

وزارة التعليم و البحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Aex  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT de GENIE MECANIQUE

# PROJET DE FIN D'ETUDES

## S U J E T

ETUDE DES STRUCTURES  
ET DES PROPRIETES DES METAUX  
APRES TREFILAGE  
PROJET D'UN BANC DE TREFILAGE A BOBINES

2 PLANS

Proposé par :

M. PAVLOV

Etudié par :

M. GUELLOUMA

Dirigé par :

M. PAVLOV

PROMOTION : JUIN 1985

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT : GÉNIE MÉCANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ÉTUDE DES STRUCTURES ET DES PROPRIÉTÉS

DES MÉTAUX APRÈS TRÉFILAGE

PROJET D'UN BANC DE TRÉFILAGE A BOBINES

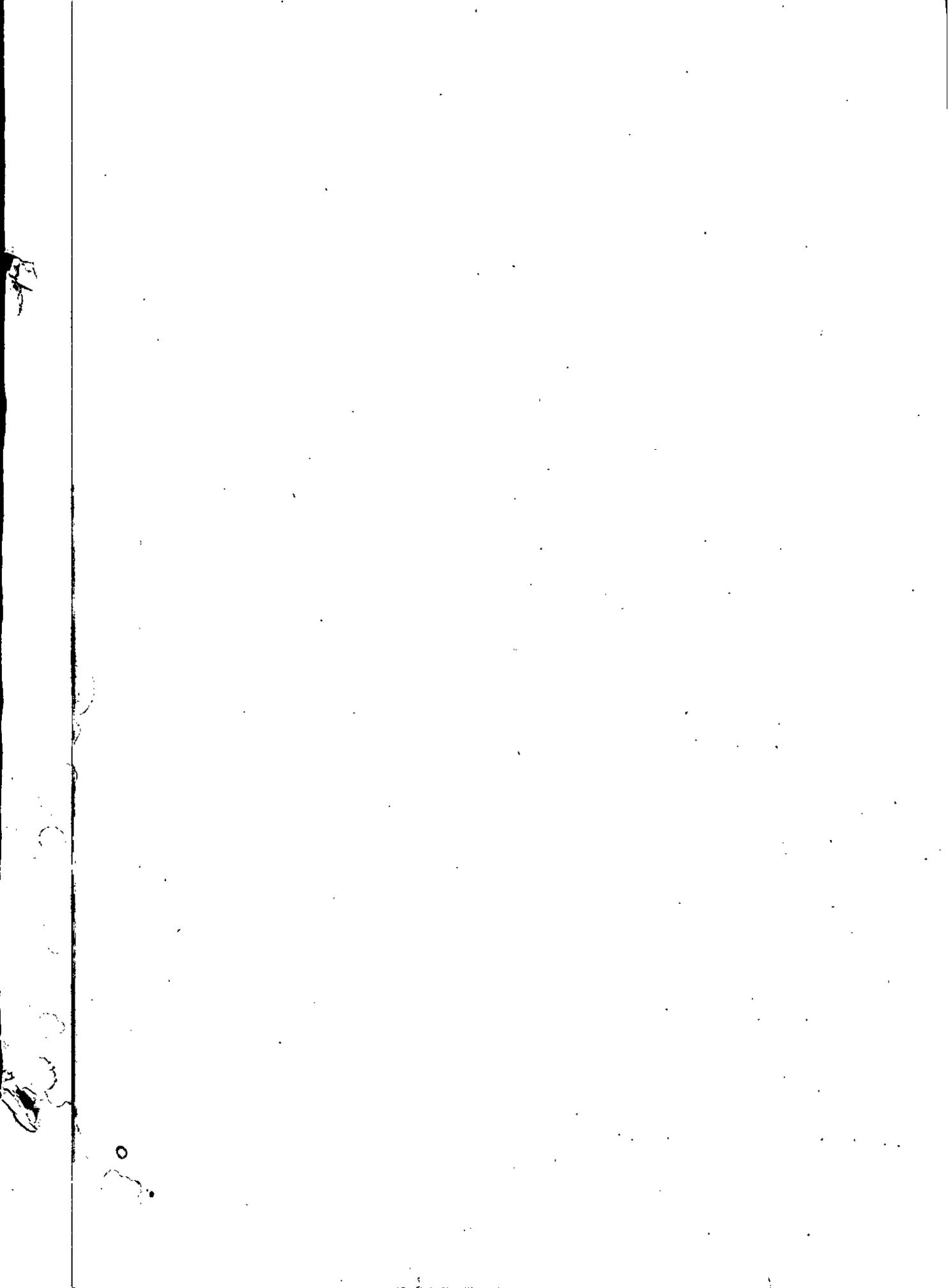
PROPOSÉ PAR :

M. PAVLOV

ÉTUDIÉ PAR :

M. GUELLOUMA

*Promotion Juin 1985*



D E D I C A C I E

F mon frère Fayçal

mon père et ma mère

mes frères et soeurs

Je dédie ce modeste travail

/)/. GUELLOUMA.

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

Il exprime ma profonde gratitude à Mr PAVLOV pour son aide précieux et son soutien constant durant cette étude.

Je voudrais témoigner ma sincère et profonde reconnaissance à tous les professeurs de département mécanique et plus particulièrement à Messieurs : A GREFKOVICZ et A. ELEOD pour leurs conseils tout au long de cette étude.

Mes plus vifs remerciements sont adressés à Messieurs les responsables de l'ENICAB ; aux techniciens du laboratoire de l'ENICAB SID'ALI, MOHAMED, NOUR-EDDINE, ABDERAHMANE, HACEN et YUCEF ; ainsi qu'au responsable du service approvisionnement Mr. S. TALAKELAA pour les moyens mis à ma disposition et les conseils bénéfiques qu'il n'ont cessé de me prodiguer durant toute cette période.

Je remercie tous mes amis : SID'AHMED, MOHAMMED, YACINE, ABDELKADER et ZINO pour leur aide à la réalisation de ce modeste travail.

## T A B L E   D E S   M A T I E R E S

### CHAPITRE I. INTRODUCTION

- I. 1/     - Généralités
- I. 2/     - Présentation du sujet
- I. 3/     - Tréfilage
- I. 3.1/   - Procédé de tréfilage
- I. 3.2/   - Gamme opératoire
- I. 3.3/   - Domaine d'application
- I. 3.4/   - Utilisation du produit
- I. 4/     - Choix du matériau
- I. 4.1/   - Généralités sur le matériau étudié
- I. 4.2/   - Fabrication du fil machine
- I. 4.2.1/ - Procédé classique
- I. 4.2.2/ - Procédé coulée continue
- I. 4.3/   - Décapage du fil
- I. 4.4/   - Caractéristiques du fil machine

### CHAPITRE II. TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES du CUIVRE

- II. 1/     - Déformation plastique
- II. 1.1/   - Mécanisme de la déformation
- II. 1.2/   - Déformations des monocristaux
- II. 1.3/   - Déformations des agrégats polycristallins
- II. 1.4/   - Durcissement par écrouissage
- II. 1.5/   - Mécanisme de formation des dislocations
- II. 2/     - Recuit de recristallisation
- II. 2.1/   - Restauration et polygonisation
- II. 2.2/   - Recristallisation
- II. 2.2.1/ - Recristallisation primaire
- II. 2.2.2/ - Recristallisation secondaire
- II. 3/     - Caractéristiques mécaniques

### CHAPITRE III. METHODES EXPERIMENTALES, RESULTATS et INTERPRETATIONS

- III. 1/ - Prélèvements des échantillons
- III. 2/ - Préparations des éprouvettes et des échantillons micrographiques
- III. 2.1/ - Préparations des éprouvettes
- III. 2.2/ - Préparations des échantillons micrographiques
- III. 2.2.1/- Prélèvement
- III. 2.2.2/- Enrobage
- III. 2.2.3/- Polissage
- III. 2.2.4/- Attaque chimique
- III. 3/ - Recuit de recristallisation
- III. 4/ - Techniques expérimentales
- III. 4.1/ - Essai de traction
- III. 4.2/ - Mesure de l'allongement
- III. 4.3/ - Mesure de la microdureté
- III. 4.4/ - Mesures des résistivités électriques
- III. 4.5/ - Microscopie optique
- III. 5/ - Résultats
- III. 5.1/ - Influence de la déformation par tréfilage sur les propriétés du fil
  - III. 5.1.1/- Evolution des caractéristiques mécaniques au cours de tréfilage
  - III. 5.1.2/- Evolution des caractéristiques électriques
- III. 5.2/ - Influence du recuit sur les propriétés du fil
  - III. 5.2.1/- Evolution des caractéristiques mécaniques en fonction de la température de recuit
  - III. 5.2.2/- Evolution de la résistivité électrique en fonction de la température de recuit.

### CHAPITRE IV. ETUDE de la STRUCTURE

- IV. 1/ - Evolution de la structure en fonction du degré de déformation
- IV. 2/ - Evolution de la structure en fonction de la température de recuit.

TABLE des FIGURES

- Principe de coulée continue	figg 1. 1.
- Système de glissement de la structure C.F.C.	fig 2. 1.
- Schématisation d'une déformation élastique et d'une déformation plastique du métal sous l'effet d'une contrainte de glissement	fig 2. 2.
- Glissement dans une éprouvette cylindrique	fig 2. 5.
- Courbe de consolidation d'un monocristal de structure C.F.C.	fig 2. 6.
- Modèle de déplacement des dislocations	fig 2. 7.
- Evolution de $R = f(\epsilon)$	fig 3. 1.
- " de $A = f(\epsilon)$	fig 3.22.
- " de $HV = f(\epsilon)$	fig 3. 3.
- " de $p = \beta(\epsilon)$	fig 3. 4.
- " de $R = f(T_0)$	fig 3. 5.
- " de $A = f(T_0)$	FIG 3. 6.
- " de $p = \beta(T_0)$	fig 3. 7.
- Structure du fil machine coupe transversale ( $\epsilon = 0\%$ )	photo 1.
- " " " écroui " " ( $\epsilon = 36\%$ )	photo 2.
- " " " " " " ( $\epsilon = 63\%$ )	photo 3.
- " " " " " " ( $\epsilon = 91\%$ )	photo 4.
- " " " machine " longitudinale ( $\epsilon = 0\%$ )	photo 5.
- " " " écroui " " ( $\epsilon = 36\%$ )	photo 6.
- " " " " " " ( $\epsilon = 63\%$ )	photo 7.
- " " " " " " ( $\epsilon = 91\%$ )	photo 8.
- " " " écroui à 36 % recuit à 100°C coupe transversale	photo 9
- " " " " " " à 300°C " "	photo10
- " " " " " " à 500°C " "	photo11
- " " " " " " à 800°C " "	photo12
- " " " " " " à 100°C " longitudinal	photo13
- " " " " " " à 300°C " "	photo14
- " " " " " " à 500°C " "	photo15
- " " " " " " à 800°C " "	photo16

- machine simple fig 5. 1.
- machine multiples fig 5. 2.
- machine sans glissement ou à accumulation fig 5. 3.
- machine à glissement fig 5. 4.
- Courbe  $K_f = f(\psi, \dot{\psi}, T, \text{pureté})$  fig 5. 5.
- Diagrammes des moments fléchissants et de torsion de l'arbre d'entrée fig 5. 6.
- Diagrammes des moments fléchissants et de torsion de l'arbre intermédiaire fig 5. 7.
- Diagrammes des moments fléchissants et de torsion de l'arbre de la bobine fig 5. 8.

## INTRODUCTION .

### I- 1 Généralités:

Le développement des technologies que vit actuellement notre époque dans les différents domaines comme l'électronique, la mécanique, l'électrotechnique, la production de l'énergie atomique .. . . . ect, demande toujours une utilisation plus large des métaux. Et l'évolution toujours continue de ces technologies ainsi que la complication de ces prescriptions que voient satisfaire les métaux, exigent une connaissance parfaite de leurs structures et propriétés.

De même que l'utilisation rationnelle de la matière première et le déséquilibre sans cesse croissant entre l'offre et la demande des produits métallurgiques a fait naître de nouveaux procédés qui utilisent la plasticité des métaux, comme le forgeage, l'estampage, le laminage, le filage, le tréfilage, l'étirage, l'emboutissage.... . . . ect Ces opérations, dont certaines pensent être exécutées soit à chaud soit à froid, permettent d'obtenir d'une façon plus économique des produits possédant des caractéristiques mécaniques élevées généralement exempt de défaut internes

### I- 2 Présentation du Sujet :

Le sujet qui a été proposé pour l'élaboration de ce projet de fin d'études consiste à faire une étude sur les propriétés et les structures des métaux après tréfilage. Ainsi que l'étude d'un banc de tréfilage à bobine.

- Notre Projet a été axé plus particulièrement sur l'étude des structures du cuivre au cours du tréfilage et l'évolution de ces propriétés mécanique et électriques.

- Un paragraphe a été consacré sur le traitement thermique du cuivre afin de voir l'évolution de sa structure et de ses propriétés et déterminer ainsi une température où le cuivre sera soumis à un recuit de recristallisation qui aura pour but de donner au métal ces propriétés initiales et donc la possibilité d'être retréfiler.

- Un chapitre a été réservé à la déformation plastique par tréfilage dans le but d'en déduire tous les paramètres nécessaires à la réalisation d'un banc de tréfilage à bobines .

---Enfin nous avons juger utile de donner à votre banc de tréfilage la possibilité de faire subir au cuivre un recuit en continue et ceci par un dispositif de recuit ou recuisseur.

..../...

## I- 3 TREFFILAGE

### I.3.1- Précédé de tréfilage :

Le tréfilage dont l'étymologie implique à la fois la notion de traction et celle du fil, est un procédé qui utilise la plasticité des métaux pour les transformer en fils.

Ce mode de travail des métaux qui semble si simple paraît être pratiqué depuis environ un millier d'années.

Avant cette époque les fils métalliques étaient obtenus par martelage et découpage de feuilles minces de métal malléable et ce n'est qu'au siècle qu'apparaît pour la première fois dans un manuscrit latin l'indication de l'emploi de la filière pour la fabrication des barres et des fils métalliques.

L'opération technologique consiste à exercer une traction sur le fil machine pour le faire passer par une filière lubrifiée.

A la sortie le fil aura épousé la forme de la filière et ou a une section semblable à celle-ci :

### I.3.2 Gamme Opératoire:

le fil machine se présente sur un dévidoir , passe par la filière puis s'enroule sur une bobine d'enroulement l'entraînement est obtenu par la rotation de la bobine d'entraînement.

### I.3.3- Domaine d'application :

La tréfilage s'exécute à froid et s'applique à tous les métaux présentant une résistance suffisante à la traction et une bonne homogénéité de composition et de structure, car le moindre défaut interne provoque la rupture du fil.

lorsque la section du fil est très réduite ,ou fait appel au traitement de recuit. Le recuit a pour but de donner au métal ou au fil la possibilité d'être retréfilé car les déformations plastiques provoquent un durcissement du métal et limitent ainsi la poursuite de l'opération.

### I.3.4- Utilisation du Produit :

Les fils métalliques servent de matière première à toute une industrie de transformation dont les ateliers sont très souvent annexés au ateliers de tréfilage proprement dits ; ateliers de câblage , de pointerie, de clouterie, de visserie, de fabrication de grillage, de gance artificielle, de boîte métallique de chaînerie...ect.

On fabrique également à partir du fil métallique un nombre considérable d'objets de toutes sortes épingles, aiguilles, hameçons axes d'appareils de mesure et de mouvement d'horlogerie, ressorts, bijouterie, agraffes, crochets, boucleries, rayons de cycle, commandes de freins, tresses de protection.....ect.

...../...

## I- 4 CHOIX DU MATERIAU.

### I.4.1- Généralités sur le matériau étudié:

Le matériau qui a été utilisé dans notre projet est le cuivre. Ce matériau a une place de choix dans les différentes technologies mais il trouve son utilisation encore plus large dans le transport de l'énergie électrique, le cuivre possède à la température ambiante la plus faible résistivité électrique et la meilleure conductivité thermique après l'argent.

Le compromis satisfaisant entre limite élastique et l'allongement qu'on peut obtenir avec le cuivre conducteur, sa résistance à la corrosion et son aptitude à la mise en forme et sa facilité au sondage, justifient amplement le choix de ce matériau dans le transport de l'énergie électrique.

### I-4.2 -Fabrication du fil machine.

La fabrication du fil machine utilisé dans le tréfilage se fait suivant deux procédés.

#### I.4.2.1 - Procédé classique .

Les cathodes de cuivre électrolytique sont coulées en lingots. ces lingots subissent un préchauffage à 900°C environ puis un laminage à chaud.

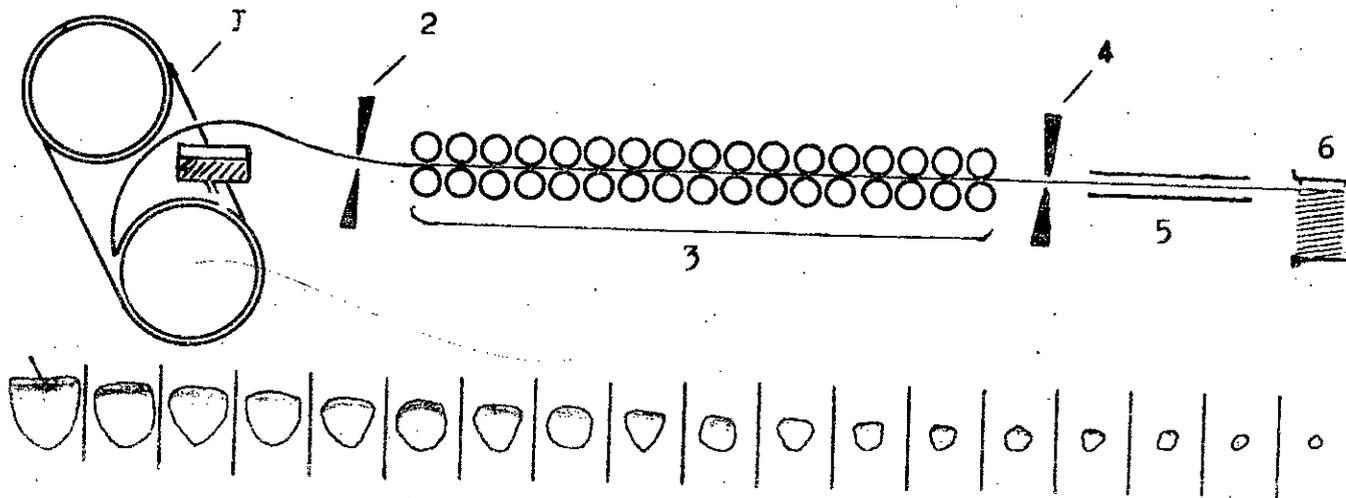
Le produit laminé est un fil rond qu'on rappelle fil machine.

#### I-4.2.2. Procédé coulée continue: (figure 14)

Ce procédé consiste à fondre les cathodes dans un four à cuve à 1150 °C ; le cuivre liquide est transférée dans un four de maintien et de coulée dans lequel on peut corriger sa teneur en oxygène. Cette teneur doit être respectée car la solubilité de l'oxygène dans le cuivre à l'état liquide est de 9007 % à 300 °C; elle atteint 0,01% à 950°C .

l'oxygène forme avec le cuivre un oxyde  $Cu_2 O$  et d'un Eutectique  $Cu-Cu_2 O$ . Ce dernier s'isole aux joints de grains et diminue la forgeabilité. La coulée du cuivre se fait dans une roue de coulée dont la couronne constitue la coquille avec une bande d'acier animée d'un mouvement de rotation? . La barre coulée subit un nettoyage par rasage au cours du laminage. Le fil obtenu est décapé en continu avant d'être bobiné.

.../...



Changements de section dans le laminoir

- 1- Machine de coulée continue
- 2- Cisailles volantes
- 3- Laminoir
- 4- Cisailles volantes
- 5- Dispositif de nettoyage de surface
- 6- Enrouleur

figure 1.1 Principe de coulée continue

## I.4.3-Décapage du Fil .

Après le laminage à chaud; le cuivre se couvre d'une couche noire relativement épaisse de  $Cu_2O$  et  $CuO$  qui peut être éliminée par un décapage sulfurique qui consiste en :

- Humersion des bobines du fil dans un bain d'acide sulfurique.
- Lavage à l'eau sous pression pour éliminer les traces d'acides et de  $CuSO_4$  due à la réaction de  $Cu_2O$  avec  $H_2SO_4$ .
- Humersion des bobines dans un bain de crème de tartre dans le but de former une couche adhérente qui freine l'attaque de l'oxygène.

## I.4.4./CARACTERISTIQUES DU FIL MACHINE

## I.4.4.1./ Caractéristiques chimiques .

Le fil machine qu'on va utiliser dans notre étude est le fil machine obtenu de la coulée continue

99,96 % Cu. ... homogénéité chimique

Il possède en outre une bonne homogénéité chimique et une faible teneur en oxygène.

