

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE L'ECROUISSAGE ET LA RESTAURATION
DE L'ALUMINIUM

Proposé par:

Mme BOUALI

Etudié par:

Dj ZAIDI

Dirigé par:

Mme BOUALI

PROMOTION 1993

E.N.P. 10, Avenue Hacem Badi El-Harrach à Alger

DEDICACE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail...

A mes parents

A mes frères et soeurs

A ma famille et à tous mes amis

REMERCIEMENTS

Mes remerciements les plus vifs vont à Madame BOUALI pour ses conseils et son aide précieuse, ainsi qu'à tous les enseignants du département de métallurgie qui ont contribué à ma formation.

Ma profonde gratitude, ma reconnaissance vont aux responsables de l'entreprise de l'industrie des câbles (ENICAB) du Gué de Constantine pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé, ainsi qu'à l'équipe technique du laboratoire de contrôle et plus précieusement à Messieurs Sid-Ali, Djillali et Mohamed pour leur précieuse aide et leur collaboration et contribution à la réalisation de ce mémoire.

INTRODUCTION

L'aluminium présente un intérêt industriel puisqu'il réuni un certain nombres de propriétés de haut intérêt parmi ces propriétés, on peut citer :

- La facilité de mise en forme par déformation
- Les bonnes propriétés de transport (chaleur et électricité).

Parmi les procédés de déformation à froid, le tréfilage qui est utilisé dans l'industrie de câblage donne lieu à une importante production des fils minces à partir du fil machine. La technique du tréfilage est un procédé très ancien, son amélioration a été faite par des mises au point successives basées sur l'expérience.

Dans ce présent travail nous avons étudié les effets de l'écrouissage de l'aluminium sur la structure, la texture et les propriétés du métal écrouit nous avons ensuite suivi l'évolution de ces propriétés au cours du recuit sous l'influence des principaux paramètres (température, déformation, temps).

Comme matériau nous avons utilisé du fil d'aluminium élaboré en coulée continue, mis en oeuvre par la Société Nationale des Industries de Câblage (ENICAB) et utilisés par la SONEGAS pour les lignes aériennes de distribution de l'énergie électrique.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

Mise en forme des métaux par déformation plastique

1.1 Mécanisme de la déformation plastique

La déformation plastique des matériaux s'accompagne de modification concernant la microstructure et la répartition des contraintes. Les modifications structurales sont de deux sortes:

- Purement cristallines
- Physico chimiques

Dans la première catégorie se rangent les phénomènes de glissement de pliage de distorsion et de subdivision dans les cristaux.

Dans le cas de l'aluminium appartenant au système cristallin cubique à face contre (c.f.c.), on a surtout à s'occuper des phénomènes de glissement.

Le phénomène de glissement obéit à trois lois expérimentales :

- Les plans de glissement ont une orientation cristallographique définie généralement par la densité réticulaire la plus élevée.
- Le déplacement par glissement se fait suivant une direction cristallographique correspondant toujours à une rangée de densité maximale. Comme pour les autres métaux appartenant au système (c.f.c.) (Cu, Ag, An ...), à température ordinaire le système de glissement cristallographique de l'aluminium sera:
 - * Plan de glissement (111)
 - * Direction de glissement $[110]$
- Le glissement se produit lorsque la composante de la tension tangentielle L au plan (111) atteint une certaine valeur appelée cisaillement critique (loi de E. Schmidt) valeur qui diminue lorsque la pureté du métal augmente.

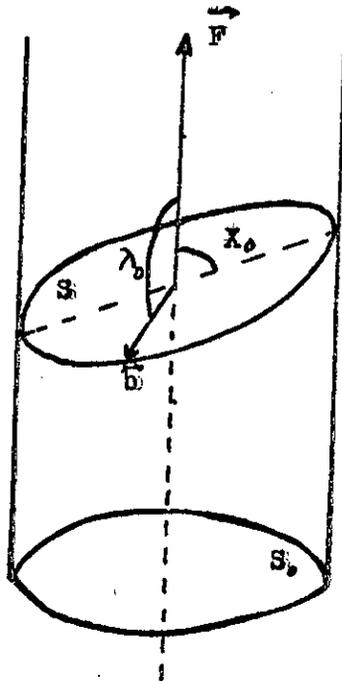


fig. 1: définition des angles du facteur de schmid.

$$\tau = \frac{F \cos \lambda_0}{S_0 / \sin x_0} = \frac{F}{S_0} \sin x_0 \cos \lambda_0$$

x_0 : angle entre plan de glissement avec l'axe de l'éprouvette

λ_0 : angle entre F et la direction de glissement

S_0 : section normale de l'éprouvette

$\sin x_0 \cos \lambda_0$: facteur de Schmidt

Le système de glissement peut varier avec la température, pour l'aluminium on a:

température	plan de glissement
20°C	(111)
200°C	(110)
400°C	(100)

Plus le nombre de plan et de direction de glissement augmente, plus son aptitude à la déformation est élevé

Le glissement résulte du déplacement de dislocations dans le cristal, chaque rangée d'atomes mobiles se déplace par suite de déplacement des atomes successifs à une translation du réseau cristallin, le déplacement d'une dislocation à travers le cristal aboutit au déplacement d'une partie du cristal à une équidistance. En plus du glissement, la déformation de plusieurs métaux à empilement compacte, peut se produire par maclage. Le maclage est une déformation plastique qui consiste en un changement d'orientation d'une partie du cristal qui adopte une position symétrique par rapport à la première partie dans le plan de maclage. Tout comme le glissement le maclage doit s'accompagner de déplacement des dislocations travers le cristal

1-2 Influence des divers facteurs sur la plasticité

La déformation plastiques des métaux est fonction de sa composition chimique, de la structure (phase et grosseur du grain), de la température de la vitesse de déformation, de la direction et de la grandeur des forces extérieurs. les métaux purs sont plus plastiques que leurs alliages. La plasticité d'un métal est plus grande d'une structure dendritique à gros grain que celle du même métal ayant subit une déformation et qui par conséquent, a une structure plus fine, généralement, si on élève la température du métal, sa plasticité s'élève alors que sa résistance à la déformation diminue.

La vitesse de déformation et la température affectent plus la consolidation que la limite élastique.

L'augmentation de la vitesse de déformation engendre un accroissement important de la consolidation.

Par contre une élévation de la température entraîne l'effet inverse (voir fig. 2)

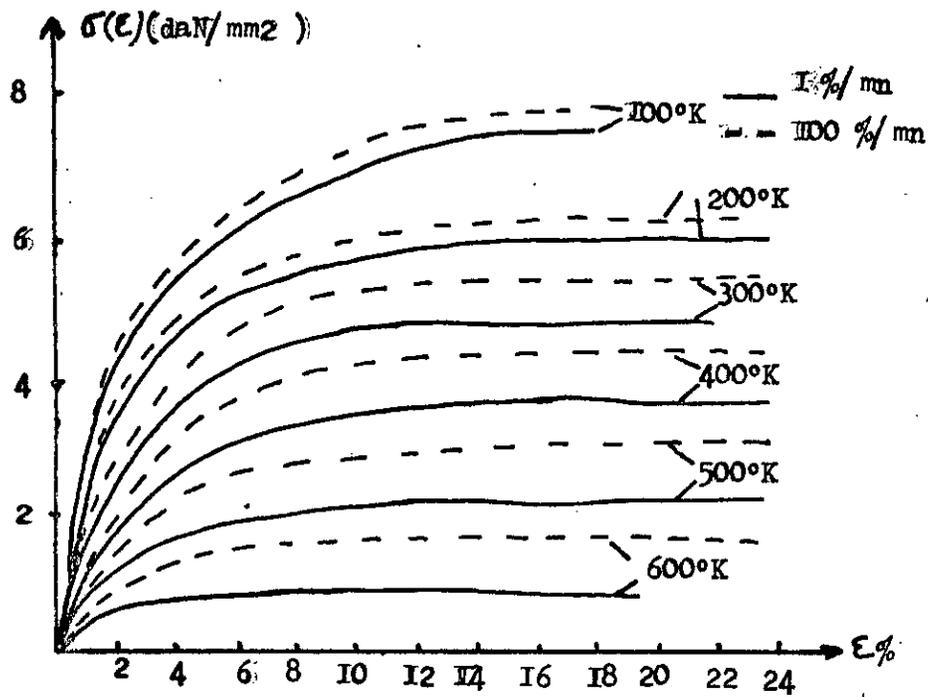


fig. 2: Courbes rationnelles de traction de l'aluminium polycristal en fonction de la vitesse et de la température.

L'état structural initial et les conditions de déformation imposée, influent sur la limite élastique et sur la consolidation définie par $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$. La limite élastique du métal au cours de la déformation plastique augmente consécutivement aux déformations antérieures et aux transformations structurales qui en sont résultées

1-3 Influence de la déformation sur la structure et les propriétés

La déformation d'un métal entraîne une modification notable de la structure. Ses grains s'allongent dans le sens de la déformation en formant une structure fibreuse. Les déformations importantes donnent lieu à une orientation cristallographique préférentielle des grains qui a reçu le nom de texture. La texture entraîne une anisotropie des propriétés cristallographiques.

