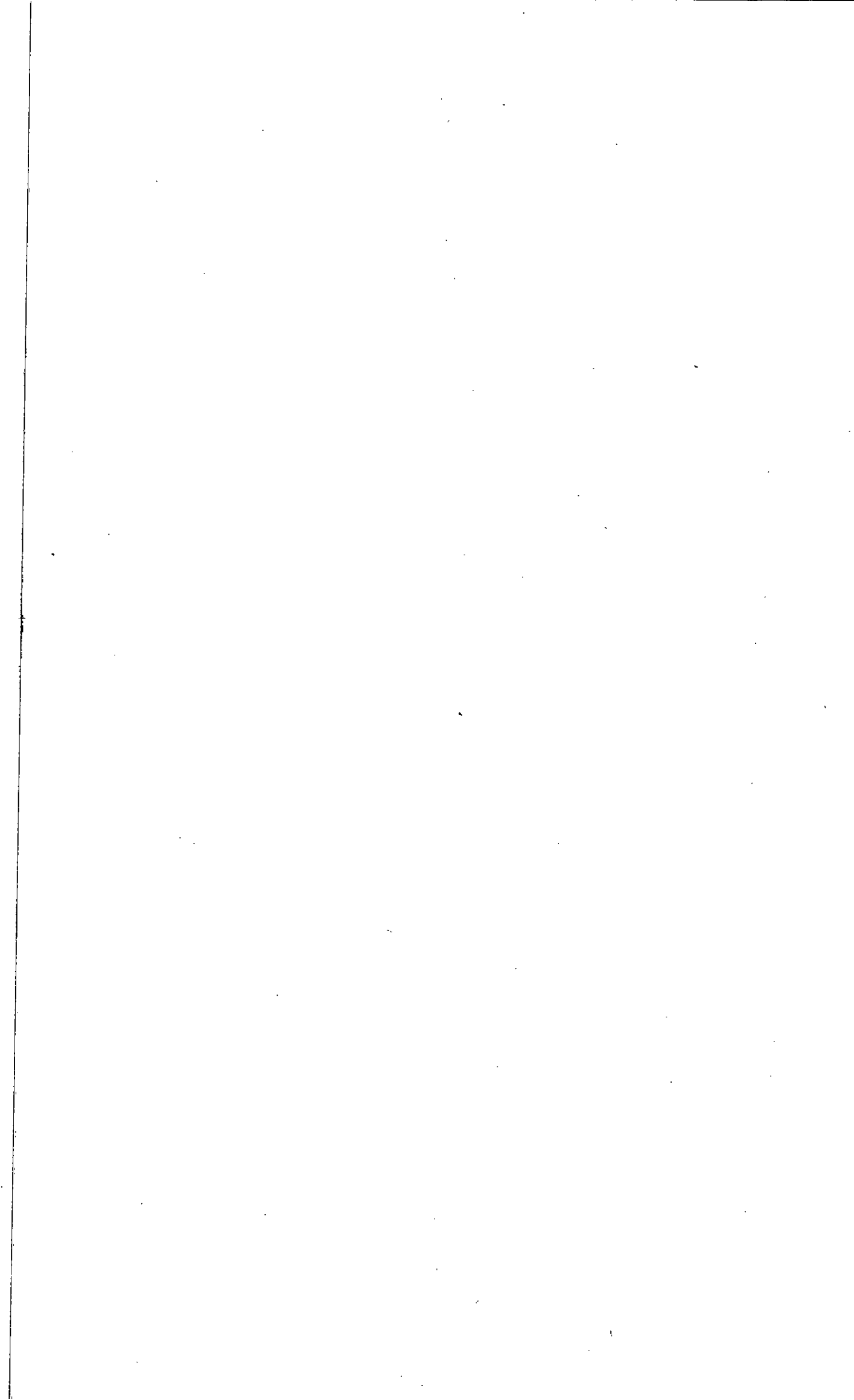
HADJOUT Mohamed Omar

Dirigé par :

I. TROITSKI



PROMOTION :



Nom : HADJOUT

Prénom : MOHAMED OMAR

Département : GENIE-MECANIQUE

Promoteur : IGOR TROITSKI

Résumé

Sujet : Ce présent travail a fait l'objet de l'étude et de la conception d'un laminair réversible de bande à froid de type "1700". Nous avons choisi l'équipement technologique du laminair réversible et réalisé le calcul des calibrages. Nous avons réalisé également l'élaboration constructive de la cage de travail, le calcul à la résistance et au serrage des commandes de la cage. Dans le cadre du projet nous avons exécuté les dessins de montage du laminair et de la cage de trav.

Summary

Subject: This project is concerned by the study and the design of a reversible band cold rolling mill of the type "1700". The equipment of the reversible rolling mill has been chosen and the calibration calculation has been done. The constructive study of the cage has been completed along with its resistance and lightning calculation furthermore, design drawing of the rolling mill and the cage were done in this project.

ملخص

الموضوع: يتضمن هذا المشروع دراسة وتقييم مصفحة عكسية لمصينة نعت البرد من الطراز "1700"؛ تم تنفيذ المشروع على النحو التالي:

- اختيار التجهيز التكنولوجي للمصفحة العكسية وتنفيذ حساب التيارات
- الإعداد البنائي لقفس العمل
- حسابات المقاومة والسند لأحمال القفس.
- رسومات التجهيز للمصفحة وقفس العمل.

SOMMAIRE

I	INTRODUCTION	
	1. Généralités	1
	2. Importance et place du laminage dans l'industrie	4
	3. But de l'étude	6
II	JUSTIFICATION TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DU CHOIX DES EQUIPEMENTS	
	1. Technologie de fabrication des toles laminées à froid	7
	2. Technologie de laminage de la bande sur le laminoir réversible	10
	3. Choix des équipements	14
	4. Particularités constructives du laminoir	19
III	CALCUL DE CALIBRAGE DU LAMINOIR	24
IV	CAGE DE TRAVAIL	
	1. Elaboration constructive de la cage du travail du laminoir réversible de type "1700"	41
	2. Particularités constructives de la cage de travail	44
V	CALCUL DU BÂTI DE LA CAGE DE TRAVAIL A LA RESISTANCE	46
VI	CALCUL DES COMMANDES DES MECANISMES	
	1. Calcul de la commande principale du laminoir	55
	2. Calcul des commandes des organes de serrage des cylindres de travail	60
	calcul de la commande de la mise au point des cylindres de travail	64
VII	CALCUL DES ELEMENTS DE LA CAGE A LA RESISTANCE	
	1. Calcul des cylindres de travail et d'appui	67
	2. Calcul et vérification des paliers lisses des cylindres d'appui.	76
	3. Calcul de la vis de pression à la résistance	77
	4. Calcul de l'écrou de la vis de pression à la résistance.	79
	CONCLUSION	82

I. INTRODUCTION

1) Généralités:

Le laminage peut se caractériser comme un procédé de mise en forme par déformation plastique dans lequel les outils au contact du produit en cours de déformation sont des solides de révolution animés d'un mouvement de rotation autour d'axes fixes entre lesquels le produit est entraîné par frottement. (fig 2).

bien que leurs génératrices soient loin d'être rectilignes, ces outils sont appelés "cylindres de travail".

L'entraînement du produit s'accompagne d'une déformation imposée par l'espace libre entre les cylindres de travail, au contact desquels des contraintes prennent naissance, qui se traduisent par un couple résistant sur l'axe des cylindres et par une force équilibrée par la contrainte du bâti du laminar et de toute la chaîne mécanique réglant l'écartement des cylindres. Le couple résistant est équilibré par celui des moteurs d'entraînement des cylindres qui fournisse ainsi l'énergie à la mise en forme. Le produit sort des cylindres perpendiculairement au plan contenant leurs axes sous la forme d'une barre droite de section droite constante.

Les cylindres au contact du produit laminé sont le plus souvent au nombre de deux, mais il existe des cas où l'espace dans lequel le produit est entraîné et où s'effectue la déformation est délimité par trois ou quatre cylindres. Ce dernier cas étant industriellement fort important (laminage des pastrelles).

Les parties de chaque cylindre en contact avec le produit laminé et qui constitue une sorte de filière "par analogie avec le tréfilage" en délimitant la zone de déformation ou "emprise", sont usinées suivant une forme correspondante à celle que l'on veut obtenir et sont appelées cannelures. La fig 3 représente par exemple le cas d'une barre de section ovale.

Les différentes cannelures définissant la lumière ne peuvent être rigoureusement jointives

et certaines parties du contour de la barre sont libres. Il faut donc choisir la forme de la section d'entrée de manière que compte-tenu de la déformation imposée, le métal prenne dans les parties libres une forme qui complète parfaitement le contour désiré.

Nous achevons ces généralités par juste ce qu'il faut de technologie pour préciser quelques termes de métier. . . Nous nous bornerons au cas où les cylindres définissant la cannelure sont au nombre de deux.

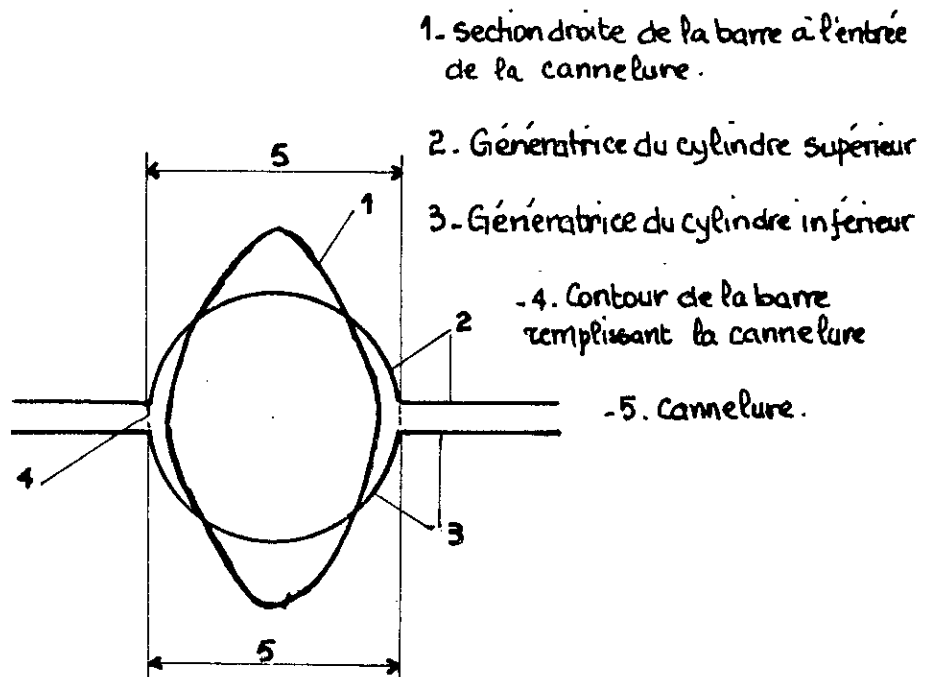
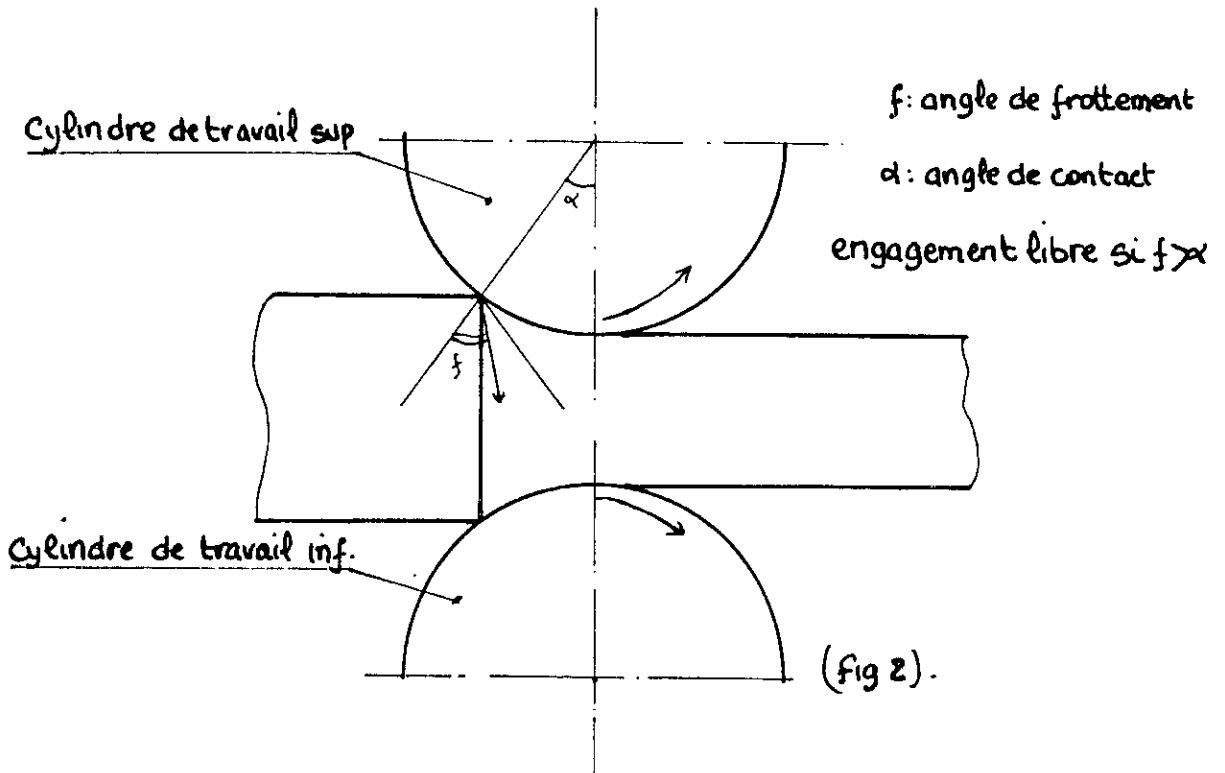


fig.3. Laminage d'un rond à partir d'une barre ébauchée de section ovale.
 (Coupe des cylindres par le plan contenant les axes).

2) Importance et place du laminage dans l'industrie :

98% de l'acier élaboré subit à un stade ou à un autre de sa transformation une opération de laminage, la proportion d'acier ne subissant pas d'autres opérations de mise en forme par déformation plastique telle que forgeage à chaud ou à froid, tréfilage, emboutissage, étant considérable.

La plupart des objets en acier dont la civilisation industrielle dans laquelle nous vivons a besoin, se fabriquent en effet commodément et économiquement à partir de produits obtenus par laminage. On le conçoit facilement lorsque l'objet considéré, poutrelle, rail, rond, béton, tôle, a une forme qui peut s'obtenir directement par laminage ou en est du moins très proche; mais il en est aussi un grand nombre pour lesquels la gamme de fabrication optimale se termine par une opération d'usinage, par exemple, effectuée sur un tronçon découpé dans une barre laminée alors que la forme finale désirée ne rappelle que d'assez loin et parfois même pas du tout ce que l'on peut obtenir par laminage.

La place essentielle tenue par le laminage appelle quelques remarques concernant les aspects économiques de ce procédé. Le fait que l'outil roule sur le produit, ce qui réduit la vitesse de glissement à une fraction seulement de la vitesse linéaire du produit, permet de réaliser facilement des vitesses de laminage très élevées.

En laminage le processus de déformation a un caractère continu mais pour des raisons pratiques évidentes les barres ont une longueur finie; il s'agit donc en ce sens d'un procédé par lots, mais son principe même ainsi que les hautes vitesses permettant de laminer des produits de très grandes longueurs: quelques dizaines de mètres au minimum dans le cas des tôles très larges, et jusqu'à dix kilomètres pour le fil de petit diamètre en dépit de refroidissement en cours de laminage à chaud. Les lots sont très importants et le laminage est un procédé à haute productivité et à faible coût de transformation.

En contre-partie il nécessite des investissements considérables tant par le poids des matériels mis en jeu que par l'étendue des ateliers nécessaires et par conséquent on ne peut tirer pleinement parti du faible coût de transformation qu'à condition d'utiliser au maximum la capacité de production résultant du fait que l'on peut laminier à grande vitesse.

Il faut bien voir que cette capacité maximale possible est considérable et dépasse dans certains cas la capacité d'absorption du marché au niveau de laquelle il faut bien se limiter; même dans ce cas là le laminage reste un procédé économique.

3) But de l'étude:

Le but de ce présent travail est d'étudier et de concevoir un laminoir réversible de type "1700". Nous avons examiné la technologie de fabrication de la bande à froid dans le laminoir réversible.

Nous avons choisi l'équipement technologique du laminoir réversible et réalisé le calcul des calibrages.

Nous avons fait également l'élaboration constructive de la cage de travail, et le calcul des éléments de la cage à la résistance et enfin le calcul des commandes de la cage.

Dans le cadre du projet nous avons exécuté les dessins de montage du laminoir et de la cage de travail.

Données de base:

1) l'acier de la bande à laminier avec $\begin{cases} R_e = 23 \text{ dan/mm}^2 \\ R_r = 33 \text{ dan/mm}^2 \end{cases}$

2) l'épaisseur initiale $h_0 = 2 \text{ mm}$

3) l'épaisseur finale $h_3 = 0,5 \text{ mm}$

4) Largeur de la bande $b = 1250 \text{ mm}$

5) Vitesse de la bande:

$$\begin{cases} a/ \text{ dans la première passe: } V_1 = 6,0 \text{ m/s} \\ b/ \text{ dans la deuxième passe: } V_2 = 6,2 \text{ m/s} \\ c/ \text{ dans la troisième passe: } V_3 = 8,4 \text{ m/s} \end{cases}$$

III. JUSTIFICATION TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DU CHOIX DES EQUIPEMENTS

1) Technologie de fabrication de tôles laminées à froid.

La fabrication de tôles laminées à froid d'épaisseur variant entre 2 et 0,1 mm d'épaisseur est très répandue grâce à la grande qualité de ses produits.

Les ébauches de l'atelier de laminage à chaud, comme bobines entrent de laminage à froid. Les bobines laminées à chaud s'avancent par le convoyeur de bobines laminées à chaud sur le groupe de décapage continu, dont lequel le métal se nettoie ou s'épure de la battiture de laminage.

Après ce décapage, une portion de la bobine s'avance sur la chaîne de découpage combinée et sur la machine à plier des profils. L'autre portion de bobine s'avance sur le laminoir à froid.

Le laminage des tôles à froid est réalisé sur le laminoir réversible ou continu à l'aide du corroyage (étrépage de la tôle) successif de la bande par les cylindres de la cage de travail.

Le choix du type de laminoir dépend des paramètres suivant :

- 1) Production de l'atelier.
- 2) Qualité des produits finis.
- 3) Poids des bobines.

Pour une production d'un atelier supérieure à 300 mille tonnes de produit par an, on utilise généralement Les Laminaires "Continus".

Pour une production d'un atelier inférieure à 300 mille tonnes de produit par an, en tenant compte de la variété de produits finis qui existe et des petites dimensions des bobines,

On recommande pour cela d'utiliser les laminaires "Réversibles".

Le métal laminé est enroulé en bobine, après avoir subi les opérations technologiques suivantes :

a) Le métal de construction :

Il subit un recuit et après un corroyage faible de $0,5 \div 5\%$ sur le laminair à dresser afin d'augmenter les propriétés mécaniques du métal puis le métal s'avance sur le groupe de découpage transversal ou longitudinal, où il se coupe et s'emballe.

b) Le métal destiné au zincage :

Après le laminage à froid, il avance sur le groupe de galvanisation continu, une fois que le métal est enrobé de zinc, il avance sur le groupe de découpage transversal ou longitudinal, ensuite s'enroule et s'emballe.

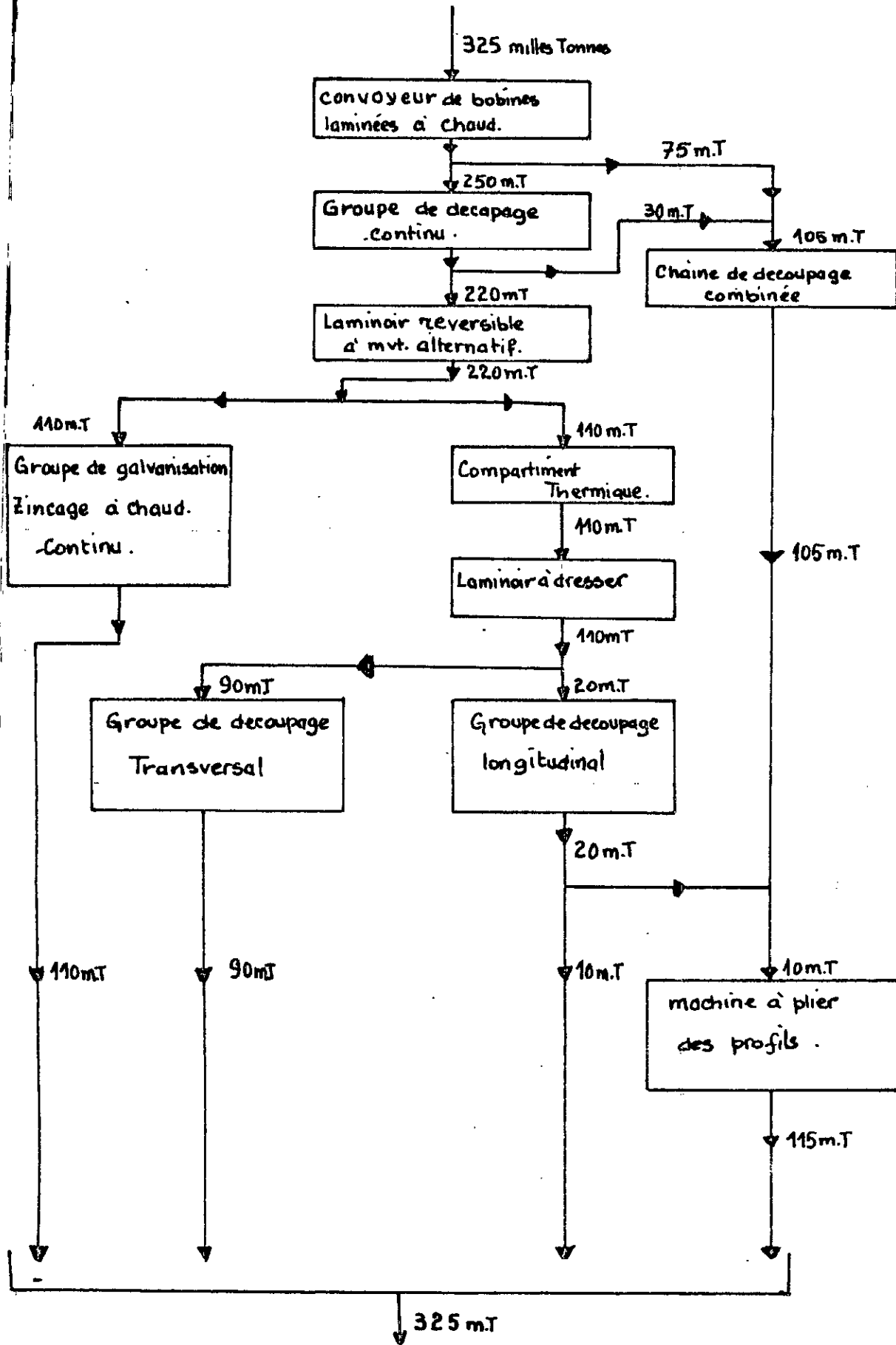
c) Le métal destiné à laminier des profils :

Après le laminair réversible, il avance sur le laminair à dresser, puis sur la machine à plier des profils.

Le métal emballé se pese et s'envoie au client.

En ce concerne notre cas, la production de l'atelier ne dépasse pas 260 mille tonnes de produits par an. D'après les recommandations le laminair réversible répond bien aux normes du moment qu'il assure les paramètres indispensables, et il est beaucoup moins cher que le laminair "continu".

Schéma du courant de marchandises de l'atelier



II.2 TECHNOLOGIE DE LAMINAGE DE BANDE SUR LE "LAMINOIR REVERSIBLE"

Le laminage de la bande jusqu'à l'épaisseur voulue se fait en plusieurs passes, tout en tenant compte de l'itinéraire de la bande donnée.

L'ordre d'avancement du métal se fait de la façon suivante :

Les bobines à laminier sont placées sur le convoyeur de chaîne à l'aide de la machine à levage. Il peut travailler dans les deux régimes à savoir le régime continu ou le régime pas à pas.

Ce même convoyeur déplace la bobine vers la débobineuse, elle s'élève du convoyeur à l'aide de la table à charge et s'installe sur l'élevateur. Ce dernier fixe la bobine sur le tambour de la débobineuse, le centrage de la bobine sera assuré par l'opérateur du poste de commande.

Un rouleau de serrage commandé par des verins hydrauliques descend pour préserver l'enroulement de la bobine pendant l'enlèvement de la ceinture (enveloppe), et permet d'exercer une pression sur les spires extérieures lors du débobinage. La machine à rabattre de bord frontal descend sur la bobine en même temps que le rouleau de serrage, l'opérateur tourne la bobine lorsque le couteau de la machine à rabattre touche le bord frontal de la bande.

À la vitesse de manœuvre, le bord frontal se sépare de la bobine par le couteau de la machine à rabattre, et se déplace derrière le rouleau de la machine à dresser, et avance. La commande de la débobineuse est ensuite actionnée, le rouleau supérieur de la machine à dresser descend à l'aide de verin hydraulique, et la bande se fixe dans les rouleaux à dresser, tandis que la machine à rabattre et le rouleau de serrage reviennent à leurs positions initiales.