## I.4.4.2 -Etat de Surface:

Le fil étudié a une surface propre et brillante .

## I.4.4.3- Caractéristiques mécaniques et électriques.

Diamètre (mm)	R (kg/mm <sup>2</sup> )	A %	Z %	S ( $\frac{mm^2}{cm}$ )
8,12	24	49	65,75	1,684

.../...

II.1 DEFORMATION PLASTIQUE

II.1.1 - MECANISME DE LA DEFORMATION

La déformation plastique s'effectue essentiellement par glissement et plus rarement ( basse température, forte vitesse) par maillage.

POUR LE CUIVRE La déformation pastique s'effectue par mécanisme de glissement.

Les systèmes de glissement sont formés des plans de type (111) contenant les directions du type (110). Ces plans et directions sont les plus denses dans les systèmes cubiques à faces centrées dans lesquels cristallise le cuivre .

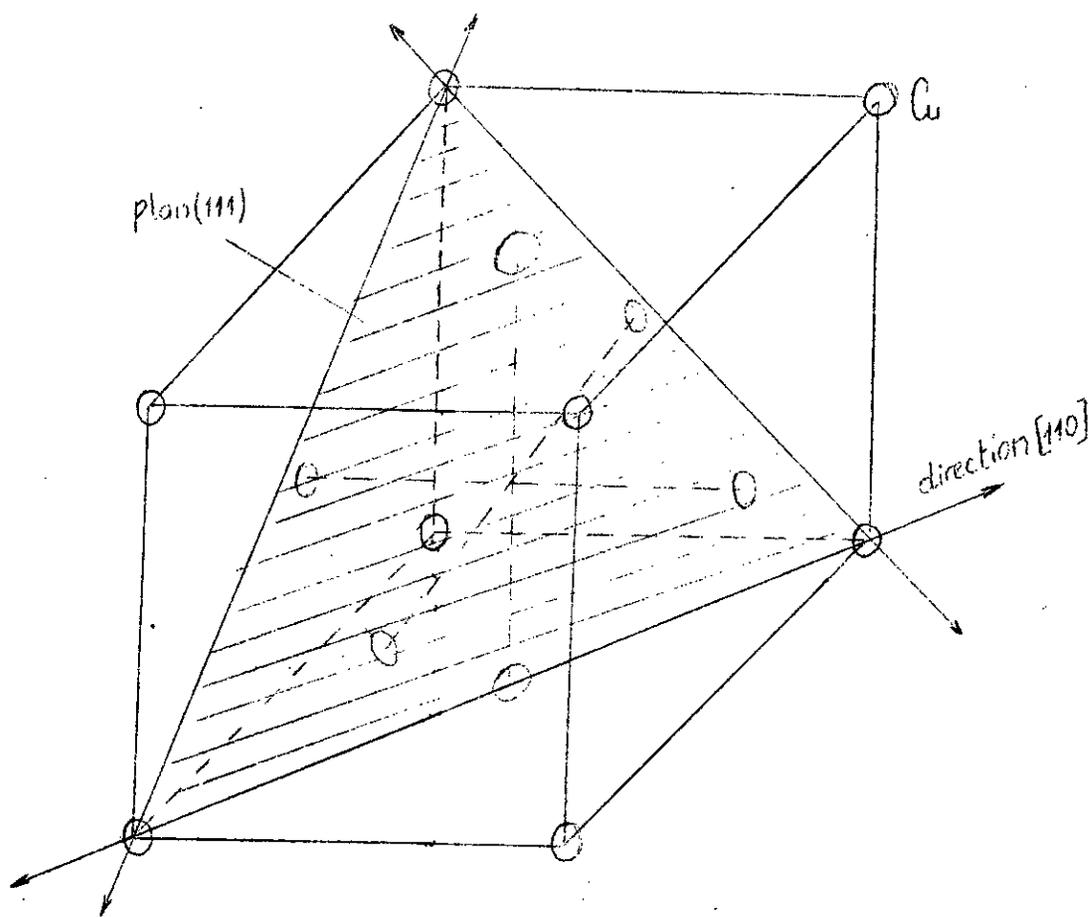


Figure 21. - Système de glissement de la structure C.F.C.

.../...

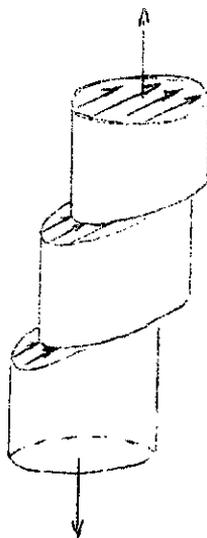


Figure 2.8 Glissement dans une éprouvette cylindrique.

### II.1.2- Déformations des monocristaux :

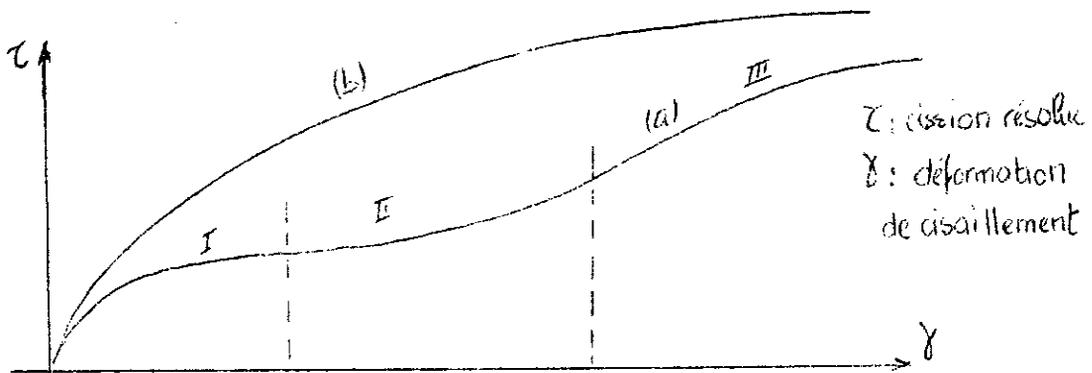
Si le cristal est favorablement orienté un seul système de glissement est possible. Et la déformation d'un monocristal du cuivre sera traduit par ce système de glissement.

Celui-ci est d'abord un glissement facile (I) à partir d'une cession résolue  $\tau_c$ . Il est suivi d'un stade de consolidation linéaire (II) et d'un stade (III) à durcissement décroissant.

L'apparition du stade (II) est relié à la rotation du cristal.

Si le cristal est orienté de manière que le glissement puisse s'effectuer dès le départ suivant deux plans de glissement ou plus, le glissement facile n'est pas observé.

.../...



(fig.2.5) Courbe de consolidation d'un monocristal de structure C.F.C.

- a- Un seul système de glissement est actif initialement
- b- deux système de glissement sont actifs initialement.

### II.1.3. Déformations hétérogènes des agrégats polycristallins.

Dans les polycristaux les divers grains doivent maintenir leur cohésion malgré leur déformation et rester exactement en contact suivant leurs joints. Il a été démontré que pour qu'un cristal puisse se déformer sans rompre la continuité avec ses voisins, sa déformation doit se faire selon cinq systèmes de glissement indépendants.

Néanmoins dans le cuivre la déformation se développe initialement avec deux et parfois trois systèmes de glissement. La déformation varie d'un grain à un autre d'une façon notable.

### II.1.4- Durcissement par écrouissage :

L'origine de ce durcissement est connue, avec l'augmentation de la déformation, la densité des dislocations augmente et un grand nombre de ces dislocations ne peut déboucher en surface. Et à cause des interactions diverses, une forte proportion se trouve bloquée dans le cristal sous forme de dépôts, boucles, empilements, échelons, réseau, etc....

Le passage de nouvelles dislocations devient alors de plus en plus difficile puisque la densité d'obstacles augmente.

Il s'ensuit alors un accroissement de la résistance à la déformation qui affecte notablement les propriétés du cuivre.

(fig.2.5) Courbe de consolidation d'un monocristal de structure C.F.C.

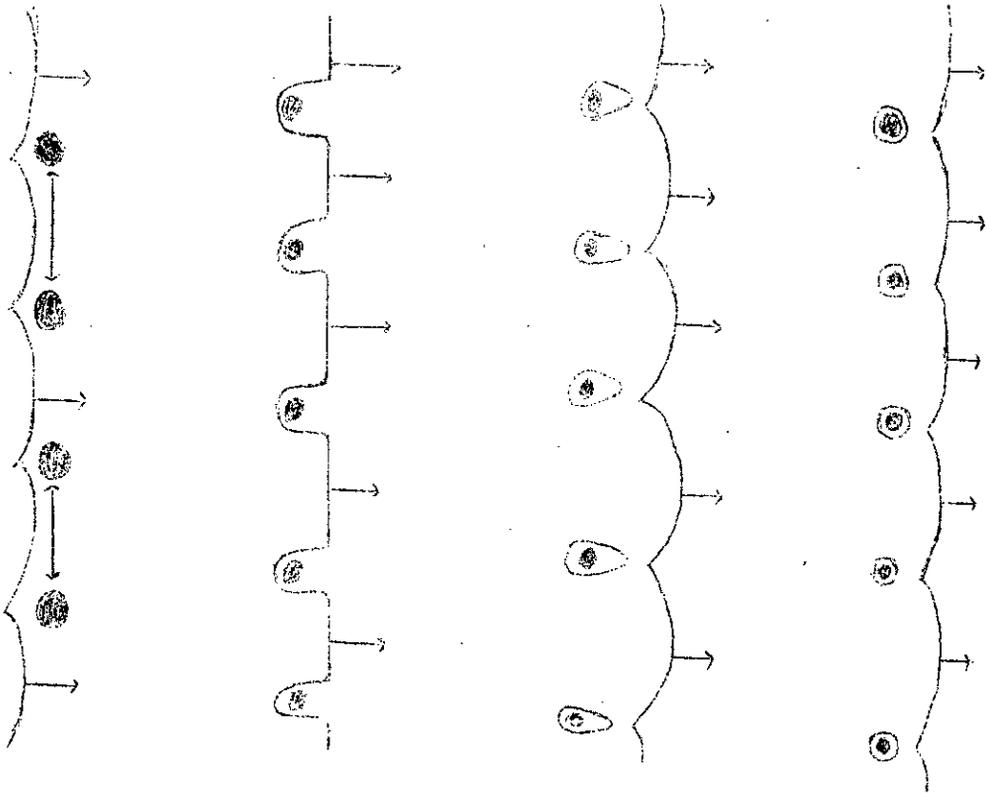
### 11.1.5- Mécanisme de formation des dislocations.

II.1.5. Une contrainte exercée sur une dislocation entraîne le mouvement de la dislocation, c'est à dire le déplacement des atomes voisins du cœur de dislocation.

Le déplacement correspond à celui où la ligne de dislocation se traverse entièrement le cristal en partant de la droite du cristal pour déboucher à la surface extérieure.

Mécanisme de formation des dislocations par écrouissage initial

Ce déplacement fait que les dislocations s'incurvent d'abord autour des particules pour les contourner ensuite. A mesure que les contraintes augmentent, les dislocations forment des nœuds fermés autour des particules. Après avoir laissé ces nœuds ou anneaux, qui font obstacles aux nouvelles dislocations, les dislocations poursuivent le glissement dans la même direction. A mesure que la distance entre les particules diminue, les nœuds ou anneaux font que la contrainte nécessaire pour que les dislocations se déplacent entre les particules croît. Cette difficulté de déplacement des dislocations entraîne en général un changement des propriétés mécaniques.



## II.2. RECUIT DE RECRISTALLISATION.

### II.2.1-Restauration et polygonisation.

Le cuivre écroué par tréfilage est dans un état ~~très~~ thermodynamiquement instable. Sa structure a été altérée, ses propriétés physiques et mécaniques ont été modifiées.

Mais pour restaurer les propriétés et la structure que le métal possédait avant déformation il faut généralement le rechauffer.

Un échauffement jusqu'aux températures ~~par~~ élevées d'habitude inférieure à 0,2 ou 0,3 T F déclenche le processus de restauration, terme qui traduit la suppression des microcontraintes et en partie des distorsions du réseau cristallin.

La restauration s'effectue en deux étapes, la première appelée détente, a lieu aux températures inférieures à 0,2 TF et la structure n'est pas modifiée.

La deuxième étape de la restauration, appelée polygonisation est une fragmentation des grains en bloc plus petits.

Le cuivre peut polygoniser à une température de 0,25 à 0,3 Tf.

Toutefois, contrairement aux métaux tel que le fer et l'aluminium, le passage de la structure écrouie à la structure polygonisée est, pour le cuivre, le résultat d'une évolution très lente.

### II.2.2. RECRISTALLISATION

#### II.2.2.1- Recristallisation primaire .

La température de recristallisation du cuivre est fonction de la pureté, de la durée de maintien et surtout du taux d'écrouissage.

Toutefois avec la montée de la température à un certain niveau, il se forme de nouveaux grains équiaxiaux.

Les germes de nouveaux grains apparaissent probablement dans les secteurs à densité accrue.

Le processus de la cristallisation primaire présente un avantage car il supprime pratiquement l'écrouissage et le métal retrouve ses propriétés initiales .

Pour le cuivre de nuances industrielles la température est de 200°C environ pour une durée de maintien d'une demi-heure.

.../...

## II.2.2.2- Recristallisation secondaire

Lorsqu'un métal écroui est recuit à une température bien supérieure à sa température de recristallisation primaire une croissance soudaine de grains de dimensions voisines apparaît. Un petit nombre de grains envahit très rapidement la masse recristallisée.

## II.3. CARACTERISTIQUES MECANIQUES

### I - Limite élastique à 0,2 % Ro.2

Comme il est difficile de déterminer avec précision la fin du domaine élastique, on a défini conventionnellement la limite élastique qui correspond à un allongement de 0,2 %. Elle est rapportée à l'unité de l'éprouvette.

### - Résistance à la traction F

C'est le quotient de la charge maximale, par la section initiale de l'éprouvette.

### - Allongement à la rupture :

Il est exprimé en pourcent par rapport à la longueur initiale L de l'éprouvette.

### - Striction de rupture Z% :

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette. Elle est exprimée en pourcent par rapport à la section initiale.

## Durée des Métaux:

On appelle dureté la propriété d'un corps de s'opposer à la déformation plastique provoquée par des contacts de la couche superficielle. On distingue 3 méthodes pour la mesure de la dureté.

### Méthode BRINELL:

Cette méthode consiste à imprimer dans la pièce sous une charge P constante une bille en acier dur et à mesurer après l'enlèvement de la charge, l'empreinte laissée à la surface de métal.

### Méthode RECVELLE:

Cet essai consiste à faire pénétrer dans la couche superficielle de l'éprouvette un cône à pointe en diamant ou une petite bille en acier et à mesurer la profondeur de l'empreinte.

### Méthode VICKERS:

Cette méthode est très utilisée pour mesurer la dureté des pièces de faible épaisseur et des couches superficielles minces à dureté élevée. La dureté est déterminée par l'empreinte laissée dans la surface mise à l'essai.

### III. METHODES EXPERIMENTALES, RESULTATS ET INTERPRETATIONS.

L'étude des propriétés mécaniques a été réalisée aux moyen d'essais de traction, d'allongement et de dureté. Les propriétés électriques ont été étudiées par les mesures des résistivités.

L'étude de la structure a été réalisée grâce à la prise des microphotographies des échantillons.

#### III.1 PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS .

Le fil machine obtenu par coulée continue a été progressivement tréfilé. On a utilisé pour cela une tréfileuse simple et une gamme de filière. Après chaque passe de filière, on prélève les échantillons. La gamme de tréfilage est la suivante .

pas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	14
$\varnothing$ (mm)	8,12	7,32	6,50	5,905	5,20	4,935	4,19	3,74	3,33	3,10	2,68	2,25

#### III.2 - PREPARATION DES EPROUVETTES ET DES ECHANTILLONS MICROGRAPHIQUES;

##### III.2.1.- Préparation des éprouvettes .

Les éprouvettes sont des tronçons de fil qu'on a prélevé après chaque opération de tréfilage.

Le dressage de ces éprouvettes a été fait à la main et à l'aide d'un maillet afin d'éviter toute modification de dimensions et l'écaillage du métal .

Avant d'entamer chaque essai on mesure le diamètre qui est la moyenne de trois valeurs prises à des points différents et dans trois directions différentes.

Les éprouvettes utilisées dans les essais de traction ont une longueur de 500 mm dont 200mm de partie utile. Les éprouvettes destinées aux mesures des résistivités ont une longueur de 1200 mm dont 1000mm de partie utile. ( ces valeurs sont données par les normes AFNOR).

.../...

## II.2.2.- PREPARATION DES ECHANTILLONS MICROGRAPHIQUES:

### III.2.2.1 Prélèvement.

Les échantillons sont tronçonnés à la meule sous arrosage d'eau afin d'éviter tout échauffement et donc modification de structure .

### III.2.2.2.- Enrobage :

Les échantillons sont enrobés à chaud à l'aide d'une presse hydraulique utilisant de la résine (  $t = 80^{\circ} \text{C}$  )

Différentes couleurs et d'empreintes ont été utilisées pour éviter tout risque d'erreur.

### III.2.2.3 - Polissage:

Le polissage des échantillons micrographiques a été réalisé en suivant le cycle opératoire suivant :

Cycle opératoire de polissage lors de préparation des échantillons micrographiques.

ETAPE	ABRASIF	Vitesse tr/mm	A/Refroid	Temps(mm)
1ère	120	250	Eau	5
2	240	250	Eau	3
3	320	250	Eau	3
4	600	250	Eau	3
5	1000	250	Eau	3
6	Drap Velour/Feut	250	Lubrifiant	2
7	" Velour/ "	250	"	5
8	" " /feutr	250	"	5

après chaque étape

- Lavage de l'échantillon dans l'appareil à ultra-sons
- Lavage du papier et de plateau à l'eau
- Vérifier au microscope optique le polissage.

### III 2.2.4 - Attaque chimique:

Trois réactifs ont été essayés

.../...

1er-  $\text{HNO}_3$ . 50% ;  $\text{H}_3\text{PO}_4$  40% ;  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$  10% ;

2èm-  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  10% ;  $\text{H}_2\text{O}$  90%

3è -  $\text{FCl}$  à  $45^\circ\text{C}$  5 ml;  $\text{HCl}$   $d = 1,19$  50 ml;  $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_4$  99% 45ml

Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant le dernier réactif.

### III-3 RECUI DE RECRISTALLISATION

Afin d'obtenir la recristallisation plusieurs recuits ont été faits à des températures de  $20^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $200^\circ$ ,  $300^\circ$ ,  $400^\circ$ ,  $500^\circ$ ,  $600^\circ$ ,  $700^\circ$ , et  $800^\circ\text{C}$ , pendant une durée de 30mm dans des fours électriques

### III.4- TECHNIQUES EXPERIMENTALES :

#### III.4.1 - Essai de traction.

L'essai consiste à exercer sur une éprouvette de longueur  $l = 200\text{mm}$  un effort croissant suivant l'axe de l'éprouvette.

Les essais sont effectués sur 2 machines distinctes ;

la première mesure des charges de 0,005 kg à 55kg, c'est la (JJ instruments X T 560 2).

La deuxième mesure des charges supérieure à 500 kg c'est le dynamomètre. L'essai est effectué à une vitesse de  $75\text{m/mm}$  (N.AFNOR)

#### III.4.2. Mesure de l'allongement.

On porte sur toute la longueur de l'éprouvette des repères de 50mm, après l'essai de traction et la rupture on constitue l'éprouvette et on mesure la nouvelle longueur entre repères.

#### III.4.3- Mesure de la microdureté :

Les essais de dureté ont été effectués par la méthode VICKERS en microdureté. La charge utilisée est de 200 grammes .

#### III.4.4 -Mesures des résistivités électriques.

Pour la mesure de la résistivité nous avons utilisé le pont double de THOMSON qui est un perfectionnement du pont de WHEASTON. Il permet d'éliminer l'influence des fils de connexion dans la comparaison des résistances à faible valeur.

La résistance d'une éprouvette de 1000mm de longueur est mesurée à la température ambiante . Le résultat est ramené à  $20^\circ\text{C}$  en appliquant une relation de correction.

.../...

### III.4.5. Microscopie Optique.

Les microphotographies ont été prise au microscope optique au laboratoire de Mines-Métallurgie .

### III.5 Résultats :

#### III.5.1 - Influence de la déformation par tréfilage sur les propriétés du fil:

Pour montrer l'influence du tréfilage sur les caractéristiques du fil nous avons exprimé le degré de déformation par la variation de la section relative qui est défini par .

$$\varepsilon \% = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$$

où  $S_0, S$  sont respectivement la section initiale et la section finale du fil

#### III.5.1.1.- Evolution des caractéristiques mécaniques au cours de tréfilage .

Le tableau ci-dessous résume les valeurs obtenues au cours des essais.