1-3-1 Origine de la texture

Il est difficile d'éviter la présence de toute texture qu'elle soit provoquée par écrouissage ou après solidification. Les métaux en se solidifiant, leurs premières orientations préférentielles prennent naissance et seront à l'origine de toute influence sur les textures ultérieures. L'expérience montre que pour les métaux C.F.C on obtient une texture $\langle 001 \rangle$ autrement dit une texture de fibres $\langle 001 \rangle$ parallèles à l'écoulement de la chaleur. Le glissement imposé tend à amener les directions de glissement de la contraintes à la suite de diverses rotations du grain consécutives au glissement une texture peut en résulter

1-3-2 Textures d'écrouissage

La déformation des divers grains est accompagnée d'une rotation de leur réseau cristallin vers un certain nombre de position stables. Ces positions stables correspondent aux orientations préférentielles de la texture de déformation. Elles dépendent de plusieurs facteurs:

- 1- des conditions dans lesquelles est faite la déformation.
(vitesse, température, nature du système de glissement)
- 2- Types de déformation (tréfilage, traction laminage)
- 3- position initiale des grains (textures initial)

1-3 Déformation par tréfilage

Le tréfilage est une opération qui a pour effet de réduire les sections en obligeant le matériau à s'allonger plastiquement sous un effort de traction (fig. 3)

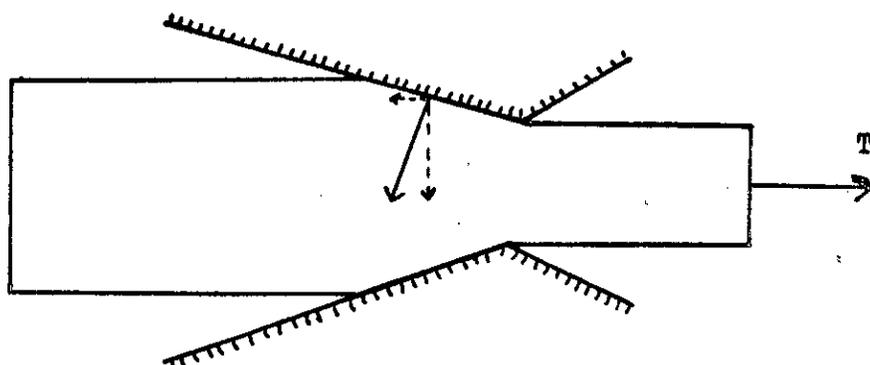


fig. 3: Forces exercées sur le métal pendant son passage dans une filière.

CHAPITRE II

ECROUISSAGE

2-1 Phénomène d'écrouissage pendant la déformation plastique

L'écrouissage est la modification structurale que subit un métal du fait d'une déformation plastique permanente et d'où résulte une modification de ses propriétés physiques et mécaniques. L'écrouissage dépend de la déformation plastique, il modifie la structure cristalline. L'écrouissage est le phénomène de durcissement par multiplication et blocage des dislocations à température ambiante modifiant ainsi les propriétés mécaniques et physiques.

La déformation plastique du métal est rendu possible par la multiplication et le déplacement irréversible des dislocations mais les déplacements de celles ci peuvent rencontrer d'autres dislocations et donc interagissent entre elles. Au fur et à mesure que la déformation plastique prend de l'ampleur (le nombre de dislocation augmente), elle devient plus difficile à réaliser. On aboutit donc à une plus grande résistance à la déformation plastique (voir fig. I)

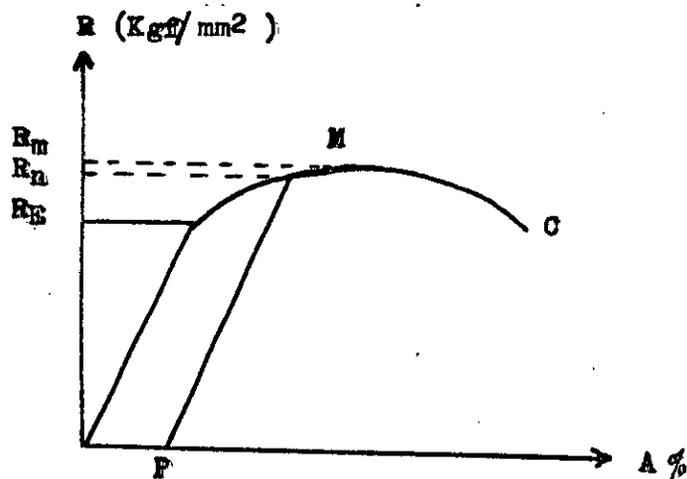


fig. I Diagramme effort déformation

2-2 Interaction entre dislocation et défaut cristallins

2-2-1 Formation d'un cran

Lorsque une dislocation coin rencontre une dislocation vis, il y a formation d'un cran égal au vecteur de burgers de celle-ci, considérons un plan cristallographique (P) supposé horizontale (voir fig. 2) contenant une dislocation coin (b), est traversé perpendiculairement par une dislocation vis (V) de vecteur de burgers \vec{V} , elle s'est transformé en ligne brisée AA' BB' le segment A'B' s'appelle cran est un segment de dislocation dirigé suivant le vecteur de burgers \vec{V} , de longueur V et ayant b pour vecteurs de burgers. De même sur la dislocation vis, il se forme un cran horizontal Cc', de longueur b , ayant \vec{V} pour vecteur de burgers, d'une façon générale, quant une dislocation D se déplace dans son plan de glissement elle rencontre d'autres dislocations fixes traversant ce plan, généralement chaque dislocation subit un décalage appelé cran. Le cran sur une dislocation D_2 à la longueur et la direction du vecteur de burgers de la dislocation D_1 qui la traverse, mais a toujours le vecteur de burgers de la dislocation D_2 .

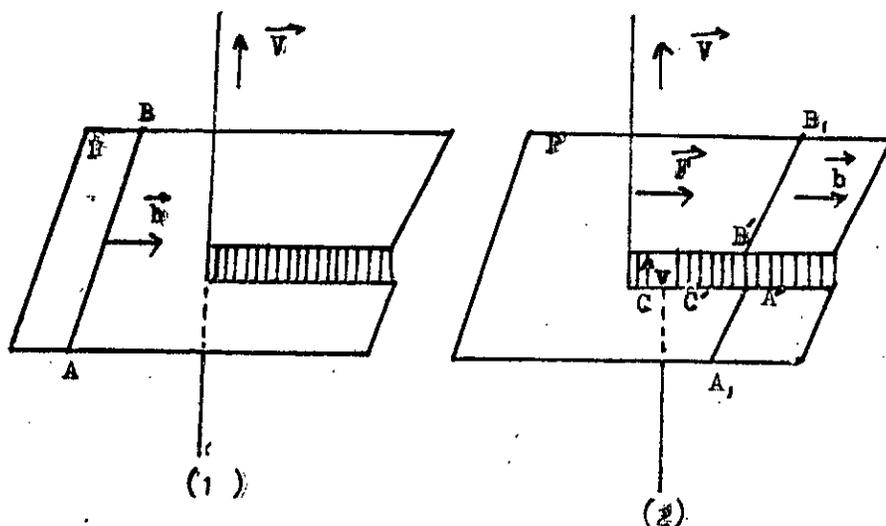


Fig. 2

La formation d'un cran nécessite une certaine énergie et par conséquent gêne le mouvement des dislocations, le mécanisme des dislocations est extrêmement complexe: les dislocations ne sont pas forcément orthogonale entre elle . elles sont généralement mixtes elles peuvent être imparfaite. Le nombre de dislocations augmente considérablement avec la déformation plastique. La formation d'un cran ne correspond qu'à des déformations faibles. Au delà, il se produit des configuration nouvelle de forme complexe. En particulier il apparaît des dislocations super sessiles (une telle dislocation ne peut ni glisser ni monter) qui constituent une barrière pour les dislocations qui les rencontrent.

2-2-2 Interaction d'une dislocation avec des précipités répartis uniformément

Les précipités ou les zones de Guinier-Preston sont contournés par les dislocations s'ils sont de grande taille et cisailés dans le cas de très petites particules, car l'alliage est voisin d'une solution solide unique. Par contre l'obtention d'un précipité finement dispersé avec des distances entre deux obstacles, gêne le mouvement des dislocations, celle-ci ne peuvent franchir l'obstacle que sous l'action d'une cission suffisante soit en les évitant par un mécanisme de montée ou de glissement dévié (passage d'un plan de glissement à un autre) soit en passant entre eux si elles sont assez espacées. La figure 3 illustre le mécanisme, analogue à celui de Frank et Read. La dislocation commence à se courber, puis traverse l'obstacle

si la cission est au moins égale à $\frac{2Gb}{\lambda}$

λ : distance entre obstacle

b : distance de déplacement de la partie supérieure sur la partie inférieure de cristal.

G : Module de cisaillement

Cette formule approchée, correspond à des particules sphériques, la modification de la sphéricité des particules a pour effet en général d'accroître la dureté. Quand la

dislocation D à traversé une rangée de particules de précipités, une bouche de dislocation entoure chaque obstacle, l'espace libre entre les obstacles à diminuer et le déplacement des dislocations est rendu plus difficile, pour un même volume total de précipités. La distance entre particules et leur taille varie en sens inverse. Le durcissement de l'alliage est d'autant plus grand que les particules sont plus proches les unes des autres, c'est à dire qu'elles sont fines.