Les commandes de la débobineuse et du rouleau d'entraînement et de dressage

étant actionnées à la fois, la bande se déplace derrière les rouleaux de centrage et s'arrête. Le rouleau de dressage supérieur descend, les commandes des débobineuses machine à dresser et de la machine d'entraînement de la bande sont actionnées, la bande se déplace vers la boîte d'entrée qui elle est élevée, et s'engage enfin dans les rouleaux de la cage de travail.

Les rouleaux latéraux (de guidage) de la bande d'entrée doivent être ajustés au préalable à la largeur de la bande à laminier. Lorsque le bord frontal de la bande se trouve à $100 \div 150$ mm environ de la bobine, le dispositif de serrage règle le convoyage de la bande et le guide supérieur descend.

Le bord frontal de la bande se déplace à la vitesse de manoeuvre vers le tambour de la bobineuse arrière du laminier et s'engage dans la foule du tambour, puis on fixe les tractions en amont et en aval de la bande, on corrige la position des visées de serrage et enfin le laminier s'accélère jusqu'à la vitesse de travail.

Pour éviter la formation d'une boucle ou une traction excessive (de la bande) qui peut conduire jusqu'à la rupture de la bande laminée, on doit régler le système d'accélération de façon à ce qu'on ait une accélération égale à savoir l'accélération des moteurs du laminier, bobineuses, débobineuses. Le même procédé doit s'appliquer pour la décélération lors de l'arrêt des moteurs.

Pour le contrôle de l'épaisseur de la bande au cours du laminage, les indicateurs d'épaisseur s'avancent sur la bande à l'aide de verins hydraulique, même chose pour les indicateurs de tractions de la bande, ces derniers sont placés à l'avant et à l'arrière de la cage.

Au moment où le bord frontal arrière quitte la débobineuse, on réduit la vitesse de travail du laminier jusqu'à la vitesse de manoeuvre. On élève ensuite le guide

supérieur de la boîte d'entrée et le guide de la bobineuse se trouvent devant en avant de la cage lorsque le bord arrière frontal de la bande se trouvera à $1 \div 2,5$ m environ des cylindres de travail.

A ce moment le laminoir s'arrête et on inverse le sens de marche, le bord frontal arrière de la bande s'engage dans le tambour de la bobineuse se trouvant devant la cage. Après avoir fixé les tractions en amont et les contre-tractions en aval tout en tenant compte de la passe choisie, on règle simultanément les accélérations des moteurs des laminoir, de la bobineuse et de la débobineuse de façon à atteindre la vitesse de travail dans le sens opposé par rapport à la 1^{re} passe. Le processus de laminage se répète de la même façon que précédemment le nombre répétition est lié au nombre de passes choisi au départ. En général le nombre de passes dans notre cas est impair.

Au cours de la dernière passe, plus précisément à la fin du processus de laminage le guide supérieur de la boîte d'entrée descend sur la bande et la vitesse du laminoir diminue jusqu'à atteindre la vitesse de manoeuvre.

Les cylindres de travail s'écartent pour laisser passer le bord de la bande épaisse. On effectue l'opération de bobinage, ensuite la bobine s'enlève de la bobineuse à l'aide d'une machine spéciale.

Cette dernière posera la bobine sur une table où elle sera enveloppée à sa périphérie par une ceinture à l'aide d'une machine à ceinture.

la bobine se posera sur le convoyeur de chaîne où elle subira un marquage sur son enveloppe et se déplacera ensuite dans le hall de l'atelier voisin où elle s'élèvera du convoyeur par la machine à laver.

Parallèlement à la dernière phase de travail de la bande précédente, (c'est à dire au moment où l'on commence à diminuer la vitesse de travail du laminoir pour passer à la vitesse

de manoeuvre). On prépare le bord frontal de la bobine suivante.

Cette préparation se termine par la fixation de bande centrée dans les rouleaux de la machine à dresser. Lorsque la bobine suivante est enlevée de la bobineuse de dernière, le guide de la bobineuse de devant descend la position basse.

Les commandes de la débobineuse et du rouleau d'entraînement de dressage sont actionnés.

Toutes les opérations se répètent de la même façon que précédemment. Le fonctionnement du laminoir décrit ci-dessus se rapporte au processus de laminage dont le nombre de passe est impair. Lorsque ce dernier est pair, la première sera réservée pour le bobinage de la bande sur la bobineuse de dernière, les cylindres de travail étant en position de repos. Dans ce cas le laminage ne se fera que dans la deuxième passe.

Quand au laminage des cordons de soudure, il se fera qu'à une vitesse réduite.

Enfin le contrôle du processus de laminage se fera par les dispositifs et systèmes de contrôle technologique.

3) CHOIX D'EQUIPEMENT DU LAMINOIR REVERSIBLE

Sur la base de la technologie de laminage de la bande étudiée précédemment nous allons examiner l'équipement qui constitue le laminair réversible.

a) Convoyeur de chargement et de déchargement de la bobine.

Le convoyeur sert à transporter les bobines non laminées vers le laminair et évacue les bobines laminées.

Il présente une chaîne fermée avec des chariots dont les rouleaux reposent sur les glissières du châssis soudé. Ce dernier est installé sur des poutres.

La chaîne s'engrène avec un rouleau de chaîne, la commande s'effectue à l'aide d'un moteur électrique et d'un réducteur. La capacité de chaque convoyeur s'estime à six bobines.

b) Table receptrice:

Cette table est destinée à réceptionner les bobines ramenées par le convoyeur, et les transmettre au tambour de la débobineuse.

La table receptrice se présente sous forme d'un chariot avec une table montante.

Le chariot étant une construction soudée de quatre rouleaux, la table montante a la forme d'une fourchette qui se déplace dans les glissières verticales du chariot.

Le déplacement du chariot et l'élevation de la table se font à l'aide de vérins hydraulique.

Le chariot est muni de ressorts qui ont pour but d'amortir les chocs dans les positions extrêmes.

c) Débobineuse.

Elle est destinée à réceptionner la bobine non laminée, à dérouler la bobine, maintenir la bobine pendant le débobinage, assurer la tension nécessaire de la bande en amont.

Il existe deux type de débobineuse :

1) Débobineuse à deux têtes.

2) Débobineuse à tambour en porte-à-faux :

Dans notre cas la débobineuse à deux têtes ne nous convient pas, car la tension de la bande en amont pendant le laminage n'est pas bien assurée. Ce qui entraîne un défaut de laminage sur les dernières spires de la bobine.

1) débobineuse à tambour en porte-à-faux :

Le tambour est constitué d'un corps moulé avec couvercle. Il est monté en porte-à-faux dans le corps avec des roulements.

La débobineuse est munie d'une butée réglable, qui sert à centrer les bandes à laminer de différentes largeurs. Le réglage de cette butée se fait à l'aide de verin hydraulique.

L'autre extrémité du tambour s'appuie sur un dispositif rabattable qui nous permet le chargement et le déchargement de la bobine.

La commande de la débobineuse comprend un moteur électrique et un réducteur, elle est aussi munie de rouleaux de serrage oscillant, dont le balancement est assuré par un verin hydraulique.

d) Machine à rabattre de bord frontal de la bande :

Comme son nom l'indique elle rabat le premier bord frontal de la bande.

Il en existe deux types :

1) machine à rabattre à trollette.

2) machine à rabattre magnétique.

On ne peut utiliser le premier type de machine indiquée ci-dessus, car il nous arrive parfois de laminer des aciers spéciaux anti-magnétiques.

Le balancement du dispositif à rabattre de la machine se fait par verin hydraulique.

Tous les organes de cette machine sont montés sur le châssis de la machine à dresser.

e) Machine à dresser:

Elle sert à :

- 1) - avancer le premier bord frontal dans le laminair .
- 2) - Centrer la bande par rapport à l'axe du laminair .
- 3) - dresser la bande (éliminer les courbures dues aux spires).

Elements constitutifs de cette machine :

elle comprend trois rouleaux .

- deux rouleaux inférieurs entraînés par un moteur électrique et un réducteur .
- un rouleau supérieur, mobile, monté sur un levier oscillant grâce un verin hydraulique

elle comprend également des rouleaux de centrage .

Pendant le dressage on réalise le réglage du rouleau mobile en fonction de l'épaisseur de la bande à laminier , manuellement , à l'aide de visées de réglage .

f) Commande principale du laminair .

Elle transmet le moment de torsion aux cylindres de travail.

- Elle comprend :
- quatre moteurs électriques
 - un réducteur combiné
 - un accouplement d'engrenage à profil de dents spéciales qui permet le travail des arbres en inclinaison. Cette dernière est due au réaffûtage des cylindres de travail.

g) Mécanisme de remplacement des cylindres d'appui .

IL sert à remplacer les cylindres d'appui

- IL est constitué :
- d'un châssis soudé qui est posé sur des fondations
 - d'un support de cylindres d'appui à remplacer.

Ce support se déplace sur la glissière du châssis à l'aide d'un vérin hydraulique.

h) Mécanisme de remplacement des cylindres de travail.

Il sert à remplacer les cylindres de travail. Comme son nom l'indique.

Il est constitué :

- d'un chariot posé sur rails. Ce dernier est muni d'une plateforme qui peut se déplacer dans le sens transversal à l'aide d'un réducteur et d'une transmission par écrou. La plateforme a deux positions fixes :

a) Première position :

Elle sert à réceptionner les cylindres de travail neufs.

B) Deuxième position :

Elle permet la prise des cylindres de travail usés de la cage, et l'installation des cylindres neufs dans la cage de travail. L'enlèvement des cylindres de travail usés s'effectue par un coulisseau entraîné par un moteur électrique et un réducteur.

i) Mécanisme d'enlèvement des bobines :

Ce mécanisme enlève les bobines du tambour des bobineuses et les pose sur le convoyeur. Sa construction est identique à celle de la table receptr

j) Machine à ceinture (à envelopper).

Elle enveloppe les bobines laminées à l'aide d'une bande d'acier.

- Elle comprend :
- 1) - un mécanisme d'avance de la bande.
 - 2) - un mécanisme de déroulement de la bobine.
 - 3) - un mécanisme d'enroulement de la bobine.
 - 4) - un mécanisme d'oscillation du mécanisme d'enroulement.
 - 5) - un mécanisme d'aggrava de la ceinture d'acier

Le mécanisme de déroulement est monté sur un montant soudé.

Les autres mécanismes sont montés sur les 2 entablements.

k) Balance :
Elle est destinée à peser les bobines laminées, et enregistrer leur poids sur une bande de papier.

Type de la balance : balance à levier et à cardan.

l) Appareils de contrôles technologiques :

Le laminair est muni des appareils technologiques suivants :

- Indicateur de l'effort de laminage.
- Indicateur de traction de la bande.
- Indicateur de l'épaisseur de la bande.

Tous ces appareils permettent de contrôler et de corriger le processus de laminage.

9. Particularités Constructives du laminoir

En différence des laminoirs réversibles existant, notre laminoir possède les particularités suivantes :

a) - Commandes des cylindres de travail et des débobineuses :

Ces commandes sont animées par deux moteurs chacune. Elles présentent les avantages suivants : - Le moment d'inertie des deux moteurs est inférieur au moment d'inertie d'un moteur électrique ayant même puissance sommaire. Ceci est très important au point de vue dynamique (force d'inertie ...) de commande, parce que le laminoir travaille dans le régime réversible ce qui entraîne une naissance d'une accélération puis de décélération brusque.

b) - Installation des débobineuses en porte-à-faux :

- L'utilisation des débobineuses à tambours en porte-à-faux nous d'effectuer la première passe de travail avec une tension de la bande allant jusqu'à six tonnes-force. Par contre la débobineuse à deux têtes peut permettre une tension de la bande allant jusqu'à trois tonnes-force.

La débobineuse en porte-à-faux nous permet également d'éviter la détérioration des bords latéraux de la bande, et enfin un dernière avantage c'est son poids, la débobineuse en porte-à-faux est moins lourde que la débobineuse à deux têtes.

c) - Appui rabattable de type fermé :

Cet appui permet d'effectuer le laminage avec une tension supérieure que celle qui est créée par un appui rabattable de type ouvert.

d) - mécanisme de suppression d'émulsion de la bande :

Il élimine l'émulsion de la surface du cylindre d'appui pendant la dernière passe de travail afin d'éviter la corrosion de la bande laminée pendant le stockage.

Ce mécanisme est constituée par deux raclettes en matière plastique montées sur deux leviers suspendus. La particularité de cette construction, est la commande pneumatique qui permet l'ouverture brusque des raclettes pendant le changement des cylindres d'appui. (voir schéma.)

e) - Mécanisme de remplacement des cylindres de travail :

Ce mécanisme sert :

- à enlever les cylindres usés pour rectification.
- à remettre en place les cylindres rectifiés ou neufs.

Il est constitué par : deux vis, deux écrous, deux réducteurs de vitesses à vis sans fin, un réducteur à engrenage cylindrique, un moteur électrique, un frein, des manchons à dents, des arbres intermédiaires,

Les vis et les écrous ont la construction analogue à ceux du mécanisme de serrage.

f) - système de réglage de la forme et du profil de la bande :

C'est un système automatique qui règle la forme et le profil de la bande pendant le laminage.

Ce système est constitué par des verins hydrauliques montés sur la cage de travail et système électro-hydraulique placé en dehors du laminoir. (voir schéma)

Ces verins hydrauliques sont montés dans des boîtiers fixés sur la cage de travail.

Il en est de même pour les verins qui servent à équilibrer le poids des cyl. d'ap. supérieurs.

1) - Table de guidage :

Cette table sert à : - guider le bord frontal et arrière de la bande pour l'engager entre les cylindres de travail.

- provoquer ou créer une tension de la bande lorsque le bord arrière quitte les cylindres de travail. Cette tension nous permet de préserver le bon enroulement de la bobine.

Nous venons de citer ci-dessus tous les mécanismes et dispositifs essentiels constituant la cage de travail de notre laminaire réversible.

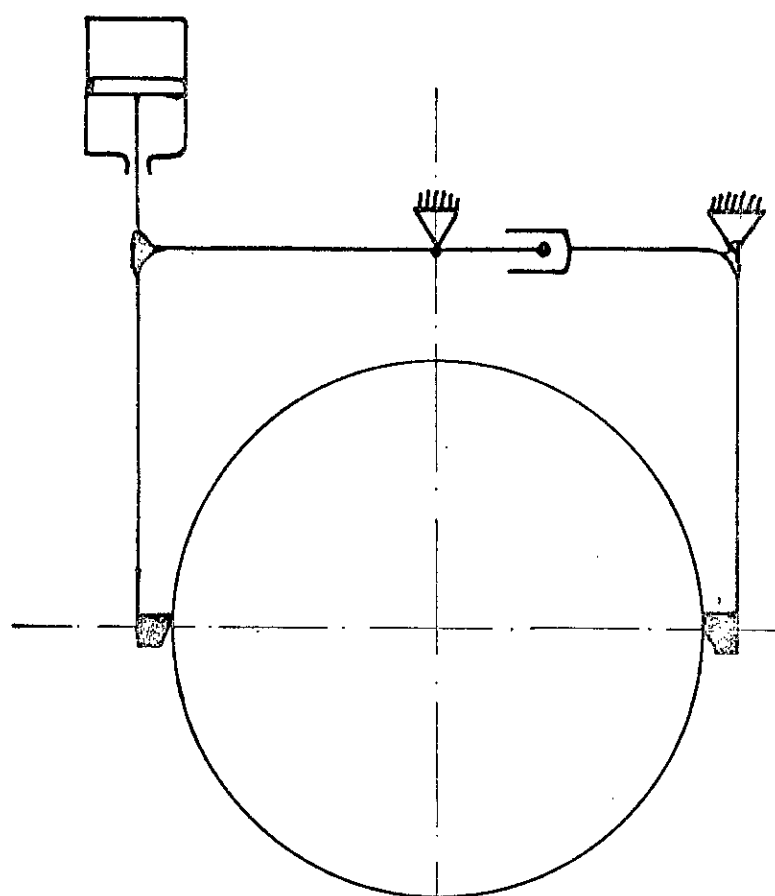


Schéma cinématique du mécanisme de suppression d'émulsion.

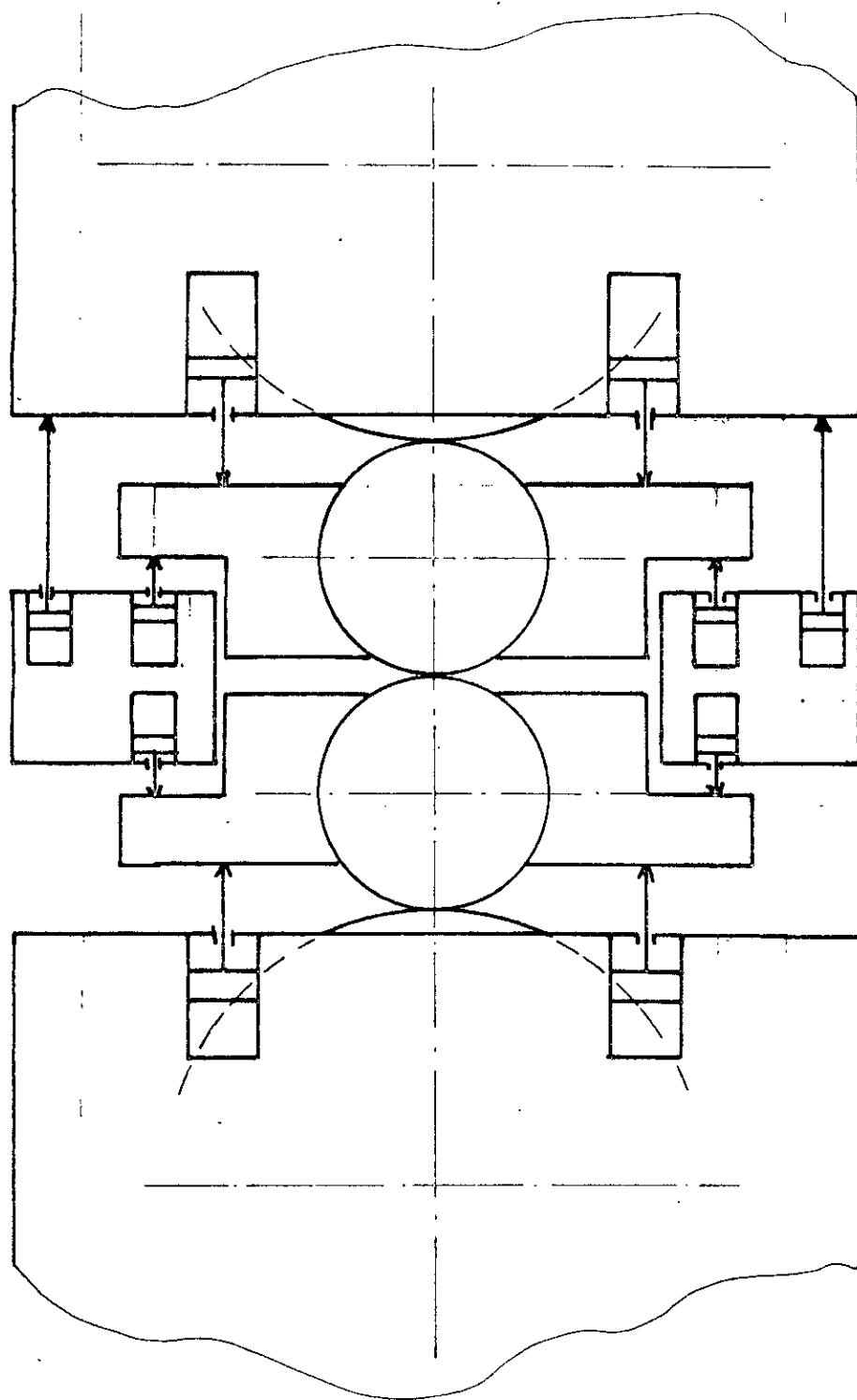


Schéma de montage des verins hydrauliques du système de réglage automatique de forme et du profil de la bande.

III - CALCUL DE CALIBRAGE DU LAMINOIR

Laminage de la bande

Itéraire: $(0,5 \times 1250$ à $2 \times 1250)$ mm.

Le laminage se fait en 3 passes :

Nuance de l'acier : A33 $R_e = 18 \text{ dan/mm}^2$ $R = 30 \text{ dan/mm}^2$

L'épaisseur de la tôle initiale : $h_0 = 2 \text{ mm}$

L'épaisseur de la tôle finale : $h_3 = 0,5 \text{ mm}$.

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

avec Δh_i Corroyage absolu dans la $i^{\text{ème}}$ passe $[\Delta h_i] = [\text{mm}]$.

h_{i-1} : épaisseur de la tôle avant la passe de travail $[h_{i-1}] = [\text{mm}]$

h_i : épaisseur de la tôle après la passe de travail $[h_i] = [\text{mm}]$

$$\Delta h_1 = h_0 - h_1 \Rightarrow \Delta h_1 = 2 - 1,10 \Rightarrow \Delta h_1 = 0,90 \text{ mm}$$

$$\Delta h_2 = h_1 - h_2 \Rightarrow \Delta h_2 = 1,10 - 0,69 \Rightarrow \Delta h_2 = 0,41 \text{ mm}$$

$$\Delta h_3 = h_2 - h_3 \Rightarrow \Delta h_3 = 0,69 - 0,5 \Rightarrow \Delta h_3 = 0,19 \text{ mm}$$

2) Corroyage relatif :

$$E_i = \frac{\Delta h_i}{h_{i-1}} \cdot 100 \quad (2)$$

E_i : Corroyage relatif dans la $i^{\text{ème}}$ passe $[E_i] = [\%]$

Δh_i et h_{i-1} même que dans l'équation (1)

$$E_1 = \frac{\Delta h_1}{h_0} \cdot 100 \Rightarrow E_1 = \frac{0,90}{2,00} \cdot 100 \Rightarrow E_1 = 45\%$$

$$E_2 = \frac{\Delta h_2}{h_1} \cdot 100 \Rightarrow E_2 = \frac{0,41}{1,10} \cdot 100 \Rightarrow E_2 = 37,2\%$$

$$E_3 = \frac{\Delta h_3}{h_2} \cdot 100 \Rightarrow E_3 = \frac{0,19}{0,69} \cdot 100 \Rightarrow E_3 = 27,6\%$$

3) Corroyage relatif total

$$E_{i\text{t}} = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100 \quad (3)$$

$$E_{1\varepsilon} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100 \Rightarrow E_{1\varepsilon} = \frac{2 - 1,10}{2} \times 100 \Rightarrow E_{1\varepsilon} = 45\%$$

$$E_{2\varepsilon} = \frac{h_0 - h_2}{h_0} \times 100 \Rightarrow E_{2\varepsilon} = \frac{2 - 0,69}{2} \times 100 \Rightarrow E_{2\varepsilon} = 65,5\%$$

$$E_{3\varepsilon} = \frac{h_0 - h_3}{h_0} \times 100 \Rightarrow E_{3\varepsilon} = \frac{2 - 0,5}{2} \times 100 \Rightarrow E_{3\varepsilon} = 75\%$$

4) Limite d'élasticité du métal avant et après le laminage :

$$\sigma_{ei} = \sigma_{0,2} + q E_{i\varepsilon}^w \quad (4)$$

σ_{ei} : limite d'élasticité du métal de la bande après la i ème passe [σ_{ei}] = [dan/mm²].