Diamètre initial avant tréfilage	Section avant rupture	Degré de Déformation	Résistance à la rupture	Allonge. ment	Microdureté VICKECS
mm	mm <sup>2</sup>	%	kg/mm <sup>2</sup>	%	kgf/mm <sup>2</sup>
8,12	51,78	0	24,33	49	92
7,32	42,08	16,83	29,46	21	105
6,50	33,18	35,92	35,86	5	116
5,905	27,38	47,12	38,34	4	117
5,20	21,24	58,98	41,436	2	118
4,935	19,13	63,05	41,82	3	122
4,19	13,788	73,37	43,51	HR*	123
3,744	11,01	78,73	43,59	2,25	126
3,39	9,03	82,56	43,76	0,5	125
3,00	7,07	86,35	44,84	0,5	126
2,68	5,64	89,11	46,09	HR*	126
2,395	4,51	91,29	46,56	HR*	126

\* Hors - repère .

.../....

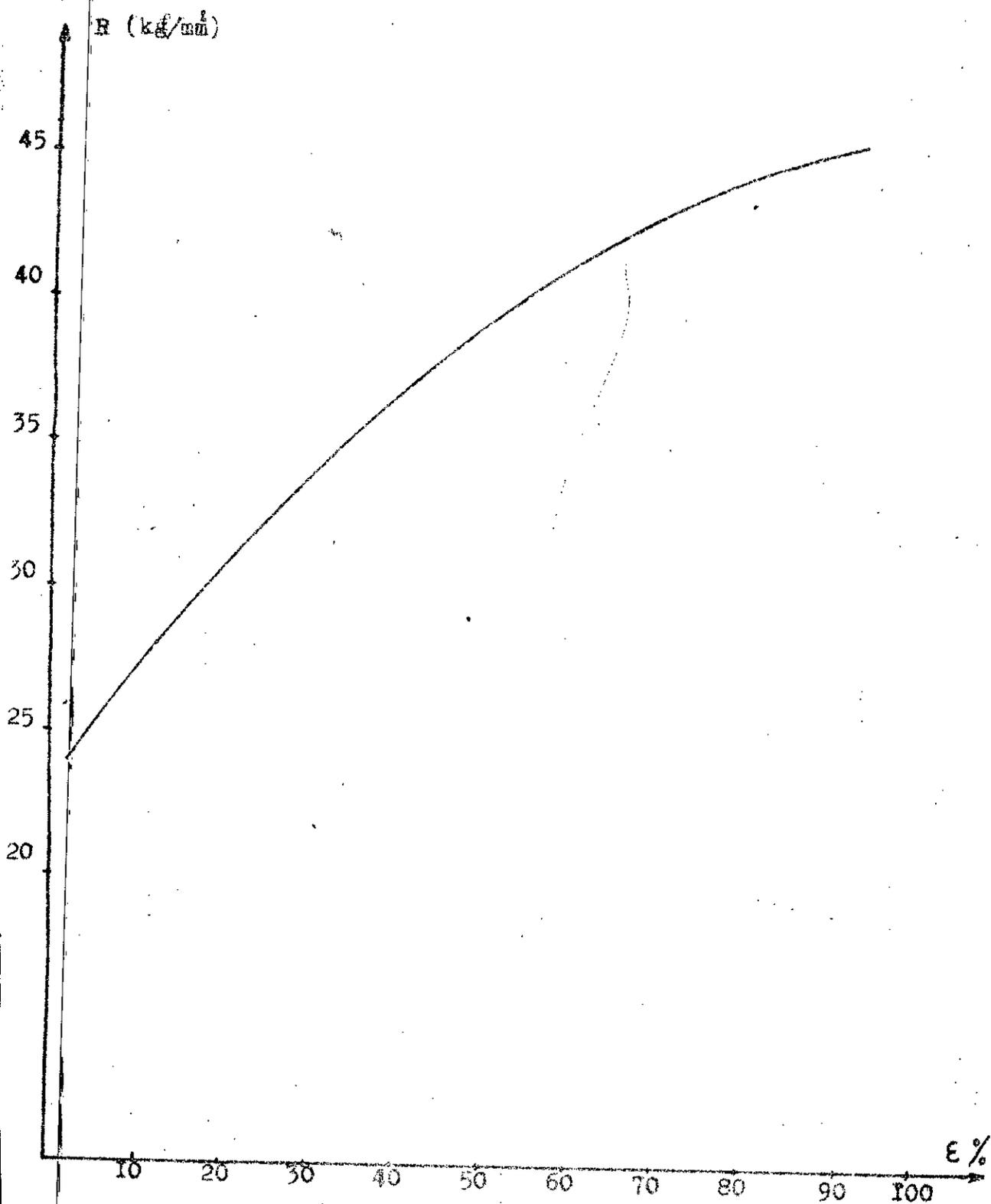


figure 3.1 Evolution de la résistance à la rupture  
en fonction du degré de déformation.

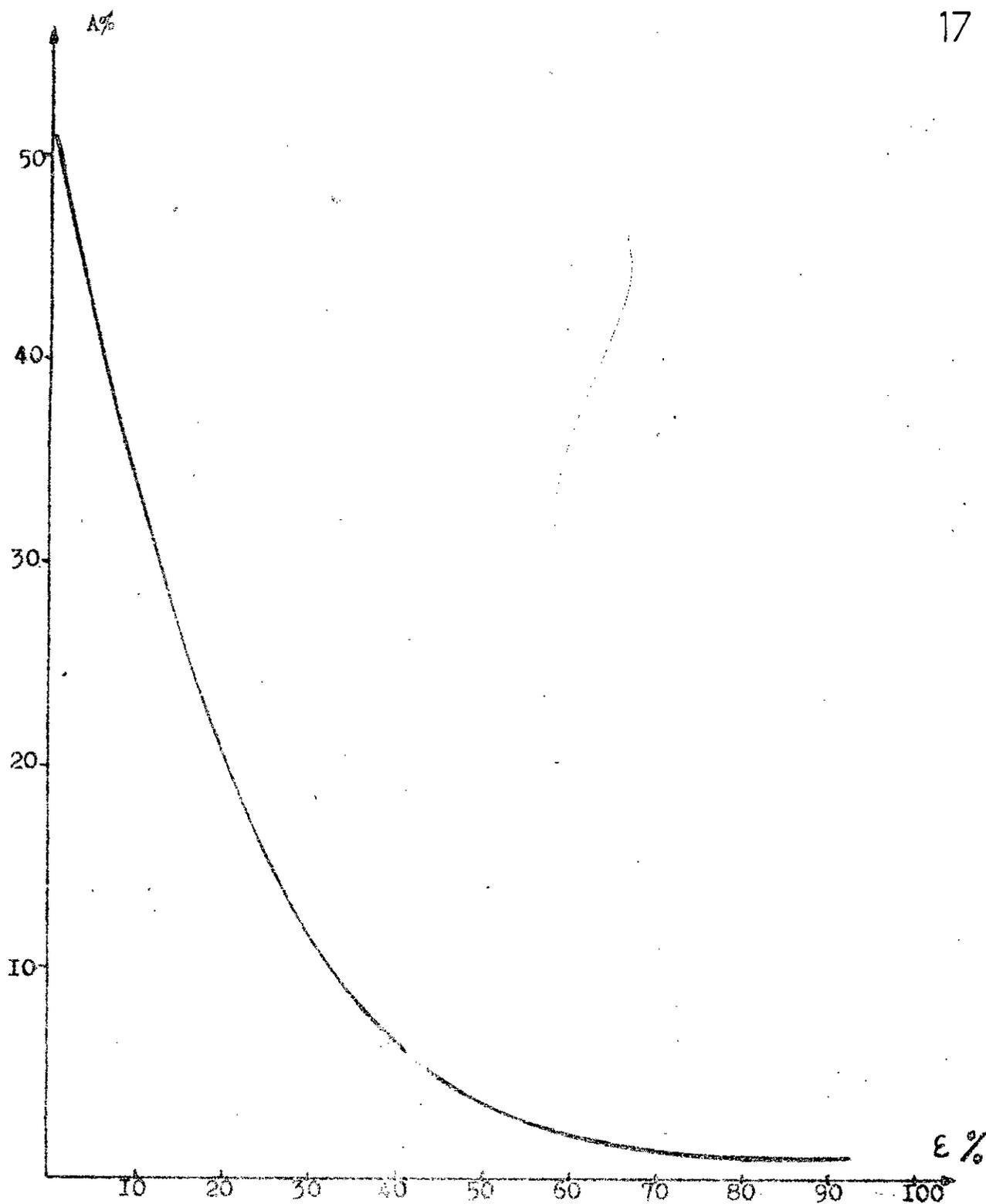


Figure 3.2 Evolution de l'allongement à la rupture en fonction du degré de déformation.

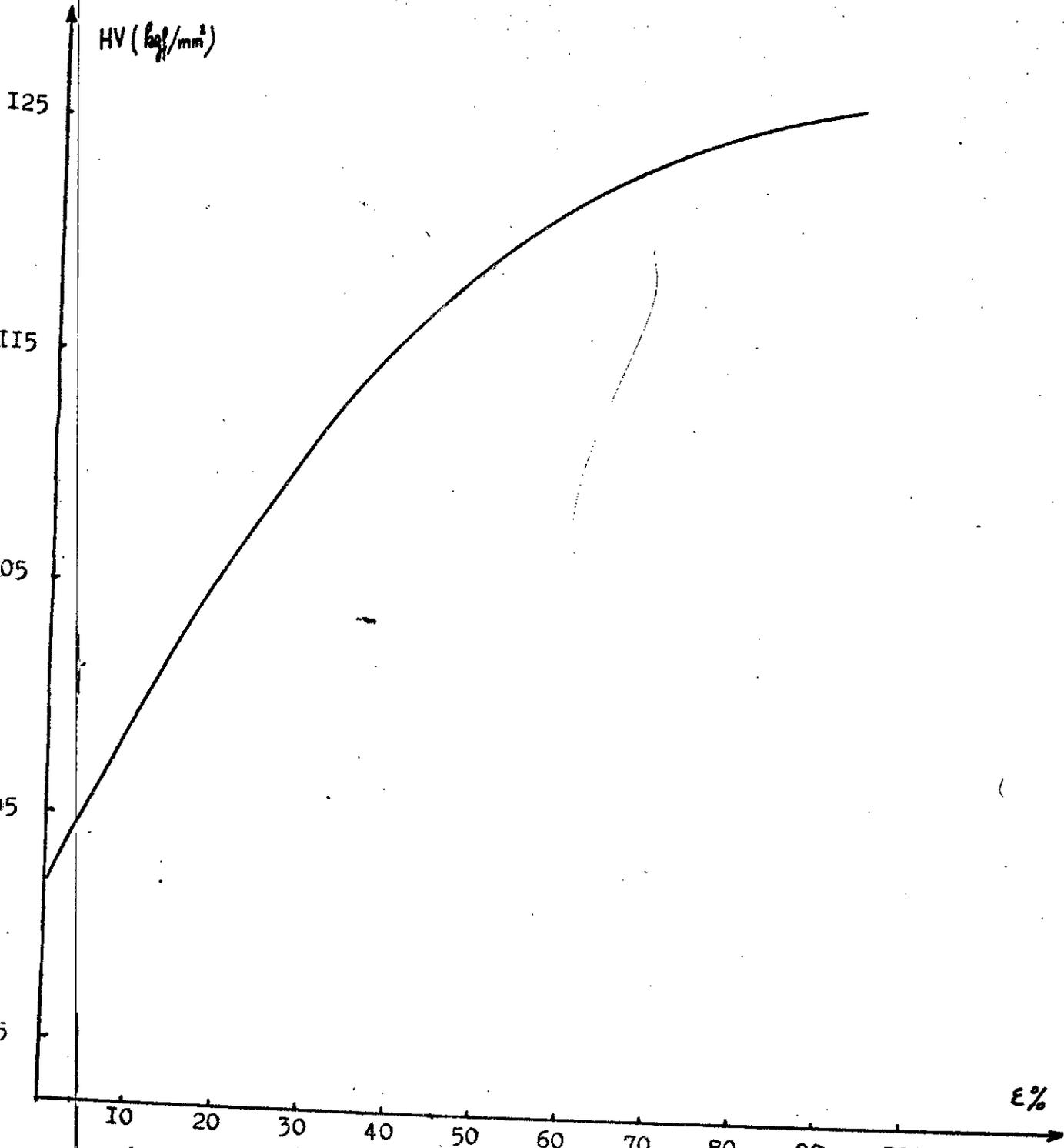


Figure 33 Evolution de la dureté en fonction du degré de déformation

La figure 3.1 montre l'effet de l'écroutissage sur la résistance à la traction. A mesure que le fil s'écroutit la résistance à la traction augmente. L'accroissement est maximal pour les deux premières passes, pour les passes suivantes cet accroissement décroît progressivement.

La déformation par tréfilage entraîne une augmentation des défauts et une concentration des dislocations.

Cette concentration est d'autant plus élevée que le degré de déformation est important.

La figure 3.2 met en évidence l'influence du degré de déformation sur l'allongement du fil. Une diminution très importante est observée dès la première passe. L'augmentation des défauts et la concentration des dislocations est un obstacle à l'allongement du fil.

La figure 3.3. Les mêmes remarques que les 2 courbes précédentes, on observé une augmentation de la dureté avec le degré d'écroutissage, ceci est due comme on l'avait énoncé auparavant à l'augmentation du nombre d'imperfections de la structure cristalline.

III.5.1.2- Evolution des caractéristiques électriques .

Le tableau ci-dessous résume les valeurs obtenues au cours des mesures de la résistivité .

où  $R_t$  : ( Résistance à la température  $t$  )

$t$ : température du local =  $17^{\circ}\text{C}$  .

$R_{20}$  ( Résistance à la température ambiante)

$$R_{20} = \frac{R_t}{1 + X ( t - 20 )} \quad ( \text{M} )$$

$X$  (coefficient de temperature) =  $0,00393 (d^{\circ})^{-1}$

$R_{20}$  Résistivité à la temperature ambiante

$$R_{20} = \frac{R}{4l} \cdot d^2 \quad ( \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{cm}} )$$

$d$  (diamètre de l'éprouvettes) ( mm )

$l$  (longueur de l'prouvette) = 100 cm

.../...

Diamètre	Section	degré de	Rt (17°)	R 20.	$\rho_p$
(mm)	(mm <sup>2</sup> )	%			$\frac{\rho_p}{\text{cm}}$
8,12	51,78	0	3,2135	3,2519	1,684
7,32	42,08	18,73	4,034	4,0821	1,718
6,50	33,18;	35,92	5,169	5,23067	1,7355
5,905	27,38	47,12	6,28	6,35492	1,7399
5,20	21,24	58,98	8,09	8,1865	1,7388
4,9356	19,13	63,05	9	9,1073	1,7422
4,19	13,788	73,37	12,49	12,63069	1,7415
3,744	11,01	78,73	15,7	15,8873	1,74919
3,39	9,03	82,56	19,18	19,40883	1,75262
3,00	7,07	86,25	24,56	24,85301	1,75710
2,68	5,64	89,11	30,82	31,18770	1,75898
2,395	4,51	91,29	38,58	39,04028	1,76071

La figure 3.4 montre que l'écroutissage a pour effet d'augmenter la résistivité électrique. Ceci est due à l'augmentation des défauts dans la structure qui est un obstacle pour la conductivité électrique du fil.

Toutefois il faut remarquer que pour un degré de déformation à 90 % l'augmentation de la résistivité ne dépasse pas 5%. Cette caractéristique a fait du cuivre le conducteur idéal dans le transport de l'énergie électrique.

### III.5.2. Influence du recuit sur les propriétés du fil :

Pour montrer l'influence du recuit sur les propriétés mécanique et électriques du fil, nous avons fait le recuit d'un échantillon ayant subi une déformation de 36 %. Ce recuit a été fait à différentes températures allant de 20°C à 800°C.

.../...

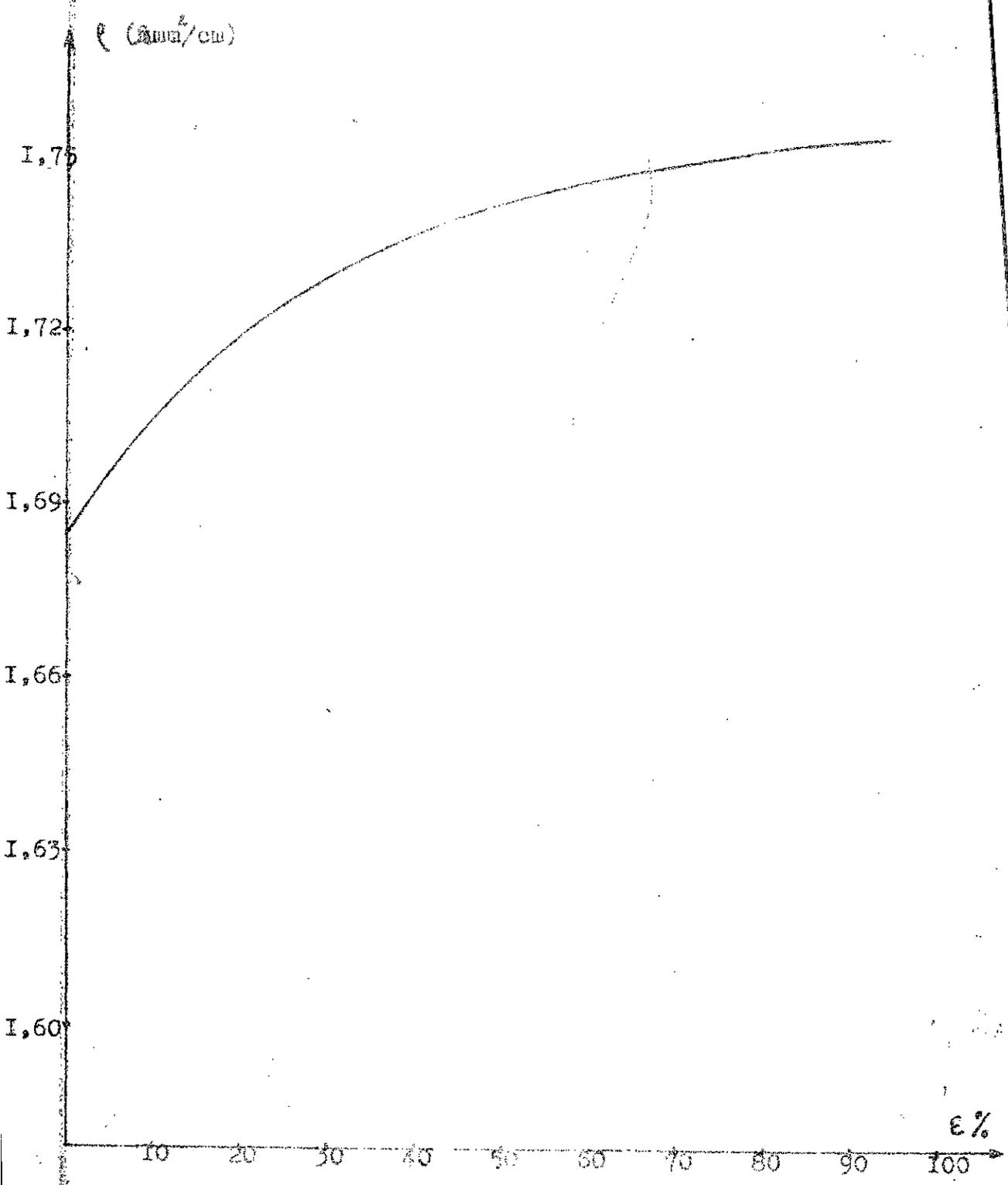


Figure 3.4. Evolution de la résistivité électrique en fonction du degré de déformation

III.5.2.1- Evolution des caractéristiques mécaniques en fonction de la température de recuit :

LE TABLEAU CI-DESSOUS RESUME LES RESULTATS OBTENUS.

T° de Recuit	R	A
° C	kgf / mm <sup>2</sup>	%
20	35,86	5
100	35,23	5
150	35,23	5
200	34,95	5
300	24,70	12
400	20,10	47,5
500	23,74	47,5
600	23,50	46,5
700	23,35	47
800	22,9	45

La figure 3.5 montre 3 stades d'évolution de la résistance à la rupture. La première entre 20° et 200°C où la résistance à la rupture n'est pas sensible à la température de chauffage, c'est le stade de la restauration, il n'y a pas création de nouveaux grains, mais seulement réduction du nombre de défaut et réarrangement de ceux-ci en nouvelles configurations. Le deuxième stade où la résistance à la rupture décroît rapidement c'est le stade de la recristallisation primaire qui supprime pratiquement l'écroutissage et redonne au métal ses caractéristiques initiales.

Le troisième stade c'est le stade de la recristallisation secondaire la résistance à la rupture ne subit pas une très grande variation.