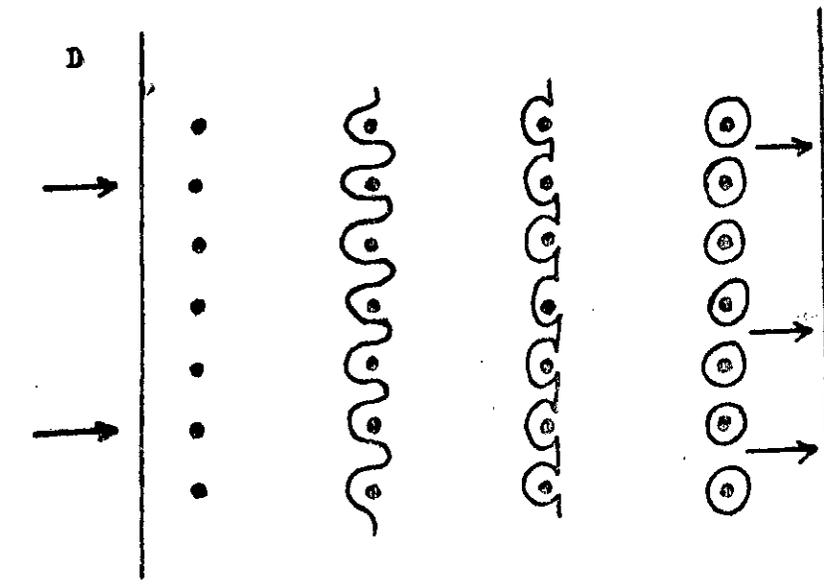


fig. 3 : Interactions d'une dislocation avec des précipités répartis uniformément.

2.2.3. Interaction avec les joints de grains

les joints de grains ont pour effet d'augmenter la résistance vu que les dislocations ne peuvent franchir un tel obstacle et ne peuvent disparaître. La surface n'étant pas libre.

Sur le joint elles forment un empilement. La contrainte locale qu'elles créent peut être suffisante pour déclencher un

glissement dans le grain voisin. Les joints de grains constituent une barrière contre le glissement parce que les dislocations ne peuvent pas les traverser (sauf toute fois si la température est trop élevée). Lorsque il y a empilement des dislocations appartenant à un même plan de glissement contre un joint, la contrainte en tête d'empilement est égal à $n\tau$ si la cission appliquée à la première dislocation est égale à τ . Ainsi le joint transmet une cission élevée au cristal voisin et une déformation peut se propager à tous les grains à travers les joints (voir fig. 4).

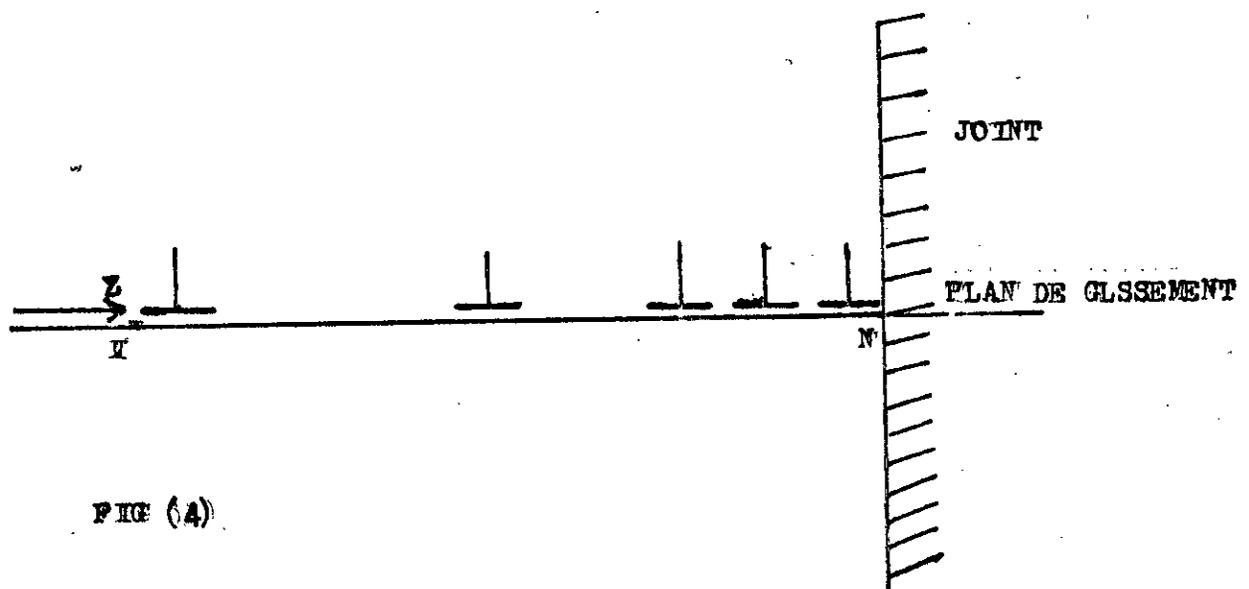


FIG (4)

Les contraintes en tête d'empilement peuvent dépasser la résistance à la rupture et créer des microfissures. La déformation d'un cristal formé de deux cristaux soudés l'un à l'autre sur une certaine longueur, le contact subsiste toujours le long du joint, et par suite la déformation de chaque cristal est influencée par celle de l'autre. La déformation est plus importante au voisinage de la partie commune que dans le reste du métal. Les polycristaux dont les orientations sont très diverses se déforment par glissement et distorsion de manière non homogène. En général, les glissements de deux grains

adjacents n'arrivent pas en coïncidence sur les joints, et il s'en suit de fortes distorsion aux limites des grains. La déformation du polycristal fait intervenir plusieurs facteurs qui définissent la structure du métal:

- La taille du grain, la distorsion prenant naissance au voisinage des joints des grains, son importance croît avec la finesse du grain; celle-ci entraîne donc une augmentation de la résistance à la déformation plastique, et la dureté. La résistance à la traction vérifie souvent la formule.

$$R = A + \frac{B}{\sqrt{D}}$$

D : diamètre moyen du grain

A, B: sont des constantes dépendantes du matériau

- orientation des cristaux les uns par rapports aux autres, et par rapport à la direction de l'effort.
- Les impuretés accroissent la résistance des polycristaux, d'une façon plus prononcée que pour les monocristaux.
- Orientation des joints par rapport aux plans de glissement et par rapport à la direction de l'effort.

2-2-4 Effet des éléments d'alliage:

Le métal à une résistance mécanique d'autant meilleure que la propagation des dislocations est plus difficile, il faut donc créer des obstacles aux mouvements de dislocations dans les solutions solides de substitution, à **causes** des différences de dimension des divers sortes d'ions, le réseau du métal solvant est légèrement déformé, dans les solutions d'insertion.

Les ions interstitiels plus volumineux que les espaces vides, déforment le métal autour d'eux. De plus les éléments en solution agissent sur la morphologie des imperfections du réseau cristallin. La présence d'un atome en solution fait

apparaître un champ de contraintes qui peut gêner le mouvement des dislocations. Ce qui permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques exceptionnelles.

2-3 Structure du métal écroui

2-3-1 Modification de la structure cristalline

L'écrouissage croît en fonction de la densité de dislocation présente dans le métal suivant la loi:

$$\Delta\delta = \delta - \delta_0 = Kgb\sqrt{\rho}$$

d'où: K: constante de l'ordre de l'unité

G: module de cisaillement

b: vecteur de burgers

ρ : densité de dislocation

Dans le cadre de la théorie des dislocations la déformation se fait essentiellement dans le stade qui est caractérisé par une importante densité de dislocation et une possibilité de glissement d'autant plus grande que l'énergie de faute d'empilement et que la température de déformation sont élevées. Pour certains métaux de faible énergie de faute d'empilement, la densité de dislocation augmente constamment avec la déformation, pour d'autres au contraire de forte énergie de faute d'empilement il se produit pour un début de restauration dynamique, un équilibre partiel entre le nombre de dislocations créés à chaque instant, fonction de la vitesse moyenne de déformation et le nombre de dislocation qui s'annihilent en fonction de la température de déformation.

A cet équilibre correspond la déformation d'une structure cellulaire qui dépend du métal, elle est d'autant plus parfaite que le métal présente une forte énergie d'empilement.

Au cours de l'écrouissage, la structure n'est pas seulement perturbée par la présence des dislocations et la formation d'une structure cellulaire. En effet l'écrouissage introduit également des lacunes et interstitiels qui, suivant les métaux

et la température s'éliminent plus au moins rapidement après déformation.

2-3-2 Modification de la forme du grain

A toute déformation correspond toujours un changement de forme de l'ensemble des grains du métal. Pendant le tréfilage, les grains s'allongent dans la direction de tréfilage. Par contre dans les directions perpendiculaires à la filière, les dimensions de grain diminuent. Le tréfilage transforme un empilement des grains plus ou moins équiaxes en empilement de strates ou fibres peu épaisses et très longues.