$\sigma_{0,2}$: limite d'élasticité initiale [$\sigma_{0,2}$] = [dan/mm²] $\sigma_{0,2} = 23$

$E_{i\varepsilon}$: Corroyage relatif total

$q; w$: paramètres dépendant de la nature du métal de la bande

$$q = 3,46 \quad ; \quad w = 0,6$$

$$\sigma_{e,0} = 23 \text{ dan/mm}^2$$

$$\sigma_{e,1} = \sigma_{0,2} + q E_{1\varepsilon}^w \Rightarrow \sigma_{e,1} = 23 + 3,46 \times 45^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e,1} = 56,96 \text{ dan/mm}^2$$

$$\sigma_{e,2} = \sigma_{0,2} + q E_{2\varepsilon}^w \Rightarrow \sigma_{e,2} = 23 + 3,46 \cdot 65,5^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e,2} = 65,54 \text{ dan/mm}^2$$

$$\sigma_{e,3} = \sigma_{0,2} + q E_{3\varepsilon}^w \Rightarrow \sigma_{e,3} = 23 + 3,46 \cdot 75^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e,3} = 69,14 \text{ dan/mm}^2$$

5) Résistance à la déformation du métal à laminier : on applique la formule suivante

$$\sigma_{gi} = 1,15 \frac{(\sigma_{e,i-1} + 2\sigma_{e,i} + 2\sigma_{e,i}'' + \sigma_{e,i}''')}{8} \quad (5)$$

avec σ_{gi} : résistance à la déformation du métal à laminier dans la i ème passe en [dan/mm²]

σ_{ei} : limite d'élasticité du bande

$\sigma_{e,i-1}$: limite d'élasticité du métal de la bande après la $(i-1)$ ème passe en [dan/mm²]

$\sigma_{e,i}''$: valeur intermédiaire de la limite d'élasticité en [dan/mm²].

$$\text{avec } \sigma_{e,i}'' = \sigma_{0,2} + q E_{i\varepsilon}^w$$

q et w même paramètre que dans l'équation (4)

$$E_{i\varepsilon}'' = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100 \quad [E_{i\varepsilon}''] = [\%] \quad (6)$$

$E_{i\varepsilon}''$: valeur intermédiaire du corroyage relatif total dans la i ème passe

h_i : valeur intermédiaire de l'épaisseur de la tôle dans la i ème passe.

$$h_i = h_{i-1} - \beta_2 \Delta h_i \quad (7)$$

β_2 : coefficient dont la valeur est égale à 0,25 ; 0,5 ; 0,75

h_{i-1} : même que dans l'équation (1)

Première Passe :

$$h'_1 = h_0 - 0,25 \Delta h_1 \Rightarrow h'_1 = 2 - 0,25 \cdot 0,9 \Rightarrow h'_1 = 1,775 \text{ mm}$$

$$E'_{1\varepsilon} = \frac{h_0 - h'_1}{h_0} \cdot 100 \Rightarrow E'_{1\varepsilon} = \frac{2 - 1,775}{2} \cdot 100 \Rightarrow E'_{1\varepsilon} = 11,25\%$$

$$\sigma_{e1} = \sigma_{0,2} + q E'_{1\varepsilon} \Rightarrow \sigma_{e1} = 23 + 3,46 \cdot 11,25^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e1} = 37,78 \text{ dan/mm}^2$$

$$h''_1 = h_0 - 0,5 \Delta h_1 \Rightarrow h''_1 = 2 - 0,5 \cdot 0,9 \Rightarrow h''_1 = 1,55 \text{ mm}$$

$$E''_{1\varepsilon} = \frac{h_0 - h''_1}{h_0} \cdot 100 \Rightarrow E''_{1\varepsilon} = \frac{2 - 1,55}{2} \cdot 100 \Rightarrow E''_{1\varepsilon} = 22,5\%$$

$$\sigma_{e1} = \sigma_{0,2} + q E''_{1\varepsilon} \Rightarrow \sigma_{e1} = 23 + 3,46 \cdot 22,5^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e1} = 45,4 \text{ dan/mm}^2$$

$$h'''_1 = h_0 - 0,75 \Delta h_1 \Rightarrow h'''_1 = 2 - 0,75 \cdot 0,9 \Rightarrow h'''_1 = 1,325 \text{ mm}$$

$$E'''_{1\varepsilon} = \frac{h_0 - h'''_1}{h_0} \cdot 100 \Rightarrow E'''_{1\varepsilon} = \frac{2 - 1,325}{2} \cdot 100 \Rightarrow E'''_{1\varepsilon} = 33,75\%$$

$$\sigma_{e1} = \sigma_{0,2} + q E'''_{1\varepsilon} \Rightarrow \sigma_{e1} = 23 + 3,46 \cdot 33,75^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e1} = 51,57 \text{ dan/mm}^2$$

On passe maintenant au calcul numérique de la résistance à la déformation du métal.

$$\sigma_{g_2} = \frac{1,15 (23 + (2 \times 37,78) + (2 \times 45,4) + 2 \times 51,57 + 56,96)}{8} \Rightarrow \sigma_{g_2} = 50,23 \text{ dan/mm}^2$$

On passe au calcul de la 2ème passe de travail

$$h'_2 = h_1 - 0,25 \Delta h_2 \Rightarrow h'_2 = 1,10 - 0,25 \cdot 0,41 \Rightarrow h'_2 = 0,99 \text{ mm}$$

$$E'_{2\varepsilon} = \frac{h_0 - h'_2}{h_0} \cdot 100 \Rightarrow E'_{2\varepsilon} = \frac{2 - 0,99}{2} \cdot 100 \Rightarrow E'_{2\varepsilon} = 50,5\%$$

$$\sigma_{e2} = \sigma_{0,2} + q E'_{2\varepsilon} \Rightarrow \sigma_{e2} = 23 + 3,46 \cdot 50,5^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e2} = 59,39 \text{ dan/mm}^2$$

$$h''_2 = h_1 - 0,5 \Delta h_2 \Rightarrow h''_2 = 1,1 - 0,5 \cdot 0,41 \Rightarrow h''_2 = 0,895 \text{ mm}$$

$$E''_{2\varepsilon} = \frac{h_0 - h''_2}{h_0} \cdot 100 \Rightarrow E''_{2\varepsilon} = \frac{2 - 0,895}{2} \cdot 100 \Rightarrow E''_{2\varepsilon} = 55,25\%$$

$$\sigma_{e2}'' = \sigma_{a2} + q \epsilon_{2\epsilon}''^w \Rightarrow \sigma_{e2}'' = 23 + 3,46 \cdot 55,25^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e2}'' = 61,42 \text{ dan/mm}^2$$

$$h_2'' = h_1 - 0,75 \Delta h_2 \Rightarrow h_2'' = 1,1 - 0,75 \cdot 0,41 \Rightarrow h_2'' = 0,79 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{2\epsilon}'' = \frac{h_0 - h_2''}{h_0} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{2\epsilon}'' = \frac{2 - 0,79}{2} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{2\epsilon}'' = 60,5\%$$

$$\sigma_{e2}''' = \sigma_{a2} + q \epsilon_{2\epsilon}''^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e2}''' = 23 + 3,46 \cdot 60,5^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e2}''' = 63,56 \text{ dan/mm}^2$$

On passe au calcul numérique de la résistance à la déformation du métal

$$\sigma_{g2} = \frac{1,15 (56,96 + (2 \cdot 59,39) + (2 \cdot 61,42) + (2 \cdot 63,56) + 65,54)}{8} \Rightarrow \sigma_{g2} = 70,61 \text{ dan/mm}^2$$

Calcul de la troisième passe de travail :

$$h_3 = h_2 - 0,25 \Delta h_3 \Rightarrow h_3 = 0,69 - 0,25 \cdot 0,19 \Rightarrow h_3 = 0,643 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{3\epsilon}' = \frac{h_0 - h_3}{h_0} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{3\epsilon}' = \frac{2 - 0,643}{2} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{3\epsilon}' = 67,85\%$$

$$\sigma_{e3}' = \sigma_{a2} + q \epsilon_{3\epsilon}'^w \Rightarrow \sigma_{e3}' = 23 + 3,46 \cdot 67,85^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e3}' = 66,45 \text{ dan/mm}^2$$

$$h_3'' = h_2 - 0,5 \Delta h_3 \Rightarrow h_3'' = 0,68 - 0,5 \cdot 0,19 \Rightarrow h_3'' = 0,595 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{3\epsilon}'' = \frac{h_0 - h_3''}{h_0} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{3\epsilon}'' = \frac{2 - 0,595}{2} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{3\epsilon}'' = 70,25\%$$

$$\sigma_{e3}'' = \sigma_{a2} + q \epsilon_{3\epsilon}''^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e3}'' = 23 + 3,46 \cdot 70,25^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e3}'' = 67,36 \text{ dan/mm}^2$$

$$h_3''' = h_2 - 0,75 \Delta h_3 \Rightarrow h_3''' = 0,69 - 0,75 \cdot 0,19 \Rightarrow h_3''' = 0,55 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{3\epsilon}''' = \frac{h_0 - h_3'''}{h_0} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{3\epsilon}''' = \frac{2 - 0,55}{2} \times 100 \Rightarrow \epsilon_{3\epsilon}''' = 72,5\%$$

$$\sigma_{e3}''' = \sigma_{a2} + q \epsilon_{3\epsilon}'''^w \Rightarrow \sigma_{e3}''' = 23 + 3,46 \cdot 72,5^{0,6} \Rightarrow \sigma_{e3}''' = 68,21 \text{ dan/mm}^2$$

On passe au calcul numérique de la résistance à la déformation du métal.

$$\sigma_{g3} = \frac{1,15 (65,54 + (2 \cdot 66,45) + (2 \cdot 67,36) + (2 \cdot 68,21) + 69,14)}{8} \Rightarrow \sigma_{g3} = 77,44 \frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$$

6) Calcul des tractions et contre-tractions spécifiques en amont et en aval.

$$\text{en amont : } \sigma_{oi} = \frac{T_{oi} \cdot 10^3}{B \cdot h_i} \quad (8) \quad [\sigma_{oi}] = [\text{dan/mm}^2]$$

$$\text{en aval : } \sigma_{ai} = \frac{T_{ai} \cdot 10^3}{B \cdot h_i} \quad (9) \quad [\sigma_{ai}] = [\text{dan/mm}^2]$$

σ_{oi} - Contrainte de traction spécifique en amont dans la ième passe.

σ_{ai} - contrainte de contre-traction spécifique en aval dans la ième passe.

B : largeur de la bande à laminer.

T_{gi} : Contractions en aval de la bande en tonnes.

T_{oi} : traction en amont de la bande en tonnes.

h_{i-1} et h_i : épaisseurs de la bande avant et après le laminage

Première passe :

$$\sigma_{o,1} = \frac{T_{o,1} \cdot 10^3}{B \cdot h_0} \Rightarrow \sigma_{o,1} = \frac{3 \cdot 10^3}{1250 \cdot 2} \Rightarrow \sigma_{o,1} = 1,2 \text{ dan/mm}^2$$

$$\sigma_{a,1} = \frac{T_{a,1} \cdot 10^3}{B \cdot h_1} \Rightarrow \sigma_{a,1} = \frac{12 \cdot 10^3}{1250 \cdot 1,10} \Rightarrow \sigma_{a,1} = 8,72 \text{ dan/mm}^2$$

Deuxième passe :

$$\sigma_{o,2} = \frac{T_{o,2} \cdot 10^3}{B \cdot h_2} \Rightarrow \sigma_{o,2} = \frac{8,6 \cdot 10^3}{1250 \cdot 1,10} \Rightarrow \sigma_{o,2} = 6,25 \text{ dan/mm}^2$$

$$\sigma_{a,2} = \frac{T_{a,2} \cdot 10^3}{B \cdot h_2} \Rightarrow \sigma_{a,2} = \frac{8,6 \cdot 10^3}{1250 \cdot 0,69} \Rightarrow \sigma_{a,2} = 9,97 \text{ dan/mm}^2$$

Troisième passe :

$$\sigma_{o,3} = \frac{T_{o,3} \cdot 10^3}{B \cdot h_2} \Rightarrow \sigma_{o,3} = \frac{8,6 \cdot 10^3}{1250 \cdot 0,69} \Rightarrow \sigma_{o,3} = 9,97 \text{ dan/mm}^2$$

$$\sigma_{a,3} = \frac{T_{a,3} \cdot 10^3}{B \cdot h_3} \Rightarrow \sigma_{a,3} = \frac{3,1 \cdot 10^3}{1250 \cdot 0,65} \Rightarrow \sigma_{a,3} = 4,96 \text{ dan/mm}^2$$

7) Coefficient d'influence des tractions et des contre-tractions à la ième passe :

$$\text{en amont : } \xi_{oi} = 1 - \frac{\sigma_{oi}}{\sigma_{gi}} \quad (10)$$

$$\text{en aval : } \xi_{ai} = 1 - \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{gi}} \quad (11)$$

ξ_{oi} et ξ_{ai} : sont respectivement les coefficients d'influence des tractions et des contre-tractions :

σ_{oi} et σ_{ai} même que dans les équations (8) et (9)

σ_{gi} : même que dans l'équation (5)

Première passe :

$$\xi_{0,1} = 1 - \frac{\sigma_{0,1}}{\sigma_{g1}} \Rightarrow \xi_{0,1} = 1 - \frac{4,2}{50,23} \Rightarrow \xi_{0,1} = 0,916$$

$$\xi_{1,1} = 1 - \frac{\sigma_{1,1}}{\sigma_{g1}} \Rightarrow \xi_{1,1} = 1 - \frac{8,72}{50,23} \Rightarrow \xi_{1,1} = 0,826$$

Deuxième passe :

$$\xi_{0,2} = 1 - \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{g2}} \Rightarrow \xi_{0,2} = 1 - \frac{6,25}{70,61} \Rightarrow \xi_{0,2} = 0,911$$

$$\xi_{1,2} = 1 - \frac{\sigma_{1,2}}{\sigma_{g2}} \Rightarrow \xi_{1,2} = 1 - \frac{9,97}{70,61} \Rightarrow \xi_{1,2} = 0,858$$

Troisième passe :

$$\xi_{0,3} = 1 - \frac{\sigma_{0,3}}{\sigma_{g3}} \Rightarrow \xi_{0,3} = 1 - \frac{9,97}{77,44} \Rightarrow \xi_{0,3} = 0,871$$

$$\xi_{1,3} = 1 - \frac{\sigma_{1,3}}{\sigma_{g3}} \Rightarrow \xi_{1,3} = 1 - \frac{4,96}{77,44} \Rightarrow \xi_{1,3} = 0,935$$

8) Longueur de l'arc de contact non-déformé :

$$l_i = \sqrt{0,5 D_t \Delta h_i} \quad (12) \quad [l_i] = [\text{mm}]$$

l_i : longueur de l'arc de contact non-déformé dans la $i^{\text{ème}}$ passe

Δh_i : Corroyage absolu

$$l_1 = \sqrt{0,5 D_t \Delta h_1} \Rightarrow l_1 = \sqrt{0,5 \cdot 500 \cdot 0,90} \Rightarrow l_1 = 15 \text{ mm}$$

$$l_2 = \sqrt{0,5 D_t \Delta h_2} \Rightarrow l_2 = \sqrt{0,5 \cdot 500 \cdot 0,44} \Rightarrow l_2 = 10,12 \text{ mm}$$

$$l_3 = \sqrt{0,5 D_t \Delta h_3} \Rightarrow l_3 = \sqrt{0,5 \cdot 500 \cdot 0,19} \Rightarrow l_3 = 6,89 \text{ mm}$$

9) Indice de déformation

$$d_i = \frac{2 \mu l_i}{\Delta h_i} \quad (13)$$

avec d_i : l'indice de déformation dans la $i^{\text{ème}}$ passe

l_i : même que dans l'équation (12)

μ : coefficient de frottement entre les cylindres et le métal à laminé $\mu = 0,05$
(depend de la lubrification et de la vitesse de laminage)

Δh_i : corroyage absolu

Première passe: $d_1' = \frac{2\gamma l_1}{\Delta h_1} \Rightarrow d_1' = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 15}{0,9} \Rightarrow d_1' = 1,67$

Deuxième passe: $d_2' = \frac{2\gamma l_2}{\Delta h_2} \Rightarrow d_2' = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 10,12}{0,41} \Rightarrow d_2' = 2,47$

Troisième passe: $d_3' = \frac{2\gamma l_3}{\Delta h_3} \Rightarrow d_3' = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 6,89}{0,19} \Rightarrow d_3' = 3,63$

10) Epaisseur de la bande dans la section neutre mesurée à partir du bord:

$$h_{ei} = \sqrt[2d_i]{\frac{f_{oi}}{f_{ai}} \cdot h_{i-1}^{(d_i-1)} \cdot h_i^{(d_i+1)}} \quad (14)$$

f_{oi} : f_{ai} même que dans les équations (10) et (11)

h_{i-1} ; h_i même que dans l'équation (1)

d_i : indice de déformation

$$h_{e1} = \sqrt[2 \cdot 1,67]{\frac{f_{o1}}{f_{a1}} \cdot h_0^{(1,67-1)} \cdot h_1^{(1,67+1)}} \Rightarrow h_{e1} = \sqrt[2 \cdot 1,67]{\frac{0,976}{0,826} \cdot 2^{0,67} \cdot 1,1^{2,67}} \Rightarrow h_{e1} = 1,30 \text{ mm}$$

$$h_{e2} = \sqrt[2 \cdot 2,47]{\frac{f_{o2}}{f_{a2}} \cdot h_1^{(2,47-1)} \cdot h_2^{(2,47+1)}} \Rightarrow h_{e2} = \sqrt[2 \cdot 2,47]{\frac{0,911}{0,858} \cdot 1,1^{1,47} \cdot 0,69^{3,47}} \Rightarrow h_{e2} = 0,81 \text{ mm}$$

$$h_{e3} = \sqrt[2 \cdot 3,63]{\frac{f_{o3}}{f_{a3}} \cdot h_2^{(3,63-1)} \cdot h_3^{(3,63+1)}} \Rightarrow h_{e3} = \sqrt[2 \cdot 3,63]{\frac{0,871}{0,935}} \Rightarrow h_{e3} = 0,56 \text{ mm}$$

11) Coefficient d'état de contrainte.

$$n_{di} = f_{oi} \cdot \frac{h_{i-1}}{\Delta h_i (d_i - 2)} \left[\left(\frac{h_{i-1}}{h_{ei}} \right)^{d_i - 2} - 1 \right] + f_{ai} \cdot \frac{h_i}{\Delta h_i (d_i + 2)} \left[\left(\frac{h_{ei}}{h_i} \right)^{d_i + 2} - 1 \right] \quad (15)$$

n_{di} : coefficient d'état de contrainte dans la ième passe

f_{oi} ; f_{ai} : même que dans les équations (10) et (11)

d_i : même que dans l'équation (13)

h_{ei} : même que dans l'équation (14)

h_i ; h_{i-1} ; Δh_i : même que dans l'équation (1)

11) Calcul du coefficient d'état de contrainte

$$n\sigma_1 = 0,976 \cdot \frac{2}{0,9(1,67-2)} \left[\left(\frac{2}{1,3} \right)^{(1,67-2)} - 1 \right] + 0,826 \cdot \frac{1,10}{0,90(1,67+2)} \left[\left(\frac{1,3}{1,10} \right)^{(1,67+2)} - 1 \right] \Rightarrow n\sigma_1 = 1,103$$

$$n\sigma_2 = 0,911 \cdot \frac{1,10}{0,41(2,47-2)} \left[\left(\frac{1,10}{0,8} \right)^{(2,47-2)} - 1 \right] + 0,858 \cdot \frac{0,69}{0,41(2,47+2)} \left[\left(\frac{0,8}{0,69} \right)^{(2,47+2)} - 1 \right] \Rightarrow n\sigma_2 = 1,18$$

$$n\sigma_3 = 0,871 \cdot \frac{0,69}{0,19(3,63-2)} \left[\left(\frac{0,69}{0,56} \right)^{(3,63-2)} - 1 \right] + 0,835 \cdot \frac{0,5}{0,19(3,63+2)} \left[\left(\frac{0,56}{0,50} \right)^{(3,63+2)} - 1 \right] \Rightarrow n\sigma_3 = 1,63$$

12) Pression spécifique moyenne :

$$P_{smi} = \sigma_{gi} \cdot n\sigma_i \quad (16) \quad [P_{smi}] = [\text{dan/mm}^2]$$

P_{smi} : Pression spécifique moyenne dans la ième passe

σ_{gi} : Contrainte de la résistance à la déformation du métal à laminer

$n\sigma_i$: Coefficient d'état de contrainte

$$\text{AN: } P_{sm1} = \sigma_{g1} \cdot n\sigma_1 \Rightarrow P_{sm1} = 50,23 \cdot 1,103 \Rightarrow P_{sm1} = 55,40 \text{ dan/mm}^2$$

$$P_{sm2} = \sigma_{g2} \cdot n\sigma_2 \Rightarrow P_{sm2} = 70,61 \cdot 1,18 \Rightarrow P_{sm2} = 83,32 \text{ dan/mm}^2$$

$$P_{sm3} = \sigma_{g3} \cdot n\sigma_3 \Rightarrow P_{sm3} = 77,44 \cdot 1,63 \Rightarrow P_{sm3} = 126,23 \text{ dan/mm}^2$$

13) Calcul de la longueur de l'arc de contact déformé par la méthode de sélection

$$l_{di} = 0,525 \cdot 10^{-4} \cdot P_{smi} \cdot D_t + \sqrt{0,5 \cdot D_t \cdot \Delta h_i + (0,525 \cdot 10^{-4} \cdot P_{smi} \cdot D_t)^2} \quad (17)$$

l_{di} : longueur de l'arc de contact déformé dans la ième passe $[l_{di}] = [\text{mm}]$.

P_{smi} : Pression spécifique moyenne

D_t : Diamètre des cylindres de travail

Δh_i : même que dans l'équation (1)

$$\text{AN: } l_{d1} = 0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 55,40 \cdot 500 + \sqrt{0,5 \cdot 500 \cdot 0,90 + (0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 55,40 \cdot 500)^2} \Rightarrow l_{d1} = 16,52 \text{ mm}$$

$$l_{d2} = 0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 83,32 \cdot 500 + \sqrt{0,5 \cdot 500 \cdot 0,41 + (0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 83,32 \cdot 500)^2} \Rightarrow l_{d2} = 12,70 \text{ mm}$$

$$l_{d3} = 0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 126,23 \cdot 500 + \sqrt{0,5 \cdot 500 \cdot 0,19 + (0,525 \cdot 10^{-4} \cdot 126,23 \cdot 500)^2} \Rightarrow l_{d3} = 10,96 \text{ mm}$$

arrivé à ce niveau on essaie de faire vérifier l'inégalité suivante : $|l_{di} - l_i| \leq 0,03 (\alpha)$

Vérification de l'inégalité (α)

$$|l_{d1} - l_1| = |16,52 - 15| = 1,52$$

On voit bien que l'inégalité (α)

$$|l_{d2} - l_2| = |12,70 - 10,12| = 2,58$$

n'est pas vérifiée pour les 3 passes.

$$|l_{d3} - l_3| = |10,96 - 6,89| = 4,07$$

On recommence les calculs à partir du Point (9) en considérant la formule ci-dessous (18)

jusqu'à satisfaction de l'inégalité (α) $l'_i = \frac{l_{di} + l_i}{2}$ (18)

$$l'_1 = \frac{l_{d1} + l_1}{2} \Rightarrow l'_1 = \frac{16,52 + 15}{2} \Rightarrow l'_1 = 15,76 \text{ mm}$$

$$l'_2 = \frac{l_{d2} + l_2}{2} \Rightarrow l'_2 = \frac{12,70 + 10,12}{2} \Rightarrow l'_2 = 11,41 \text{ mm}$$

$$l'_3 = \frac{l_{d3} + l_3}{2} \Rightarrow l'_3 = \frac{10,96 + 6,89}{2} \Rightarrow l'_3 = 8,20 \text{ mm}$$

Après tout calcul fait, je retrouve le résultat final après six itérations.

Les résultats retrouvés nous permettent de vérifier l'inégalité précédente (α)

$$l'_{d1} = 16,627 \text{ mm} ; l'_{d2} = 12,89 \text{ mm} ; l'_{d3} = 10,587 \text{ mm}$$

14) Effort de laminage total (exercé au niveau de l'arc de contact déformé)

$$P_{li} = P_{smi} \cdot l'_{di} \cdot B \quad [P_{li}] = [\text{dan}] \quad (19)$$

P_{li} : effort de laminage total dans la ième passe.

B : largeur de la bande.

l'_{di} : longueur de l'arc de contact déformé

P_{smi} : pression spécifique moyenne de laminage.

$$P_{l1} = P_{sm1} \cdot l'_{d1} \cdot B \Rightarrow P_{l1} = 55,40 \cdot 16,627 \cdot 1250 \Rightarrow P_{l1} = 1151420 \text{ dan}$$

$$P_{l2} = P_{sm2} \cdot l'_{d2} \cdot B \Rightarrow P_{l2} = 83,32 \cdot 12,89 \cdot 1250 \Rightarrow P_{l2} = 1340882,25 \text{ dan}$$

$$P_{l3} = P_{sm3} \cdot l'_{d3} \cdot B \Rightarrow P_{l3} = 126,23 \cdot 10,587 \cdot 1250 \Rightarrow P_{l3} = 1670496,23 \text{ dan}$$

15) Calcul de l'avance.

$$s_i = \frac{(h_{ei} - h_i)^2}{h_i \cdot \Delta h_i} \quad (20)$$

S_i : l'avance dans la ième passe

h_i ; Δh_i : même que dans l'équation (1)

h_{ei} : même que " " (14)

$$S_1 = \frac{(h_{e1} - h_1)^2}{h_1 \cdot \Delta h_1} \Rightarrow S_1 = \frac{(1,30 - 1,1)^2}{1,1 \cdot 0,80} \Rightarrow S_1 = 0,040$$

$$S_2 = \frac{(h_{e2} - h_2)^2}{h_2 \cdot \Delta h_2} \Rightarrow S_2 = \frac{(0,81 - 0,69)^2}{0,69 \cdot 0,41} \Rightarrow S_2 = 0,051$$

$$S_3 = \frac{(h_{e3} - h_3)^2}{h_3 \cdot \Delta h_3} \Rightarrow S_3 = \frac{(0,86 - 0,5)^2}{0,5 \cdot 0,19} \Rightarrow S_3 = 0,038$$

16) Vitesse de la bande (données de base)

$$V_1 = 6,0 \text{ m/s} \quad ; \quad V_2 = 6,2 \text{ m/s} \quad ; \quad V_3 = 8,4 \text{ m/s}$$

17) Vitesse des cylindres

$$V_{ci} = \frac{V_i}{1 + S_i} \quad (21) \quad [V_{ci}] = [\text{m/s}]$$

V_{ci} : vitesse des cylindres de travail dans la ième passe

V_i : vitesse de la bande dans la ième passe

S_i : avance dans la ième passe

$$V_{c1} = \frac{V_1}{1 + S_1} \Rightarrow V_{c1} = \frac{6,0}{1 + 0,040} \Rightarrow V_{c1} = 5,76 \text{ m/s}$$

$$V_{c2} = \frac{V_2}{1 + S_2} \Rightarrow V_{c2} = \frac{6,2}{1 + 0,051} \Rightarrow V_{c2} = 6,95 \text{ m/s}$$

$$V_{c3} = \frac{V_3}{1 + S_3} \Rightarrow V_{c3} = \frac{8,4}{1 + 0,038} \Rightarrow V_{c3} = 8,082 \text{ m/s}$$

18) Vitesse d'untourillon du cylindre d'appui :

$$V_{ti} = V_{ci} \cdot \frac{d_{ti}}{D_0} \quad (22) \quad [V_{ti}] = [\text{m/s}]$$

V_{ti} : vitesse d'untourillon du cylindre d'appui dans la ième passe.