On remarque aussi les 3 stades dans l'évolution de l'allongement en fonction du recuit. Le premier entre 20° et 200°C où l'allongement ne subit pas une variation. Le deuxième entre 200° et 400°C une grande variation est observée au cours de ce stade.

A la fin de ce stade le métal retrouve son allongement initial et ne subit une grande variation au cours du troisième stade.

.../...

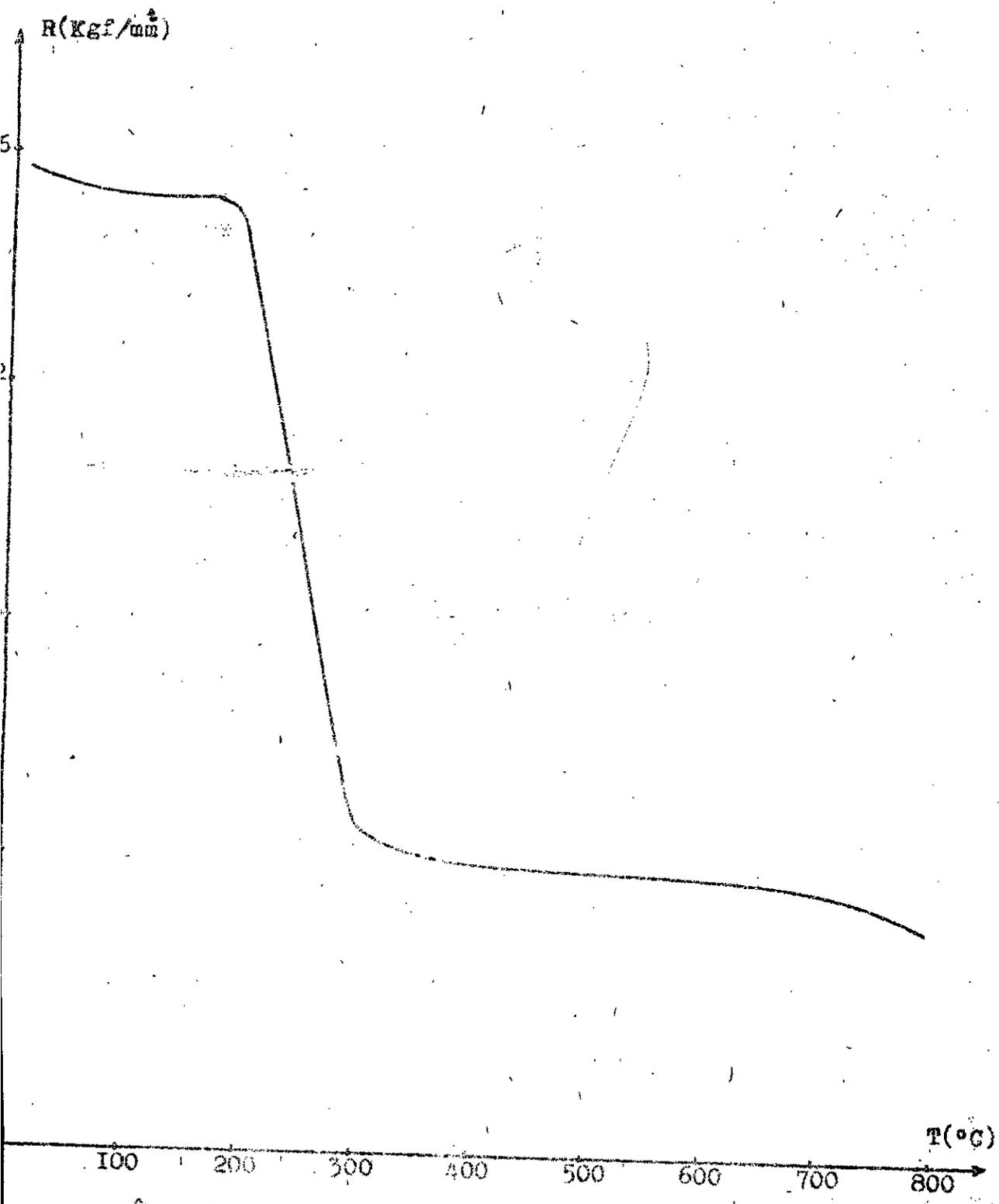


Figure 3.5 Evolution de la résistance à la rupture en fonction de la température de recuit.

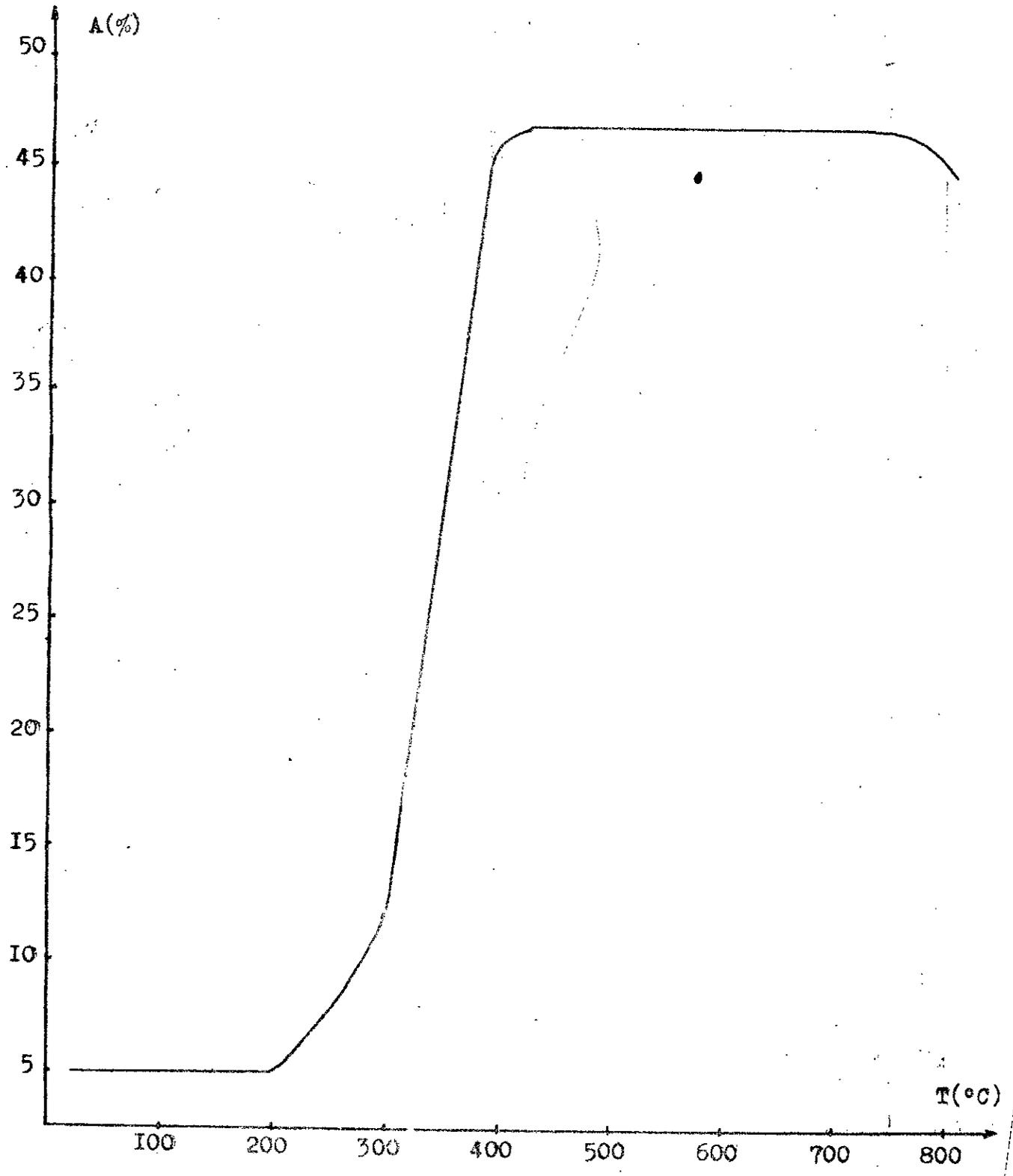


Figure 3.6 Evolution de l'allongement à la rupture en fonction de la température de recuit.

T°	Rt. (ohm)	R <sub>20</sub>	P
°C	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega \text{ mm}^2 / \text{cm}$
20	5,2957	5,234	1,737
100	5,2958	5,234	1,737
150	5,286	5,225	1,734
200	5,286	5,225	1,734
300	5,2653	5,204	1,727
400	5,2654	5,204	1,727
500	5,244	5,183	1,720
600	5,225	5,165	1,714
700	5,225	5,154	1,714
800	5,183	5,123	1,700

La figure 3.5 montre en gros, que quand la température s'élève, on observe une diminution de la résistivité en plusieurs stades attribuables à la migration et à l'élimination des lacunes. A basse température, la résistivité diminue, cette diminution est moins importante que pour les hautes températures.

Entre les températures 20-300° on remarque une diminution de 0,5 % de la résistivité due essentiellement à la disparition des interstitiels pour des températures entre 300 et 800° une diminution importante de la résistivité environ 1,6 %; ceci est due à la disparition des boucles de dislocations créées par la précipitation des défauts ponctuels.

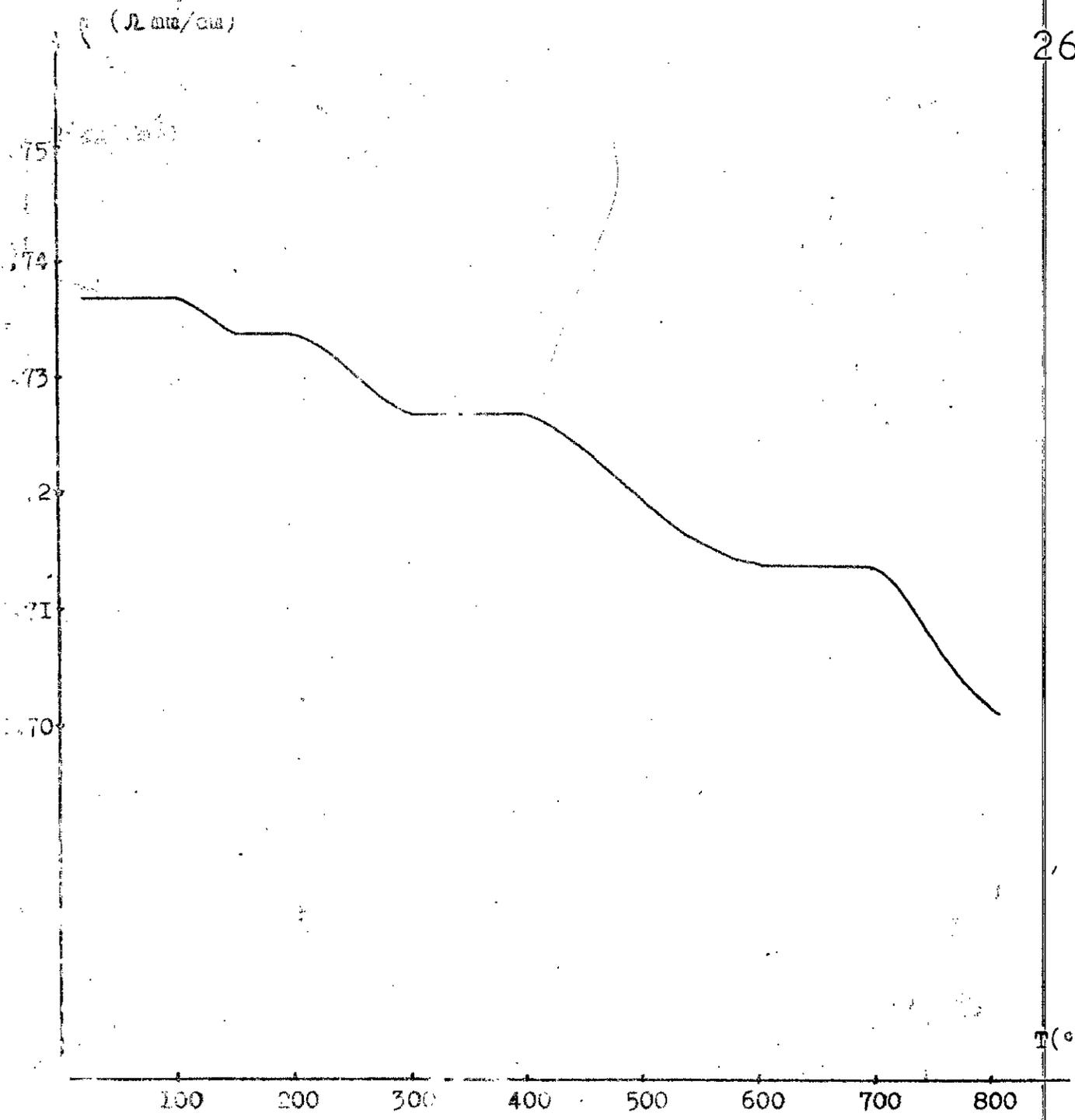


Figure 3.1 Evolution de la résistivité électrique en fonction de la température de recuit.

#### IV. - ETUDE DES STRUCTURES

L'étude des structures du cuivre subissant des déformations successives et des recuits à différentes températures est faite par l'analyse des microphotographies.

Ces dernières présentent l'évolution des structures et des échantillons en coupe transversale et longitudinale.

Pour l'étude des structures du fil écroui, notre <sup>choix</sup> s'est porté sur des fils écrouis à 0%, 36%, 63% et 91%.

Et pour l'étude des structures des fils recuits on a choisi un échantillon déformé ou tréfilé à 36% et recuit à 100°C; 300°C; 500°C et 800°C.

##### IV.I.- Evolution de la structure avec le degré de déformation (photo 1 à 8)

La structure du fil machine 0% de déformation est fixe, la dimension des grains est presque la même dans toute la section du fil.

À premier stade de tréfilage 36% déjà, une nouvelle structure apparaît en coupe transversale les grains perdent de leurs dimensions tandis qu'en coupe longitudinale les grains commencent à s'allonger.

À 63% de déformation la structure est caractérisée par un allongement visible des grains.

À 91% de déformation, la structure des fils tréfilés est très différente de la première structure, cette dernière est remplacée par une structure fibreuse très fine, uniformément répartie et sensiblement parallèle à la direction de tréfilage. À ce stade de déformation la résistance à la rupture et la dureté sont très importantes tandis que l'allongement est amoindri.

On peut caractériser l'évolution de la structure au cours de tréfilage par le rapport entre la longueur des grains selon l'axe du fil et leur longueur dans le sens transversale. Cette disproportion entre les dimensions longitudinales croît avec le degré de déformation.

et transversales

-Structure du fil écroui:  
Coupe transversale



photo 1  
degré de déformation 0%  
(x 320 )



photo 2  
degré de déformation 36%  
(x 320 )

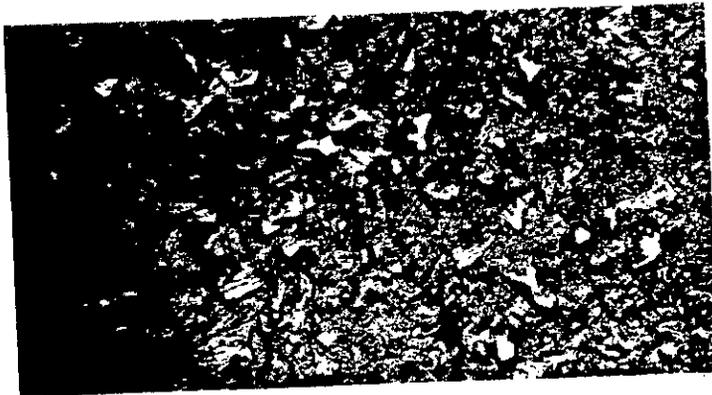


Photo 3  
degré de déformation 63%  
(x 320 )

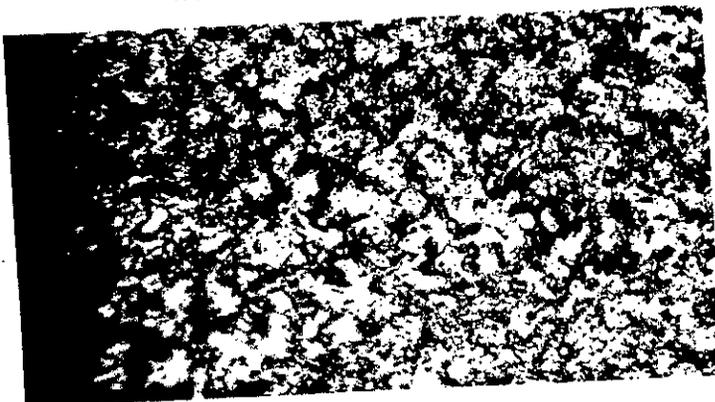


photo 4  
degré de déformation 91%  
(x 320 )

-Structure du fil écroui:  
Coupe longitudinale



photo 5  
degré de déformation 0%  
(x 320 )



photo 6  
degré de déformation 36%  
(x 320 )



photo 7  
degré de déformation 63%  
(x 320 )

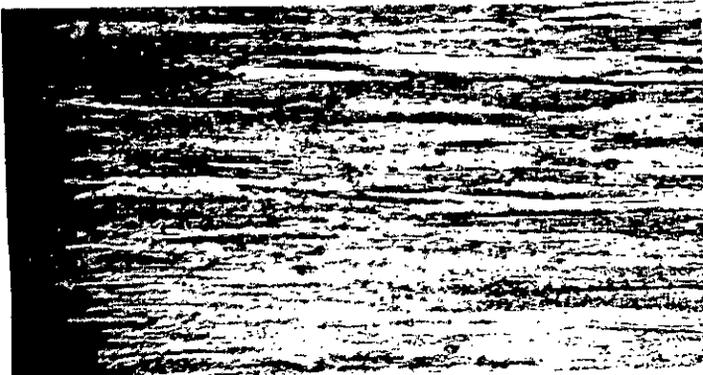


photo 8  
degré de déformation 91%  
(x320 )

IV.2.- Evolution de la structure du fil en fonction de la température de recuit ( photo 9 - 16).

Le fil écroui à 36% est recuit à différentes températures.

A 100°C on ne remarque pas un changement dans la structure (photo 2 et 9 en coupe transversale) et (photo 6 et 13 en coupe longitudinale), les grains restent déformés.

A 300°C les dimensions des grains deviennent plus grandes, la structure qu'avait le fil auparavant disparaît complètement.

A cette température le fil commence à retrouver ces propriétés initiales, la résistance à la rupture diminue sensiblement alors que l'allongement est amélioré c'est le processus de la recristallisation.

Plus la température de recuit augmente 500 et 800°C les dimensions des grains sont très importantes.

A 800°C et plus apparaît le phénomène de la suschauffe, le métal commence à perdre de sa résistance à la rupture et même de son allongement.

-Structure du fil recuit:  
Coupe transversale

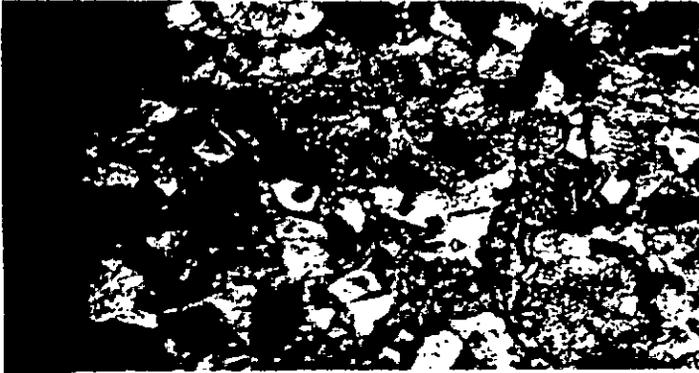


photo 9

degré de déformation 36%

température de recuit 100°C

(x 320)



photo 10

degré de déformation 36%

température de recuit 300°C

(x 320)



photo 11

degré de déformation 36%

température de recuit 500°C

(x320)



photo 12

degré de déformation 36%

température de recuit 800°C

(x 320)

-Structure du fil recuit:  
Coupe longitudinale



photo I3

degré de déformation 36%  
température de recuit 100°C  
(x 320)



photo I4

degré de déformation 36%  
température de recuit 300°C  
(x 320)



photo I5

degré de déformation 36%  
température de recuit 500°C  
(x 320)



photo I6

degré de déformation 36%  
température de recuit 800°C  
(x 320)

VI/ Généralités

Un banc de tréfilage simple est constitué principalement d'une bobine d'un dévidoir et d'une filière.

Toutefois avec l'évolution des techniques et la maîtrise du procédé de tréfilage plusieurs types de machines ont fait leur apparition.

VI.I/ Types de machines à tréfiler

Machines simples ( fig 5.1)

Dans ce genre de machine, chaque bobine est associée à un dévidoir qui l'alimente et elle est indépendante des bobines voisines.