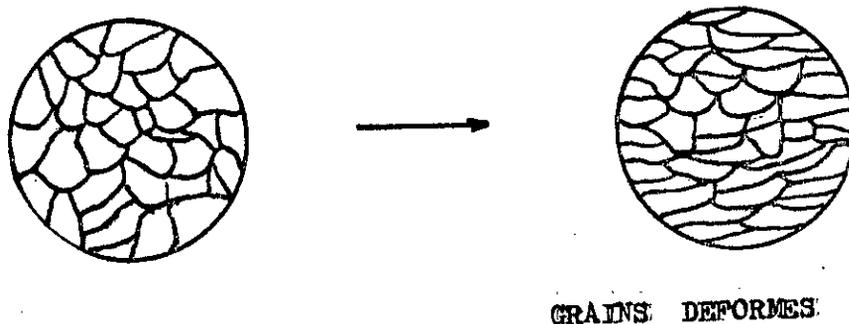


FIG (5)

En résumé le durcissement par écrouissage résulte :

1. Du blocage des dislocations, qui augmente la résistance au glissement et accroît le cisaillement critique.
2. De la naissance de contraintes internes dues à la consolidation d'interaction.
3. de l'augmentation de l'énergie potentiel latente au voisinage des joints des grains, provoquée par la courbures des intergranulaires.
4. de l'accroissement de la résistance à la fragmentation des cristaux et de la résistance de la déformation de cristaux par flexion (polymérisation structure mosaïque).

CHAPITRE III

RESTAURATION ET RECRISTALLISATION

INTRODUCTION

Les modifications structurales entraînées par tréfilage à froid modifient, les propriétés mécaniques et physiques, la majeure partie du travail mécanique se dissipe sous forme de chaleur, le métal s'échauffe, alors que la partie restante s'accumule sous forme d'énergie potentielle élevée des atomes chassés de leur état d'équilibre.

Cette accumulation d'énergie est traduite par l'augmentation des défauts d'arrangements cristallins (interstitiels, lacunes, dislocations, etc.) et **l'augmentation** en cours de déformation des contraintes résiduelles, ceci fait que l'état du métal écroui est thermodynamiquement instable. Le chauffage d'un métal provoque des processus de restauration et de recristallisations qui rétablissent toutes les propriétés qu'avait le métal avant la déformation

3.1 Evolution structurale au cours d'un recuit.

3.1.1 Restauration

le phénomène de restauration. est défini comme étant un processus qui permet de réduire les défauts atomiques : interstitiels, lacunes et dislocations introduites par écrouissage et ceci est effectuée à une température inférieure à celle de la recristallisation sans modification de la structure visible au microscope optique. Généralement au cours de la restauration les dislocations de signes opposés s'annihilent alors que les dislocations de même signe se réarrangent de manière à former une nouvelle configuration plus stable.

Lorsque la température de recuit augmente, les dislocations se dressent en parois normales à leur vecteur de burgers (normale aux plans de glissement), et le cristal sera alors formé de petits blocs légèrement désorientés, les uns par rapport aux autres. Ce processus s'effectue par glissement et montée qui

porte le nom de polygonisation c'est à dire les dislocations vont se réarranger en polygone dont l'énergie est faible. Le processus de polygonisation dépend de la nature du métal on distingue :

- Les métaux à forte énergie de défauts, où le réarrangement des dislocations est facile, d'où la modifications des propriétés mécaniques est notable avant la recristallisation.
- Les métaux à faible ou a moyenne énergie de défauts d'empilement; les dislocations étant stables, difficiles à déplacer, les propriétés mécaniques n'évoluent qu'au cours de la recristallisation.

L'évolution des propriétés mécaniques au cours du chauffage dépend essentiellement du comportement des dislocations, c'est à dire qu'elle est liée à l'énergie des défauts d'empilement. Au cours de l'augmentation de la température de recuit, l'allongement A augmente et la charge R diminue. La vitesse de restauration est d'autant plus importante que la température est élevée mais elle varie dans le sens inverse avec le temps de recuit.

3.1.2 Recristallisation

3.1.2.1 Recristallisation primaire

Quand l'écroutissage réalisé est suffisant (supérieur à une certaine valeur de l'ordre de 2 à 5 %) appelée "écroutissage critique", le recuit fait apparaître de nouveau cristaux généralement répartis d'une manière homogène et dont l'orientation cristalline est très différente de l'orientation des grains déformés dans lesquels se développent un joint de grain de forte désorientation sépare alors le grain recristallisé de la matière environnante. Les nouveaux grains se développent en consommant la matrice écroutie partiellement restauré jusqu'à ce qu'ils soient en contact entre eux. A ce moment la recristallisation "primaire" est terminée et le métal à

pratiquement retrouvé les propriétés de plasticité qu'il avait avant l'érouissage.

La recristallisation primaire dépend de plusieurs paramètres :

- Des taux d'érouissage, un érouissage minimal est nécessaire pour que la recristallisation se produise il est dit érouissage critique (généralement faible). Pour les taux d'érouissage supérieures, le nombre de germe augmente, et la recristallisation se termine avec des grains plus nombreux et plus petits, pour une température et un temps donnés, la grosseur de grain de recristallisation est alors d'autant plus faible que l'érouissage est plus grand.
- La température de recristallisation est d'autant plus basse que le temps de recuit est plus long, pour un même taux de déformation.
- La température de recristallisation est d'autant plus basse que la pureté du métal est élevé.
- La température de recristallisation est d'autant plus élevée que la déformation est faible, cette première pourra être définie comme étant la température minimale à partir de laquelle la recristallisation se produit en un temps donné.
- La recristallisation ne débutera qu'après une "période d'incubation". La vitesse de recristallisation est caractérisée par le volume recristallisé par unité de temps. voir figure.

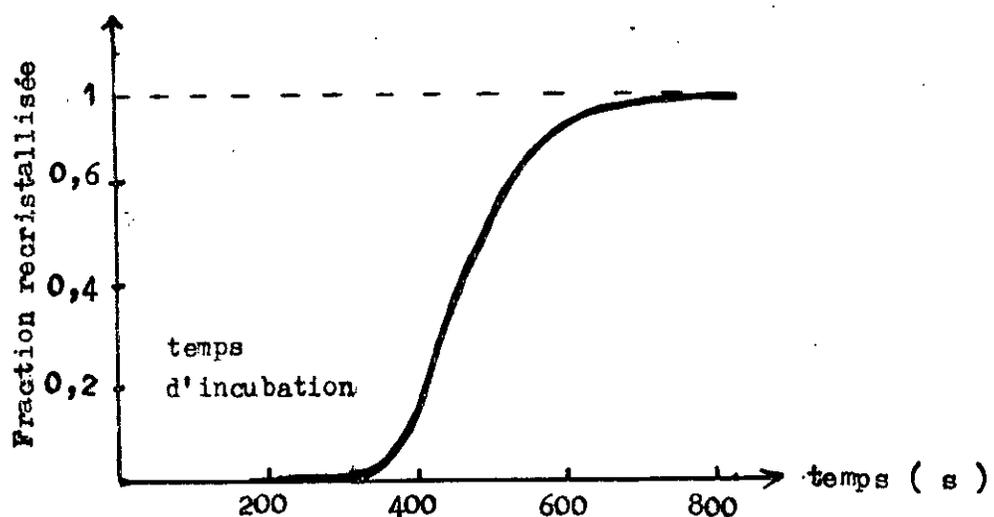


fig. 1: Cinétique de recristallisation de l'Al à 350 °C après une déformation de 5 % par traction.

3.1.2.2 Recristallisation secondaire

Lorsque la recristallisation primaire ne marque plus la fin de l'évolution structurale si on poursuit le recuit, on entre en effet dans une nouvelle phase caractérisé par un grossissement du grain.

Cette phase dans la quelle, les grains se développent aux dépens d'autres grains déjà recristallisés commence dès la fin de la recristallisation primaire.

Le grossissement de grains est parfois lent et homogène : c'est le grossissement normale, Mais très souvent le grossissement du grain est bloqué par la présence de phase précipitées.

On peut observer lorsque le blocage n'est pas suffisant ou que le blocage disparaît par une suite d'une élévation de température de recuit le grossissement de seulement quelque grains qui envahissent la matrice recristallisée, on obtient des grains de dimensions importantes et d'orientation parfois très différentes de l'orientation moyenne de la matrice dans laquelle, ils se sont développés. Lors de la recristallisation la structure est momentanément constituée de deux familles de grains, de grosseurs différentes, jusqu'à ce que les nouveaux cristaux aient envahi toute la masse ceux qui atteignent alors une taille moyenne d'équilibre qui est fonction de plusieurs paramètres:

- taux d'érouissage : ce paramètre intervient indirectement, en affinant d'abord le grain de recristallisations de manière après grossissement dans les conditions déterminés (température et temps) le grain est encore d'autant plus fin que l'érouissage est plus fort
- Pureté du métal : les inclusions finement disséminées telles que les oxydes modifient la cinétique de grossissement du grain si leur répartition n'est pas uniforme, la taille finale du grain peut être hétérogène.
- Température de recuit : pour un taux d'érouissage définie le grain grossit d'autant plus vite que la température est élevée.

Les différentes étapes de recuit sont résumées dans la figure suivante en faisant apparaître les variations de quelques propriétés mécaniques en fonction de l'évolution de la structure.