V_{ci} : même que dans l'équation (21)

$D_0 = 1400 \text{ mm}$; diamètre d'un cylindre d'appui

$d_{ti} = 1000 \text{ mm}$; diamètre du tourillon du cylindre d'appui

$$V_{t1} = V_{c1} \cdot \frac{dt}{D_o} \Rightarrow V_{t1} = 5,76 \cdot \frac{1000}{1400} \Rightarrow V_{t1} = 4,11 \text{ m/s.}$$

$$V_{t2} = V_{c2} \cdot \frac{dt}{D_o} \Rightarrow V_{t2} = 6,95 \cdot \frac{1000}{1400} \Rightarrow V_{t2} = 4,96 \text{ m/s.}$$

$$V_{t3} = V_{c3} \cdot \frac{dt}{D_o} \Rightarrow V_{t3} = 8,092 \cdot \frac{1000}{1400} \Rightarrow V_{t3} = 5,78 \text{ m/s.}$$

19) Moment résistant de laminage selon la relation de PHINK.

$$M_{\ell i} = 0,5 \cdot P_{mi} \cdot B \cdot D_t \cdot (1 + S_i) \cdot h_i \cdot \ln \left[\frac{h_{i-1}}{h_i} \right] \quad (23) \quad [M_{\ell i}] = [\text{dan.m.}]$$

$M_{\ell i}$: couple résistant de laminage dans la ième passe

P_{mi} : même que dans l'éq. (16)

B : largeur de la bande.

D_t : même que dans l'éq. (12)

S_i : avance.

$h_{i-1} : h_i$: même que dans l'éq. (1)

$$M_{\ell 1} = 0,5 \cdot 55,40 \cdot 1250 \cdot 500 (1 + 0,040) \cdot 1,140 \cdot \ln \left(\frac{2}{1,1} \right) \Rightarrow M_{\ell 1} = 11840 \text{ dan.m}$$

$$M_{\ell 2} = 0,5 \cdot 88,32 \cdot 1250 \cdot 500 (0,051 + 1) \cdot 0,69 \cdot \ln \left(\frac{1,1}{0,69} \right) \Rightarrow M_{\ell 2} = 9335 \text{ dan.m}$$

$$M_{\ell 3} = 0,5 \cdot 126,23 \cdot 1250 \cdot 500 (1 + 0,038) \cdot 0,5 \cdot \ln \left(\frac{0,69}{0,5} \right) \Rightarrow M_{\ell 3} = 6599 \text{ dan.m}$$

20) Coefficient de frottement dans les paliers lisses

$$\mu_{\ell i} = (5,04 + 4,84 C) 10^{-3} P_{\ell i}^{-0,51} \cdot V_{\ell i}^{0,55} \quad (24)$$

$\mu_{\ell i}$: coef. de frottement dans les paliers lisses dans la ième passe.

$P_{\ell i}$: même que dans l'éq. (19) $[P_{\ell i}] = [\text{T.f.}]$.

$V_{\ell i}$: même que dans l'éq. (22)

C : coefficient dépendant de la nature du lubrifiant avec $(C=2)$

$$\text{AN: } \mu_{\ell 1} = (5,04 + 4,84 \cdot 2) 10^{-3} \cdot 11515^{-0,51} \cdot 4,1^{0,55}$$

$$\mu_{\ell 1} = 0,00087.$$

$$\mu_{E_2} = (5,04 + 4,84 \cdot 2) \cdot 10^{-3} \cdot 1340,89^{-0,924} \cdot 4,96^{0,55} \Rightarrow \mu_{E_2} = 0,00090$$

$$\mu_{E_3} = (5,04 + 4,84 \cdot 2) \cdot 10^{-3} \cdot 1670,49^{-0,924} \cdot 5,78^{0,55} \Rightarrow \mu_{E_3} = 0,00088$$

21) Moment de frottement dans les paliers liésés réduit aux cylindres de travail.

$$M_{P_i} = \mu_{E_i} \cdot dt \cdot P_{L_i} \cdot \frac{D_t}{D_o} \cdot 10^{-3} \quad (25) \quad [M_{P_i}] = [\text{dan.m}]$$

M_{P_i} : Couple de frottement dans les paliers liésés réduit aux cylindres de travail à la ième passe

μ_{E_i} : même que dans l'éq. (24)

$dt = 1000 \text{ mm}$: diamètre du tourillon ; $D_t = 500 \text{ mm}$: diamètre des cylindres de travail

P_{L_i} : même que dans l'éq. (19) ; $D_o = 1400 \text{ mm}$: diamètre des cylindres d'appui.

$$M_{P_1} = 0,00087 \cdot 1000 \cdot 1151419,75 \cdot \frac{500}{1400} \cdot 10^{-3} \Rightarrow M_{P_1} = 358 \text{ dan.m.}$$

$$M_{P_2} = 0,00090 \cdot 1000 \cdot 1340882,25 \cdot \frac{500}{1400} \cdot 10^{-3} \Rightarrow M_{P_2} = 431 \text{ dan.m.}$$

$$M_{P_3} = 0,00088 \cdot 1000 \cdot 1670496,23 \cdot \frac{500}{1400} \cdot 10^{-3} \Rightarrow M_{P_3} = 525 \text{ dan.m.}$$

22) Moment de frottement de roulement entre les cylindres de travail et d'appui, réduit aux

Cylindres de travail :

$$M_{r_i} = 2,36 \cdot 10^{-5} P_{L_i} \sqrt{\frac{P_{L_i} \cdot D_t \cdot (D_t + D_o)}{L \cdot D_o}} \quad (26)$$

M_{r_i} : moment de frottement de roulement entre les cylindres de travail et d'appui, réduit aux cylindres de travail à la ième passe.

P_{L_i} : même que dans l'équation (19) ; L : Longueur du cylindre de travail en [mm].

$$M_{r_1} = 2,36 \cdot 10^{-5} \cdot 1151419,75 \cdot \sqrt{\frac{1151419,75 \cdot 500 \cdot (500 + 1400)}{1700 \cdot 1400}} \Rightarrow M_{r_1} = 0,583 \text{ tf.m} = 583 \text{ dan.m.}$$

$$M_{r_2} = 2,36 \cdot 10^{-5} \cdot 1340882,25 \cdot \sqrt{\frac{1340882,25 \cdot 500 \cdot (500 + 1400)}{1700 \cdot 1400}} \Rightarrow M_{r_2} = 0,732 \text{ tf.m} = 732 \text{ dan.m.}$$

$$M_{r_3} = 2,36 \cdot 10^{-5} \cdot 1670496,23 \cdot \sqrt{\frac{1670496,23 \cdot 500 \cdot (500 + 1400)}{1700 \cdot 1400}} \Rightarrow M_{r_3} = 1,048 \text{ tf.m} = 1048 \text{ dan.m.}$$

23) Moment moteur réduit aux cylindres de travail.

$$M_{mi} = \frac{1}{i} \left[M_{\ell i} + M_{p i} + M_{r i} + 0,5 \cdot 10^3 \cdot D_c (T_{0i} - T_{1i}) \right] \quad (27) \quad [M_{mi}] = [Tf \cdot m]$$

M_{mi} : moment moteur réduit aux cylindres de travail dans la i ème passe.

i : rapport de transmission du moteur aux cylindres avec $i = 1,837$

T_{0i} : traction de la bande en amont ; T_{1i} : traction de la bande en aval.

$M_{\ell i}$: même que dans l'éq. (23) ; $M_{p i}$: même que dans l'éq. (25)

$M_{r i}$: même que dans l'éq. (26)

$$M_{m1} = \frac{1}{1,837} \left[11,84 + 0,36 + 0,583 + 0,5 \cdot 10^3 \cdot 500 (3 - 12) \right] \Rightarrow M_{m1} = 5,73 Tf \cdot m$$

$$M_{m2} = \frac{1}{1,837} \left[9,34 + 0,43 + 0,732 + 0,5 \cdot 10^3 \cdot 500 (8,6 - 8,6) \right] \Rightarrow M_{m2} = 5,72 Tf \cdot m$$

$$M_{m3} = \frac{1}{1,837} \left[6,6 + 0,525 + 1,04 + 0,5 \cdot 10^3 \cdot 500 (8,6 - 3,1) \right] \Rightarrow M_{m3} = 5,18 Tf \cdot m$$

24) Calcul de la vitesse du moteur en [tr/mn].

$$n_i = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot V_{\ell i} \cdot i}{\pi \cdot D_c} \quad (28)$$

n_i : vitesse du moteur dans la i ème passe. ; i : rapport de transmission

$V_{\ell i}$: vitesse des cylindres de travail en [m/s] ;

$$n_1 = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 5,76 \cdot 1,837}{\pi \cdot 500} \Rightarrow n_1 = 404 \text{ tr/mn.}$$

$$n_2 = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 6,95 \cdot 1,837}{\pi \cdot 500} \Rightarrow n_2 = 487,66 \text{ tr/mn.}$$

$$n_3 = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 8,082 \cdot 1,837}{\pi \cdot 500} \Rightarrow n_3 = 567,8 \text{ tr/mn.}$$

25) Puissance développée par le moteur.

$$N_i = \frac{M_{mi} \cdot n_i}{0,075 \cdot i} \quad (29) \quad [N_i] = [kw]$$

N_i : puissance développée par le moteur dans la i ème passe

M_{i1} : même que dans l'éq (27)

i : rapport de transmission

$$N_1 = \frac{5,73 \cdot 404}{0,975 \cdot 1,837}$$

⇒

$$N_1 = 1293 \text{ kW}$$

$$N_2 = \frac{5,72 \cdot 487,66}{0,975 \cdot 1,837}$$

⇒

$$N_2 = 1557,4 \text{ kW}$$

$$N_3 = \frac{5,18 \cdot 567,8}{0,975 \cdot 1,837}$$

⇒

$$N_3 = 1642 \text{ kW}$$

Tableau récapitulatif des paramètres du Calibrage pour le laminage de la bande

dont l'itinéraire est: $0,5 \times 1250 \div 2 \times 1250$ avec un nombre de passe égal à 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Designation	h_{i-1}	Δh_i	h_i	ϵ_i	ϵ_{i2}	G_{ei-1}	G_{ei}	G_{oi}	G_{oi}	G_{gi}	T_{oi}	T_{ai}
Unités Passe n°	mm	mm	mm	%	%	dan mm ²	dan mm ²	dan mm ²	dan mm ²	dan mm ²	dan	dan
N°1	2	0,90	1,10	45	45	23	56,96	1,2	8,72	50,23	3000	12000
N°2	1,10	0,41	0,69	37,2	65,5	56,96	65,54	6,25	9,97	70,61	8600	8600
N°3	0,69	0,19	0,50	27,6	75	65,54	69,14	9,97	4,96	77,44	8600	3100

Suite du tableau de valeurs : Itinéraire (0,5 x 1250 ÷ 2,1250) mm.

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
DESIGNATION	S _{0i}	S _{1i}	l _i	M _i	d _i	h _{ei}	n _{0i}	P _{smi}	l _{di}	l' _{di}	P' _{smi}	
Unités N ^o de la Passe			mm			mm		$\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$	mm	mm	$\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$	
N ^o 1	0,976	0,826	15	0,05	1,67	1,30	4,105	55,10	16,52	16,627	56,42	
N ^o 2	0,911	0,858	10,12	0,05	2,47	0,810	1,18	83,32	12,70	12,89	84,40	
N ^o 3	0,871	0,935	6,89	0,05	3,63	0,56	1,63	126,23	10,96	10,537	127,30	

Suite

	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
DESIGNATION	S _i	V _{ei}	V _{ei}	M _{pi}	M _{pi}	M _{ri}	M _{ti}	M _{mi}	n _i	N _i	V _i	P _{li}
Unités N ^o de la Passe		m/s	m/s	dan.m	dan.m	dan.m		dan.m	tr/mn	KW	m/s	dan
N ^o 1	0,040	5,76	4,11	11840	358	583	0,00087	5730	404	1293	6,0	115 1419,75
N ^o 2	0,051	6,95	4,96	9335	431	732	0,00090	5720	487,66	1567,1	6,2	1340 832,25
N ^o 3	0,038	8,092	5,78	6599	525	1018	0,00088	5180	567,8	1642	8,4	1670 496,25

Tableau récapitulatif des paramètres de calibrage pour l'itéraire : $(4 \times 1250 \div 2,5 \times 1250)$ mm

Acier 33 : avec $(R_e = 18 \text{ dan/mm}^2 \quad \text{et} \quad R = 33 \text{ dan/mm}^2)$

ordre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Désignation	h_{i-1}	h_i	Δh_i	ϵ_i	ϵ_{i-1}	δ_{ei}	δ_{ei-1}	δ_i	v_i	v_{ci}	μ
Unités N° de Passe	mm	mm	mm	%	%	$\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$	$\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$	$\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$	m/s	m/s	
1	4,00	3,23	0,77	19,2	19,2	43,4	0,6	3,0	9,8	9,6	0,05
2	3,23	2,82	0,41	12,8	29,5	49,4	3,0	3,4	9,7	9,5	0,05
3	2,82	2,5	0,32	11,3	37,5	53,4	3,4	3,8	10,2	10,0	0,05

Suite.

ordre	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Désignation	P_{mi}	P_{ci}	P_{li}	T_{i-1}	T_i	n_{fi}	n_i	N_i	N_m	M_r	M_m
Unités N° de Passe	$\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$	mm	T.f	T.f	T.f		tr/mm	KW	KW	T.m	T.m
N° 1	42,6	11,0	800	3,0	12,0	105	366	3881	3293	10,3	8,77
N° 2	54,8	11,7	799	12,0	12,0	109	364	3108	3293	8,3	8,89
N° 3	61,0	10,7	813	12,0	12,0	103	392	2925	3099	7,5	7,91

Tableau récapitulatif des paramètres de Calibrage pour l'iteneraire : $(1,6 \times 1250 \div 0,3 \times 1250) \text{ mm}$

Acier 33 avec $(R_e = 18 \text{ daN/mm}^2 \text{ et } R_c = 33 \text{ daN/mm}^2)$

Ordre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Désignation	h_{i-1}	h_i	Δh_i	E_i	E_{i2}	G_{ei}	G_{ei-1}	σ_i	v_i	V_{ei}	μ
Unités Passes N°	mm	mm	mm	%	%	$\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$	$\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$	$\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$	m/s	m/s	0,04
N° 1	1,6	0,98	0,62	38,6	38,6	54	1,2	9,8	6,0	5,7	0,05
N° 2	0,98	0,73	0,26	26,0	54,6	61,1	7,6	10,2	6,6	6,3	0,05
N° 3	0,73	0,58	0,15	20,0	63,7	64,8	8,1	10,2	9,1	8,7	0,05
N° 4	0,58	0,43	0,15	26,5	73,3	68,5	7,4	10,1	9,8	8,4	0,05
N° 5	0,43	0,3	0,13	29,8	81,3	71,4	10,1	5,0	8,4	8,1	0,05

Suite.

Ordre	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Désignation	P_{smi}	l_{di}	P_{ei}	T_{u1}	T_i	v_{di}	v_i	N_i	N_m	M_r	M_m
Unités Passes N°	$\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$	mm	T_f	T_f	T_f		t_r/mm	KW	KW	T.m	T.m
N° 1	55,5	14,0	968	2,4	12,0	1,15	217	2456	2028	11,0	9,15
N° 2	77,5	10,3	996	9,3	9,3	1,17	241	1990	2038	8,1	8,26
N° 3	89,6	8,8	985	7,4	7,4	1,21	333	1965	2038	5,8	5,98
N° 4	87,9	8,9	979	5,4	5,4	1,15	321	1957	2038	5,3	6,19
N° 5	92,2	8,6	989	5,4	1,9	1,15	311	1677	2038	5,3	6,40

IV.1. ELABORATION CONSTRUCTIVE DE LA CAGE DE TRAVAIL DU LAMINOIR REVERSIBLE TYPE "1700"

- Description constructive de la cage :

Les organes principaux de la cage de travail sont :

- a) Un bâti
- b) Cylindres de travail
- c) Cylindres d'appui
- d) Boîtiers des paliers des cylindres de travail et d'appui .
- e) Mécanisme de serrage
- f) Mécanisme de rechargement ou de remplacement des cylindres .

a) Bâti : Il est destiné, à recevoir les efforts de laminage et à supporter tous les mécanismes de la cage de travail.

Il est constitué de deux portions de type fermé, de deux entablements, de barres rigides, assemblés par des goujons.

Matériau du bâti : Acier C.T.A 16351 (0,35% de C et moulé).

La section du bâti s'estime à 6000 cm^3 , avec un poids de 120 tonnes-forces .

b) Cylindres de travail :

Les cylindres de travail sont les éléments essentiels desquels dépend la qualité de la surface de la bande laminée .

matériau : Acier forgé de Nuance 9.X.2 (nuance soviétique ; 2% de Cr).

Diamètre du cylindre de travail :

$$D_t = \frac{0,28 E}{\mu (K - \sigma_{moy})} h_{min}$$

$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ dan/cm}^2$ module d'élasticité

$\mu = 0,05$ coefficient de frottement de contact pour le laminage à froid.

$K = 1,15 \sigma_e$ avec $\sigma_e = 3000 \text{ dan/cm}^2$; limite de déformation élastique

$\sigma_{moy} = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}$; avec σ_0 : Contrainte de traction en amont $[\sigma_0] = [\text{dan/cm}^2]$.

σ_1 : Contrainte de contre-traction en aval $[\sigma_1] = [\text{dan/cm}^2]$.

h_{min} : épaisseur minimale de la bande laminée prise de l'iteneraire

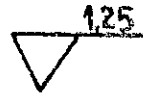
$$(1,6 \times 1250 \div 0,3 \times 1250) \text{ mm} \quad [h_{min}] = [\text{mm}].$$

$$D_t = \frac{0,28 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{0,05 (1,15 \cdot 3000 - 1000)} \cdot 0,3 \Rightarrow D_t = 540 \text{ mm}.$$

Longueur pratique du cylindre de travail

$$L_t = (2,5 \div 4) D_t \quad \text{pour notre cas on a pris } L_t = 1700 \text{ mm}$$

Rugosité de la surface des cylindres de travail:



Dureté des cylindres de travail en [chores]: $70 \div 100$ unités.

Dureté des tourillons, en [chores]: $30 \div 55$ unités.

c) Cylindres d'appui :

On utilise un matériau avec une nuance identique à celle

des cylindres de travail. Il s'agit donc d'un acier forgé de nuance 9x2 (2% de Cr)

Le diamètre du cylindre est déterminé à partir de la condition de flexion minimale.

d'où l'on a $D_{ap} \approx (2,5 \div 3,5) D_t \Rightarrow$ on a pris un. $D_{ap} = 1400 \text{ mm}$.

La dureté doit être inférieure à celle des cylindres de travail de $20 \div 30$ unités [chores]

Le voilage ou le faux rond des surfaces des cylindres d'appui par rapport aux surfaces des tourillons ne doit pas dépasser $0,03 \text{ mm}$.

d) Boîtiers ou supports des cylindres de travail et d'appui.

Les paliers des cylindres de travail et d'appui sont montés dans les boîtiers d'acier 40x. Les boîtiers inférieurs des cylindres de travail sont munis de galets pour permettre le rem-
-placement des cylindres usés.

matériau des boîtiers: Acier moulé, des alésages sont prévus dans ces boîtiers dans lesquels sont montés les paliers des cylindres.

Les boîtiers sont logés dans les lumières du bâti se trouvant sur les faces latérales. Pour supprimer le déplacement axial des boîtiers et des cylindres, on utilise des fixateurs hydrauliques. Ces derniers sont montés sur les montants du bâti.

Des verins hydrauliques destinés à assurer le contre-flambage des cylindres de travail sont montés dans les boîtiers des cylindres d'appui.

e) Mécanisme de () serrage:

Il assure l'écartement déterminé entre les cylindres de travail, d'aide du déplacement du cylindre de travail supérieur

Le mécanisme est composé de: - 2 visse de pressions (munies de filets à dent de scie). Ces visse sont fabriquées en acier de nuance soviétique 34XH1M

La tête de la visse est munie de cannelures en développante.

{ X: Cr
H: nickel
M: molybdène

- 2 réducteurs à visse sans fin.

- 2 réducteurs cinématiques synchronisés

L'écrou de la visse est en bronze de nuance soviétique A) (MLy 10.3.1.5

Il est emboîté dans un cylindre en acier 50.

Les réducteurs cinématiques sont montés sur le couvercle du réducteur principal.

Leurs arbres menants sont liés rigidement avec les têtes cannelées des visse de pressions.

Le travail commun ou séparé des deux visse est assuré par un système électrique.

IV.2. Particularités Constructives de la cage de travail :

L'étude constructive qu'on a élaboré sur la cage de travail de notre laminoir réversible diffère des constructions actuelles par les particularités suivantes :

- 1) Mécanisme de remplacement des cylindres :

On utilise le plus souvent ces mécanismes dans les laminoirs continus et à dresser. Notre étude nous a permis d'adapter ces mécanismes à notre laminoir réversible, on exige actuellement la bonne qualité de la bande laminée et celle-ci dépend de la tension p attribuée à la bande. Dans les laminoirs réversibles dépourvus de ce mécanisme on rencontre les inconvénients suivants :

- a) - Après réaffûtage, le réglage des cylindres d'appuis inférieurs en hauteur est nécessaire, dans ce type de laminoir ce dernier est obtenu à l'aide de cales de réglage ce qui entraîne une perte de temps pour chercher les cales.
- b) - Impossibilité d'obtenir un réglage précis (dépend de l'épaisseur des cales)

L'utilisation du mécanisme de remplacement des cylindres permet de supprimer les inconvénients cités ci-dessus, de plus on peut réaliser le remplacement des cylindres à l'aide de ce mécanisme. Auparavant ce remplacement se faisait manuellement.

- 2) La construction des vérins hydrauliques assurant le contre-flambage des cylindres de travail.

Sa particularité est l'utilisation des vérins hydrauliques à double action. Dans les constructions actuelles on utilise les vérins hydrauliques à simple action dont lequel le retour à la position initiale se fait par un ressort.

Inconvénient principal de cette construction :

Pendant le remplacement des cylindres de travail, les pistons des vérins sortent de leurs logements ce qui entraîne une perte importante d'huile hydraulique.

Conclusion :

Les modifications qu'on a fait sur ce laminaire réversible nous permettent pas mal d'avantage et en particulier le gain du temps de travail.

V. CALCUL DU BÂTI DE LA CAGE DE TRAVAIL A LA RESISTANCE

Le calcul se fait à partir de la pression du métal exercée sur les cylindres de travail et d'appui nommée : effort de laminage $P_L = 2000.000 \text{ dan}$.

On considère que la différence entre l'effort de traction en amont et en aval est négligeable (supérieur à $10t_f$) par comparaison à l'effort de laminage vertical.

Sachant que le bâti est constitué de deux traverses, on conclue que chaque traverse du bâti subit un effort dont l'intensité est $P_L/2 = 1000.000 \text{ dan}$

Afin de simplifier les calculs, le bâti peut être représenté en vue de cadre à caisson rigide, solidaire de deux montants et de deux traverses.

Pour procéder aux calculs du cadre élastique et symétrique, il faut trouver les positions des lignes neutres et les valeurs des moments d'inertie et des moments résistants des sections du bâti.