Machines multiples (fig 5.2)

a/ Machines dites continues. Dans lesquelles les vitesses des bobines sont automatiquement équilibrées de façon que chaque bobine débite exactement la quantité de fil nécessaire à la suivante. Chaque bobine se comporte comme une bobine simple sans qu'il ait glissement du fil par rapport à la bobine. Sur chacune un certain nombre de tours de fil est empilé à l'enfilage, ce qui permet le refroidissement du fil entre chaque passe.

b/ Machines dites sans glissement ou à accumulation (fig 5.3)

Dans ces machines il n'y a pas équilibrage automatique des vitesses. Les séries de filières, sont calculées pour que chaque filière débite plus de fil que ce qui est nécessaire à la suivante, d'où une accumulation du fil sur chaque bobine.

Cette accumulation de fil permet

De refroidir le fil

De ne pas interrompre la production des bobine aval dans le cas d'un arrêt des bobines amont.

c/ Machines à glissement ( fig 5.4)

Dans ces machines, il n'y a ni équilibrage des vitesses entre les passes ni accumulation. Pour compenser les différentes <sup>de vitesses</sup>, il y a glissement du fil sur les bobines.

V.2/ Traitement thermique utilisés dans le tréfilage ont pour but :

- soit d'obtenir des fils machines ou des fils présentant une structure adapté au tréfilage ou à la déformation adaptée ultérieure( récuît hyper trempe).
- soit de détruire l'effet de l'érouissage et d'adoucir le fil (récuît)
- soit de communiquer au fil des caractéristiques particulières (trempe).

V.2/ Calcul du banc de tréfilage

Le banc de tréfilage dont on s'est proposé d'étudier va servir dans une grande chaîne de tréfilage qui se compose de plusieurs bancs et un bon nombre de dispositifs de récuīts.

Le banc va recevoir le fil machine de diamètre  $\phi_1$  pour le tréfiler au maximum. Un deuxième banc va recevoir ce fil et va le retréfiler et ainsi jusqu'à l'obtention du diamètre final qu'on désire. Entre 2 bancs de tréfilage se trouve un dispositif de récuît qui a pour tâche de redonner au fil ses propriétés initiales et donc la possibilité d'être retréfiler. Le récuît se fait en continue.

V.2.I/ - Détermination des paramètres principaux du banc de tréfilage

V. 2.I.I/ Détermination de l'allongement logarithmique et le choix du nombre de passes

On a vu dans la partie "Etude des structures et des propriétés des métaux après tréfilage" que l'allongement du fil est plus intéressant au delà d'un certain taux d'érouissage. Et donc il n'est plus économique de faire subir au fil une autre opération de tréfilage.

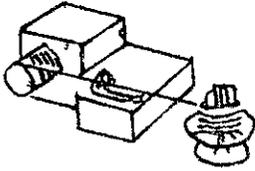


Figure 5.1. Machine simple

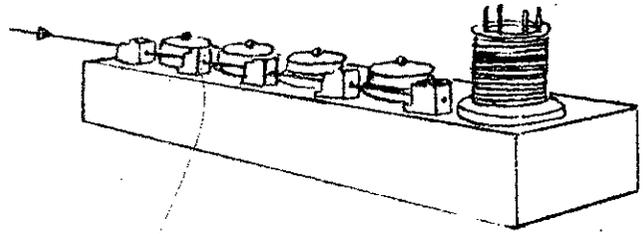


Figure 5.2. Machine multiple continue

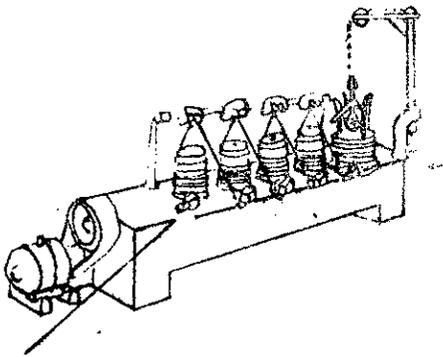


Figure 5.3. Machine multiple à accumulation

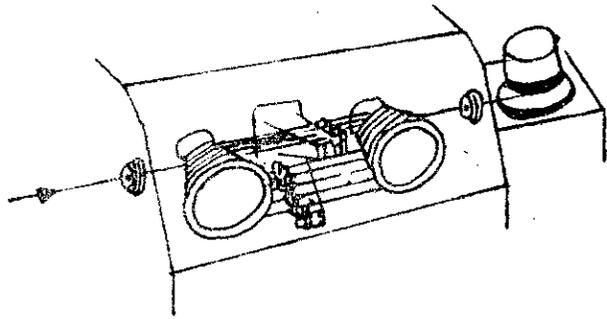


Figure 5.4. Machine multiple à glissement (à cône)

C'est dans ce sens qu'on s'est intéressé à l'allongement obtenu lors des essais de rupture.

Toutefois ces essais donnent un allongement à la rupture.

En ce qui nous intéresse on a besoin d'un allongement avant que le fil ne présente les symptômes de rupture c'est à dire l'apparition de la striction.

Pour le cuivre qu'on a utilisé cet allongement est de l'ordre de 40%.

$$A = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$A = \frac{L}{L_0} - \frac{L_0}{L_0} = e^\psi - 1$$

d'où  $\psi = \ln (1+A)$

$$\psi = \ln (1+0,4) = 33\%$$

V2.I.2/ Diamètre du fil après l'opération de tréfilage

volume initial = volume final

$$S_i \cdot l_i = S_f \cdot l_f$$

$$\frac{\pi}{4} d_i^2 l_i = \frac{\pi}{4} d_f^2 l_f$$

$$\left(\frac{d_i}{d_f}\right)^2 = \frac{l_f}{l_i}$$

$$\psi = \ln \frac{l_f}{l_i}$$

$$\psi = \ln \left(\frac{d_i}{d_f}\right)^2 \Rightarrow d_f = d_i e^{-\frac{\psi}{2}}$$

$$d_i = 8,12 \text{ mm}$$

$$\psi = 0,33$$

$$\text{d'où } d_f = 8,12 e^{-\frac{0,33}{2}} = 6,88 \text{ mm}$$

V2.I.3/ Détermination de la vitesse de tréfilage

la vitesse de tréfilage est donnée dans les différents ouvrages elle est fonction du diamètre du fil et du matériau.

D'après technique de l'ingénieur pour un diamètre du fil de 2 mm et pour le cuivre, la vitesse peut atteindre 700 m /mm on prend en compte  $V = 700 \text{ m/mm} = 12 \text{ m/s}$ .

En considérant que le débit traversant une filière est constant on a :

$$V_f \cdot S_f = V_i \cdot S_i \Rightarrow V_i = V_f \frac{S_f}{S_i} = V_f \left( \frac{d_f}{d_i} \right)^2$$

$V_f$  : Vitesse finale du fil après tréfilage = 12 m/s

$d_f$  : Diamètre final du fil après tréfilage = 2 mm

$d_i$  : Diamètre du fil machine = 8,12 mm

$$V_i = 12 \cdot \left( \frac{2}{8,12} \right)^2 = 0,73 \text{ m/s}$$

Dans notre cas on cherche la vitesse du fil après l'opération de tréfilage.

$$V_{i+1} = V_i \left( \frac{d_i}{d_{i+1}} \right)^2$$

$V_i$  : Vitesse du fil après la passe de tréfilage.

$d_i$  : Diamètre initial = 8,12 mm.

$d_{i+1}$  : Diamètre après la passe de tréfilage = 6,88 mm

$V_i$  : Vitesse du fil avant l'opération de tréfilage = 0,73 m/s.

$$V_{i+1} = 0,73 \left( \frac{8,12}{6,88} \right)^2 = 1,02 \text{ m/s}$$

2.1.4/ Vitesse périphérique de la bobine.

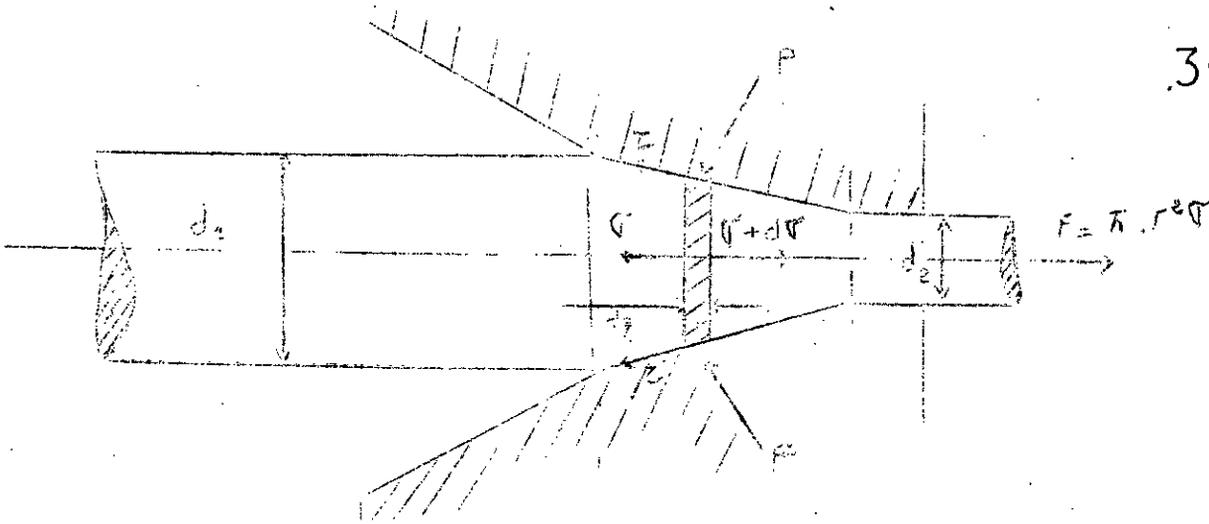
On considère que la bobine et le fil ont même vitesse, c'est à dire qu'il n'y a pas de glissement entre le fil et la bobine.

$$V_b = 1,02 \text{ m/s}$$

Toutefois avec l'utilisation du lubrifiant et le glissement qui existe toujours entre différents matériaux cette vitesse n'est jamais réalisée.

2.1.5/ - Calcul de la contrainte et de l'effort de tréfilage.

2.1.5.1/ - Calcul de la contrainte.



A défaut d'une solution mathématique rigoureuse, des formules ont été établies, donnant des valeurs approchées de la contrainte de tréfilage.

La plus utilisée de ces formules est celle dite de Siebel-Bonzel.

Elle cumule :

- L'effort principal de déformation.
- L'effort de frottement sur la paroi .
- Les pertes par glissement internes dues à la non-conservation des surfaces sphériques :

$$\sigma_c = K_{fm} \psi \left[ 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{\psi}{3} \cdot \frac{\alpha}{\psi} \right]$$

où :  $K_{fm}$  : contrainte moyenne entre son état à l'entrée de la filière et sur état final à la sortie.

$\psi$  : l'allongement logarithmique.

$\mu$  : coefficient de frottement.

$\alpha$  : demi angle d'ouverture de la filière en radians.

La contrainte d'écoulement d'un métal est fonction de l'allongement

la vitesse généralisée, la pureté du métal et la température de travail.

Pour le cuivre de pureté 99,95%.

Une vitesse généralisée lente.

Une température de travail de 18°C.

La contrainte d'écoulement est donnée par la courbe de la figure 55

$$\varphi = 0,39$$

$$Kf_0 = 80 \text{ MPa}$$

$$Kf_1 = 306 \text{ MPa}$$

$$Kf_m = \frac{(Kf_0 + Kf_1)/2}{2} = \frac{(80 + 306)/2}{2} = 193 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,05$$

Les angles d'ouvertures des filières varient entre 8 et 10°.

Pour les filières du cuivre ces angles varient entre 12 et 16°

On prend  $\alpha = 7^\circ \approx 0,122 \text{ rad}$

$$\bar{\sigma} = 193 \cdot 0,33 \left[ 1 + (0,05/0,122) + (2/3)(0,122/0,33) \right] = 105,490 \text{ MPa}$$

2.I.5.2/ Calcul de l'effort de tréfilage :

$$F = \pi r^2 \bar{\sigma} \text{ (N)}$$

r : rayon du fil après la passe de tréfilage = 3,44 mm

$\bar{\sigma}$  : contrainte d'écoulement = 105,490 MPa

$$F = \pi (3,44)^2 \cdot 105,490 = 3922 \text{ N}$$

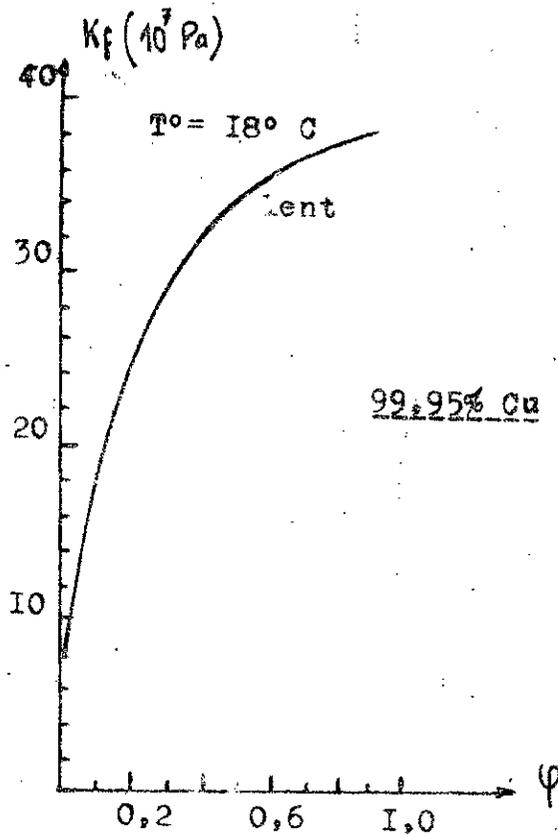
2.I.5.3/ Calcul de la puissance nécessaire

$$P = F \cdot V$$

F : effort de tréfilage = 3922 N

V : vitesse de la bobine = 1,02 r/s

$$P = 3922 \cdot 1,02 = 4000 \text{ w} = 4 \text{ kw}$$



Courbe de variation de  $K_f$  en fonction de l'allongement logarithmique  $\psi$  de la vitesse de déformation généralisée  $\dot{\psi}$  et de la température  $T$ .

Figure 5.5. D'après P. BAQUE (Mise en forme des métaux. Tome 2)

2.2/ Choix du moteur

On choisit un moteur électrique de puissance nominale supérieure à celle développée pour le tréfilage afin d'éviter tout risque de surcharge sur le moteur qui pourroit être due à une défaillance dans le procédé de tréfilage ( usure de la filière, usure des surfaces de la bobine ... etc). Notre choix s'est porté sur un moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit qui assure une sécurité de fonctionnement maximale avec un couple de démarrage élevé et un faible courant de démarrage. Il évite ainsi dans une large mesure le couple minime de démarrage.

nbr de pôles	type	n	$M_n$	$I_{n220v}$	$I_{n380v}$	$I_{n500v}$
		tr/min	Nm	A	A	A
2p = 6	DA6-38E	900	56	24	13,9	10,6
$\cos \phi$	$I_d/I_n$	$T_d/T_n$		$T_{max}/T_n$	$I_{rot}$	P
					kg m	kw
0,75	5,7	2,6		2,6	0,045	5,5

$P_n$  : puissance nominale sur l'arbre

$n$  : valeur indicative de la vitesse de l'arbre rotorique

$I_n$  : courant de nominal sous la tension nominale indiquée

$I_d/I_n$  : courant de démarrage

$T_d/T_n$  : couple de démarrage

$T_{max}/T_n$  : couple maximal relatif

$M_n$  : couple nominal sur l'arbre rotorique du moteur

Le type de moteur D. 6-38E est de la construction suivante :

Construction de la bobine :

2.3/ - Calcul des rapports de transmission

- Rapport de transmission total  $I_t$

$$I_t = \frac{W_{\text{mot}}}{W_{\text{bobine}}} = \frac{M_{\text{mot}}}{M_{\text{bobine}}}$$

$$M_{\text{mot}} = 930 \text{ tr/mm}$$

$$M_{\text{bobine}} = \frac{60 \cdot W_b}{2\pi}$$

$$W_{\text{bobine}} = \frac{V_b}{r_b}$$

$V_b$ : vitesse périphérique de la bobine = 1,02 m/s

$r_b$ : rayon de la bobine = 0,225 m

$$W_{\text{bobine}} = \frac{1,02}{0,225} = 4,53 \text{ rd/s}$$

$$M_b = \frac{60 \times 4,53}{2\pi} = 43,26 \text{ tr/mm}$$

$$I_t = \frac{930}{43,26} = 21,50$$

On choisit un banc à 2 types de transmission. La première par courroie, en supposant  $M_c = 1$  et une deuxième par engrenage avec  $M_e = 1$ .

- Rapport de transmission pour le courroie soit  $I_t = 1,62$ .

- Rapport de transmission pour le train d'engrenage

$$I_1 = 3,75$$

$$I_2 = 3,56$$

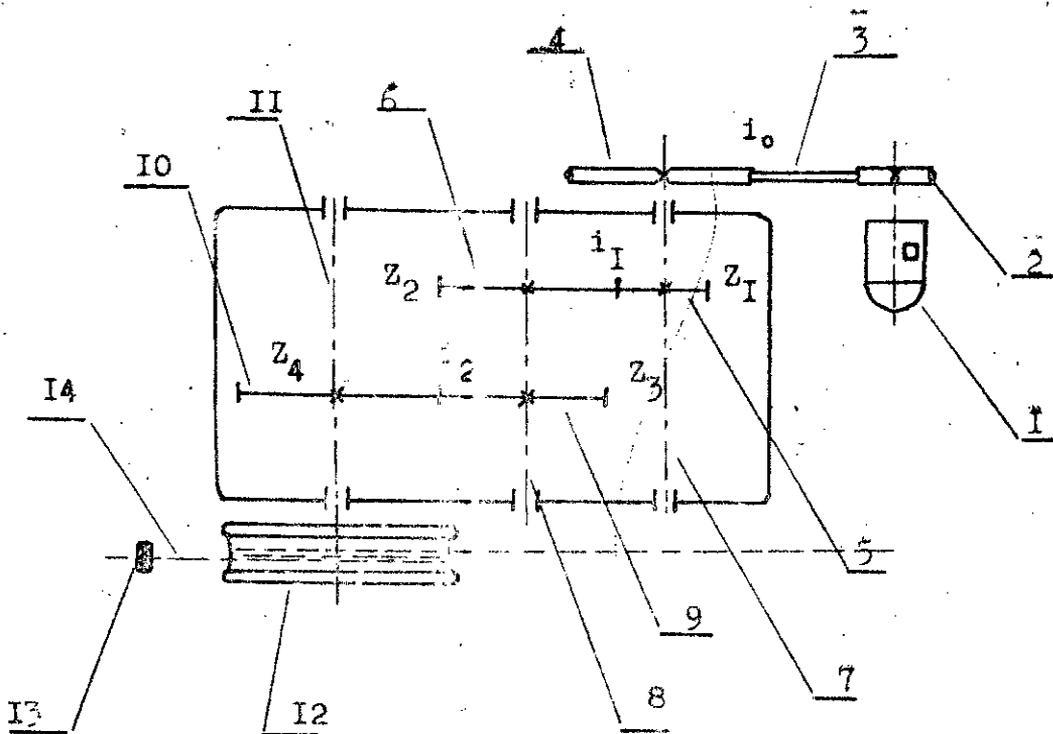
2.4/ - Calcul des couples sur les arbres

- Couple sur l'arbre d'entrée  $M_1 = M_{\text{mot}} \cdot I_0 = 56,47 \times 1,62 = 91,48 N_m$ .

- Couple sur l'arbre intermédiaire  $M_2 = M_1 \times I_1 = 91,48 \times 3,75 = 343,05 N_m$

- Couple sur l'arbre de la bobine  $M_3 \times I_2 = 343,05 \times 3,56 = 1221,2 N_m$

V 2.5 - Chaîne cinématique :



- I. Moteur électrique
2. Poulie menante
3. Courroie trapézoïdale
4. Poulie menée
5. Pignon I (étage I)
6. Roue 2 "
7. Arbre d'entrée
8. Arbre intermédiaire
9. Pignon I (étage 2)
10. Roue 2 (étage 2)
- II. Arbre de la bobine
- I2. Bobine
- I3. Filière
- I4. Fil

V 2.6/ - Effort réel de tréfilage sur la bobine

$$F_{tr} = \frac{M_3}{f_b} = \frac{1221,26}{0,225} = 5427.N.$$

V 2.7/ - Contrainte sur le fil

$$\sigma_{max} = \frac{F_{tr}}{S} = \frac{5427}{tr.(3,44)^2} = 146 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{max} = 146 \text{ MPa} < K_{f1} = 306 \text{ MPa}$$

Notre banc de tréfilage peut travailler sans risque de rupture du fil.

V 2.8/ - Calcul de la transmission par courroie :

Ce calcul est fait d'après la méthode de V. DOBROLSKI. dans son ouvrage "Eléments de machines" Edition MIR MOUSCOU.