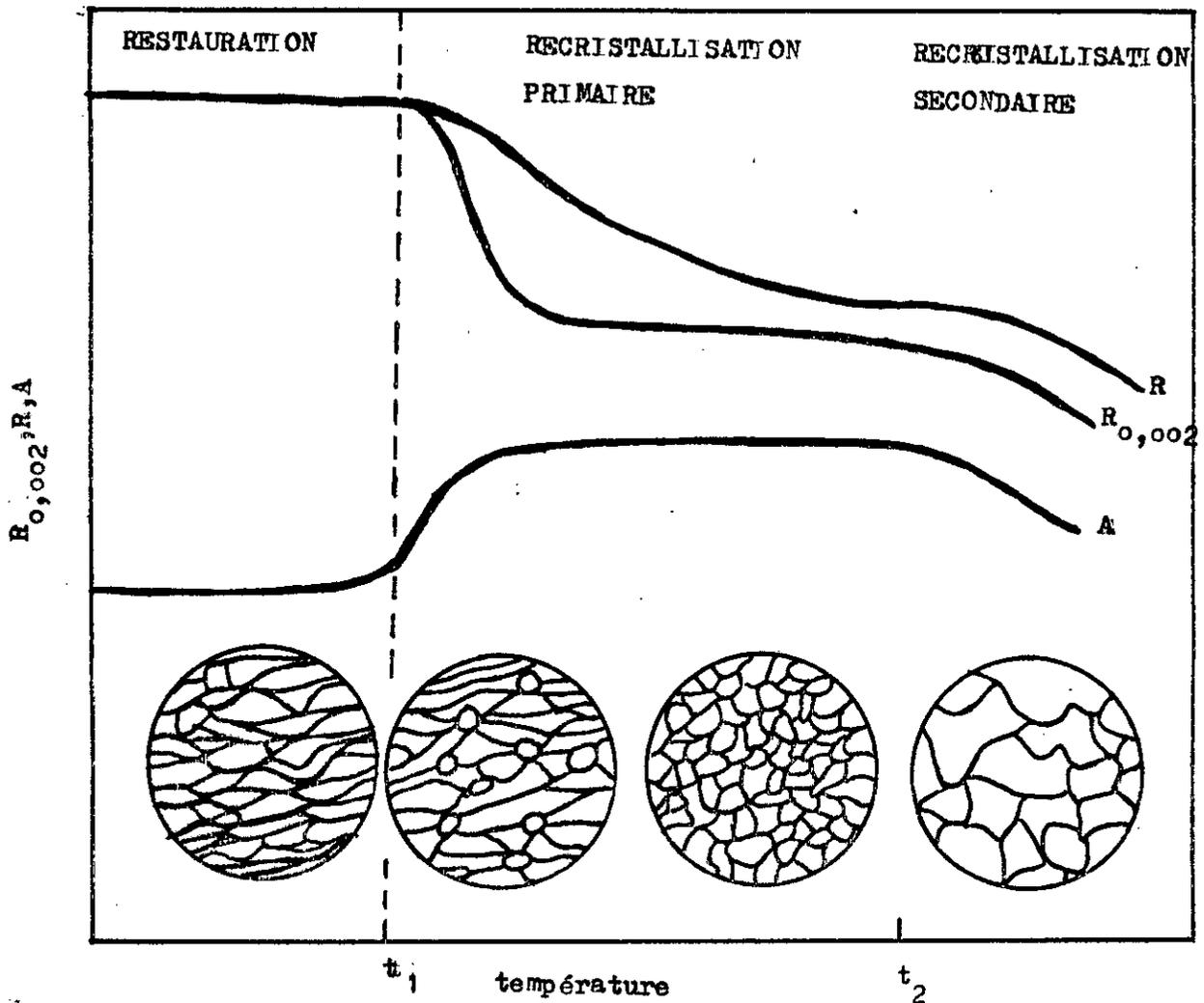


fig. 2 : Influence de la température de recuit sur les propriétés mécaniques et la structure durci par déformation

3.2 Textures de recristallisation

Lors du recuit, la monostructure en particulier la texture de déformation est généralement profondément modifiée. La texture est le résultat de la germination dans les différentes orientations et la croissance des germes déjà formés, elle dépend dans plusieurs facteurs:

- Texture de déformation.
- Paramètres de recuit en particulier de la vitesse de chauffage.
- Phénomène métallurgiques susceptible d'interférer avec la recristallisation tels que la précipitation d'éléments en solution solide sursaturés ou la remise en solution d'éléments précipités.

3.2.1 Modification de la texture par recuit et ses conséquences.

Le recuit de restauration n'entraînent pas de modification de l'orientation cristalline tandis que par recristallisation apparaissent de grains nouveaux d'orientation différente de l'orientation du métal écroui. Et au cours de la recristallisation, la texture de tréfilage est ainsi remplacée par une nouvelle texture appelée texture de recristallisation et qui dépend des mécanismes qui se reproduisent pendant le recuit (germination, croissance et grossissement du grain), la germination est le résultat de la croissance d'une cellule d'écrouissage situé au voisinage d'une forte hétérogénéité d'orientation.

L'orientation d'un germe est donc une des orientations de texture de tréfilage, mais cette orientation peut correspondre à une très faible fraction volumique de la structure écroui. Au cou de la croissance, la migration des joints de grains est plus rapide lorsque une certaine **des** orientations existe de part et d'autre du joint; la migration **des** joints de grains et donc la croissance des grains sont orientés c'est pourquoi on observe toujours presque une relation entre la texture de recristallisation et la texture de tréfilage, Après recristallisation un grossissement de grain peut se produire et ce grossissement a un effet sur la texture de recristallisation. Lors de l'écrouissage des précipités fins formés peuvent fixer les joints et les sous-joints de grains et pour des recuits de basse température conduire à une texture de restauration identique à la texture de **trofilage**. La présence de précipités peut influencer sur la texture de tréfilage ce qui

modifie considérablement les conditions de grossissement du grain.

Les textures de recristallisation sont responsables des propriétés anisotropiques, des produits tréfilés recuits. Suivant le cas, on développe ou, au contraire, on cherche à réduire l'importance des textures de recristallisation. Enfin, pour obtenir de meilleurs résultats on est amené à utiliser des recuits fonction du métal ou de l'alliage et des propriétés recherchées.

3.2.2 Les effets indirects du recuits

Le recuit ne produit pas qu'une restauration ou une recristallisation, en effet suivant la composition du métal ou de l'alliage et la température de recuit, on constate aussi, - des phénomènes de précipitation qui peuvent se produire pendant la restauration ou la recristallisation, ou au contraire de mises en solution particulière de certains éléments d'addition à la température de recristallisation. En effet la solution solide est souvent sursaturée et les phénomènes de précipitation peuvent donc se produire d'autant que la structure contient de nombreux défauts (dislocations, sous joints) qui accélèrent généralement la précipitation. Cette précipitation peut avoir des conséquences très différentes, elle perturbe en générale la cinétique de recristallisation.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I

Procédé de fabrication du fil électrique d'aluminium

Deux procédés sont utilisés dans la fabrication de l'aluminium destiné à l'industrie pour le transport de l'énergie électrique.

a) Procédé classique

Les lingots d'aluminium subissent des réchauffages à la température de 500°C, dans un four électrique.

Après l'opération de réchauffage, les lingots passent directement au laminoir à plusieurs cylindres pour être laminés à chaud, et ressortir sous forme de fil de diamètres déterminés; puis ils sont bobinés aux moyens d'un bobinoir. Le refroidissement se fait à l'air libre.

b) Procédé de coulée continue: voir (fig. I-1), (fig. I-2), (fig. I-3)

Ce procédé est le plus utilisé dans l'industrie de fabrication du fil-machine (tréfilage). Il consiste à fondre les cathodes dans un four chauffé au gaz naturel.

Le métal fondu s'écoule par une goulotte dans un four de maintien dans lequel la teneur en oxygène est soigneusement réglée. Celle-ci est mesurée d'une façon continue à la sortie du four de maintien. Ensuite le métal liquide entre dans la machine de coulée par un bec de forme bien étudiée pour réduire les remous au minimum. A la sortie de la machine de coulée, la solidification de la barre est totalement achevée par refroidissement à l'aide d'un jet d'eau.

Avant d'entrer dans le laminoir, la barre est découpée en longueur de un mètre, ensuite elle passe dans un tunnel d'homogénéisation de température dont le chauffage se fait par induction à basse fréquence, pour permettre un laminage à température constante.

Au cours du laminage, elle subit un nettoyage par arrosage à l'aide d'un liquide constitué d'eau, contenant une huile spéciale.

c) Décapage des fils:

Ce processus consiste à former, après refroidissement du fil, des spires à un diamètre correspondant à la forme de la bobine ou elles sont transportées dans les cuves de décapage, la première cuve contient de l'acide sulfurique à 60°C, qui arrose le fil sous pression de façon à accélérer le décapage, ensuite elles traversent des cuves de rinçage à l'eau froide, puis à l'eau chaude et l'opération se termine enfin par un traitement au moyen d'une solution permettant de stabiliser l'aspect de surface du fil.

- A : goutte de l'amené du métal liquide.
- B : Four de Coulée.
- C : ruban.
- D : ébauche solidifiée.