1) Section A.A de la traverse supérieure :

$$F_1 [\text{cm}^2] = b_1 \cdot h_1 \Rightarrow F_1 = 177 \cdot 150 \Rightarrow F_1 = 26550 \text{ cm}^2$$

$$F_2 [\text{cm}^2] = b_2 \cdot h_2 \Rightarrow F_2 = 90 \cdot 81,7 \Rightarrow F_2 = 7353 \text{ cm}^2$$

$$F_3 [\text{cm}^2] = b_3 \cdot h_3 \Rightarrow F_3 = 58 \cdot 62,3 \Rightarrow F_3 = 3613,4 \text{ cm}^2$$

$$F_4 [\text{cm}^2] = b_4 \cdot h_4 \Rightarrow F_4 = 110 \cdot 6 \Rightarrow F_4 = 660 \text{ cm}^2$$

Calcul de l'aire pleine (on soustrait les aires évidées) :

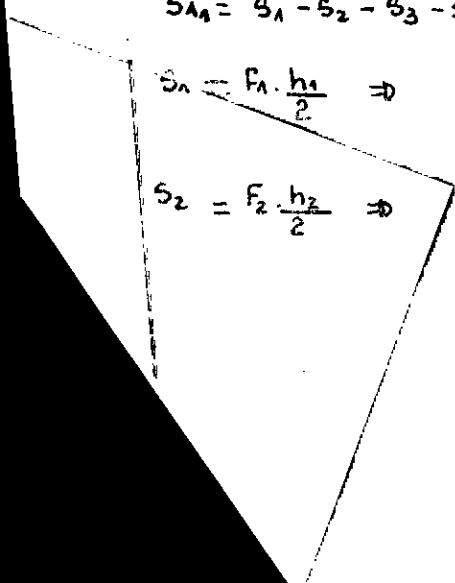
$$2) \quad F_A = F_1 - F_2 - F_3 - F_4 \Rightarrow F_A = 26550 - 7353 - 3613,4 - 660 \Rightarrow F_A = 14923,6 \text{ cm}^2$$

3) Calcul du moment statique par rapport à l'axe x-x de l'aire pleine :

$$S_{A_1} = S_1 - S_2 - S_3 - S_4$$

$$S_1 = F_1 \cdot \frac{h_1}{2} \Rightarrow S_1 = 26550 \cdot \frac{150}{2} \Rightarrow S_1 = 1991250 \text{ cm}^3$$

$$S_2 = F_2 \cdot \frac{h_2}{2} \Rightarrow S_2 = 7353 \cdot \frac{81,7}{2} \Rightarrow S_2 = 300370 \text{ cm}^3$$



$$S_3 = F_3 \cdot \left[h_2 + \frac{h_3}{2} \right] \Rightarrow S_3 = 3613,4 \cdot \left[81,7 + \frac{62,3}{2} \right] \Rightarrow S_3 = 407772,2 \text{ cm}^2$$

$$S_4 = F_4 \cdot \left[h_2 + h_3 + \frac{h_4}{2} \right] \Rightarrow S_4 = 660 \cdot \left[81,7 + 62,3 + \frac{6}{2} \right] \Rightarrow S_4 = 97020 \text{ cm}^2$$

Calcul de S_A :

$$S_A = 199120 - 300370 - 407772,2 - 97020 \Rightarrow S_A = 1186087,8 \text{ cm}^2$$

4) Calcul de l'ordonnée du centre gravité de la section A.A d'aire F_A :

$$y_c = \frac{S_A}{F_A} \Rightarrow y_c = \frac{1186087,8}{14928,6} \Rightarrow y_c = 79,48 \text{ cm}$$

5) Moment d'inertie de la section A.A par rapport à l'axe central x_1, x_1 .

$$I_A = I_1 - I_2 - I_3 - I_4$$

$$I_1 = \frac{F_1 \cdot h_1^3}{12} + F_1 \left(y_c - \frac{h_1}{2} \right)^2 \Rightarrow I_1 = \left[\frac{26550 \cdot 150^3}{12} + 26550 \left(79,48 - \frac{150}{2} \right)^2 \right] \Rightarrow I_1 = 50314119,12 \text{ cm}^4$$

$$I_2 = \frac{F_2 \cdot h_2^3}{12} + F_2 \left(y_c - \frac{h_2}{2} \right)^2 \Rightarrow I_2 = \left[\frac{7353 \cdot 81,7^3}{12} + 7353 \left(79,48 - \frac{81,7}{2} \right)^2 \right] \Rightarrow I_2 = 15062750,9 \text{ cm}^4$$

$$I_3 = \frac{F_3 \cdot h_3^3}{12} + F_3 \left[h_2 + \frac{h_3}{2} - y_c \right]^2 \Rightarrow I_3 = \left[\frac{3613,4 \cdot 62,3^3}{12} + 3613,4 \left(81,7 + \frac{62,3}{2} - 79,48 \right)^2 \right] \Rightarrow I_3 = 5192447,61 \text{ cm}^4$$

$$I_4 = \frac{F_4 \cdot h_4^3}{12} + F_4 \left[h_2 + h_3 + \frac{h_4}{2} - y_c \right]^2 \Rightarrow I_4 = \left[\frac{660 \cdot 6^3}{12} + 660 \left(81,7 + 62,3 + \frac{6}{2} - 79,48 \right)^2 \right] \Rightarrow I_4 = 3010887,26 \text{ cm}^4$$

$$\text{donc } I_A = 50314119,12 - 15062750,9 - 5192447,61 - 3010887,26 \Rightarrow I_A = 27048033,35 \text{ cm}^4$$

6) Calcul du moment résistant dans la section A.A.

$$W_A = \frac{I_A}{y_c} \Rightarrow W_A = \frac{27048033,35}{79,48} \Rightarrow W_A = 340312,45 \text{ cm}^3$$

7) Calcul de la section B.B de la traverse supérieure

$$F_1 = b_1 \cdot h_1 \Rightarrow F_1 = 177 \cdot 145 \Rightarrow F_1 = 25665 \text{ cm}^2$$

$$F_2 = b_2 \cdot h_2 \Rightarrow F_2 = 90 \cdot 81,7 \Rightarrow F_2 = 7353 \text{ cm}^2$$

$$F_3 = b_3 \cdot h_3 \Rightarrow F_3 = 58 \cdot 25 \Rightarrow F_3 = 1450 \text{ cm}^2$$

$$F_4 = b_4 \cdot h_4 \Rightarrow F_4 = 40 \cdot 35,8 \Rightarrow F_4 = 1432 \text{ cm}^2$$

$$F_5 = b_5 \cdot h_5 \Rightarrow F_5 = 60 \times 25 \Rightarrow F_5 = 150 \text{ cm}^2$$

8) Calcul de l'aire pleine (on soustrait les aires évidées)

$$F_B = F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 \Rightarrow F_B = 25665 - 7353 - 1450 - 1432 - 150 \Rightarrow F_B = 15280 \text{ cm}^2$$

9) Calcul du moment statique par rapport à l'axe x-x

$$S_B = S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5 \Rightarrow$$

$$S_1 = \frac{F_1 \cdot h_1}{2} \Rightarrow S_1 = \frac{25665 \cdot 145}{2} \Rightarrow S_1 = 1860712,5 \text{ cm}^3$$

$$S_2 = \frac{F_2 \cdot h_2}{2} \Rightarrow S_2 = \frac{7353 \cdot 81,7}{2} \Rightarrow S_2 = 300370,05 \text{ cm}^3$$

$$S_3 = F_3 \cdot \left(h_2 + \frac{h_3}{2} \right) \Rightarrow S_3 = 1450 \left(81,7 + \frac{25}{2} \right) \Rightarrow S_3 = 136590 \text{ cm}^3$$

$$S_4 = F_4 \left(h_2 + h_3 + \frac{h_4}{2} \right) \Rightarrow S_4 = 1432 \left(81,7 + 25 + \frac{35,8}{2} \right) \Rightarrow S_4 = 178427,2 \text{ cm}^3$$

$$S_5 = F_5 \left(h_2 + h_3 + h_4 + \frac{h_5}{2} \right) \Rightarrow S_5 = 150 \left(81,7 + 25 + 35,8 + \frac{2,5}{2} \right) \Rightarrow S_5 = 21562,5 \text{ cm}^3$$

$$\text{d'où } S_B = 1860712,5 - 300370 - 136590 - 178427,2 - 21562,5 \Rightarrow S_B = 1223762,8 \text{ cm}^3$$

10) Calcul de l'ordonnée du centre de gravité de la section B.B d'aire F_B :

$$y_c = \frac{S_B}{F_B} \Rightarrow y_c = \frac{1223762,8}{15280} \Rightarrow y_c = 80,09 \text{ cm}$$

11) Calcul du moment d'inertie de la section B.B par rapport à l'axe central x_1-x_1

$$I_B = I_1 - I_2 - I_3 - I_4 - I_5$$

$$I_1 = \frac{F_1 \cdot h_1^3}{12} + F_1 \left[y_c - \frac{h_1}{2} \right]^2 \Rightarrow I_1 = \frac{25665 \cdot 145^3}{12} + 25665 \left[80,09 - \frac{145}{2} \right]^2 \Rightarrow I_1 = 46445730,64 \text{ cm}^4$$

$$I_2 = \frac{F_2 \cdot h_2^3}{12} + F_2 \left[y_c - \frac{h_2}{2} \right]^2 \Rightarrow I_2 = \frac{7353 \cdot 81,7^3}{12} + 7353 \left[80,09 - \frac{81,7}{2} \right]^2 \Rightarrow I_2 = 15412023,54 \text{ cm}^4$$

$$I_3 = \frac{F_3 \cdot h_3^3}{12} + F_3 \left[y_c - \left(h_2 + \frac{h_3}{2} \right) \right]^2 \Rightarrow I_3 = \frac{1450 \cdot 25^3}{12} + 1450 \left(80,09 - 81,7 - \frac{25}{2} \right)^2 \Rightarrow I_3 = 364204,38 \text{ cm}^4$$

$$I_4 = \frac{F_4 \cdot h_4^3}{12} + F_4 \left[h_2 + h_3 + \frac{h_4}{2} - y_c \right]^2 \Rightarrow I_4 = \frac{1432 \cdot 35,8^3}{12} + 1432 \left[81,7 + 25 + \frac{35,8}{2} - 80,09 \right]^2 \Rightarrow I_4 =$$

$$I_4 = 2989935 \text{ cm}^4$$

$$I_5 = F_5 \cdot \frac{h_5^2}{12} + F_5 \left[h_2 + h_3 + \frac{h_4}{2} - y_c \right]^2 \Rightarrow I_5 = \frac{150 \cdot 2,5^2}{12} + 150 \left[81,7 + 25 + \frac{35,8}{2} + 2,5 - 80,09 \right]^2$$

$$I_5 = 607967,46 \text{ cm}^4$$

Calcul de I_B : $I_B = I_1 - I_2 - I_3 - I_4 - I_5$

$$I_B = 46445730,64 - 15412023,54 - 364204,38 - 2989935 - 607967,46 \Rightarrow$$

$$I_B = 27071600,26 \text{ cm}^4$$

12) Calcul du moment résistant dans la section B.B.

$$W_B = \frac{I_B}{y_c} \Rightarrow W_B = \frac{27071600,26}{80,09} \Rightarrow W_B = 338044,74 \text{ cm}^3$$

13) Calcul de la section C.C de la traverse supérieure.

$$F_1 = b_1 \cdot h_1 \Rightarrow F_1 = 81 \cdot 71 \Rightarrow F_1 = 5751 \text{ cm}^2$$

14) Calcul du moment statique par rapport à l'axe x.x.

$$S_c = F_c \cdot \frac{h_1}{2} \Rightarrow S_c = 5751 \cdot \frac{71}{2} \Rightarrow S_c = 204160,5 \text{ cm}^3$$

15) Calcul de l'ordonnée du centre de gravité

$$y_c = \frac{h_1}{2} \Rightarrow y_c = \frac{71}{2} \Rightarrow y_c = 35,5 \text{ cm}$$

16) Calcul du moment d'inertie de la section C.C par rapport à l'axe central x_1, x_1 .

$$I_A = \frac{F_1 \cdot h_1^2}{12} \Rightarrow I_A = \frac{5751 \cdot 71^2}{12} \Rightarrow I_A = 2415899,25 \text{ cm}^4$$

17) Calcul du moment résistant dans la section C.C

$$W_c = \frac{I_c}{y_c} \Rightarrow W_c = \frac{2415899,25}{35,5} \Rightarrow W_c = 68053,5 \text{ cm}^3$$

18) Calcul de la section D.D de la traverse supérieure

$$\text{aire } F_1: F_1 = b_1 \cdot h_1 \Rightarrow F_1 = 100 \times 81 \Rightarrow F_1 = 8100 \text{ cm}^2$$

19) Calcul du moment statique par rapport à l'axe xx

$$S_D = F_1 \cdot \frac{h_1}{2} \Rightarrow S_D = 8100 \cdot \frac{100}{2} \Rightarrow S_D = 405000 \text{ cm}^3$$

20) Calcul du centre de gravité

$$y_c = \frac{h_1}{2} \Rightarrow y_c = \frac{100}{2} \quad y_c = 50 \text{ cm.}$$

21) Calcul du moment d'inertie de la section D-D par rapport à l'axe central x_1-x_1 :

$$I_A = \frac{F_1 \cdot h_1^2}{12} \Rightarrow I_A = \frac{8100 \cdot 100^2}{12} \Rightarrow I_A = 6750000 \text{ cm}^4$$

22) Calcul du moment résistant dans la section D-D:

$$W_D = \frac{I_D}{y_c} \Rightarrow W_D = \frac{6750000}{50} \Rightarrow W_D = 135000 \text{ cm}^3$$

23) Tableau récapitulatif des résultats obtenus dans le calcul des sections:

Section	Aire F_i [cm ²]	moment statique S [cm ³]	Ordonnée du centre de gravité y_c [cm]	moment d'inertie I [cm ⁴]	moment résistant W [cm ³]
A-A	14923,6	1186087,8	79,48	27048033,35	340312,45
B-B	15280	1223762,8	80,08	27071600,26	338014,74
C-C	5751	204160,5	35,5	2415899,25	68053,5
D-D	8100	405000	50	6750000	135000

24) Calcul des moments dans les coins rigides du bâti par la relation suivante:

$$M_0 = \frac{PR \left(\frac{l_1^2}{8I_1} + \frac{R^2}{I_3} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) + \frac{l_1 R}{2I_1} \right)}{\left(\frac{l_1}{I_1} + \frac{l_2}{I_2} + \frac{\pi R}{I_3} \right)} \quad \left(\text{TZELIKOV.A. EQUIPEMENT DE LAMINAGE} \right)$$

MOSCOU 1966

l_1 = longueur de la traverse supérieure et inférieure (voir schéma)

$$l_1 = l_i - 2R \Rightarrow l_1 = 229 - 2 \times 70 \quad l_1 = 89 \text{ cm.}$$

R = rayon de courbure du bâti $R = 70 \text{ cm}$

l_2 : longueur du montant du bâti

$$l_2 = l'_2 - 2R \quad \Rightarrow \quad l_2 = 7405 - 140$$

$$l_2 = 6005 \text{ cm}$$

I_A : moment d'inertie de la section B.B.

I_2 : moment d'inertie de la section C.C.

I_3 : moment d'inertie de la section D.D.

$$M_0 = \frac{2000000}{2} \cdot \frac{80^2}{27071600,26} + \frac{70^2}{67510^4} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) + \frac{89 \cdot 70}{2 \cdot 27071600,26} \Rightarrow M_0 = 2375674,07 \text{ dan.cm}$$

$$\frac{80}{27071600,26} + \frac{600,5}{2415899,25} + \frac{\pi \cdot 70}{67510^4}$$

25) Calcul du moment maximal dû à l'effort de laminage

$$M_{\max} = \frac{P_0}{2} \cdot \frac{l_1}{4} \Rightarrow M_{\max} = \frac{2000000}{2} \cdot \frac{229}{4} \Rightarrow M_{\max} = 572500 \text{ dan.cm}$$

26) Calcul du moment résultant agissant sur la traverse

$$M_c = M_{\max} - M_0 \Rightarrow M_c = 57240000 - 2375674,07 \Rightarrow M_c = 54874325,94 \text{ dan.cm}$$

27) Calcul des contraintes dans les sections:

a) section A.A (traverse supérieure)

$$\sigma_A = \frac{M_c}{W_A} \Rightarrow \sigma_A = \frac{54874325,94}{340342,25} \Rightarrow \sigma_A = 161,23 \text{ dan/cm}^2$$

b) section B.B (traverse inférieure)

$$\sigma_B = \frac{M_c}{W_B} \Rightarrow \sigma_B = \frac{54874325,94}{338014,75} \Rightarrow \sigma_B = 162,35 \text{ dan/cm}^2$$

c) section C.C

28) Contrainte maximale dans le montant du bâti sur la face intérieure

$$\sigma_m = \frac{M_0}{W_e} + \frac{P_0/2}{2F_e} \Rightarrow \sigma_m = \frac{2375674,07}{68053,5} + \frac{1000000}{2 \cdot 5751} \Rightarrow \sigma_m = 121,85 \text{ dan/cm}^2$$

Matériau du bâti: Acier moulé ayant une limite d'élasticité. $R_e = 2500 \text{ dan/cm}^2$

et une limite à la rupture. $R_r = 4700 \text{ dan/cm}^2$

Remarque: le bâti doit avoir une très grande rigidité pour pouvoir vaincre toute résistance qu'il lui sera imposée lors du travail pour cela on recommande la contrainte admissible $R \approx 350 \div 450 \text{ daN/cm}^2$

d'après (THIMITCH. Equipement des ateliers de laminage à froid)

MOSCOU 1963

20) Calcul des coefficients de sécurité:

$$\eta_1 = \frac{R_{ad}}{\sigma_{max}} \Rightarrow \eta_1 = \frac{450}{161,23} \Rightarrow \eta_1 = 2,79$$

$$\eta_2 = \frac{R_{ad}}{\sigma_{max}} \Rightarrow \eta_2 = \frac{450}{162,35} \Rightarrow \eta_2 = 2,77$$

$$\eta_3 = \frac{R_{ad}}{\sigma_{max}} \Rightarrow \eta_3 = \frac{450}{121,85} \Rightarrow \eta_3 =$$

On remarque que tous les coefficients de sécurité que nous venons de calculer sont nettement supérieurs à 1, on conclue que le bâti est bien vérifié à la résistance

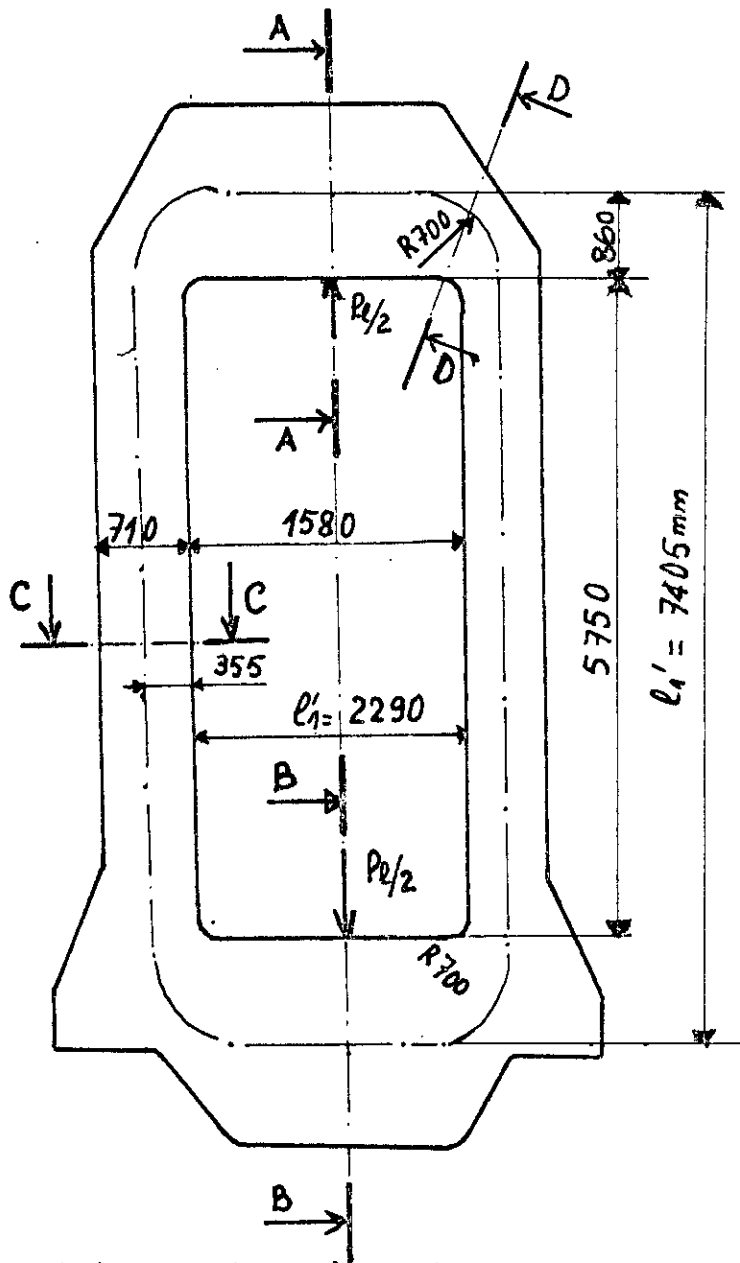
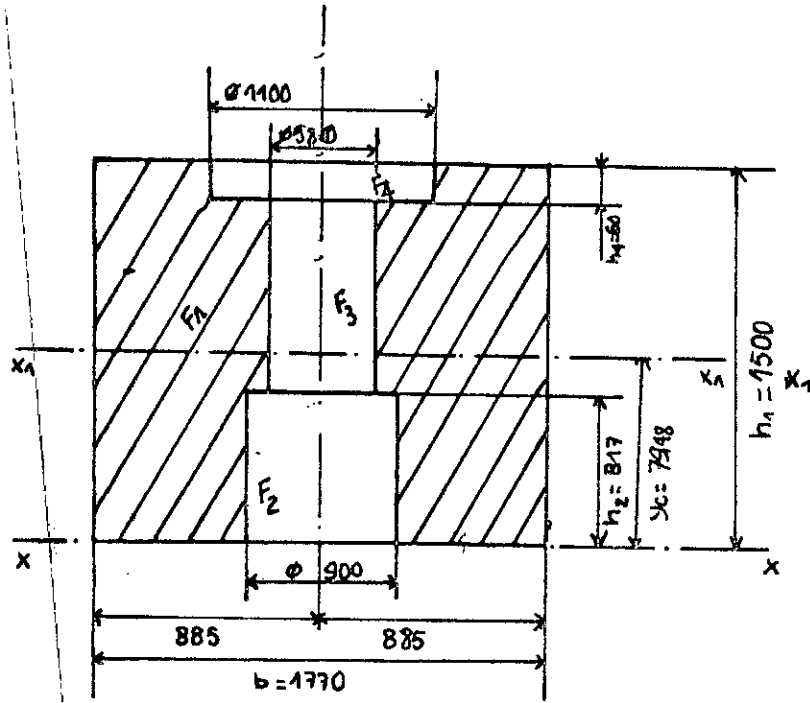
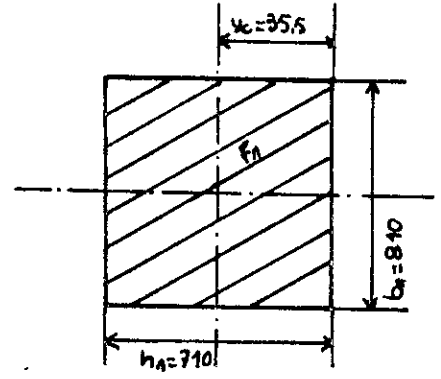


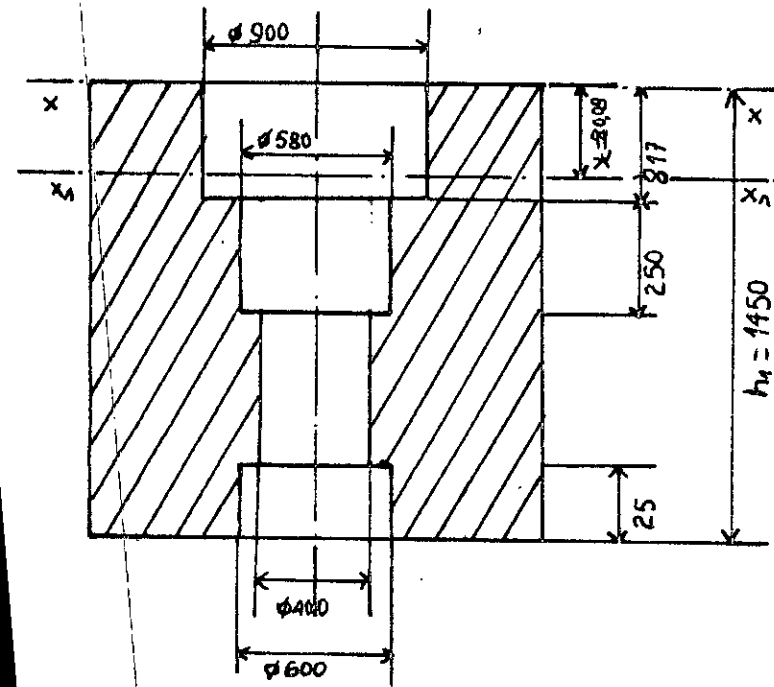
Schéma de chargement du bâti de la cage.



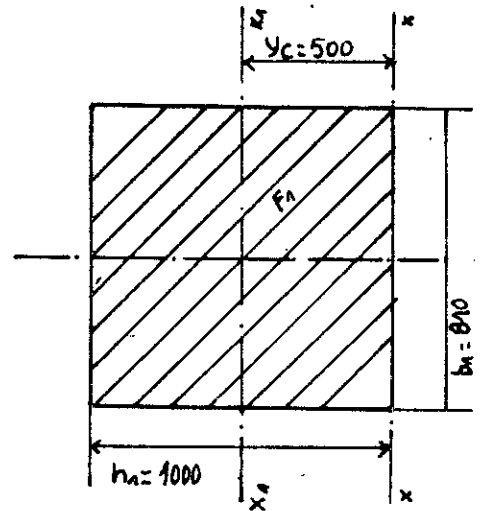
Section A-A



Section CC



Section B-B



Section D.D

VI/ CALCUL DES COMMANDES DES MECANISMES DE LA CAGE DE TRAVAIL

1) Calcul de la commande principale du laminoir.

a) Choix des moteurs de la commande principale

On choisit le moteur de la commande principale d'après la puissance maximale de laminage pris à partir de l'itéraireire le plus défavorable ($4 \times 1250 \div 2.5 \times 1250$) mm

à savoir $N_{max} = 3293 \text{ kW}$

Calcul du moment maximal de laminage

$$M_{max} = M_r \times i$$

i : rapport de transmission du moteur aux cylindres $i = 1,837$

M_r : moment de frottement de roulement entre les cylindres de travail et d'appui

$$M_{max} = 8,3 \times 1,837 \Rightarrow M_{max} = 15,24 \text{ T.m}$$

Calcul de la vitesse maximale de rotation des cylindres en [tr/min]

$$n_{max} = \frac{60 \cdot v_e}{\pi D}$$

$v_e = 10,0 \text{ m/s}$ vitesse de laminage (pris tous du même itéraireire)

$D = 470 \text{ mm}$ diamètre des cylindres de travail (rectifiés)

$$n_{max} = \frac{60 \times 10,0}{\pi \cdot 470 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow n_{max} = 407 \text{ tr/min.}$$

Calcul de la fréquence principale

$$n_{pr} = \frac{60 \cdot N_{max}}{2\pi M_{max}} \Rightarrow n_{pr} = \frac{60 \times 3293 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 15,24 \cdot 10^4}$$

$$n_{pr} = 206 \text{ /s}$$

Calcul de l'intervalle de régulation dû à l'excitation.

$$k_r = \frac{n_{max}}{n_{pr}} \Rightarrow k_r = \frac{407}{206} \Rightarrow k_r = 1,975$$

Pour le fonctionnement de chaque cylindre de travail, il nous faut un moteur dont la puissance est de $N = 2000 \text{ kW}$

On choisit le schéma à double-moteurs pour la commande des cylindres de travail

type de moteur MN 2. 630. 154. BT3 (norme soviétique)

$$N_m = 1000 / 800 \text{ kW} \quad \text{avec } n = 315 / 650 / 750 [\text{tr/min}]$$

b) Rapport de transmission du réducteur

$$i = \frac{n_{m \max}}{n_{\max}} \Rightarrow i = \frac{750}{407} \Rightarrow i = 1,837.$$

Vérification du moteur à l'échauffement par la méthode du courant équivalent.