1er étape : Calcul préalable

a/ - Choix de la courroie :

On choisit une courroie trapézoïdale en caoutchouc avec les caractéristiques suivantes :

G x H	22 x 14
Largeur pratique de la courroie $l_p$ (mm)	19
Diamètres pratiques minimant des poulies (mm)	125
Charge de rupture à la traction ( $N/mm^2$ )	3
Vitesse max recommandée ( m/s )	25

- Diamètres des poulies menée et menante:

$$d_1 = (1000 \text{ à } 2000) \times \sqrt[3]{\frac{P \text{ (kw)}}{n \text{ (tr/m}_n\text{)}}}$$

$$d_1 = 1200 \times \sqrt[3]{\frac{5,5}{930}} \approx 227 \text{ mm} \quad \text{On prend } d_1 = 250 \text{ mm}$$

d'où  $d_2 = i_0 \cdot d_1 = 1,62 \times 250 = 405 \text{ mm}$

- Vitesse périphérique

$$V = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 250 \times 930}{60} = 12,17 \text{ m/s}$$

- Angle embrassé

$$\alpha = 180 - \frac{(d_2 - d_1)}{E} \times 60$$

E entraxe = 750 (pour raison de construction)

$$\alpha = 180 - \frac{(405 - 250)}{750} \times 60 = 167,6$$

- Longueur de la courroie

$$L = 2E + \frac{\pi}{2} (d_2 + d_1) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4E}$$

$$L = 2 \times 750 + \frac{\pi}{2} (405 + 250) + \frac{(405 - 250)^2}{4 \times 750} = 2537 \text{ mm}$$

On prend  $L = 2800 \text{ mm}$

- Entraxe définitif

$$E = \frac{L - \frac{\pi}{2} (d_2 + d_1) - \frac{\pi \beta}{180} (d_2 - d_1)}{2 \cos \beta}$$

$$\beta = \frac{180 - \alpha}{2} = \frac{180 - 167,6}{2} = 6,2$$

$$E = \frac{2800 - \frac{\pi}{2} (405 + 250) - \frac{\pi \cdot 6,2}{180} (405 - 250)}{2 \cos 6,2} = 882 \text{ mm}$$

- Détermination du nombre de courroies :

$$k = \frac{Stot}{S} \quad \text{où} \quad Stot = \text{section totale des courroies}$$

$$S = \text{section d'une courroie}$$

$$Stot = \frac{T}{(\bar{V}_0)}$$

$$T = \frac{P e^{f\alpha}}{V (e^k - 1)}$$

$$P = 5500 \text{ w}$$

$$V = 12,17 \text{ m/s}$$

$$f = 0,3 \text{ (poulie en acier, courroie en caoutchouc)}$$

$$\alpha = 167^\circ,6 = 2,925 \text{ rad}$$

$$T = \frac{5500 e^{0,3 \times 2,925}}{12,17 (e^{0,3 \times 2,925} - 1)} = 774 \text{ N.}$$

$$\text{et } \bar{V}_0 = 3 \text{ N/mm}^2.$$

$$\text{d'où } Stot = \frac{774}{3} = 258 \text{ mm}^2$$

$$\text{et } S = 24 \times 18 = 308 \text{ mm}^2$$

$$k = \frac{258}{308} = 1 \text{ courroie.}$$

- Sollicitations des arbres

Pour une transmission par courroie, un arbre est sollicité par un effort R

$$R = KF$$

K = 2,5 pour courroie trapézoïdale

$$F = \frac{P}{V} = \frac{5500}{12,17} = 452 \text{ N.} \quad \text{d'où } R = 2,5 \times 452 = 1130 \text{ N.}$$

$\bar{V}$  2.9/ - Calcul de la transmission par engrenage

$\bar{V}$  2.9.1/ - Calcul cinématique de engrenages

Nous adoptons les engrenages à denture hélicoïdales qui assure une douceur d'entraînement et un fonctionnement silencieux.

I étage · Rapport de transmission  $i_1 = 3,75$

$$\begin{array}{l} \alpha_n = 20^\circ \\ \beta_1 = 24^\circ \end{array} \quad \alpha_t = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} \alpha_n}{\cos \beta_1} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} 20}{\cos 24} \right) = 21,723^\circ$$

Le nombre minimum de dents sans interférence de taillage est donnée par la relation.

$$Z' = \frac{2 \cos \beta}{\sin^2 \alpha_t} = \frac{2 \cos 24}{\sin^2 21,723} = 14 \text{ dents}$$

On prend  $Z_1 = 20$  dents

et  $Z_2 = 75$  dents

avec  $m_{n1} = 3$  mm

$$a = \frac{m_{n1}}{\cos \beta_1} \left( \frac{Z_1 + Z_2}{2} \right) = \frac{3}{\cos 24} \left( \frac{20 + 75}{2} \right) = 156 \text{ mm}$$

On prend  $a = 160$  mm

$$\cos \beta_1 = \frac{m_{n1}}{a} \left( \frac{Z_1 + Z_2}{2} \right) = \frac{3}{160} \left( \frac{20 + 75}{2} \right) = 0,891.$$

d'où  $\beta_1 = 27,048^\circ$ .

2° étage · Rapport de transmission  $i_2 = 3,56$

$$\begin{array}{l} \alpha_n = 20^\circ \\ \beta_2 = 27^\circ \end{array} \quad \alpha_t = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} \alpha_n}{\cos \beta_2} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} 20}{\cos 27} \right) = 22,219^\circ$$

$$Z' = \frac{2 \cos \beta}{\sin^2 \alpha_t} = \frac{2 \cos 27^\circ}{\sin^2 22,219} = 13 \text{ dents}$$

On prend  $Z_3 = 25$  dents

$Z_4 = 89$  dents.

$$a = \frac{m_n}{\cos \beta_2} \cdot \frac{(Z_3 + Z_4)}{2} = \frac{4}{\cos 27^\circ} \cdot \frac{(25 + 89)}{2} = 255,89 \text{ mm}$$

On prend  $a = 260 \text{ mm}$

$$\text{d'où } \cos \beta_2 = \frac{m_n}{a} (Z_3 + Z_4) = \frac{4}{260} (25 + 89) = 0,8769 \text{ et } \beta_2 = 28,727^\circ$$

I° Etage

Symbole	Dénomination	Calcul
$m_n$	module réel	$m_n = 3 \text{ mm}$
$\beta$	angle d'hélice	$= 27^\circ,048$
$p_n$	pas réel	$p_n = m_n \cdot \pi = 3 \cdot \pi = 9,425 \text{ mm}$
$p_t$	pas apparent	$p_t = p_n / \cos \beta = 9,425 / \cos 27,048$ $= 10,582 \text{ mm}$
$m_t$	module apparent	$m_t = m_n / \cos \beta = 3 / \cos 27,048$ $3,368 \text{ mm}$
$Z$	nombre de dents	$Z_1 = 20 \quad Z_2 = 75$
$d$	diamètre primitif	$d_1 = Z_1 m_t = 20 \times 3,368$ $= 67,36 \text{ mm}$  $d_2 = Z_2 m_t = 75 \times 3,368$ $= 252,6 \text{ mm}$
$h_a$	saillie	$h_a = m_n = 3 \text{ mm}$
$h_f$	creux	$h_f = 1,25 m_n = 1,25 \times 3$ $= 3,75 \text{ mm}$
$h$	hauteur de dent	$h = h_a + h_f = 3 + 3,75$ $= 6,75 \text{ mm}$
$d_a$	diamètre de tête	$d_{a1} = d_1 + 2h_a = 67,36 + 2(3)$ $= 73,36 \text{ mm}$  $d_{a2} = d_2 + 2h_a = 252,6 + 2(3)$ $= 258,6 \text{ mm}$

$d_f$	diamètre de pied	$d_{f1} = d_1 - 2h_f = 67,36 - 2(3,75)$ $= 59,86 \text{ mm}$ $d_{f2} = d_2 - 2h_f = 252,6 - 2(3,75)$ $= 245,10 \text{ mm}$
b	largeur de la denture	$b \geq \frac{d \cdot m_n}{\sin \alpha_n} = \frac{d_1 \cdot m_n}{\sin 27,048}$ $= 20,725 \text{ mm}$ <p>soit <math>b = 30 \text{ mm}</math></p>
$\alpha_n$	Angle de pression réel	$\alpha_n = 20^\circ$
$\alpha_t$	angle de pression apparent	$\alpha_t = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} \alpha_n}{\cos \beta} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{\text{tg} 20^\circ}{\cos 27,048} \right)$ $\alpha_t = 22,228$
$\xi_B$	rapport de recouvrement	$\xi_B = \frac{b \cdot \text{tg} \alpha_t}{m_t} = \frac{30 \cdot \text{tg} 27,048}{3,368}$ $= 1,447$
a	entraxe	$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{67,36 + 252,6}{2}$ $= 160 \text{ mm}$
i	rapport de transmission	$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{75}{20} = 3,75$
$n$	vitesse de rotation	$n_1 = 574 \text{ tr/m}_n$ $n_2 = \frac{n_1}{i} = 574 / 3,75 = 153 \text{ tr/m}_n$
v	vitesse périphérique sur le $\phi$ primitif	$v_1 = \frac{2\pi n_1}{60} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_1}{2}$ $= \frac{2\pi \cdot 574}{60} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{67,36}{2}$ $v_1 = 2,024 \text{ m/s}$
y	saillie réduite	$y_1 = y_2 = \frac{h_a}{m_n} = 1$
$\beta_b$	angle d'inclinaison de base	$\beta_b = \text{Arctg} (\text{tg} \beta \cos \alpha_t)$ $\beta_b = \text{Arctg} (\text{tg} 27,048 \cdot \cos 22,228)$ $= 25,297$

Symbole	Dénomination	Calcul
$m_n$	module réel	$m_n = 4 \text{ mm}$
$\beta$	angle d'hélice	$\beta = 28,727^\circ$
$P_n$	pas réel	$P_n = m_n \cdot \pi = 4 \cdot \pi = 12,566 \text{ mm}$
$P_t$	pas apparent	$P_t = P_n / \cos \beta = 12,566 / \cos 28,727$ $= 14,330 \text{ mm}$
$m_t$	module apparent	$m_t = m_n / \cos 28,727 = 4,561 \text{ mm}$
Z	nombre de dents	$Z = 25 ; Z_2 = 89$
d	diamètre primitif	$d_3 = Z_3 m_t = 25 \cdot 4,561 = 114,025 \text{ mm}$ $d_4 = Z_4 m_t = 89 \cdot 4,561 = 405,929 \text{ mm}$
$h_a$	saillie	$h_a = m_n = 4 \text{ mm}$
$h_f$	creux	$h_f = 1,25 m_n = 1,25 \cdot 4 = 5 \text{ mm}$
h	hauteur de dent	$h = h_a + h_f = 4 + 5 = 9 \text{ mm}$
$d_a$	diamètre de tête	$d_a = d + 2h_a = 114,025 + 2(4)$ $= 122,025 \text{ mm}$
$d_f$	diamètre de pied	$d_f = d - 2h_f = 114,025 - 2(5) = 104,025 \text{ mm}$ $d_{f4} = d_4 - 2h_f = 405,929 - 2(5) = 395,929 \text{ mm}$
b	largeur de la denture	$b = \frac{\pi m_n}{\sin \beta} = \frac{\pi \cdot 4}{\sin 28,727} = 26,145 \text{ mm}$ soit $b = 40 \text{ mm}$
$\alpha_n$	angle de pression	$\alpha_n = 20^\circ$
$\alpha_t$	angle de pression apparent	$\alpha_t = \text{Arctg} \frac{(\text{tg } \alpha_n)}{(\cos \beta)} = \text{Arctg} \frac{(\text{tg } 20)}{(\cos 28,727)}$ $\alpha_t = 22^\circ,541$
$\epsilon_\beta$	rapport de recouvrement	$\epsilon_\beta = \frac{b \text{ tg } \beta}{m_t} = \frac{40 \cdot \text{tg } 28,727}{4,561} = 1,53$
a	entraxe	$a = \frac{d_3 + d_4}{2} = \frac{114,025 + 405,929}{2}$ $= 260 \text{ mm}$

i rapport de transmission

$$i_2 = \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{89}{25} = 3,56$$

n nombre de vitesse

$$n_2 = 153 \text{ tr/m}_n$$

$$n_3 = 42,98 \text{ tr/m}_n$$

v vitesse périphérique

$$v_3 = \frac{2 \pi n_3}{60} \cdot \frac{d_3}{2} 10^{-3}$$

sur le  $\phi$  primitif

$$= \frac{2 \pi \cdot 153}{60} (114,025/2) 10^{-3}$$

$$= 0,914 \text{ m/s}$$

y saillie réduite

$$y_1 = y_4 = \frac{h_a}{m_n} = 1$$

$\beta_b$  angle d'inclinaison

$$\beta_b = \text{Arctg} ( \text{tg} \beta \cos \alpha_t )$$

$$\beta_b = \text{Arctg} ( \text{tg} 28,727 \cos 22,541^\circ )$$
  
$$= 26,849$$

### 2.9.2/ Vérification des dentures à la rupture

Les calculs sont faits d'après la méthode de G. Henriot dans son ouvrage "Traité théorique et pratique des engrenages" Tome I 5<sup>e</sup> édition.

La force tangentielle admissible c'est à dire celle que la dent du pignon ou de la roue peut supporter est donnée par :

$$F_{\text{tadm}} \left( \frac{I}{2} \right) = \sigma_{\text{blim}} \left( \frac{I}{2} \right) \cdot b \cdot m_o \cdot \frac{K_v \cdot K_{bl} \left( \frac{I}{2} \right) \cdot K_M \cdot K_A}{Y_{\xi} \cdot Y_f \left( \frac{I}{2} \right) \cdot Y_{\beta}}$$

I. indice du pignon de l'étage considéré.

2. indice de la roue intermédiaire.

où  $\sigma_{\text{blim}}$  : valeur limite de base de la contrainte de rupture  $\sigma_b$

elle est fonction du matériau et de sa charge de rupture à cœur (hbar).

b : largeur de la denture (mm)

$m_o$  : module de l'étage considéré (mm)

$K_v$  : facteur de vitesse qui fait intervenir les surcharges dues à l'effet combiné des erreurs de dentures, et de la vitesse, compte tenu des inertés de la transmission.

$K_{bl}$  : facteur de durée, il est fonction de la longévité et de la vitesse de rotation de l'élément.

$K_M$  : facteur de portée, donné en fonction du rapport b/d

$K_A$  : facteur de service, il tient compte de la nature de l'organe moteur et de l'organe receuteur.

$Y_{\xi}$  : facteur de conduite.

$Y_f$  : facteur de forme, il dépend du nombre de dent et de la correction

$Y_{\beta}$  : facteur d'inclinaison, il dépend de l'angle d'inclinaison  $\beta$

Vérification du I<sup>er</sup> étagea/ facteur  $\sigma_{blim}$ 

soit le pignon en acier allié trempé

$$\sigma_b = 70 \text{ hbar fig 7. I7} \rightarrow \sigma_{blim} = 22 \text{ hbar} = 22 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

et la roue en acier au carbone

$$\sigma_b = 60 \text{ hbar fig 7. I7} \rightarrow \sigma_{bl} = 15 \text{ hbar} = 15 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

b/ module  $m_o = 3 \text{ mm}$ c/ facteur de vitesse  $K_v$  pour des dents des dentures bonne qualité commerci

ale classe III  $K_v = \frac{6}{6 + \sqrt{v_t}} = \frac{6}{6 + \sqrt{214}} = 0,859$

d/ largeur de la denture  $b = 30 \text{ mm}$ e/ facteur de durée  $K_{bl}$ 

$$H = 87600 \text{ h}$$

$$K_{bl1} = 0,65$$

$$n = 574 \text{ tr/m}_n \rightarrow \frac{7 \cdot 21}{\dots}$$

$$K_{bl2} = 0,65$$

$$n = 153 \text{ tr/m}_n$$

f/ facteur de portée  $K_M$ 

$$b/a_1 = 30/67,36 = 0,445 < 1 \rightarrow \frac{7 \cdot 23}{\dots} \rightarrow K_M = 1$$

g/ facteur de service  $K_A$ 

organe moteur : moteur électrique

degré de choc I

page 340  $K_A = 0,90$

usqu'à 24 h/

h/ facteur de conduite  $Y_F$ 

page 326  $Y_F = 1$

i/ facteur de sécurité  $\sigma_F$

$$\beta_1 = 27^\circ, 048$$

$$x = 0$$

$$\alpha_n = 20^\circ$$

$$Z_{v1} = \frac{Z_1}{\cos^3 \beta_1} = \frac{20}{\cos^3 27,048} = 28,31$$

$$\xrightarrow{7.7} Y_{f1} = 2,50$$

$$\beta_1 = 27^\circ, 048$$

$$x = 0$$

$$\alpha_n = 20^\circ$$

$$\xrightarrow{7.7} Y_{f2} = 2,20$$

$$Z_{v2} = \frac{Z_2}{\cos^3 \beta_1} = \frac{75}{\cos^3 27,048} = 106,16$$

II/ facteur d'inclinaison  $Y_\beta$

$$\beta = 27^\circ, 048 \xrightarrow{7.7} Y_\beta = 0,76$$

Calcul des efforts tangentiels admissibles  $F_{t1adm}$  et  $F_{t2adm}$

$$F_{t1adm} = \sqrt{b_1 \lim b_2} \cdot \frac{K_v K_{bl} K_M K_A}{Y_{F1} Y_\beta}$$

$$F_{t1adm} = 22 \cdot 10^7 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,808 \cdot 0,65 \cdot 1 \cdot 0,90}{2,50 \cdot 0,76} = 4895 \text{ N}$$

$$F_{t2adm} = \sqrt{b_2 \lim b_1} \cdot \frac{K_v K_{bl} K_M K_A}{Y_{F2} Y_\beta}$$

$$F_{t2adm} = 15 \cdot 10^7 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,808 \cdot 0,65 \cdot 1 \cdot 0,90}{1,2 \cdot 0,76} = 3793 \text{ N}$$

Calcul de l'effort tangentiel réel sur le 1<sup>er</sup> étage

$$F_{t1} = \frac{M_1}{d/2} = \frac{91,48}{67,36 \cdot 10^{-3}/2} = 2716 \text{ N}$$

d'où  $F_{t1} = 2716 < F_{t1adm} = 4895 \text{ N}$  le pignon est vérifié à la rupture

et  $F_{t1} = 2716 < F_{t2adm} = 3793 \text{ N}$  la roue est vérifiée à la rupture

a/ facteur  $\sigma_{blim}$  :

soit le pignon en acier allié traité

$$\sigma_{b3} = 60 \text{ hbar} \cdot \frac{7 \cdot 17}{100} = \sigma_{bl3} = 22 \text{ hbar} = 22 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

et la roue en acier au carbone

$$\sigma_{b4} = 60 \text{ hbar} \cdot \frac{7 \cdot 17}{100} = \sigma_{bl4} = 15 \text{ hbar} = 15 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

b/ largeur de la dent  $b = 40 \text{ mm}$

c/ module  $m_n = 4 \text{ mm}$

d/ facteur de vitesse  $K_v$

classe III  $\rightarrow K_v = \frac{6}{6 + \sqrt{0,914}} = 0,859$

e/ facteur de durée  $K_{bl}$

$$H = 87600 \text{ h}$$

$$K_{bl3} = 0,65$$

$$n = 153 \text{ tr/n}_n$$

$$\frac{7 \cdot 21}{100}$$

$$n = 42,98$$

$$K_{bl4} = 0,73$$

f/ facteur de module  $K_M$

$$b/d_3 = 40/114,025 < 1 \rightarrow K_M = 1$$

g/ facteur de service  $K_A$

$$K_A = 0,90$$

h/ facteur de contact  $Y_z$

page 326  $Y_z = 1$

i/ facteur de forme  $Y_f$

$$\alpha_3 = 28,727$$

$$x = 0$$

$$\sigma_n = 20^\circ$$

$$Z_{v3} = \frac{n \cdot Z^{20}}{\cos^2 \alpha_3} = \frac{25}{\cos^2 28,727} = 37,07$$

$$Y_{f3} = 2,4$$

$$B_e = 28,727$$

$$x = 0$$

$$\alpha_n = 20^\circ$$

$$Y_{f_7} = 2,2$$

$$Z_{v_4} = \frac{B_e}{\cos^3 \beta_e} = \frac{89}{\cos^3 28,727} = 131,98$$

k/ facteur d'inclinaison  $Y_\beta$

$$\beta = 28^\circ,727 \xrightarrow{7. II} Y_\beta = 0,76$$

Calcul des efforts tangentiels admissibles  $F_{t_3adm}$  et  $F_{t_4adm}$

$$F_{t_3adm} = \sigma_{b_3lim} \cdot b \cdot m \cdot \frac{K_v \cdot K_{bl} \cdot K_M \cdot K_A}{Y_\tau \cdot Y_{f_7} \cdot Y_\beta}$$

$$F_{t_3adm} = 22 \cdot 10^7 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,859 \cdot 0,65 \cdot 1 \cdot 0,9}{1 \cdot 2,4 \cdot 0,76} = 9697 \text{ N}$$

$$F_{t_4adm} = \sigma_{b_4lim} \cdot b \cdot m \cdot \frac{K_v \cdot K_{bl} \cdot K_M \cdot K_A}{Y_\tau \cdot Y_{f_7} \cdot Y_\beta}$$

$$F_{t_4adm} = 15 \cdot 10^7 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,859 \cdot 0,73 \cdot 1 \cdot 0,9}{1 \cdot 2,2 \cdot 0,76} = 7128 \text{ N}$$

Calcul de l'effort tangentiel réel agissant sur le 2 arbre :

$$F_{t_2} = \frac{M_2}{d/2} = \frac{343,05 \cdot 10^3}{114,025/2} = 6017 \text{ N}$$

d'où  $F_{t_3} = 6017 \text{ N} < F_{t_3adm}$  leignon est vérifié à la rupture.