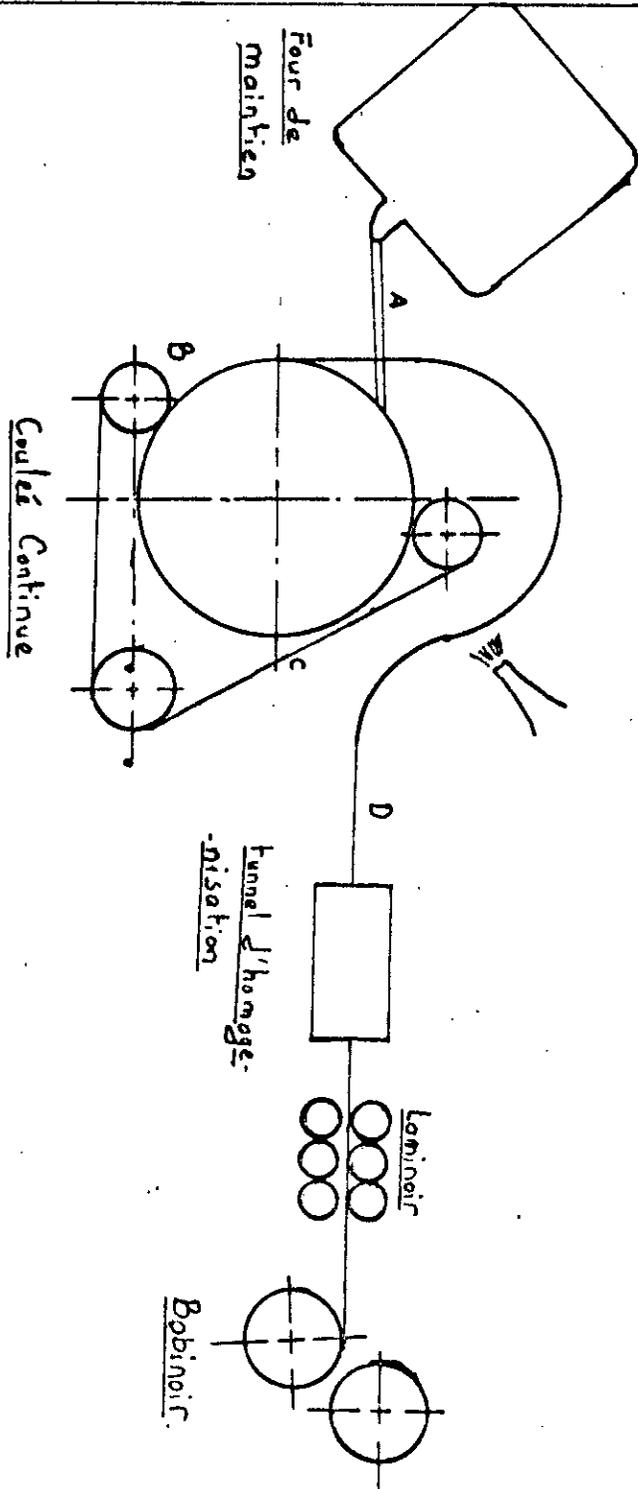
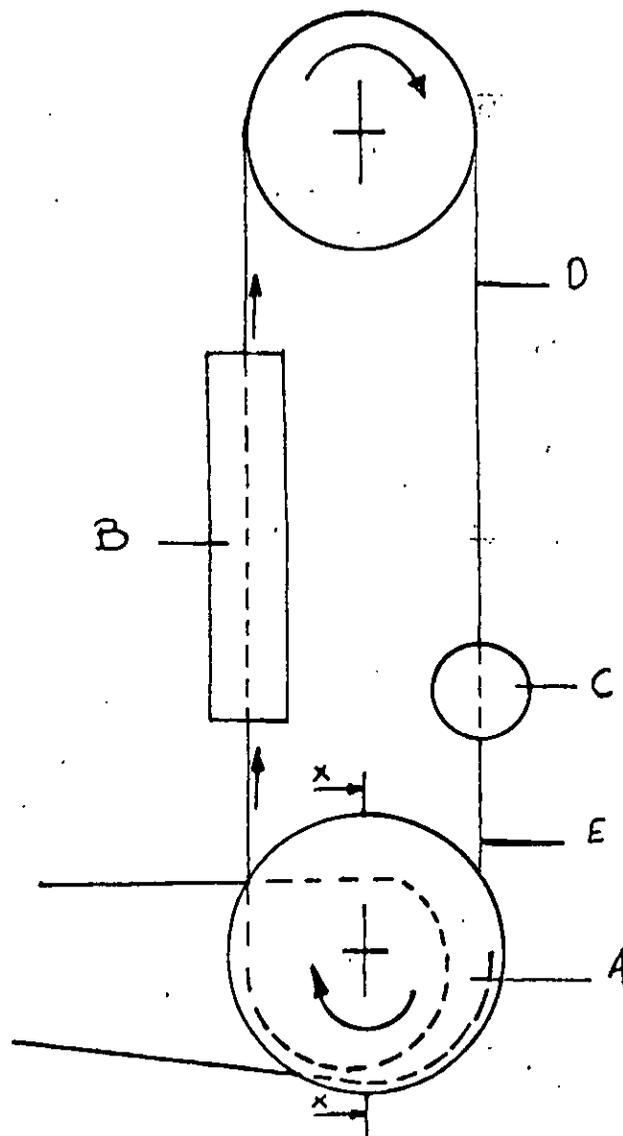


Fig I. 1) Procédé de Coulée Continue.



A: poulie a gorge profonde isolante.

B: dispositif d'induction longitudinal.

C: dispositif de refroidissement instantané.

D: Zone de recuit.

E: Zone de sechage



Coupe x-x

Fig(I 2) Dispositif de recuit continu.

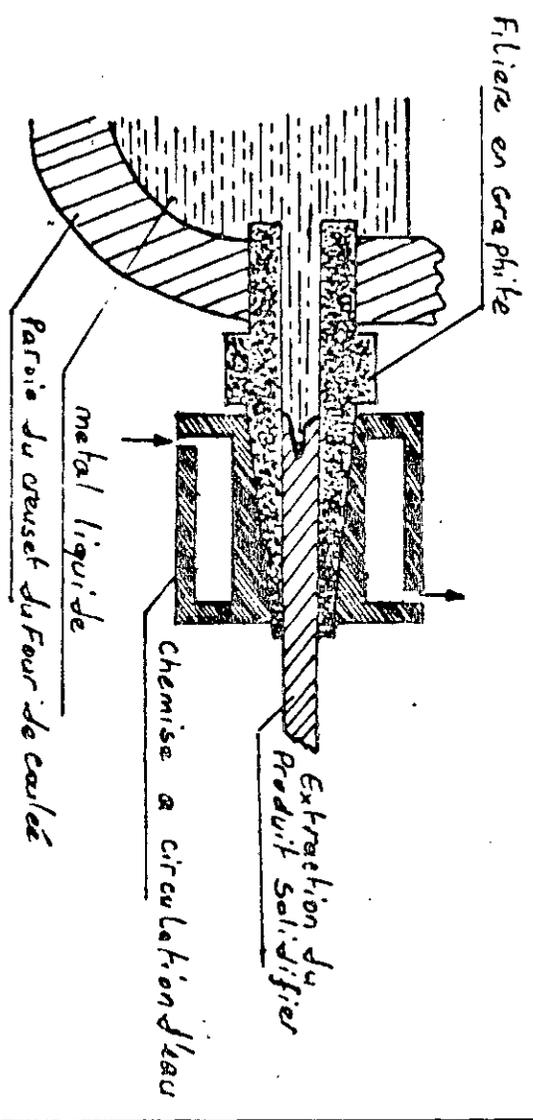


Fig (1.3) Coulé Continue horizontale en Lingotière
A Filière de Graphite.

CHAPITRE II

Procédé de tréfilage

Le fil machine obtenu par les opérations de laminage est un produit intermédiaire, surtout dans la fabrication des câbles électriques, dont le fil doit avoir un diamètre plus petit, l'opération qui permet la réduction du diamètre du fil est dite tréfilage. Elle a pour effet de réduire les sections en obligeant le matériau à s'allonger plastiquement sous l'effet de traction.

En ce qui concerne l'allongement, l'intervention de la filière modifie complètement la distribution des contraintes dans le métal "s'écoulant" à travers elle, en apportant l'effet de la compression.

Elle permet alors d'étirer sans rupture un métal écroui, dans lequel, à la traction simple il ne reste que 1 à 3% d'allongement disponible et cela en lamenant à une section considérablement inférieure à celle de la striction.

2-1 Analyse et travail dans la filière

La filière est un corps solide (acier), avec un trou conique usiné dans un matériau de dureté élevée (carbure du tungstène, diamant, etc.). Notons que pour des fils de diamètre supérieur à 1mm, on utilise des filières à carbures de tungstène et pour des diamètres inférieurs à 1 mm, on utilise des filières de diamant dont la durée de vie est de 50 à 100 fois supérieure à celle des filières de carbures de tungstène.