Du fait que le laminage de la bande dans le laminoir réversible se fait en plusieurs passes avec des charges, des accélérations et des décélérations qui diffèrent à chaque passe.

Pour cela il faut corriger le calcul du chargement du moteur d'après la méthode du courant équivalent, tout en respectant les normes actuelles des chargements des moteurs des cylindres de travail sachant que le courant équivalent ne doit pas dépasser 85 %

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m I_{kst}^2 \cdot t_{kmach} + \sum_{k=1}^m I_{kd}^2 \cdot t_{ked}}{t_c}}$$

I_{eq} : courant équivalent en portion de courant nominal $I_{eq} = \frac{I_e}{I}$

I_{kst} : chargement du moteur par le courant statique dans la passe considérée.

I_{kd} : chargement du moteur par le courant dynamique dans la passe considérée.

t_{kmach} : temps machine du laminage dans la passe considérée en [s].

t_{ked} : temps total de fonctionnement du moteur dans le régime dynamique dans la passe considérée.

t_c : durée du cycle de laminage en [s].

Calcul de $J_{kst} = \frac{M_k \cdot K}{M_n}$

M_k : Couple moteur dans la passe considérée en [dan.m]

$M_n = 12380$ dan.m Couple nominal des deux moteurs.

K_i : degré ou taux d'affaiblissement des moteurs dans la passe considérée

$$K_i = \frac{n_i}{n_n} \quad \begin{array}{l} \text{vitesse du moteur à la } i\text{ème} \\ \text{passe pris de l'itéraire (4x1250.)} \\ \text{vitesse nominale du moteur} \end{array}$$

$$K_1 = \frac{366}{315} \Rightarrow K_1 = 1,16 \quad ; \quad K_2 = \frac{364}{315} \Rightarrow K_2 = 1,15$$

$$K_3 = \frac{392}{315} \Rightarrow K_3 = 1,24$$

d'où $J_{kst_1} = \frac{8770 \cdot 1,16}{12380} \Rightarrow J_{kst_1} = 0,820$

$$J_{kst_2} = \frac{8890 \cdot 1,15}{12380} \Rightarrow J_{kst_2} = 0,825$$

$$J_{kst_3} = \frac{7910 \cdot 1,24}{12380} \Rightarrow J_{kst_3} = 0,790$$

temps machine à la passe considérée $t_{i\text{mach}}$:

$$t_{1\text{mach}} = 93,9\text{s} \quad ; \quad t_{2\text{mach}} = 90,2\text{s} \quad ; \quad t_{3\text{mach}} = 99,4\text{s}$$

Calcul de $J_{kd} = \frac{I_{\Sigma} \cdot a \cdot K_i \cdot C}{0,5d \cdot M_n}$

I_{Σ} : moment d'inertie total des moteurs et des éléments de la commande en [dan.m²]

avec $I_{\Sigma} = 888,7$ dan.m²

$a = 2\text{m/s}^2$ accélération ; $d = 0,5\text{m}$ diamètre des cylindres de travail.

$C = 0,85$ Coefficient tenant compte du changement de courant dynamique pendant l'accélération et de la décélération.

K_i : taux d'affaiblissement des moteurs à la i ème passe.

$$\text{A.N: } I_{1d} = \frac{883,7 \cdot 1,16 \cdot 0,85 \cdot 2}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 12380} \Rightarrow I_{1d} = 0,56$$

$$I_{2d} = \frac{883,7 \cdot 1,15 \cdot 0,85 \cdot 2}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 12380} \Rightarrow I_{2d} = 0,55$$

$$I_{3d} = \frac{883,7 \cdot 1,24 \cdot 0,85 \cdot 2}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 12380} \Rightarrow I_{3d} = 0,60$$

temps total de fonctionnement du moteur dans le régime dynamique à la passe considérée en [s]. $t_{1\epsilon d} = 9s$

$$t_{2\epsilon d} = 6,2s$$

$$t_{3\epsilon d} = 6,4s$$

durée du cycle de laminage en [s] : $t_c = 315s$.

Calcul de I_{eq} (courant équivalent.)

$$\sum_{k=1}^{m=3} I_{kst}^2 \cdot t_{kmach} = (0,820^2 \cdot 93,9 + 0,825^2 \cdot 90,2 + 0,78^2 \cdot 99,4) \Rightarrow$$

$$\sum_{k=1}^3 I_{kst}^2 \cdot t_{kmach} = 186,57$$

$$\sum_{k=1}^3 I_{k\epsilon d}^2 \cdot t_{k\epsilon d} = (0,56^2 \cdot 9 + 0,55^2 \cdot 6,2 + 0,60^2 \cdot 6,4) \Rightarrow$$

$$\sum_{k=1}^3 I_{k\epsilon d}^2 \cdot t_{k\epsilon d} = 7,00$$

d'où le courant équivalent
$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^3 I_{kst}^2 \cdot t_{kmach} + \sum_{k=1}^3 I_{k\epsilon d}^2 \cdot t_{k\epsilon d}}{t_c}}$$

$$\Rightarrow I_{eq} = \sqrt{\frac{186,57 + 7,00}{315}} \Rightarrow I_{eq} = 0,784 \cdot I_n$$

On voit que la condition est bien vérifiée $I_{eq} < 0,85 = 85\% \text{ de } I_n$

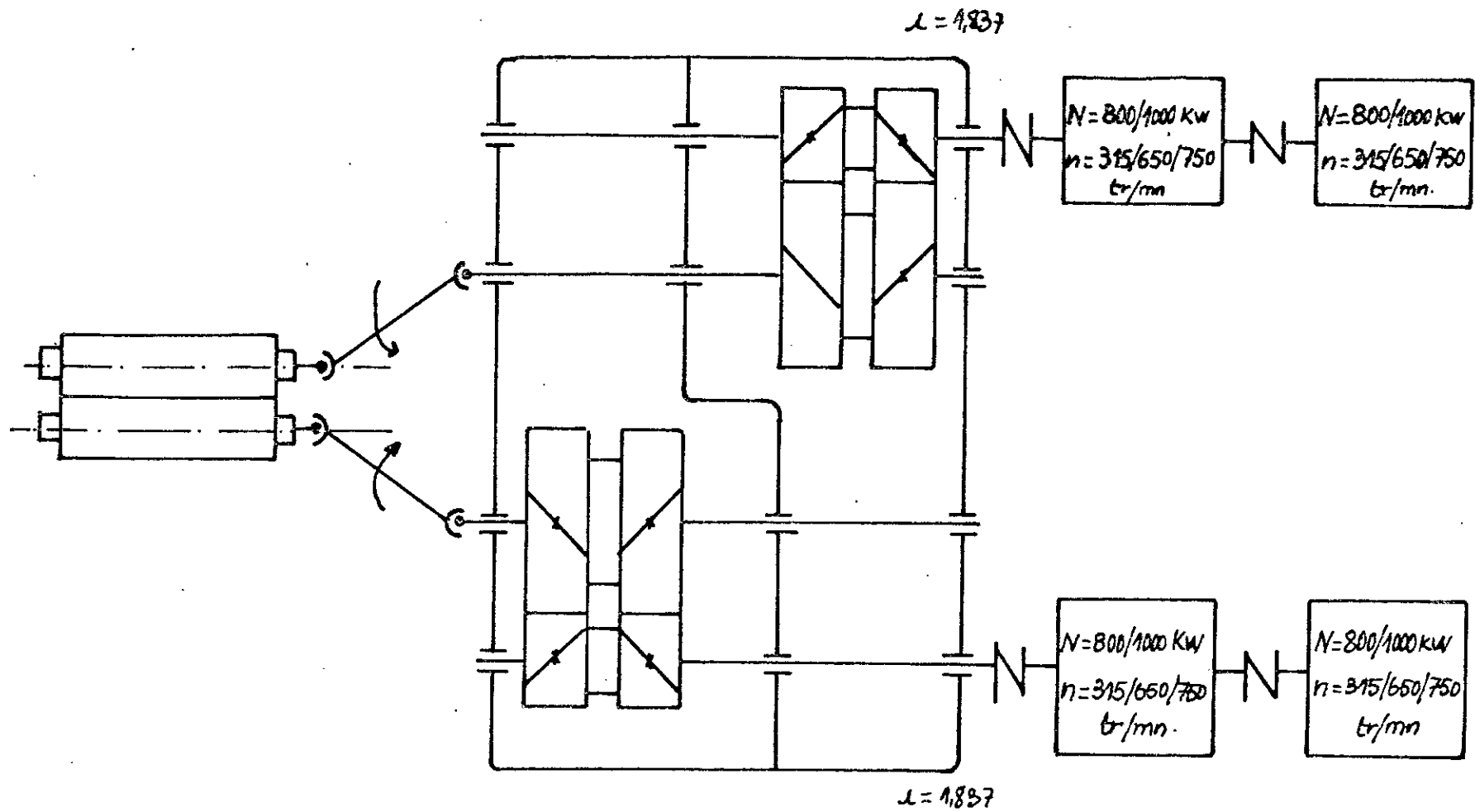


Schéma Cinématique de la commande principale du laminoir

VI.2 Calcul des commandes des organes de serrage des cylindres de travail

2) Calcul d'organes de serrage du cylindre de travail supérieur.

a) Moment de torsion nécessaire pour la rotation de la vis de pression.

$$M = M_t + M_{cv}$$

M_t : couple statique maximale effectué pendant le laminage en [dan.m].

$$M_t = \frac{P_r}{2} \left[\frac{d_b}{3} \mu_b + \frac{d_m}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \right]$$

$P_r/2 = 1000.000$ dan effort agissant sur la vis de pression.

$d_b = 535$ mm diamètre du palier de la butée.

$\mu_b = 0,15$ Coefficient de frottement dans le palier de butée

$d_m = 544$ mm diamètre moyen du filet de la vis de pression.

$\alpha = 0^\circ 48'$ l'angle d'hélice de la vis

$\varphi = 5^\circ 40'$ l'angle de frottement dans la vis, lorsque ($f = 0,1$ bronze sur acier)

$$M_t = 1000.000 \left[\frac{535}{3} \cdot 0,15 + \frac{544}{2} \operatorname{tg}(0^\circ 48' + 5^\circ 40') \right] \quad M_t = 57580,20 \text{ dan.m}$$

M_{cv} : Couple nécessaire à vide pour tourner la vis.

$$M_{cv} = \frac{P_r}{2} \left[\frac{d_b}{3} \mu_b + \frac{d_m}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \right]$$

$P_r/2 = 10200$ dan : l'effort de compensation du cylindre d'appui.

$$d'm \quad M_{cv} = 10200 \left[\frac{535}{3} \cdot 0,15 + \frac{544}{2} \operatorname{tg}(0^\circ 48' + 5^\circ 40') \right] \Rightarrow$$

$$M_{cv} = 587,32 \text{ dan.m}$$

Couple résultant nécessaire pour tourner la vis.

$$M = 57580,20 + 587,32 \quad \Rightarrow \quad M = 58167,52 \text{ dan.m}$$

b) fréquence de la vis de pression en [tr/mn]

$$n_v = \frac{V}{h}$$

avec $v = 26,4 \text{ mm/mn}$: vitesse de déplacement de la vis de pression.

$h = 24 \text{ mm}$: pas du filet de la vis.

$$n_v = \frac{26,4}{24} \Rightarrow n_v = 1,1 \text{ tr/mn.}$$

c) Puissance de la commande des organes de serrage :

$$N = \frac{M \cdot n_v}{975 \eta} \quad [N] = [KW]$$

η : rendement de la commande $\eta = 0,63$

$M = 58167,52 \text{ dan.m}$ Couple nécessaire pour tourner la vis

$$\text{A.N : } N = \frac{58167,52 \cdot 1,1}{975 \cdot 0,63} \Rightarrow N = 105 \text{ KW}$$

d) Choix du moteur :

La commande de mécanisme de serrage subit les impératives suivantes :

- rapidité maximale
- précision d'arrêt
- réglage de vitesse

Pour cela on choisit un moteur alimenté en courant continu :

type : M17.2.430.121.4T4 $N = 160 \text{ KW}$ $n_m = 500/1200 \text{ tr/mn.}$

e) Rapport de la transmission de la commande :

$$i = \frac{n_m}{n_v} \Rightarrow i = \frac{500}{1,1} \Rightarrow i = 455$$

f) Vérification du moteur d'après la méthode du courant effectif.

Condition de sécurité : $I_{eff} > I_n$

$$I_{eff} = \sqrt{\left(I_{st} + \frac{e \cdot T_a + I_a \cdot T_b}{3T_c} \right) \epsilon} \quad [I_{eff}] = [A]$$

I_{st} : Courant statique de la charge en [A].

$e = 0,125 \text{ mm/s}$: vitesse moyenne de déplacement des vis, on choisit pour ce laminoir la valeur indiquée.

T_a : coefficient calculé en $[\text{A.S}^2]$.

T_b : " " " " en $[\text{mm}^{-1}]$

I_a : Intensité du courant lorsque le moteur fonctionne à butée.

$E = 0,8 \text{ s}$ durée de brauchement du moteur

Calcul de I_{st} :

$$I_{st} = \frac{M_r \cdot I_n}{M_n}$$

$$\text{avec } M_r = \frac{M}{\lambda \cdot \eta} \Rightarrow M_r = \frac{5816,52}{455 \cdot 0,65} \Rightarrow M_r = 203 \text{ dan.m}$$

M_r : couple résistant pendant le laminage réduit à l'axe du moteur en $[\text{dan.m}]$.

M : Couple résultant nécessaire pour tourner la vis en $[\text{dan.m}]$.

η : rendement de la commande.

$$M_n = \frac{N_m \cdot 975}{n_m} \Rightarrow M_n = \frac{160 \cdot 975}{500} \Rightarrow M_n = 312 \text{ dan.m}$$

N_m : Puissance du moteur en $[\text{kW}]$ et M_n : moment moteur nominal.

n_m : vitesse du moteur en $[\text{tr/mn}]$.

A.N :

$$I_{st} = \frac{203 \cdot 364}{312} \Rightarrow$$

$$I_{st} = 236,84 \text{ A.}$$

$I_n = 364 \text{ A}$ Intensité du courant nominal du moteur.

Calcul de T_a :

$$T_a = \frac{G \cdot D_r^2 \cdot I_n}{40 M_n}$$

$$\text{avec } G \cdot D_r^2 = 78 \text{ dan.m}^2.$$

$G \cdot D_r^2$: moment

A.N :

$$T_a = \frac{78.364}{40.312}$$

⇒

$$T_a = 2,275 \text{ [As}^{-1}\text{]}$$

Calcul de T_b :

$$T_b = \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{h}$$

$$\Rightarrow T_b = \frac{2 \cdot \pi \cdot 455}{24}$$

$$\Rightarrow T_b = 119,12 \text{ mm}^{-1}$$

h: pas de la vis en [mm]

i: rapport de transmission de la commande.

Calcul de I_a :

$$I_a = \lambda I_n$$

⇒

$$I_a = 25 \cdot 364$$

⇒

$$I_a = 910 \text{ A}$$

 λ : coefficient empiriqueA.N de I_{ef} :

$$I_{ef} = \sqrt{\left(236,84 + \frac{0,125 \cdot 2,275 + 910 \cdot 119,12}{3 \cdot 0,1} \right) 0,8}$$

$$I_{ef} = 538 \text{ A}$$

Condition de sécurité: I_n doit être inférieur à I_{ef}

(voir schéma (a))

3) Calcul de la commande de la mise au point des cylindres.

a)

$$M_v = \frac{P_c}{2} \left[\frac{d_c}{3} \mu + \frac{d_m}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \right] : \text{couple nécessaire pour tourner la vis.}$$

$P_c/2$: 30 000 dan . poids du cylindre d'appui et des coussins

$d_c = 535 \text{ mm}$: diamètre de la crapaudine (palier de butée)

$\mu = 0,15$ coefficient de frottement dans les paliers .

$d_m = 544 \text{ mm}$: diamètre moyen du filet de la vis de pression .

$\alpha = 0^\circ 48'$. l'angle d'hélice du filet .

$\varphi = 5^\circ 40'$. l'angle de frottement dans le filets

A.N :

$$M_v = 30000 \left[\frac{535}{3} \cdot 0,15 + \frac{544}{2} \operatorname{tg}(0^\circ 48' + 5^\circ 40') \right] \Rightarrow M_v = 172740 \text{ dan.cm}$$

$$M_v = 1727,4 \text{ dan.m}$$

b) fréquence de la vis de pression.

$$n = \frac{v}{s} \quad v : \text{vitesse de déplacement de la vis en [mm/mn]}$$

$$s : \text{pas de la vis en [mm]}$$

$$n = \frac{41,4}{24} \Rightarrow n = 1,725 \text{ tr/mn.}$$

c) Calcul de la puissance de la commande du mécanisme de la mise au point des cylindres :

$$N = 2 \frac{M_v \cdot n}{975 \eta} \Rightarrow [N] = [kW]$$

$$2 M_v : \text{couple nécessaire pour tourner 2 vis.} \quad [M_v] = [\text{dan.m}]$$

$\eta = 0,7 \cdot 0,9 \cdot 0,9$ rendement de la commande du mécanisme de la mise en place des cylindres.

n : fréquence de la vis de pression . $[n] = [\text{tr/mn}]$.

A.N:

$$N = \frac{2.1727,4 \cdot 1.725}{975 \cdot 0,567} \Rightarrow N = 10,8 \text{ Kw}$$

Pour le mécanisme de la mise en place des cylindres on choisit le moteur de type : M.T.K.M. 411. 67

Puissance du moteur : $N_m = 22 \text{ Kw}$

nombre de tours/mn : $n = 935 \text{ tr/mn}$

Rapport de transmission : $i = \frac{935}{1,725} \Rightarrow i = 542,5$

(VOIR SCHEMA DE LA COMMANDE)(B)

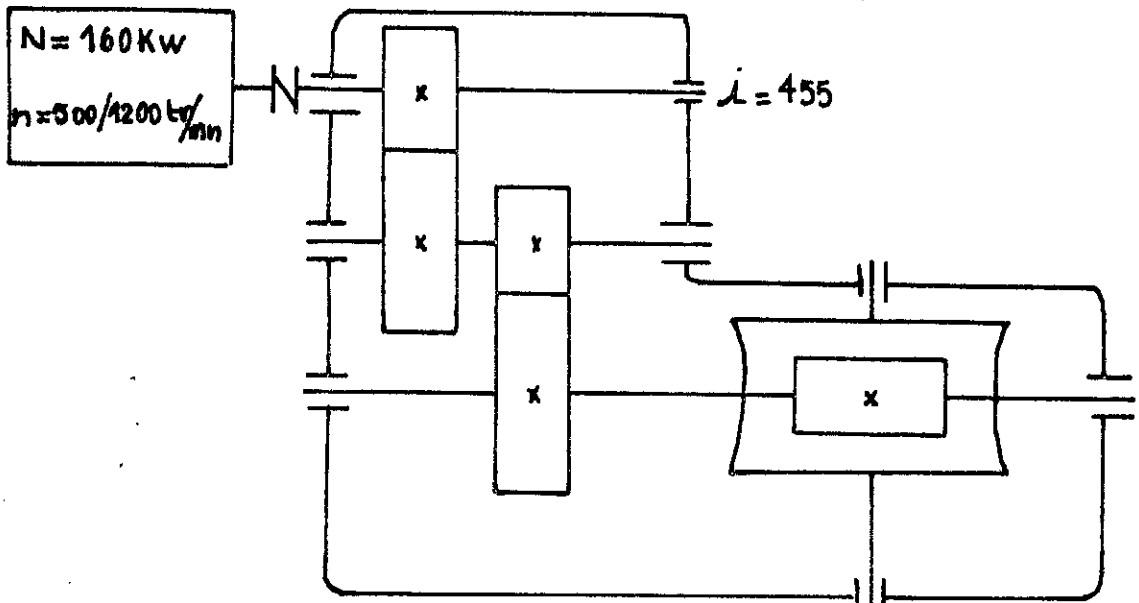


Schéma cinématique de la commande de la vis de pression. (α)

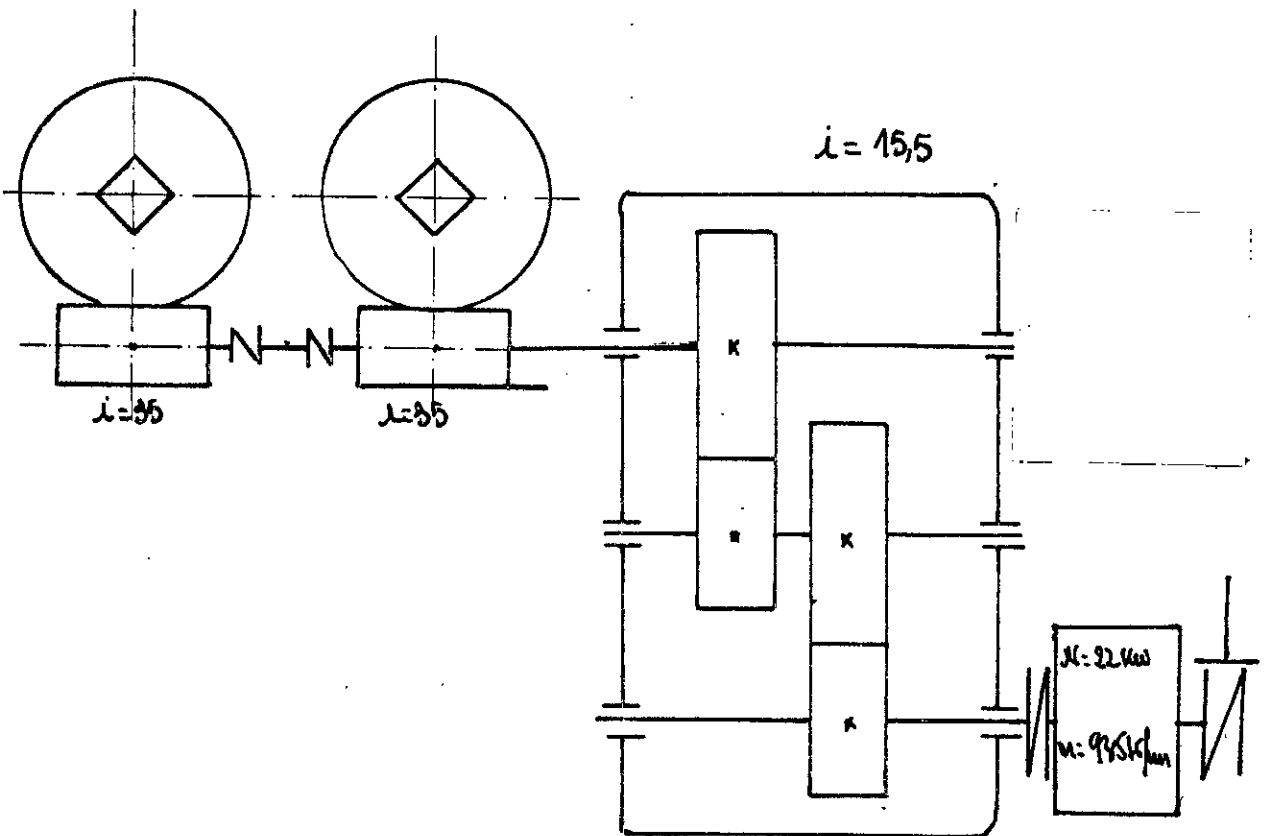


Schéma cinématique de la commande du mécanisme de changement de cylindres. (β)

VII. CALCUL DES ELEMENTS DE LA CAGE A LA RESISTANCE

1). Calcul des cylindres de travail et d'appui.

On considère que l'effort s'exerçant sur le cylindre d'appui est égal à l'effort de laminage P_L , avec $P_L = 2000 T_f$ ou $P_L = 2000000 \text{ dan}$.

d'où $P_{ap} = 2000 T_f$: effort s'exerçant sur le cylindre d'appui.

L'effort s'exerçant sur le cylindre de travail peut s'obtenir par la formule suivante:

$$P_t = \frac{P_{ap}}{\left(\frac{D_{ap}}{D_t}\right)^4 - 1} \left(\begin{array}{l} \text{d'après TRETIAKOV . A} \\ \text{Calcul des cylindres de laminoirs à froid} \\ \text{MOSCOU 1978} \end{array} \right)$$

D_{ap} : diamètre du cylindre d'appui avec $D_{ap} = 1400 \text{ mm}$

D_t : diamètre du cylindre de travail avec $D_t = 500 \text{ mm}$.

En plus de cela le cylindre de travail subit une charge, qui est l'effort de compensation dû aux vérins pour la bonne correction de la planéité. L'effort est indiqué par la

relation suivante : a) $P_p = 4 \frac{\pi d^2}{4} P \cdot \eta_v$ $[P_p] = [\text{dan}]$

P_p : l'effort de compensation dû aux vérins hydrauliques

$d = 60 \text{ mm}$: diamètre du vérin hydraulique

$P = 140 \text{ dan/cm}^2$ pression du liquide dans les vérins.