$F_{t_4} = 6017 \text{ N} < F_{t_4adm}$  la roue est vérifiée à la rupture.

V 2.9.3/ - Vérification des dentures à la pression superficielle :

L'effort tangentiel admissible à la pression superficielle est donnée par la relation.

$$F_t^{(I)adm} = \sigma_{hl}^{(I)} \lim b \cdot d \cdot cr \frac{K_v K_{hl}^{(I)} K_M K_A}{Z_e^2 Z_\beta Z_c^e}$$

$\sigma_{hl}^{(I)}$  : pression superficielle limite de base, elle est fonction du matériau utilisé et de la dureté briuell superficielle.

b : largeur de la denture.

d : diamètre primitif du pignon de l'étage considéré.

$c_r$  : facteur de rapport

$$c_r = \frac{i}{i + I} \text{ pour engrennage extérieur}$$

$K_v$  : facteur de viteese.

$K_{hl}$  : facteur de durée.

$K_M$  : facteur de portées.

$K_A$  : facteur de service.

$Z_e$  : facteur du matériau.

$Z_\beta$  : facteur de longueur de contact.

$Z_c$  : facteur géométrique

pour  $\alpha_n = 20^\circ$ , une formule simplifiée a été établie

$$F_t adm = \Omega_o \cdot b \cdot d \cdot cr \cdot c_\beta \cdot K_v \cdot K_{hl} \cdot K_M \cdot K_A$$

avec  $c_\beta$  : facteur d'inclinaison.

$\Omega_o$  : facteur de correction remplaçant  $\sigma_{hl}^{(I)}$  dans la formule simplifiée.

$$\Omega_o = \frac{\sigma_{hl}^{(I)}}{7700 \cdot 2,35}$$

Une relation est donnée permettant une égalisation des capacités de charge.

$$\frac{\sigma_{hl}^{(I)}}{\sigma_{hl}^{(I)}} = \frac{\Omega_o}{\Omega_o} = \frac{K_{hl}^e}{K_{hl}^i}$$

Le pignon 1 est en acier allier trepé HB = 600 7. 37  $\sigma_{o1} = 1$

La roue 2 est en acier au carbone HB = 250 7. 37  $\sigma_{o2} = 0,4$

$$\frac{\sigma_{o1}}{\sigma_{o2}} = \frac{1}{0,3} = 2,25 \quad \left| \begin{array}{l} \text{---} \longrightarrow \text{D'après la figure 7. 38 l'orga-} \\ \text{ne le plus faible est la roue.} \end{array} \right.$$

et  $i_1 = 3,75$

Donc la résistance de l'étage est déterminée par la vérification de la roue à la pression superficielle.

a/  $\sigma_{o2} = 0,4$

b/  $b = 30 \text{ mm}$

c/  $d_1 = 67,36 \text{ mm}$

d/  $c_r = \frac{i_1}{i_1 + 1} = \frac{3,75}{3,75 + 1} = 0,789$

e/  $\beta_1 = 27^{\circ},048$  7; 36,  $c_{\beta} = 1,33$

f/  $K_v = 0,808$

g/  $H = 87600 \text{ h}$

$n_2 = 153,0$

7. 21  $\longrightarrow K_{hl2} = 0,52.$

h/  $K_M = 1$

i/  $K_A = 0,90$

La force tangentielle admissible sera :

$$F_{t2adm} = \sigma_{o2} \cdot b \cdot d_1 \cdot c_r \cdot c_{\beta} \cdot K_v \cdot K_{hl2} \cdot K_M \cdot K_A$$

$$F_{t2adm} = (0,4 \cdot 30 \cdot 67,36 \cdot 0,789 \cdot 1,33 \cdot 0,808 \cdot 0,52 \cdot 1 \cdot 0,9) \cdot 10 = 3207 \text{ N}$$

$F_{t1} = 2716 \text{ N} < F_{t2adm} = 3207 \text{ N}$  le I<sup>er</sup> étage est vérifié à la pression superficielle.

Le pignon 3 est en acier allié trempé avec HB = 600  $\xrightarrow{7.37}$   $\Omega_{o1} = 1$

et la roue en acier au carbone a bev HB = 250  $\xrightarrow{7.37}$   $\Omega_{o2} = 0,4$

$$\frac{\Omega_{o1}}{\Omega_{o2}} = \frac{1}{0,4} = 2,5$$

$$i_2 = \frac{Z_H}{Z_3} = \frac{89}{25} = 3,56$$

$\xrightarrow{7.38}$  La roue est l'organe le plus faible.

a/  $\Omega_{o2} = 0,4$

b/  $b = 40 \text{ mm}$

c/  $d_3 = 114,025 \text{ mm}$

$$d/ c_r = \frac{i_2}{i_2 + 1} = \frac{3,56}{3,56 + 1} = 0,78$$

e/  $= 28^{\circ},727 \xrightarrow{7.36} c_\beta = 1,34$

f/  $K_v = 0,859$

g/  $H = 87600 \text{ h}$

$n_3 = 42,98$

$$\xrightarrow{\hspace{2cm}} K_{hl4} = 0,60$$

h/  $K_M = 1$

i/  $K_A = 0,9$

$$F_{t4adm} = \Omega_{o4} \cdot b \cdot d_3 \cdot c_r \cdot c_\beta \cdot K_v \cdot K_{hl4} \cdot K_M \cdot K_A$$

$$F_{t4adm} = (0,4 \cdot 40 \cdot 114,025 \cdot 0,78 \cdot 1,34 \cdot 0,859 \cdot 0,60 \cdot 1 \cdot 0,9) \cdot 10 = 9582 \text{ N}$$

d'où  $F_{t1} = 6017 \text{ N} < F_{t4adm} = 9582$  le 2° étage est vérifié à la pression superficielle.

Arbre d'entrée :

$$\text{Effort tangentiel } T_1 = \frac{P}{V_1} = \frac{5500}{2,024} = 2716 \text{ N}$$

$$\text{Effort axial } A_1 = T_1 \operatorname{tg} \beta_1 = 2716 \cdot \operatorname{tg} 27,048 = 1386 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{Effort radial } R_1 &= T_1 \operatorname{tg} \alpha_n / \cos \beta_1 = 2716 \operatorname{tg} 20 / \cos 27,048 \\ &= 1109 \text{ N} \end{aligned}$$

Rouvroie = 1130 N ( Effort dû à la transmission par courroie)

Arbre intermédiaire :

$$T_2 = T_1 = 2716 \text{ N}$$

$$A_2 = A_1 = 1386 \text{ N}$$

$$R_2 = R_1 = 1109 \text{ N}$$

$$T_3 = \frac{P}{V_3} = \frac{5500}{0,914} = 6017 \text{ N}$$

$$A_3 = T_3 \operatorname{tg} \beta_2 = 6017 \operatorname{tg} 28,727 = 3298 \text{ N}$$

$$R_3 = T_3 \operatorname{tg} \alpha_n / \cos \beta_2 = 6017 \operatorname{tg} 20 / \cos 28,727 = 2497 \text{ N}$$

Arbre de la bobine :

$$T_3 = T_4 = 6017 \text{ N}$$

$$A_3 = A_4 = 3298 \text{ N}$$

$$R_3 = R_4 = 2497 \text{ N}$$

$$F_{tr} = 5427 \text{ ( tension sur le fil)}$$

3.7.4/ - Calcul dynamique

Arbre d'entrée

Plan XAZ

$$\text{Réactions : } R_{BX} = 1962 \text{ N}$$

$$R_{AX} = 754 \text{ N}$$

2.9.4/ - Calcul dynamique

Arbre d'entrée

Plan XAZ

Réactions :  $R_{BX} = 1962 \text{ N}$

$R_{AX} = 754 \text{ N}$

Moment fléchissant

Au point A = 0

Au point B = 0

Au point D =  $65 R_{AX} = 49010 \text{ Nmm}$

Plan XAY

Réactions :  $R_{BY} = 2625 \text{ N}$

$R_{AY} = 386 \text{ N}$

$R_{BZ} = 1386 \text{ N}$

Moment fléchissant

Au point A = 0

Au point D<sup>-</sup> =  $-65 R_{AY}$

=  $-25090 \text{ Nmm}$

Au point D<sup>+</sup> =  $21590,48 \text{ Nmm}$

Au point B =  $-15784,52 \text{ Nmm}$

Au point E = 0

Moment de torsion

$M_t = T_1 \cdot \frac{D_1}{2}$

=  $2716 \cdot 67,68/2 = 91500 \text{ Nmm}$

- Diamètre de l'arbre

$d = \frac{10 M_i}{adm}$

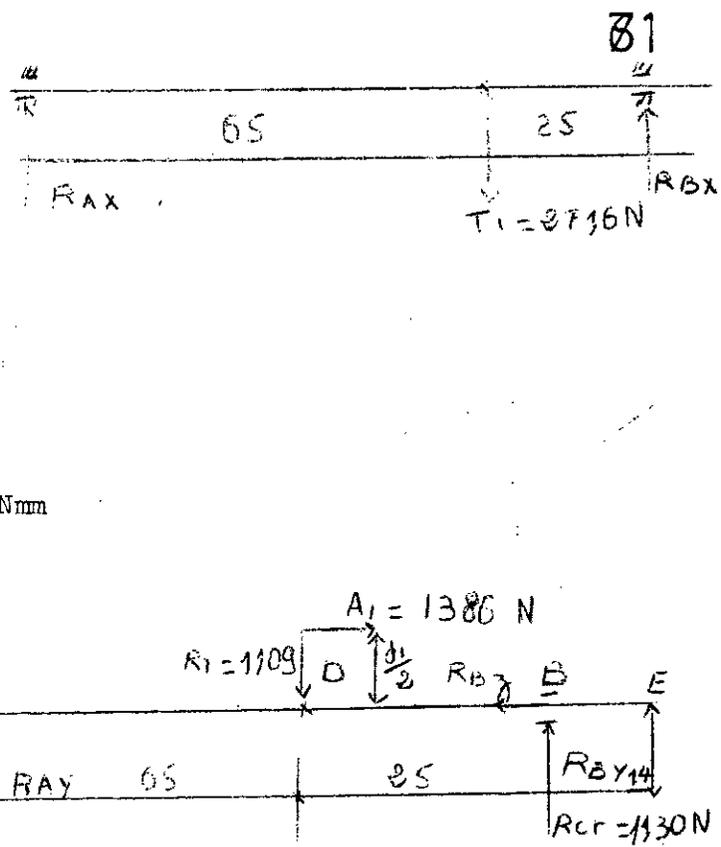
Mi : moment idéal au niveau de la section considérée

adm : contrainte admissible = 60-80 MPa

L'arbre est dimensionné pour un moment idéal Mi max

$M_i \text{ max} = \sqrt{M_{FDX}^2 + M_{FDY}^2 + M_t^2}$

$M_i \text{ max} = \sqrt{(49010)^2 + (25090)^2 + (91500)^2} = 106788 \text{ N mm}$



-Diagrammes des moments fléchissant et de moment de torsion de l'arbre d'entrée:

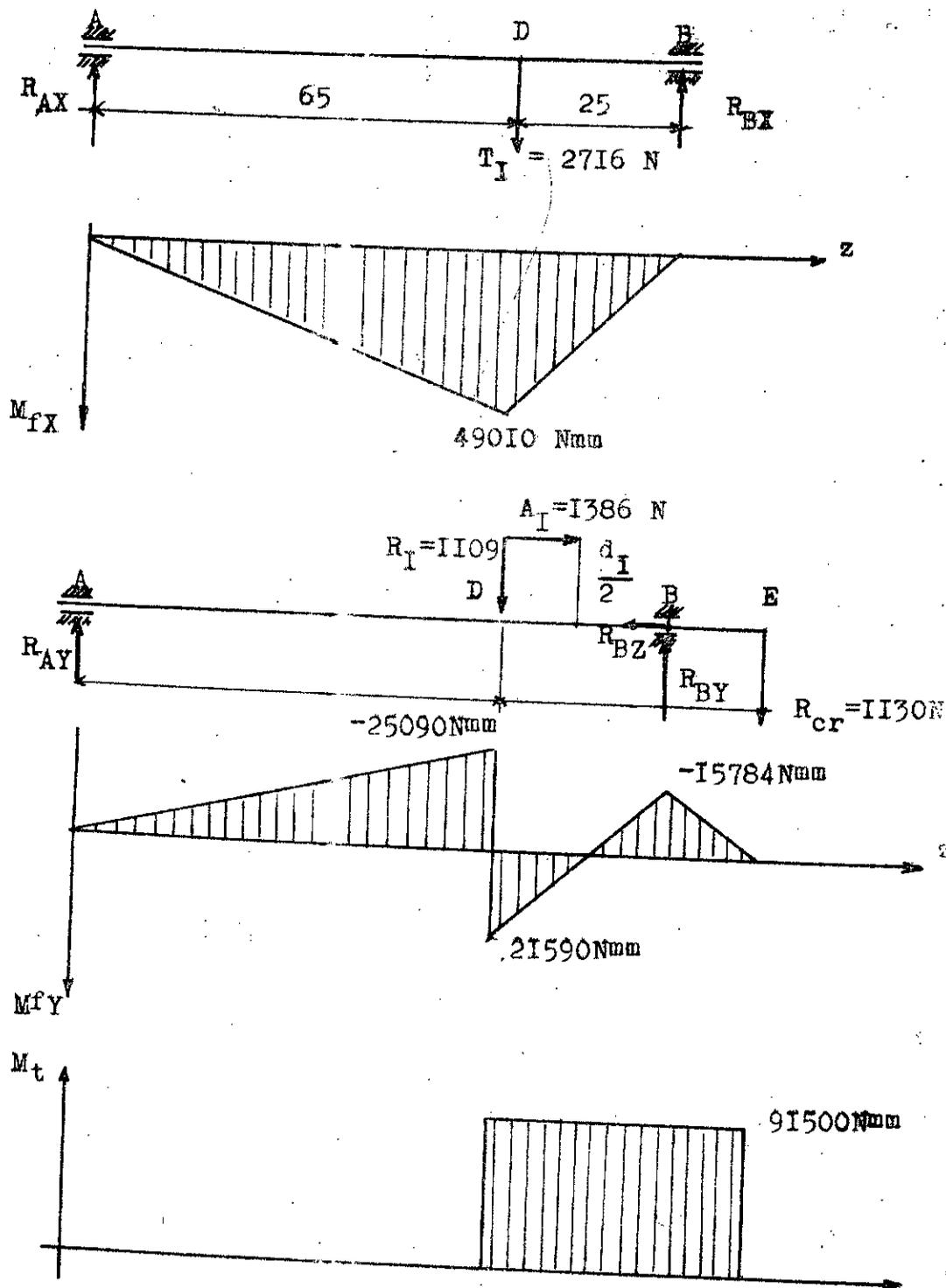


Figure 5.6

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 106788}{70}} = 24,72 \text{ mm}$$

On prend  $d = 45 \text{ mm}$

Arbre intermédiaire

Plan XAZ

Réactions :  $R_{BX} = 3901 \text{ N}$   
 $R_{AX} = 4832 \text{ N}$

Moment fléchissant

Au point A = 0  
 Au point C = -144960 Nmm  
 Au point D = -97560 Nmm

Plan XAY

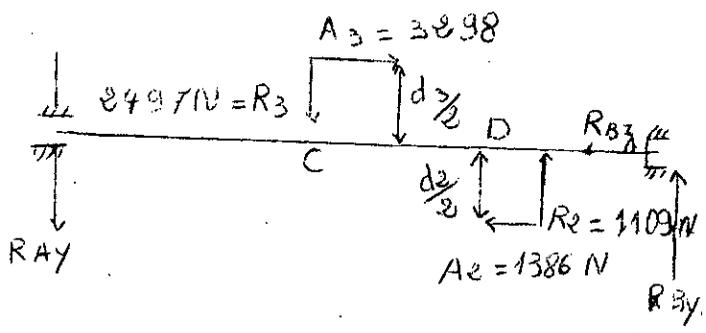
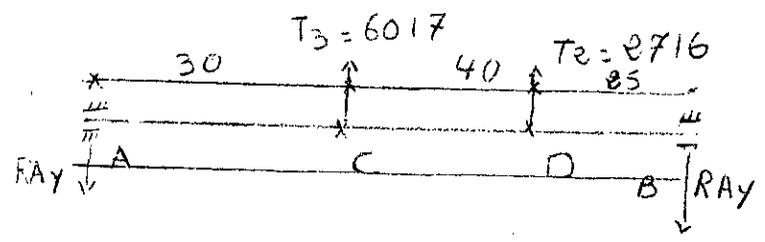
Réactions :  $R_{BY} = 3793 \text{ N}$   
 $R_{AY} = 2405 \text{ N}$   
 $R_{BZ} = A_3 - A_2 = 1912 \text{ N}$

Moment fléchissant

Au point A = 0  
 Au point C<sup>-</sup> = 72150 Nmm  
 Au point C<sup>+</sup> = 115836 Nmm  
 Au point D<sup>-</sup> = -80244 Nmm  
 Au point D<sup>+</sup> = 94807,8 Nmm  
 Au point B = 0

Moment de torsion

$$M_{t2} = T_2 \cdot d_2 / 2 = 2716 \cdot \frac{252,6}{2} = 343030,8 \text{ Nmm}$$



- Diamètre de l'arbre

$$M_i \text{ max} = \sqrt{M_{FCX}^2 + M_{FCY}^2 + M_t^2}$$

$$M_i \text{ max} = \sqrt{(144960)^2 + (115836)^2 + (343030,8)^2} = 372402 \text{ Nmm}$$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 372402}{70}} = 37,47 \text{ mm}$$

On prend  $d = 50 \text{ mm}$

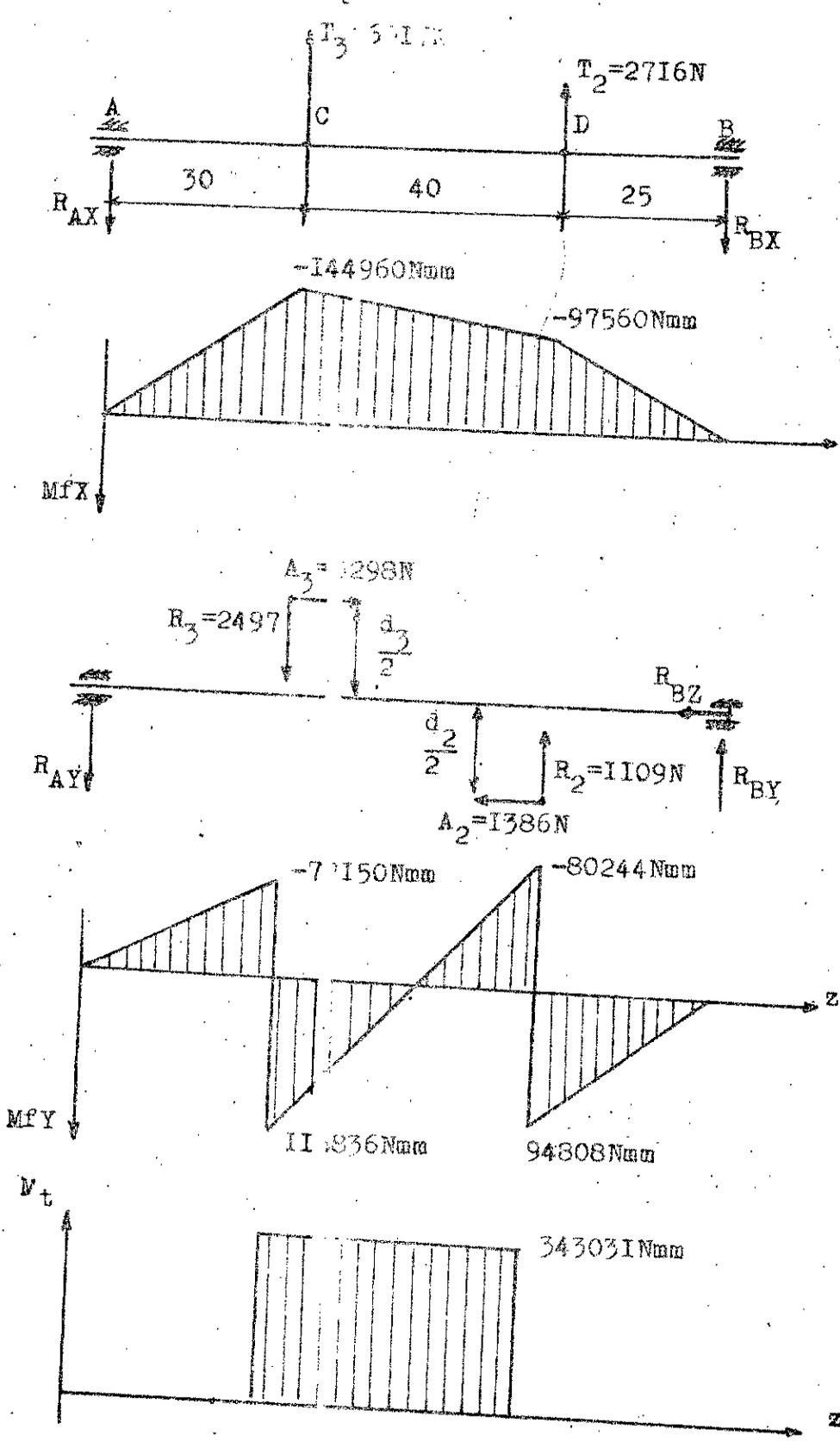


Figure 5.7

Arbre de la bobinePlan XAZ

Réactions :  $R_{AX} = 4117 \text{ N}$

$R_{BX} = 1900 \text{ N}$

Moment fléchissant :