2-2 Description de la filière (fig. II,1)

Depuis l'entrée jusqu'à la sortie du fil, nous définissons comme suit, les quatre parties de la filière (fig. II-2, 1).

a) Cône d'entrée: AA' - BB'

C'est la partie non travaillante, bien raccordée au reste du profil et arrondie de façon à ne pas blesser le fil, même lorsqu'il ne se présente pas normalement, son but est de favoriser l'accès du lubrifiant dans la zone de travail.

b) Cône de travail BB' - CC'

C'est la partie essentielle de la filière, puisque c'est là que s'effectue la totalité ou presque la totalité de la déformation, son angle doit être supérieur à 12° . Pour les vitesses l'angle doit être plus ouvert, le choix de l'angle dépend du diamètre de tréfilage.

c) Portée CC' DD' cylindrique

C'est la partie cylindrique ou légèrement conique, servant à parfaire le guidage de l'écoulement dans le cône de travail et à calibrer la section finale. Lorsque la portée est conique, l'angle total du cône dépasse rarement 5° et sa longueur est fonction du diamètre de sortie.

0,3 à 0,5 d, pour les diamètres supérieurs à 4 mm

0,5 à 0,75 d, pour les diamètres inférieurs à 1 mm

La longueur de la portée doit augmenter lorsque l'importance de la réduction diminue.

d) Cône de sortie

Cette portion de profil est sans influence sur le diamètre du fil mais son rôle est important car elle sert à soutenir l'orifice terminal pour éviter qu'il s'écaille, son angle est généralement de 70° .

2-3 Lubrification

Le fil s'échauffe lors de son passage à travers la filière, suite du travail interne de déformation et de frottement sur la filière.

Cet échauffement s'accroît avec l'augmentation de la vitesse de tréfilage. Pour cela le refroidissement et la lubrification sont deux facteurs très importants dans l'industrie. Le refroidissement est assuré par l'eau ou l'huile, les caractéristiques du lubrifiant diffèrent selon l'importance de la déformation et les conditions dans lesquelles elle est effectuée.

Il doit répondre aux conditions suivantes:

- ne doit pas créer de dépôt nuisible sur la surface du fil (coloration corrosion, etc.)
- il doit être stable (oxydabilité, interaction chimique avec le métal, etc.)
- il doit posséder une polarité suffisante pour adhérer à la surface métallique
- au cours du tréfilage le lubrifiant se charge de paillettes de métal, seul les grosses particules sont filtrées, les autres seront éliminées par décantation. On économise ainsi le remplacement onéreux du lubrifiant, tout en améliorant la tenue des filières et la qualité de la surface du fil

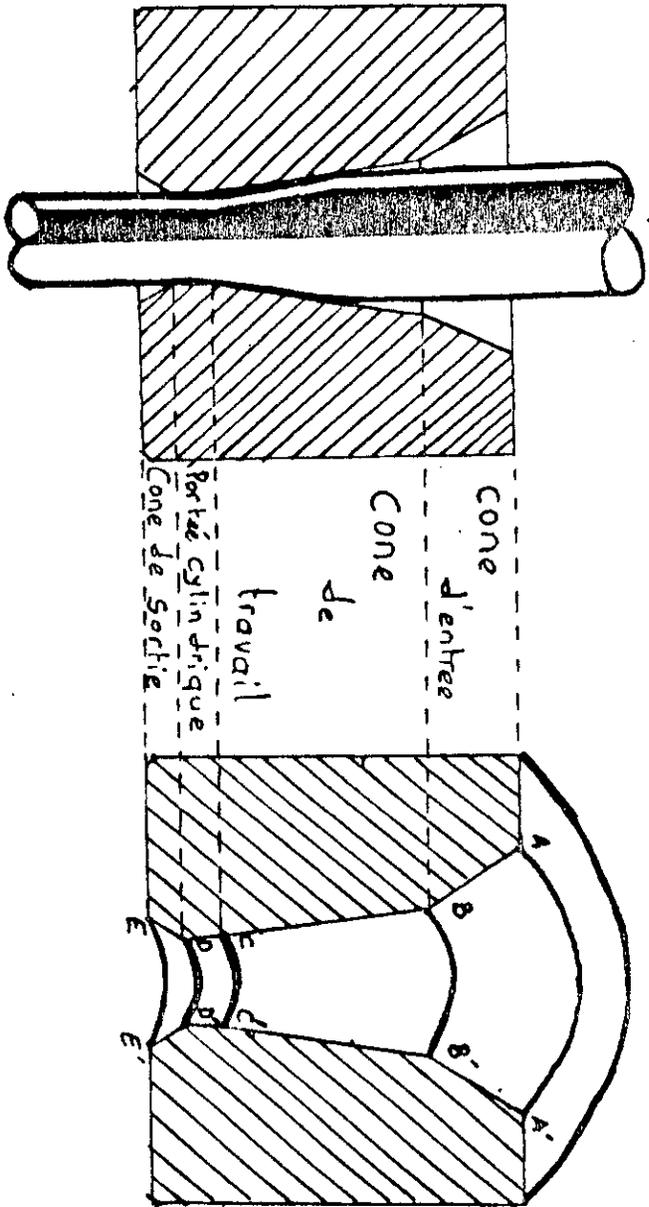


Fig. III. 1) : Profil de filière.

- le maintien du pouvoir de lubrifiant doit être assuré par un bon refroidissement du bain de tréfilage. Des lubrifiants peuvent supporter des températures de 150°C sans se décomposer.

2-4 Influence des facteurs secondaires

a) Influence de la répartition des passes:

La résistance des fils est d'autant plus élevée que le nombre de passes et plus grand pour un même taux de réduction, ceci s'explique par l'accumulation des écrouissages successifs au passage des filières. Le tréfilage par très forte passes est défavorables à la qualité du fil.

b) Influence de la vitesse:

L'utilisation de grande vitesse de tréfilage conduit à réduire l'importance de la réduction de la section par passe, donc augmenter le nombre de passe de tréfilage pour obtenir le diamètre désiré. Il est sans doute utile de rappeler que la vitesse n'est pas toujours le facteur primordial de la productivité surtout pour la machine multiple (5 à 21 filières) et le réenfilage consécutif peuvent plus que tout autre facteur abaisser le rendement.

2-5 Type de machines de tréfilage fig. II,2

a) Machine simple (fig. 2)

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

b) Machine multiple

Dans ce genre de machine, le fil passe d'une bobine à la suivante en traversant une nouvelle filière et subit à chaque fois une réduction de section et accroissement de vitesse. On distingue trois types de machines multiples

- Machine dite "continue" (fig. 3)

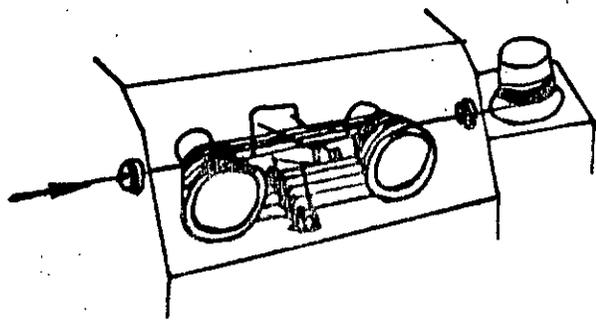
Dans lesquelles, les vitesses des bobines sont automatiquement équilibrées de façon que chaque bobine débite exactement la quantité de fil nécessaire à la suivante, sans qu'il y ait glissement du fil par rapport à la bobine.

- Machine dite "sans glissement ou accumulation"(fig. 4)

Dans ces machines, il n'y a pas équilibrage automatique des vitesses des bobines. La série des diamètres des filières est établies de façon à ce que chaque filière débite un peu plus de fil que ce qui est nécessaire à la suivante, ce qui provoque une accumulation progressive du fil pendant le tréfilage.

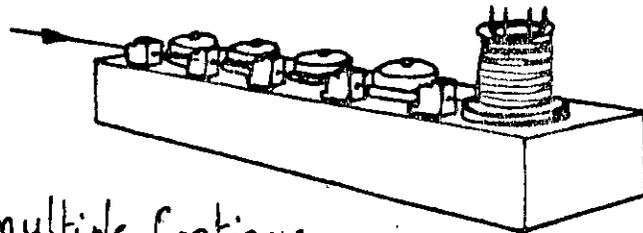
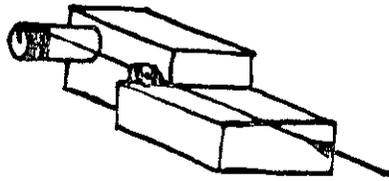
- Les machines à glissement

Dans lesquelles il n'y a pas non plus équilibrage automatique des vitesses. Pour compenser les différentes vitesses il y a glissement du fil sur les bobines afin d'éviter une accumulation de fil à l'entrée de la bobine filière



① machine multiple
a glissement

② machine simple



③ machine multiple Continue.

④ machine multiple a accumulation.

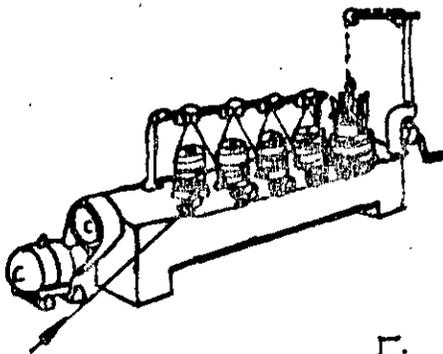


Fig (II, 2) Different types de
machines de trefilage.