$\eta_v = 0,85$ rendement du vérin.

b) Dans le plan horizontal le cylindre de travail subit

$$T = P_{ex} + \frac{T_{tr}}{2}$$

P_{ex} : l'effort d'extrusion $[P_{ex}] = [\text{dan}]$

T_{tr} : l'effort de traction $[T_{tr}] = [\text{dan}]$ est déterminé à partir de la

Condition de rupture de la bande ayant une section max $(4 \times 1550) \text{ mm}^2$

L'effort d'extrusion $P_{ex} = \frac{P_e \cdot d^2}{A}$

P_e : 2000000 dan : effort de laminage

$d = 6\text{mm}$: déplacement des axes de cylindres de travail par rapport à l'axe de la cage.

$A = 895\text{mm}$: distance minimale entre les axes des cylindres de travail et d'appui.

A.N:

Effort de compensation :

$$P_r = \frac{4 \cdot \pi \cdot 6^2 \cdot 140 \cdot 0,85}{4} \Rightarrow P_r = 13458,6 \text{ dan.}$$

Effort s'exerçant sur le cylindre de travail.

$$P_t = \frac{2000000}{\left(\frac{1400}{500}\right)^4 - 1} \Rightarrow P_t = 33076,66 \text{ dan.}$$

Effort d'extrusion :

$$P_{ex} = \frac{2000000 \cdot 6}{895} \Rightarrow P_{ex} = 13407,82 \text{ dan.}$$

Effort R : c'est la réaction due aux efforts exercés sur le cylindre.

$$R = \frac{T_{ex}}{4} + \frac{P_{ex}}{2}$$

avec $T_{ex} = R_r \cdot x_s$ et $R_r = 6500 \text{ dan/mm}^2$ limite à la rupture.

$$R = \frac{6500 \times 4 \times 1550}{4} + \frac{13407,82}{2} \Rightarrow R = 107453,91 \text{ dan.}$$

Moment de torsion maximal :

$$M_{max} = 15000 \text{ dan.m.}$$

Calcul des moments fléchissants dans zones dangereuses des cylindres de travail

1) Soit le plan vertical:

$$\text{zone (III, III)} \quad M_f - Pr/2 \cdot x = 0 \Rightarrow M_f = Pr/2 \cdot x \Rightarrow M_f = 1985,14 \text{ dan.m} = 198514 \text{ dan.cm.}$$

$$\text{zone (II, II)} \quad M_f - Pr/2 \cdot x = 0 \Rightarrow M_f = Pr/2 \cdot x \Rightarrow M_f = 2927,25 \text{ dan.m} = 292725 \text{ dan.cm.}$$

$$\text{zone (I; I)} \quad -M_f + (Pr/2 \cdot x) + \frac{P_L(x-0,51)^2}{b \cdot 2} - \frac{P_L + P_L(x-0,435)^2}{L \cdot 2} = 0$$

$$-M_f = 6729,3 \times 1,285 + \frac{33076,66 (1,285 - 0,51)^2}{1,550} - \frac{(13458,6 + 33076,66)(1,285 - 0,435)^2}{1,7 \cdot 2}$$

$$M_f = 516701 \text{ dan.cm}$$

2) Soit le plan horizontal:

$$\text{zone (III, III)} \quad M_f - Rx = 0 \Rightarrow M_f = Rx \Rightarrow M_f = 31698,90 \text{ dan.m} = 3169890 \text{ dan.cm}$$

$$\text{zone (II, II)} \quad M_f - Rx = 0 \Rightarrow M_f = Rx \Rightarrow M_f = 46742,45 \text{ dan.m} = 4674245 \text{ dan.cm.}$$

$$\text{zone (I; I)} \quad M_f - Rx - \frac{P_L(x-0,51)^2}{2b} - \frac{P_L + P_L(x-0,435)^2}{L} = 0$$

$$M_f = 107458,91 \times 1,285 + \frac{33076,66 (1,285 - 0,51)^2}{2 \times 1,55} + \frac{13407,82 (1,285 - 0,435)^2}{1,7}$$

$$M_f = 144131,73 \text{ dan.m} \approx 14413173 \text{ dan.cm.}$$

Calcul des moments fléchissants résultants. $M_{f_{\text{tot}}} = \sqrt{M_{f_H}^2 + M_{f_V}^2}$

$$\text{zone (III, III)} \Rightarrow M_{f_{\text{tot}}} = \sqrt{198514^2 + 3169890^2} \Rightarrow M_{f_{\text{tot}}} = 31,740^5 \text{ dan.cm}$$

$$\text{zone (II, II)} \Rightarrow M_{f_{\text{tot}}} = \sqrt{292725^2 + 4674245^2} \Rightarrow M_{f_{\text{tot}}} = 46,810^5 \text{ dan.cm}$$

$$\text{zone (I, I)} \Rightarrow M_{f_{\text{tot}}} = \sqrt{516701^2 + 14413173^2} \Rightarrow M_{f_{\text{tot}}} = 144,210^5 \text{ dan.cm}$$

soit :

$R_{rc} = 11500 \text{ dan/cm}^2$ - Limite de rupture du cylindre de travail.

$R_e = 8500 \text{ dan/cm}^2$ - Limite d'élasticité du cylindre de travail.

d'où $\sigma_{-1} = 5500 \text{ dan/cm}^2$ limite d'endurance (ou à la fatigue) du cylindre de travail.

Calcul de la contrainte normale à la flexion :

$$\sigma_{fi} = \frac{M_{fi}}{0,1 d_i^3}$$

Calcul du coefficient de sécurité à la flexion :

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{\sigma}}{E_{\sigma}} \sigma_f + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad \left\{ \begin{array}{l} K_{\sigma} = 1,8 \\ E_{\sigma} = 0,5 \end{array} \right. \quad \sigma_m = 0$$

E_{σ} : facteur de l'état de surface.

K_{σ} : Coefficient de concentration des contraintes normales

ψ_{σ} : Coefficient défini par la susceptibilité du matériau à la symétrie du cycle.

σ_f : Contrainte normale à la flexion

σ_m : valeur moyenne de la contrainte.

Tableau de valeurs :

section dangereuse des cylindres de travail	$M_{fi} [\text{dan.cm}]$	$\sigma_{fi} [\text{dan/cm}^2]$	$\sigma_{-1} [\text{dan/cm}^2]$	n_{σ}	$M_f [\text{dan.cm}]$
I. I	$144,2 \cdot 10^5$	1153,6	5500	1,32	15000 00
II. II	$46,8 \cdot 10^5$	631,68	5500	2,42	15000 00
III. III	$31,7 \cdot 10^5$	1064	5500	1,43	15000 00
IV. IV	—	—	5500	—	15000 00
V. V	—	—	5500	—	15000 00

Schéma de chargement des cylindres de travail dans le plan vertical:

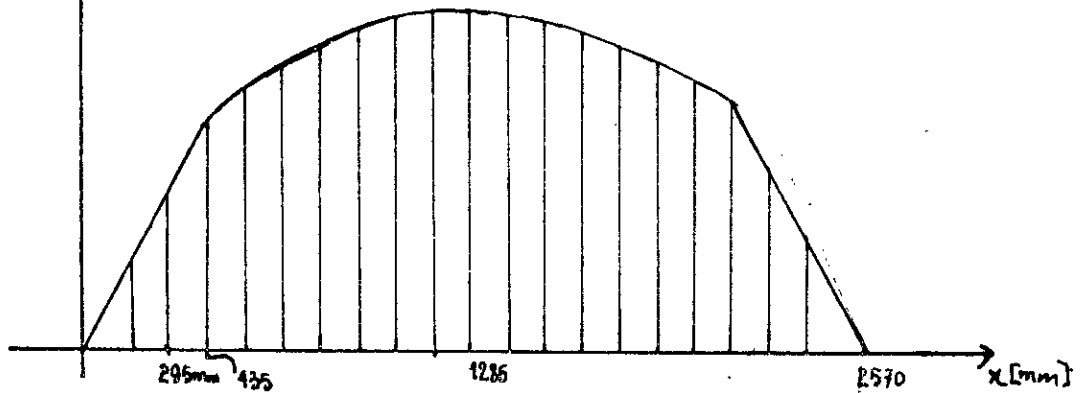
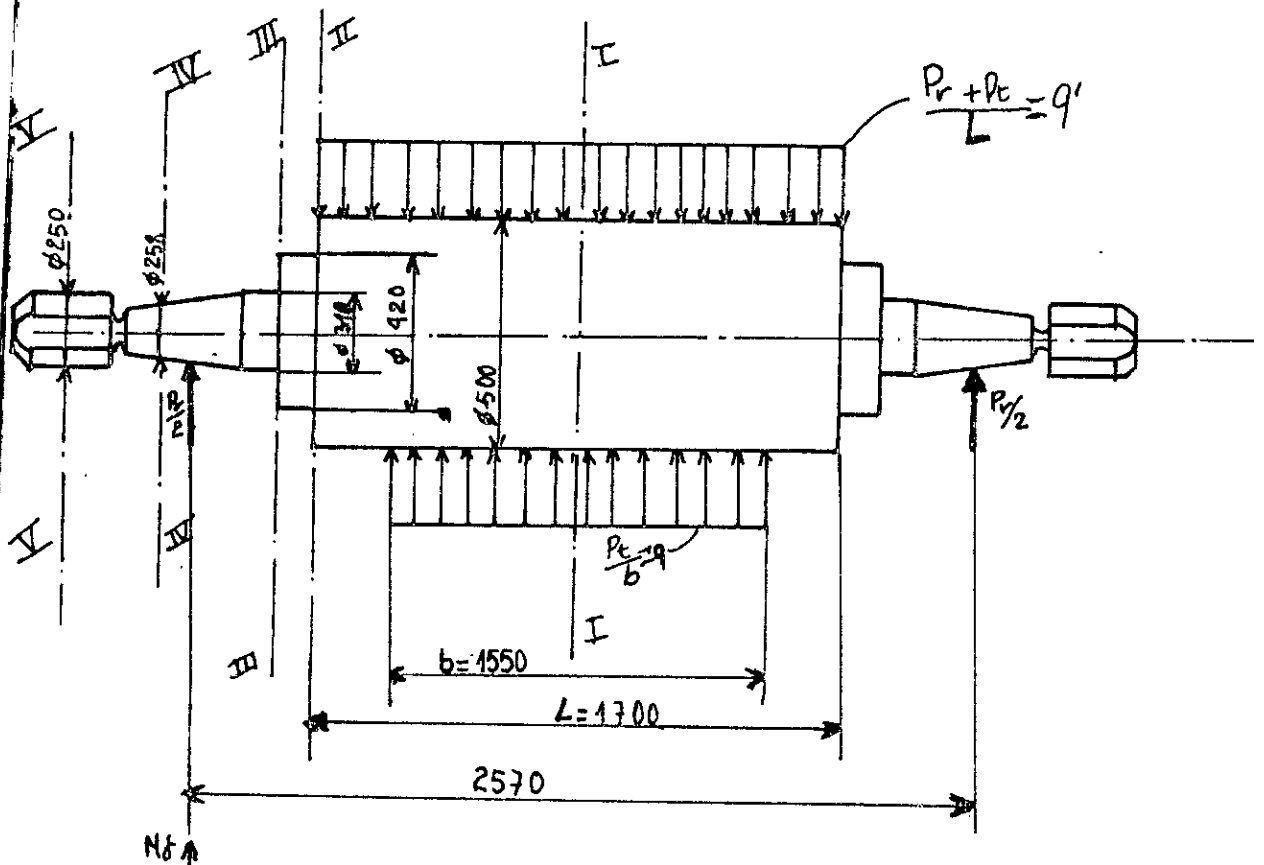


Diagramme des moments fléchissants des cylindres de travail dans le plan vertical.

Schéma de chargement du cylindre de travail dans le plan horizontal :

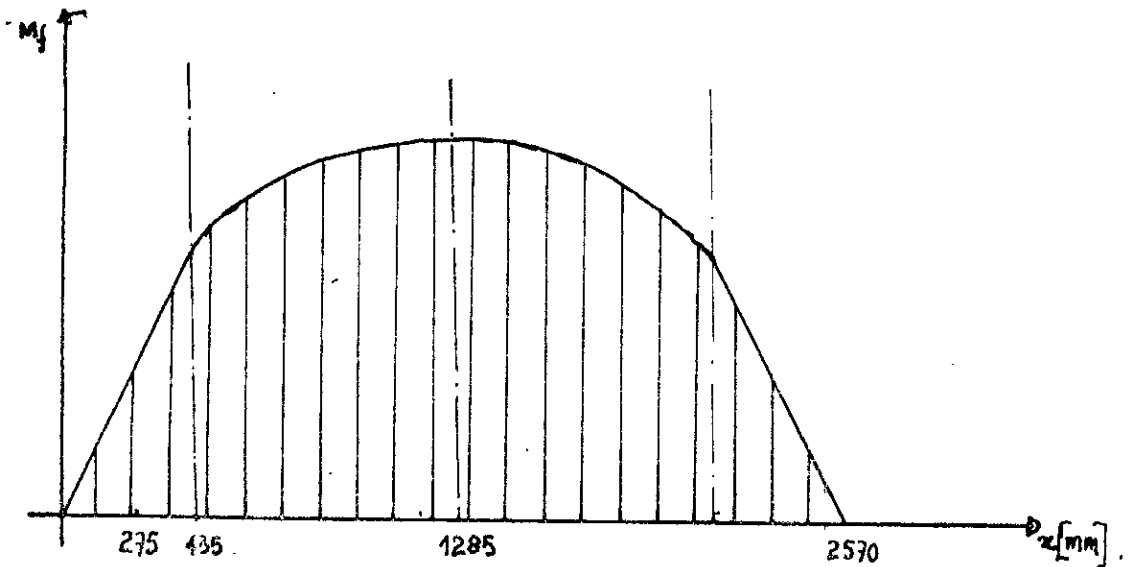
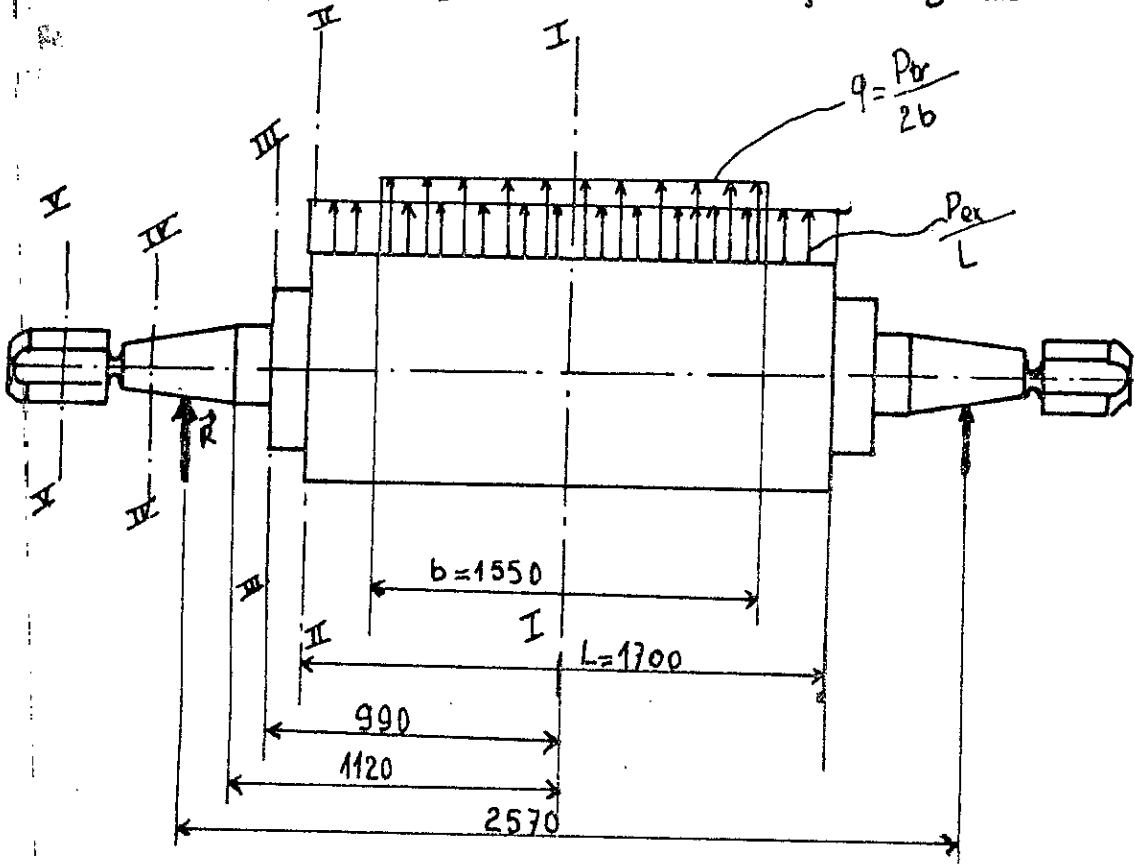


Diagramme des moments fléchissants des cylindres de travail dans le plan horizontal :

Calcul des moments fléchissants dans les zones dangereuses des cylindres d'appui.

zone (III, III) :

$$\frac{P_r}{2} \cdot x - M_f = 0 \Rightarrow M_f = \frac{P_r}{2} \cdot x \Rightarrow M_f = 450000 \text{ dan.m}$$

zone (I, I)

$$M_f - \frac{P_r}{2} \cdot x + q \left(\frac{x - 0,55}{2} \right)^2 = 0$$

$$x = 0,55 \text{ m}$$

$$M_f - \frac{P_r}{2} \cdot 0,55 + \frac{P_r (0,55 - 0,55)^2}{L \cdot 2} = 0 \Rightarrow M_f = 550000 \text{ dan.m}$$

$$x = 1,4 \text{ m}$$

$$M_f - \frac{P_r}{2} \cdot 1,4 + \frac{P_r (1,4 - 0,55)^2}{L \cdot 2} = 0 \Rightarrow M_f = 975000 \text{ dan.m}$$

zone (II, II)

$$M_f - \frac{P_r}{2} (2,8 - x) = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow (x=2,8) = 2,8 \text{ m} \quad M_f = 0 \\ \Rightarrow (x=2,25 \text{ m}) \quad M_f = 550000 \text{ dan.m} \end{array} \right.$$

Soit :

$R_r = 11500 \text{ dan/cm}^2$ = limite de rupture du cylindre d'appui

$R_e = 8500 \text{ dan/cm}^2$: limite d'élasticité du cylindre d'appui

d'où $\sigma_{-1} = 5500 \text{ dan/cm}^2$: limite d'endurance du cylindre d'appui

(ou limite à la fatigue)

Calcul de la contrainte normale :

$$\sigma_{fi} = \frac{M_{fi}}{0,1 d^3}$$

Calcul du coefficient de sécurité à la flexion

$$n_{\sigma_i} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{\sigma}}{E_{\sigma}} \sigma_{fi} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m}$$

avec $K_{\sigma} = 1,8$

; $\sigma_m = 0$

; $E_{\sigma} = 0,5$

E_{σ} : facteur de l'état de surface

K_{σ} : Coefficient de concentration des contraintes normales

V_0 : coefficient défini par susceptibilité du matériau à l'asymétrie du cycle.

σ_f : contrainte normale à la flexion

σ_m : valeur moyenne de la contrainte du cycle.

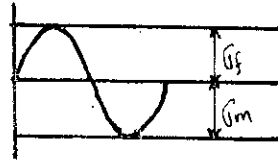


Tableau de valeurs :

Section dangereuses des cylindres d'appui.	M_f en [dan.cm]	σ_f en [dan/cm ²]	σ_m en [dan/cm ²]	n_{σ_i}
I . I	$975 \cdot 10^6$	355,32	5500	4,29
II . II	$55 \cdot 10^6$	200,44	5500	7,62
III . III	$45 \cdot 10^6$	163,99	5500	9,32

Remarque :

Le calcul du coefficient de sécurité se fait pour prouver que le cylindre d'appui est bien vérifié à la flexion. Celui-ci doit être supérieur à l'unité.

Schéma de chargement du cylindre d'appui

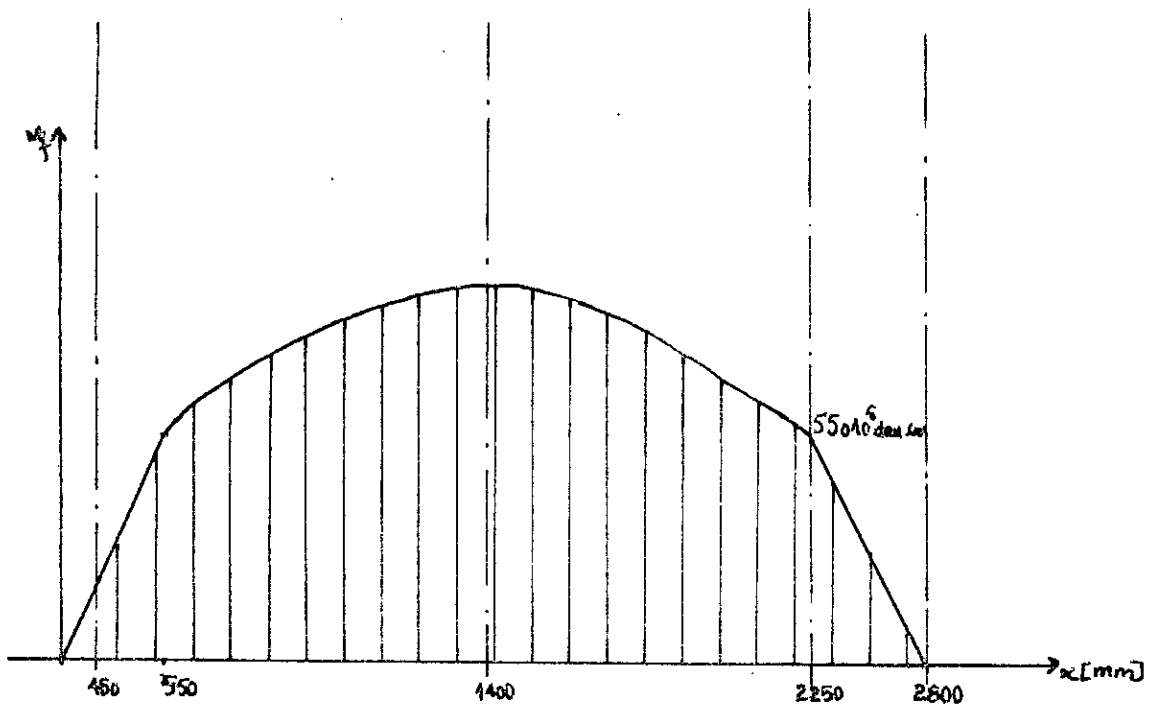
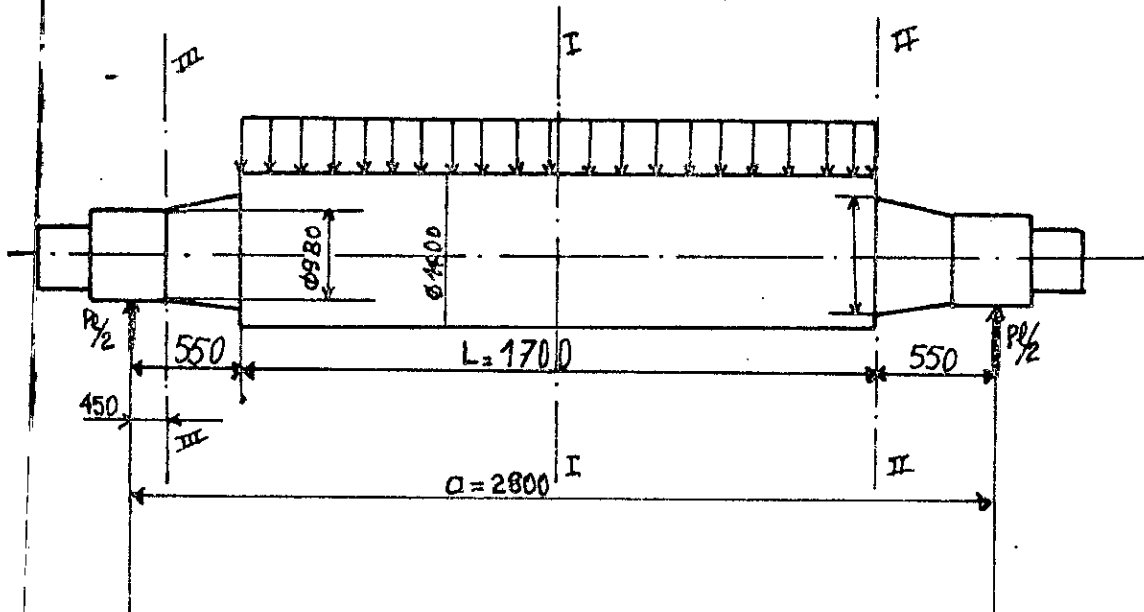


Diagramme des moments fléchissants du cylindre d'appui :

2) Calcul et vérification des paliers lisses des cylindres d'appui.

$$P = 225 \text{ dan/cm}^2 ; d = 1000 \text{ mm} ; l = 750 \text{ mm} ; P_c = 2000000 \text{ dan.}$$

Calcul des roulements du cylindre de travail

On utilise les roulements coniques à 4 rangées de billes avec une charge dynamique

$$C = 236000 \text{ dan. et une durée de travail } L_h = 4000 \text{ heures.}$$

Le roulement inférieur travaille dans les conditions plus défavorable que le roulement supérieur, pour cela on préfère faire le calcul.