Au point A = 0

Au point C =  $30R_{AX} = 30 \cdot 4117$

$= 123510 \text{ N mm}$

Au point B = 0

Plan XAY

Réactions :  $R_{AY} = 19322,75 \text{ N}$

$R_{BY} = 11398 \text{ N}$

$R_{AZ} = 3298 \text{ N}$

Moment fléchissant :

Au point B = 0

Au point C<sup>-</sup> =  $740918,75 \text{ Nmm}$

Au point C<sup>+</sup> =  $221349,67 \text{ Nmm}$

Au point A =  $638249,17$

Au point F = 0

Moment de torsion

$M_t = T_r \cdot d/2 = 6017 \cdot \frac{405,929}{2}$

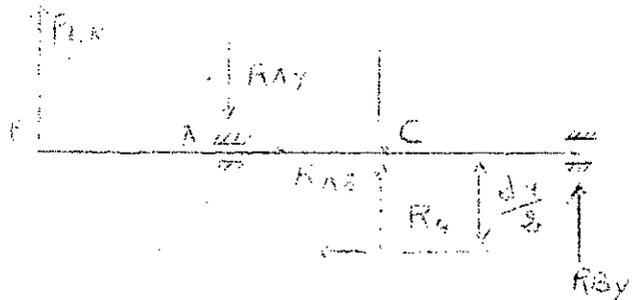
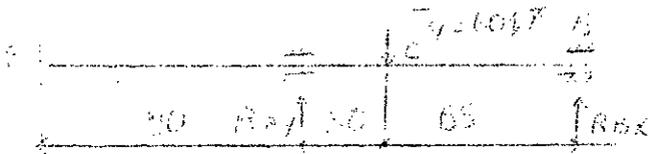
$= 1221237 \text{ Nmm}$

- Diamètre de l'arbre

$d_i \geq \sqrt[3]{\frac{10M_i}{70}}$

$M_i \text{ max} = \sqrt{(123510)^2 + (740918,75)^2 + (1221237)^2} = 1433749 \text{ Nmm}$

$d_i \geq \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 1433749}{70}} = 58,7 \text{ mm}$

On prend  $d_i = 90 \text{ mm}$ 

-Diagrammes des moments fléchissant et de torsion de l'arbre de la bobine :

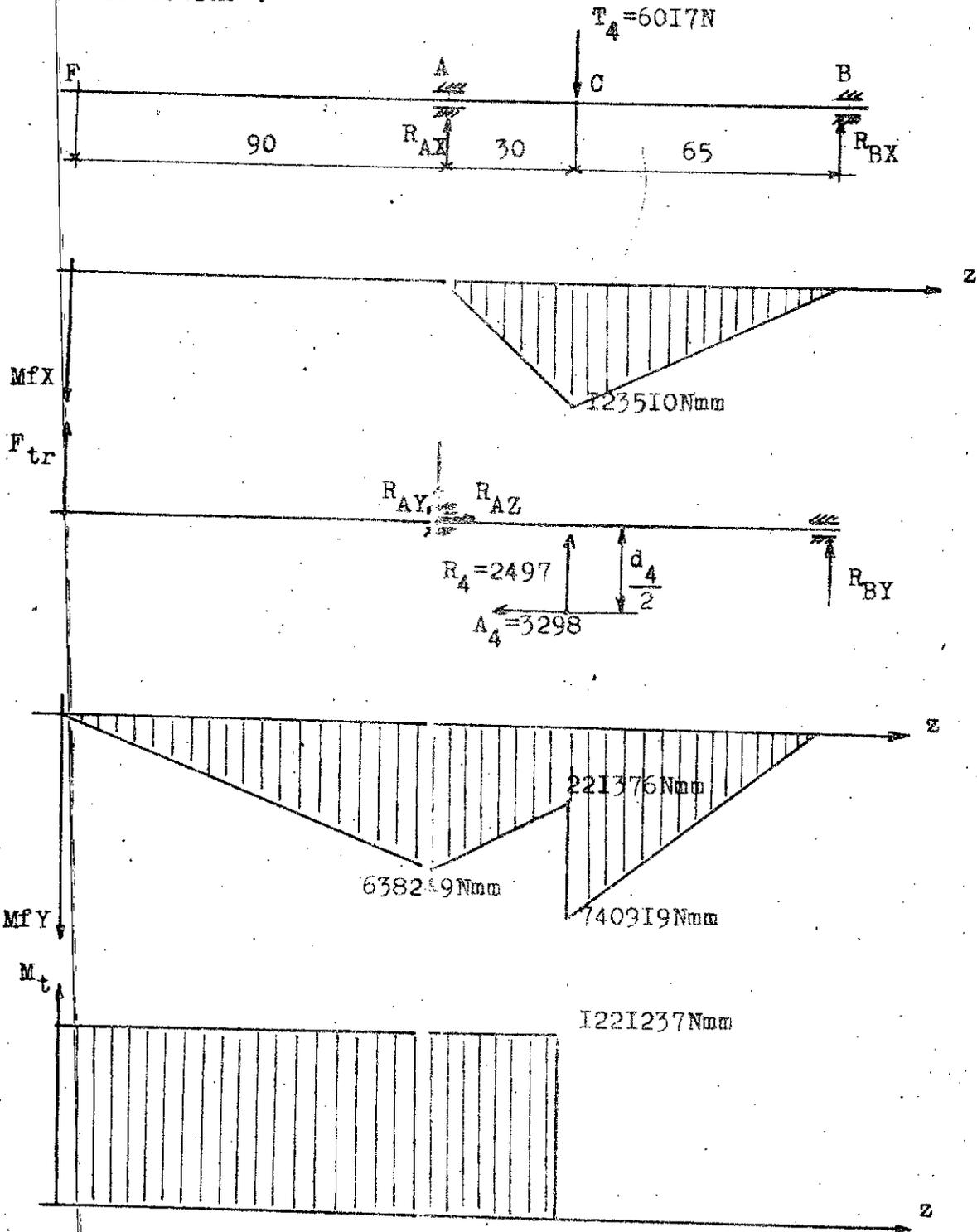


Figure 5.8

V2.9.5/ - Calcul des roulements :

$$C = P \cdot \left[ \frac{60 \cdot n \cdot L_h \cdot I/k}{10^6} \right]$$

C : Charge dynamique de base en (daN)

P : Charge dynamique équivalente

P : Charge dynamique équivalente en (daN)

n : vitesse de rotation en (tr/mm)

L : durée de vie en (heures)

K : 3 (roulements à billes)

$$P = (XVFr) + (YFa)$$

Fr : Charge radiale (daN)

Fa : Charge axiale (daN)

X : Facteur radial dépend de  $F_a/C_0$  et  $F_a/F_r$

V : Facteur de rotation =, 1 pour roulement à billes

Y : Facteur axial dépend de  $F_a/C_0$  et  $F_a/F_r$

- Calcul des charges radiales et axiales sur les paliers

Arbre	Paliers	Charges axiales (N)	Charges radiales (N)
1	A	$R_{AZ} = 0$	$\sqrt{R_{AX}^2 + R_{AY}^2} = \sqrt{(754)^2 + (386)^2} = 847$
	B	$R_{BZ} = 1386$	$\sqrt{R_{BY}^2 + R_{BZ}^2} = \sqrt{(11962)^2 + (2625)^2} = 3277$
2	A	$R_{AZ} = 0$	$\sqrt{R_{AX}^2 + R_{AY}^2} = \sqrt{(4832)^2 + (2405)^2} = 5387$
	B	$R_{BZ} = 1912$	$\sqrt{R_{BX}^2 + R_{BY}^2} = \sqrt{(5961)^2 + (3793)^2} = 5441$
3	A	$R_{AZ} = 3298$	$\sqrt{R_{AX}^2 + R_{AY}^2} = \sqrt{(4117)^2 + (19323)^2} = 19756$
	B	$R_{BZ} = 0$	$\sqrt{R_{BY}^2 + R_{BZ}^2} = \sqrt{(1900)^2 + (11398)^2} = 11555$

- Notre choix s'est porté sur les roulements ayant les caractéristiques suivantes :

Arbre	Palier	S. de dim	$C_0 = C_h$ . Stat de base (N)	$C = C_h$ . dyn de base (N)	$n_{max}$ (tr/mm)
1	A	03	21600	31500	8000
	B	03	21600	31500	8000
2	A	03	21600	31500	8000
	B	03	21600	31500	8000
3	A	03	78000	95000	4000
	B	03	78000	95000	4000

- Calcul des charges dynamiques réelles :

$$C' = P \cdot \frac{(60 L_h \cdot n)^{1/3}}{(10^6)}$$

On estime la durée de vie  $L_h$  à 10.000 heures.

On calcul  $P$  d'après les valeurs de  $X$  et  $Y$  tirées du tableau

40.63 page I84 (Chevalier).

Arbre	Palier	$F_a/C_0$	$F_r/F_r$	X	Y	$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$ (N)
1	A	0	0	1	0	$1 \cdot 847 = 847$
	B	0,064	0,422	0,56	1,6	$0,56 \cdot (3277) + 1,6(1386) = 4052$
2	A	0	0	1	0	$5397 \cdot 1 = 5397$
	B	0,088	0,35	0,56	1,4	$0,56 \cdot (5441) + 1,4(1912) = 5724$
3	A	0,152	0,163	0,56	1,4	$0,56(19756) + 1,4(3298) = 15680$
	B	0	0	1	0	$11555 \cdot 1 = 11555$

- Calcul des charges dynamiques réelles:

Arbre	Palier	n(tr/Mn)	$C' = P. (0,6n)^{1/3}$	C	Observation
I	A	574	847(6,995) = 5925	31500	$C' < C$
	B	574	4052(6,995) = 28345	31500	"
2	A	153	5397(4,504) = 24309	31500	"
	B	153	5724(4,504) = 25782	31500	"
3	A	43	15680(2,952) = 46282	95000	"
	B	43	11555(2,952) = 34107	95000	"

Les roulements choisis conviennent bien à notre construction.

V 2.9.6/ - Calcul des clavettes

On choisit pour l'assemblage des éléments de notre banc de tréfilage c'est à dire (Roue - Arbre et Poulie - Arbre), des clavettes parallèles. Ces clavettes parallèles ne sont vérifiées qu'à la compression, c'est là où la contrainte est dangereuse.

La condition de résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{comp} = \frac{2 M_t}{d l_p k} \leq R_{comp}$$

où  $M_t$  : couple transmis par l'arbre

d : diamètre de l'arbre

k : hauteur de la clavette /2 = b/2.

$l_p$  : longueur pratique de la clavette.

Dans notre cas, l'assemblage est rigide avec une allure de charge douce et matériau du moyeu en acier on a  $R_{comp} = 1500 \text{ daN/cm}^2$

a/ Assemblage poulie - arbre :

$$l_p \gg \frac{2M_t}{d k R_{comp}}$$

Pour diamètre 45 mm on a d'après NFE 27-656

$$a = 14 \text{ mm} ; b = 9 \text{ mm} ; k = 4,5 \text{ mm}$$

$$M_t = 91,5 \text{ N.m.}$$

$$\text{d'où } l_p = \frac{2 \times 91,5}{4,5 \times 0,45 \times 15000} = 6 \text{ mm}$$

$$\text{et } l_t = l_p + a = 6 + 14 = 20 \text{ mm}$$

D'après NFE 27 - 657. On prend  $l = 36 \text{ mm}$

Finalement clavette forme A de  $14 \times 9 \times 36$

b/ - Assemblage Roue 2 - arbre :

Pour diamètre 50 on a :  $a = 14 \text{ mm}, b = 9 \text{ mm} ; k = 4,5 \text{ mm.}$

$$M_t = 343 \text{ Nm.}$$

$$\text{d'où } l_p = \frac{2 \times 343}{5 \times 0,45 \times 15000} = 20 \text{ mm.}$$

$$\text{et } l_t = l_p + a = 20 + 14 = 34 \text{ mm.}$$

On prend une clavette forme A de  $14 \times 9 \times 36$

c/ - Assemblage Roue 3 - arbre

Pour diamètre 90 mm on a :  $a = 25 \text{ mm}, b = 14 \text{ mm}, k = 7 \text{ mm.}$

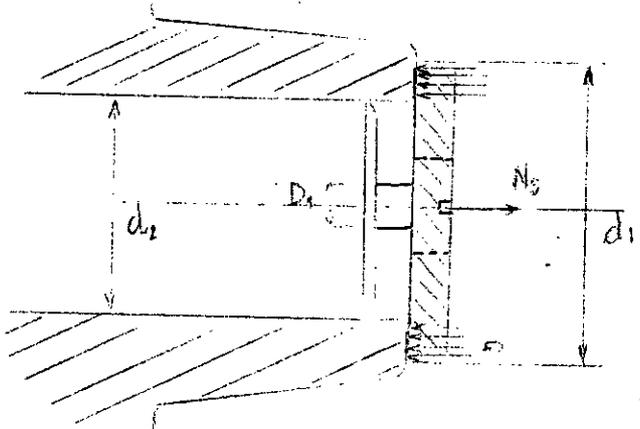
$$M_t = 1121 \text{ N}$$

$$\text{d'où } l_p = \frac{2 \times 1121}{9 \times 0,7 \times 15000} = 23 \text{ mm}$$

$$l_p = l_p + a = 23 + 25 = 48 \text{ mm}$$

d'après NFE 27 - 657 on a  $l = 70 \text{ mm}$

On prend une clavette forme A de  $25 \times 14 \times 70$



Le moment de torsion transmis par l'arbre à la bobine est réalisé par adhérence. Deux vis exercent un effort de serrage  $N_s$  sur une rondelle en bronze qui se met en contact avec la bobine. La surface de contact est annulaire. L'effort de serrage engendre un moment de frottement.

Pour qu'il y ait transmission il faut que  $M_{fr} = KM_t$

K coefficient de sécurité = 1,5 à 2.

Supposons que la pression est uniforme sur la surface annulaire

$$P = \frac{Q}{(R^2 - r^2)}$$

Le moment de frottement agissant sur la surface élémentaire

$$dM_{fr} = 2\pi r dr P \cdot f \cdot r$$

$$M_{fr} = \int_r^R 2\pi P \cdot f \cdot r^2 dr \quad M_{fr} = \frac{2}{3} \pi P \cdot f \cdot (R^3 - r^3)$$

$$M_{fr} = \frac{2}{3} Q \cdot f \cdot \frac{(R^3 - r^3)}{(R^2 - r^2)}$$

Dans notre cas on a

$$M_{fr} = \frac{1}{3} N_s \cdot Z \cdot f \cdot \frac{d_1^3 - d_2^3}{d_1^2 - d_2^2}$$

$$\text{d'où } N_s = \frac{3 KM_t}{f \cdot Z} \cdot \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{(d_1^3 - d_2^3)}$$

Il s'agit ici d'un assemblage contraint, c'est à dire que l'assemblage a subit au serrage avant l'application de la charge.

$$\text{d'où } \sigma = \frac{4 \times 1,3 \cdot N_s}{\pi d_1^2} \leq R_{\text{comp}}$$

$$\sigma = \frac{4 \times 1,3}{\pi d_1^2} \times \frac{3 K M_t}{\mu \cdot Z} \left( \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^3 - d_2^3} \right)$$

$K$  : Coefficient de sécurité = 2.

$M_t$  : moment de torsion = 1121000 N.mm

$d_1$  : diamètre de la vis = 18 mm

$\mu$  : coefficient de frottement = 0,2 (Bronze - Céramique)

$Z$  : nombre de vis = 2

$d_1$  : diamètre extérieure de la surface annulaire = 100 mm

$d_2$  : diamètre intérieure de la surface annulaire. = 70 mm

$R_{\text{comp}} = 3000 \text{ MPa}$  (Céramique d'après LAKHTINE)

$$\sigma = \frac{4 \times 1,3}{\pi (18)^2} \times \frac{3 \times 2 \times 1121000}{0,2 \times 2} \frac{(100)^2 - (70)^2}{(100)^3 - (70)^3} = 667 \text{ MPa.}$$

$\sigma < R_{\text{comp}}$  l'assemblage est vérifié.

C O N C L U S I O N

Pendant l'étude de ce projet nous avons examiné le changement des structures et des propriétés du cuivre.

Nous avons remarqué que la structure du cuivre change sensiblement pendant la déformation, celle-ci transforme la structure polyédriques en structure fibreuse.

L'augmentation du degré de déformation provoque l'augmentation de la fibrosité et diminution des dimensions des grains dans une section transversale. Les essais mécaniques indiquent que la déformation à froid améliore les propriétés résistantes et diminue les propriétés plastiques.

Pour diminuer l'écroutissage nous avons essayé l'influence du recuit sur la structure et les propriétés mécaniques. Nous avons pu mettre en évidence que la température de recuit de 200°C à 400°C provoque l'amélioration des propriétés plastiques jusqu'à avoir les propriétés initiales.

Le recuit change la structure et donne la possibilité d'obtenir la structure homogène polyédrique, c'est à dire qu'on peut utiliser le recuit de recristallisation comme traitement thermique intermédiaire.

La conception du banc de tréfilage que nous avons proposé apporte des améliorations dans le procédé de tréfilage :

- le procédé reste toujours continue
- une meilleure qualité du produit
- une large gamme de produit

Une étude plus détaillée sur la chaîne à banc ainsi que son coût permet de faire une comparaison entre les bancs à une seule bobine et les bancs à plusieurs bobines.

Toutefois nous pensons que cette comparaison ne sera que bénéfique pour l'industrie de tréfilage dans la mesure où elle permettra une meilleure maîtrise du procédé.

Enfin nous pensons que l'étude nous a beaucoup aidé à compléter notre formation.

## B I B L I O G R A P H I E

- |  |   |
|--|---|
| 1/ - Précis de Métallurgie appliquée                   | A. ROOS.                                      |
| 2/ - Métallographie et traitement thermique des métaux | I. LAKHTINE                                   |
| 3/ - WIRE PRODUCTIONS UNITS                            | NEHOF - KOMMANDIT<br>GESLLSCHAFT              |
| 4/ - Mise en forme des métaux                          | P. BAQUE                                      |
| 5/ - Métallurgie générale                              | J. BERNARD.                                   |
| 6/ - T. de l'Ingénieur                                 |   |
| 7/ - Alliages métalliques                              | G. GHAUSSEN - G.HILLY                         |
| 8/ - Eléments de Construction à l'usage de l'ingénieur | F. BERNARD.                                   |
| 9/ - Eléments de machine                               | V.Dobrovolski                                 |
| 10/- Troute théorique et pratique des engrenages       | G. Henriot                                    |
| 11/- Moto - réducteurs plats triphasés                 | Catalogue FGEBF BALTIER                       |
| 12/- Aide mémoire Conception en construction mécanique | Christian Eloy                                |
| 13/- Aide mémoire Calculs en construction mécanique    | Christian Eloy                                |
| 14/- Aide mémoire Résistance des matériaux             | G.Pissarenko                                  |
| 15/- Guide du dessinateur industriel                   | A. CHEVALIER                                  |
| 16/- THESE de fin d'étude Convoyeur à Vis              | Prop : A GREFKOWICZ<br>Etudié : L. TATAKELAA. |