Le roulement agit dans le plan vertical l'effort suivant P_r :

$$P_r = \frac{P_f + P_{i.c}}{2}$$

$$P_f : \text{effort de flexion} \quad P_f = 4 \frac{\pi D^2}{4} p \eta$$

$$p = 64 \text{ dan/cm}^2 \text{ pression du liquide dans les verins}$$

$$D = \text{diamètre du verin hydraulique} \quad D = 125 \text{ mm.}$$

$$\eta = \text{rendement du verin} \quad \eta = 0,85$$

$$P_f = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 12,5^2}{4} \cdot 64 \cdot 0,85 \Rightarrow P_f = 26703,5 \text{ dan.}$$

$P_{i.c} = 2000 \text{ dan.}$ poids du corps et du roulement.

$$\text{d'où } P_r = \frac{26703,5 + 2000}{2} \Rightarrow P_r = 14351,75 \text{ dan.}$$

En plus de la charge verticale, le roulement reçoit l'effort de traction de la bande qui est dirigée horizontalement $T_{r \text{ max}} = 12000 \text{ dan}$ entre la cage et la bobineuse.

d'où l'effort max s'exerçant sur le roulement:

$$F_{r \text{ max}} = \sqrt{P_r^2 + \left(\frac{T_r}{4}\right)^2} \Rightarrow F_{r \text{ max}} = 14662 \text{ dan.}$$

3) Calcul de la vis de pression à la résistance :

1) Calcul de la contrainte à la compression sur la surface de la crapaudine .

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{\frac{P_2}{2}}{\pi \frac{d_e^2}{4}} \leq R_{\text{comp adm.}}$$

$P_2/2 = 100000 \text{ dan}$ effort de laminage s'exerçant sur une vis .

$d_e = 53,5 \text{ cm}$ diamètre de la crapaudine

$R_{\text{comp admissible}} = 600 \div 800 \text{ dan/cm}^2$.

A.N :

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{100000}{\frac{\pi \cdot 53,5^2}{4}} \Rightarrow \sigma_{\text{comp}} = 445 \text{ dan/cm}^2$$

la condition de sécurité ($\sigma_{\text{comp}} \leq R_{\text{comp adm}}$) est bien vérifiée

la vis est donc bien vérifiée à la compression.

2) Calcul de la contrainte de serrage dans le noyau de la vis .

$$\sigma_s = \frac{\frac{P_2}{2}}{\pi \frac{d_n^2}{4}} \leq R_s \text{ adm} \quad \text{avec } R_s \text{ adm} = 1200 \div 1500 \text{ dan/cm}^2$$

d_n : diamètre intérieur de la vis avec $d_n = 52,8 \text{ cm}$

$$\sigma_s = \frac{100000 \times 4}{\pi \cdot 52,8^2} \Rightarrow \sigma_s = 456,72 \text{ dan/cm}^2$$

$\Rightarrow \sigma_s \leq R_s \text{ adm.}$ vérifié.

3) vérification des cannelures de la vis de pression à la compression .

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{M_{\text{vmax}}}{\psi \cdot z \cdot m \cdot l \cdot r_m \cdot 0,75} \leq R_{\text{comp}} \quad \text{avec } R_{\text{comp}} = 600 \div 800 \text{ dan/cm}^2$$

M_{vmax} : Couple agissant sur la vis de pression

$\psi = 0,75$ Coefficient d'irrégularité

$z = 54$ nombre de dents.

$m = 10 \text{ mm}$: module des cannelures à flanc en développante

$l = 66 \text{ cm}$: hauteur du moyeu

r_m : rayon moyen de l'assemblage à cannelures.

$$r_m = \frac{d_e + d_i}{4} \Rightarrow r_m = \frac{56 + 54}{4} \Rightarrow r_m = 27,5 \text{ cm.}$$

Calcul de $M_{v \max}$:

$$M_{v \max} = \frac{N \cdot 97500 \cdot l}{n}$$

$N = 160 \text{ kW}$: Puissance du moteur

$l = 456$: rapport de transmission

$n = 5000 \frac{\text{tr}}{\text{min}}$: nombre de tours/d-moteur.

A.N:

$$M_{v \max} = \frac{160 \cdot 97500 \cdot 456}{500} \Rightarrow M_{v \max} = 1419610^3 \text{ dan.cm}$$

Calcul de σ_{comp} :

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{1419610^3}{0,75 \cdot 54 \cdot 1 \cdot 66 \cdot 27,5 \cdot 0,75} \quad \sigma_{\text{comp}} = 258 \text{ dan/cm}^2$$

Sachant que $R_{\text{comp adm}} \approx 600 \div 800 \text{ dan/cm}^2$

On voit bien que la condition de sécurité $\sigma_{\text{comp}} < R_{\text{comp adm}}$ est vérifiée

Les cannelures de la vis de pression sont vérifiées à la compression.

type de vis : 34XH1M

5) Calcul de l'écrou de la vis de pression à la résistance.

1) Vérification à la compression du filet de l'écrou.

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{P/2}{\frac{\pi}{4} (d_{\text{ext}}^2 - d_{\text{i}}^2) z} \leq R_{\text{comp adm}}$$

$P/2 = 1000000 \text{ dan}$ effort de laminage

$d_{\text{e}} = 56 \text{ cm}$ diamètre extérieur du filet.

$d_{\text{i}} = 53,4 \text{ cm}$ diamètre intérieur du filet.

$z = 34$ nombre de spires de l'écrou.

$R_{\text{comp adm}} = 150 \div 200 \text{ dan/cm}^2$

A.N :

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{1000000}{\frac{\pi}{4} (56^2 - 53,4^2) 34} \Rightarrow \sigma_{\text{comp}} = 132 \text{ dan/cm}^2$$

L'écrou est donc bien vérifié à la compression ($\sigma_{\text{comp}} < R_{\text{comp adm}}$.)

2) Vérification de l'écrou au cisaillement

$$\tau_c = \frac{P/2}{\pi \beta h d_{\text{e}}} \leq R'_c$$

$\beta = 0,65$ coefficient du profil de l'écrou

$h = 83 \text{ cm}$ hauteur de l'écrou

$d_{\text{e}} = 56 \text{ cm}$ diamètre extérieur du filet.

$R'_c = 260 \div 340 \text{ dan/cm}^2$

$$\text{A.N.} \quad \tau_c = \frac{1000000}{\pi \cdot 0,65 \cdot 83 \cdot 56} \Rightarrow \tau_c = 106 \text{ dan/cm}^2$$

On voit bien que l'écrou est bien vérifié au cisaillement.

Vérification de l'écrou à la flexion :

$$\sigma_f = \frac{Pz/2 (d_e - d_i)}{2 \pi \cdot \beta^2 s^2 d_e z} \leq R_{fad}$$

$d_e = 56 \text{ cm}$ diamètre extérieur

$d_i = 53,4 \text{ cm}$ diamètre intérieur

$\beta = 0,65$ coefficient du profil de filet

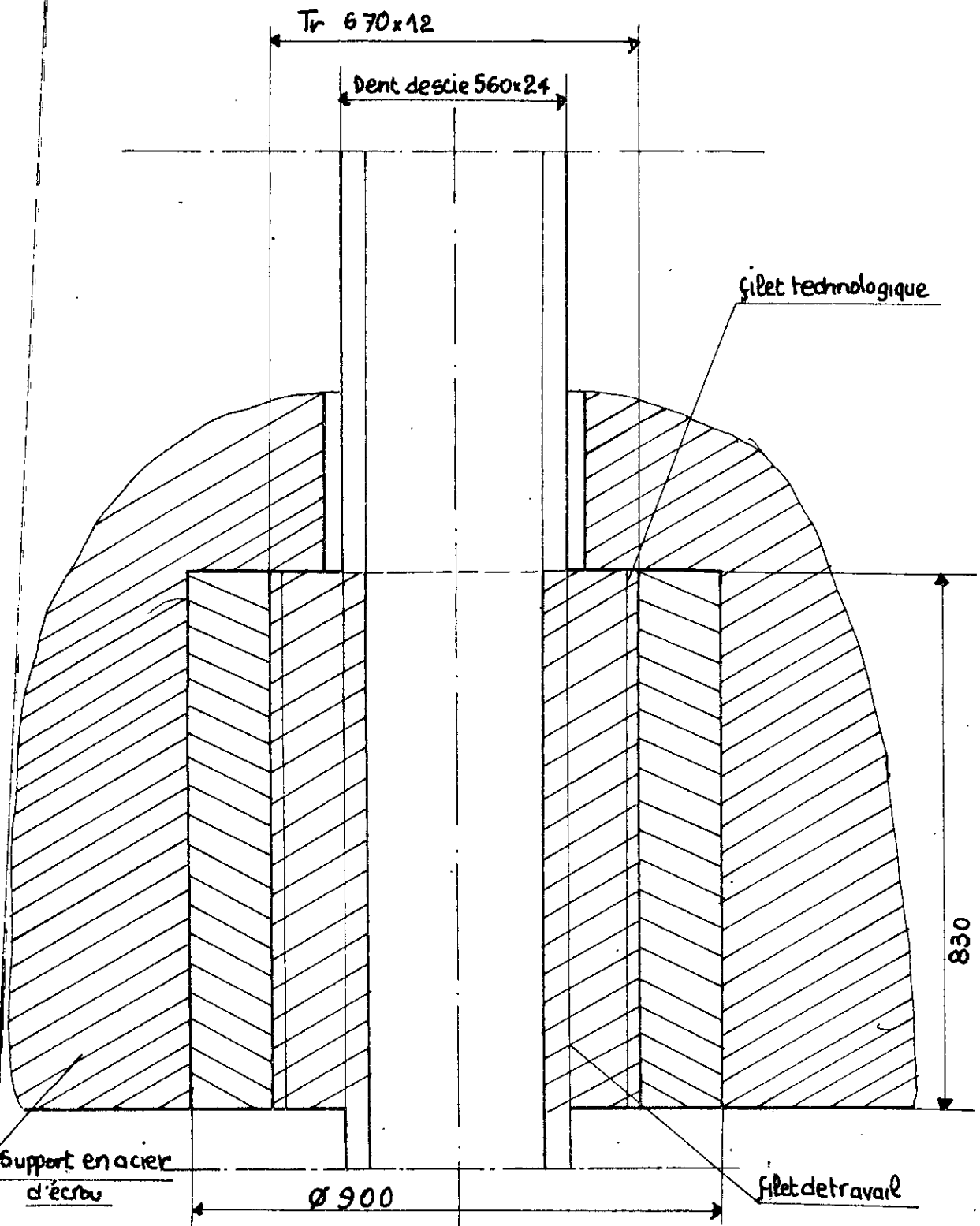
$s = 24 \text{ cm}$ pas du filet.

et $R_f = (350 \div 450) \text{ dan/cm}^2$

$$\sigma_f = \frac{1000000 (56 - 53,4)}{2 \pi \cdot 0,65^2 \cdot 24^2 \cdot 56 \cdot 34} \Rightarrow \sigma_f = 89,30 \text{ dan/cm}^2$$

l'écrou est bien vérifié à la flexion.

Crapaudine et l'écrou : $\sigma_p \times M Y$



Transmission vis-écrou du mécanisme de serrage:

Conclusion:

L'étude de ce projet, a été pour nous une simple mise en valeur de nos capacités intellectuelles acquises au cours de notre cycle universitaire.

Lors de cette étude nous avons examiné la construction du laminoir réversible puis son élaboration, et vérifié également certains organes essentiels à la résistance tels que la cage de travail, le bâti, cylindres de travail, cylindres d'appui, visses, et écrous de serrage.

Le Laminoir réversible est une machine très complexe classée parmi les machines lourdes, on y trouve beaucoup de mécanismes très ^{intéressant} au point de vue mécanique tels que; réducteur combiné, verins hydrauliques à double action, bobineuses et enfin débobineuses.

Vu que nous manquons de temps, il nous est impossible d'élaborer la construction de chaque organe mécanique et le vérifier à la résistance, pour cela nous souhaitons aux étudiants de l'école polytechnique en cours de cycle universitaire de faire l'étude et la construction plus en détails des organes de la machine en question, auxquels on n'a pas touché.

Bibliographie

Ouvrages :

1/ T ZELIKOVA. " Equipement de laminage "M" 1968 "

2/ THIMITCH.G. " Equipement mécanique des ateliers de laminage à froid "M" 1972 "

3/ TRETIAKOV.A. " Calcul et recherche des cylindres de laminage à froid "

4/ PONACENKO.F " Fabrication de la tôle à froid "

5/ ANTONOV.G. " Fabrication de la tôle mince "

6/ A. CHEVALIER " Guide du dessinateur industrielle "

Documentation industrielle: " Catalogue , notices "

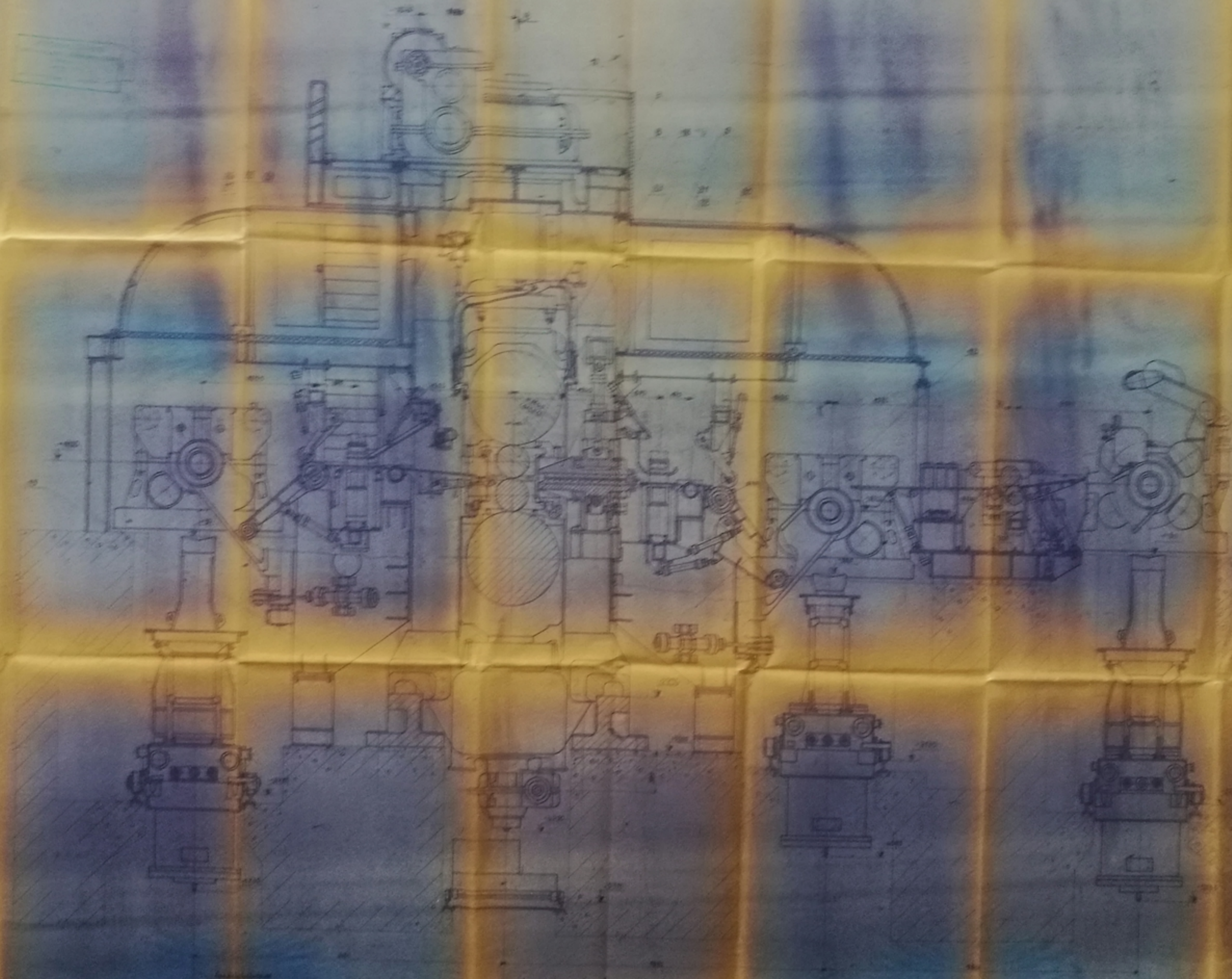


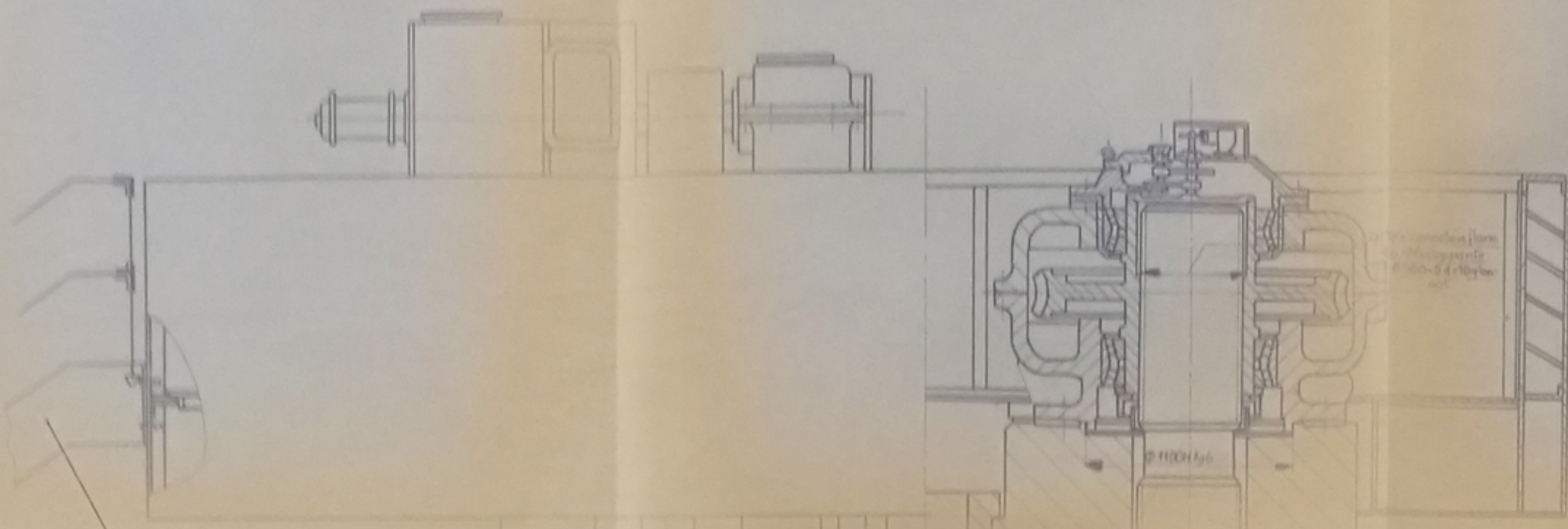
Fig. 1

Axe de la machine au travail

Axe de la machine

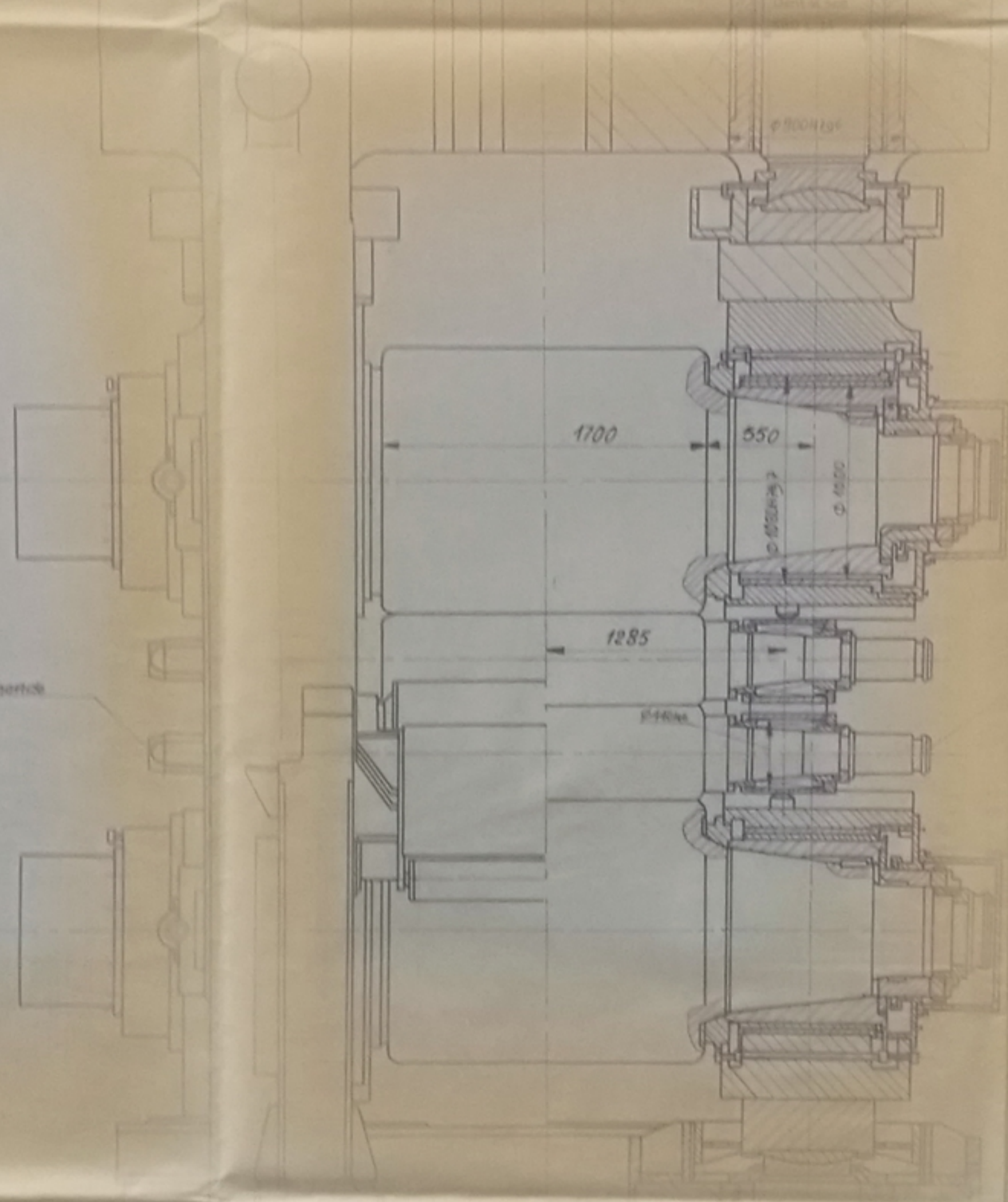
Axe de la machine

1/2 COUPE BB



14

Côté de montage



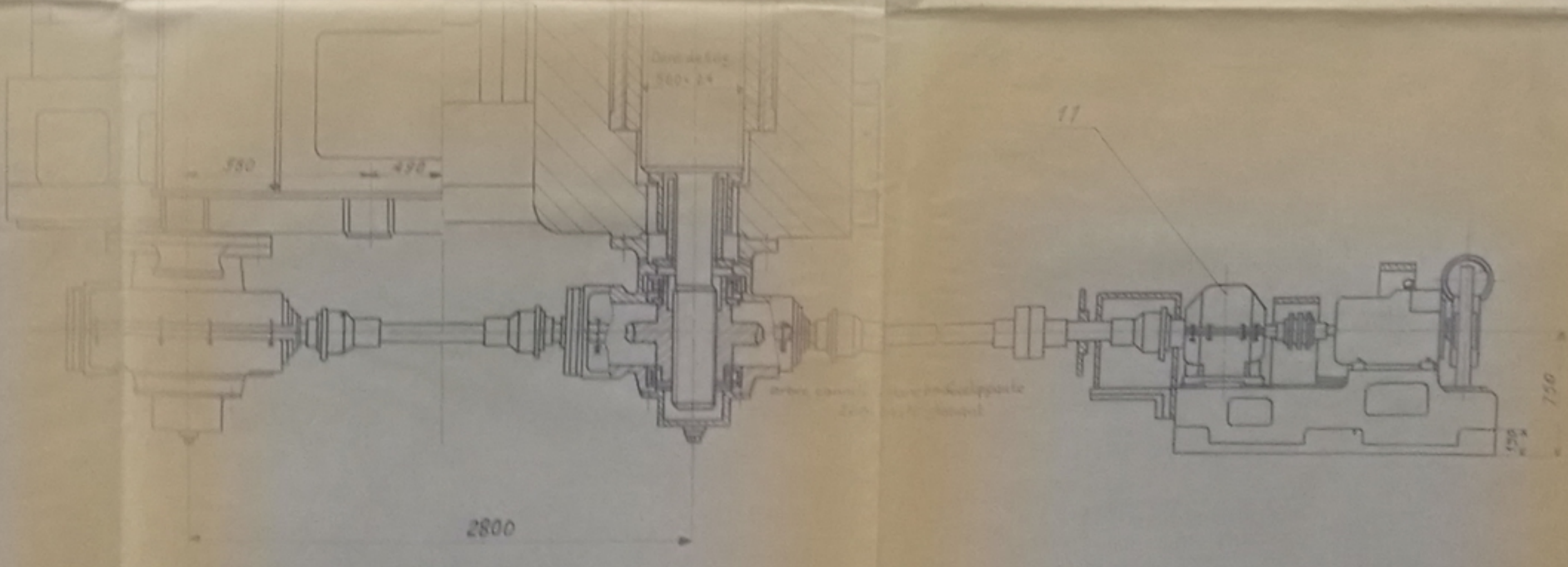
1700

550

1285

Côté de démontage

17



2800

11

المكتبة
 المدرسة
 ENP
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHEQUE

PM 020 84
Annexe - 2 -

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	
LAMINAR REVERSIBLE 1200 CAGE DE TRAVAIL	ENP DEPT. MECANIQUE
Bureau de montage	