CHAPITRE III

Etude de la restauration et la cristallisation de l'aluminium

Pour étudier l'effet du taux d'érouissage sur la restauration et la cristallisation et les propriétés mécaniques et physiques (résistivité) nous avons utilisé du fil machine d'aluminium à 99,5% minimum de pureté

3-1 Caractéristiques du fil machine d'aluminium

Les fils machines d'aluminium utilisés pour cette étude sont des fils produits par le procédé de coulée continue (ces fils d'aluminium sont importés). Ils présentent une surface lisse et brillante, une section droite et circulaire de diamètre 9,60mm. La pureté de ce métal est de 99,5% minimum qui a pour symbole A5L.

La résistivité maxi à 20°C est de 0,0280 ohm mm²/m.

La résistance à la traction est de 10,5 à 12,5 Kgf/mm².

L'analyse chimique de ce fil machine d'aluminium a donné les résultats suivants:

	Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Cn	V	B
%	99,8	0,13	0,05	0,004	0,0009	0,0027	0,0005	0,0030	0,0002	0,0017	0,0024

3-2 Erouissage à différents taux par tréfilage

Afin d'assurer différents taux d'érouissage nous avons utilisé le procédé de tréfilage progressif sur les fils machines d'aluminium à l'aide d'une tréfileuse simple et une gamme de filière avec prélèvement d'échantillons à chaque passe. Nous avons utilisé des filières en carbures de tungstène

Les gammes de filières utilisées pour l'aluminium dans notre expérience sont les suivantes

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	8,76	8,27	8,10	7,32	6,48	5,74	5,08	4,5	3,99	3,53	3,15

A : Nombre de passe

B : Doamètre de la filière (mm)

3-3 Prélèvement 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 effectué avec soin, soit à la main, soit à l'aide de maillet en bois sur une planche de bois pour éviter les modifications de dimensions et l'érouissage du métal.

Les mesures de diamètres ont été faites en différents points et dans les directions différents à l'aide de palmer. Les éprouvettes utilisées dans les essais de traction ont une longueur de 500 mm dont 200 mm de partie utile, et les éprouvettes de résistivité ont une longueur de 700mm dont 500mm de partie utile.

3-4 Traitement thermique (recuit)

Après érouissage à différents taux, nous avons effectué des recuits à différentes températures allant de 50 à 350°C et différents temps de maintien variant de 10mn à 1h 30mn, ces différents temps de maintien et températures sont choisis de manière à ce que la structure érouie puisse subir une restauration puis recristallisation.

Les fours utilisés sont de 2 types:

- Four à moufle: (CONTROLAB TYPE : 110 MC)
- Four tubulaire: (CARBOLITE FURNACES TYPE:STF 15/75)

Le tableau ci dessous regroupe les différents traitement thermiques effectués.

Taux d'érouissage	T (°C)	temps de recuit
16,92 ---> 89,18	150 °C	1 heure
16,92 ---> 89,18	350 °C	1 heure
54,43	50 °C ---> 350 °C	1 h 30 mn
86,48	50 °C ---> 350 °C	1 h 30 mn
54,43	100°C	10 mn ---> 1h 15 mn
54,43	200°C	10 mn ---> 1h 15 mn
54,43	300°C	10 mn ---> 1h 15 mn
54,43	350 °C	10 mn ---> 1h 45 mn

3-5 Préparation métallographique

a) Prélèvement:

Les échantillons sont coupés à l'aide d'une tronçonneuse sous arrosage d'eau , afin d'éviter tout échauffement.

b) Enrobage:

Les échantillons sont enrobés à l'aide d'une presse hydraulique en utilisant de la résine.

c) Polissage:

Afin de rendre la surface plane, brillante et ne présentant aucune rayure susceptible de gêner l'observation microscopique, un polissage a été effectué avec du papier abrasif:

- - Polissage grossier avec papier émeri: 180-320-600.
- - Polissage fin avec papier émeri: 1000.
- - Finition sur un feutre en utilisant un liquide préparé à base des polymères "L'Alumine".

d) Attaque chimique

Après polissage, l'échantillon est attaqué à froid par le réactif cité ci dessous:

Flick: (HF=10cm³; Hcl:15cm³; H²O:100cm³)

e) Examen microscopique et photographie

Pour l'examen métallographique et la prise de photos, on a utilisé un appareil spécial qui comprend un système d'éclairage avec source lumineuse, lentille et un appareil photographique.

CHAPITRE IV

Essais mécaniques et résistivité électrique

4-1 Essais mécaniques

Comme essais de mécanique nous avons effectué des essais de traction et de dureté.

4-1-1 Essai de traction:

La machine d'essai de traction est un système à double mâchoires. L'une fixe, l'autre mobile qui consiste à appliquer sur une éprouvette de longueur utile de 200 mm, un effort croissant suivant son axe de symétrie. Cette éprouvette subit une déformation jusqu'à la rupture et un système mécanique affiche à cet instant, la charge à la rupture. Les essais sont effectués sur deux machines distinctes à la température ambiante et à une vitesse constante de 75 mm/mn.

- Condition d'essai:

La machine utilisée (J-J instrument T500²) peut mesurer des forces allant jusqu'à 500Kg et le dynamomètre peut mesurer des charges supérieures à 500Kgf. A l'aide de cet essai, on peut déterminer:

a) la charge à la rupture

Qui est le rapport de la charge maximale à la rupture P par la section initiale de l'éprouvette.

$$R = \frac{P}{S_0}$$

b) L'allongement à la rupture

Qui est exprimée en pourcentage par rapport à la longueur initiale L_0 de l'éprouvette.

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

L : Longueur de l'éprouvette après rupture.

4-2 Essai de dureté

L'essai de dureté a été fait par la dureté ROCKWELL dont le pénétrateur est une bille d'acier de diamètre 0,006mm avec une charge de 15 Kg (HR15T), l'essai consiste à imprimer une empreinte et prendre la moyenne de trois mesures.

4-3 résistivité électrique

Les mesures de résistivité électrique ont été faites sur un pont de WHENSTONE à mâchoire mobile sur des éprouvettes de 500 mm de longueur utile, pour chaque mesure on lit la température "t" le résultat est ramené à 20°C, en appliquant une relation de correction.

$$R_{20} = \frac{R_t}{1 + \alpha(t - 20)}$$

R_t : résistance à la température "t"

R_{20} : résistance à la température de 20°C

α : 0,0041 deg⁻¹

La résistivité à la température de 20° C est

$$\rho_{20} = R_{20} \frac{S}{L} \quad (\Omega m) \quad \text{avec } S = \frac{\pi d^2}{4}$$

S: section du fil (m²)

L: longueur de l'éprouvette (500mm)

R: résistance électrique (Ω/m)

CHAPITRE V

RESULTATS

5-1 Influence de la déformation sur les propriétés du fil

Pour montrer l'influence de l'écroutissage par tréfilage sur la structure, les propriétés mécaniques et électriques de l'aluminium, nous avons exprimé le taux d'écroutissage par la variation de la section relative par :

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

Avec S_0 et S respectivement les sections initiales et finales des fils.

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

ϕ (mm) donné	ϕ (mm) trouvé	S (mm ²)	ε %	ϕ ($\mu\Omega$ mm)	Rr (Kgf/mm ²)	A%	HR15T
9,60	9,60	72,34	0,00	27,3605	10,63	12,5	33,8
8,76	8,75	60,10	16,92	27,7135	12,22	8	40,6
8,27	8,35	54,73	24,34	27,7461	12,27	7	41
8,10	8,08	51,24	29,16	27,7821	12,48	6,5	42
7,32	7,27	41,48	42,65	27,7938	13,73	6	44,8
6,48	6,48	32,96	54,43	27,8090	14,85	5	45,2
5,74	5,75	25,95	64,12	27,8561	15,40	4,5	46,9
5,08	5,08	20,25	72,01	27,8961	15,75	4	47
4,50	4,50	15,89	78,07	27,9761	15,84	3,5	49
3,99	4,08	13,06	81,19	28,0991	17,20	3	51
3,54	3,53	9,78	86,48	28,2549	17,47	2	53
3,15	3,16	7,83	89,18	28,2640	18,10	1,5	52

Tableau n°1: récapitulatif pour les fils de l'aluminium écroui.

5-1-1 Comportement de l'aluminium au cours de l'érouissage

5-1-1-1 Evolution des propriétés mécaniques

a) Variation de la dureté (fig. V-1)

La dureté de l'aluminium augmente avec l'augmentation de taux d'érouissage. L'accroissement est important à la première passe de tréfilage car la déformation est importante, mais commence à diminuer aux passes suivantes, néanmoins une tendance à une élévation de la dureté aux dernières passes de tréfilage.

b) Variation de la charge à la rupture (fig. V- 2)

Au fur et à mesure que le taux d'érouissage augmente, la charge à la rupture prend des valeurs importantes pour la première passe de tréfilage, puis elle s'affaiblit pour les passes suivantes et on remarque une élévation importantes aux dernières passes de tréfilage.

c) Variation de l'allongement à la rupture

La chute de l'allongement à la rupture de l'aluminium est brutale pendant la première passe de tréfilage comme le montre la figure (V-3).

L'allongement à la rupture diminue avec l'augmentation du taux d'érouissage suivant une allure hyperbolique.

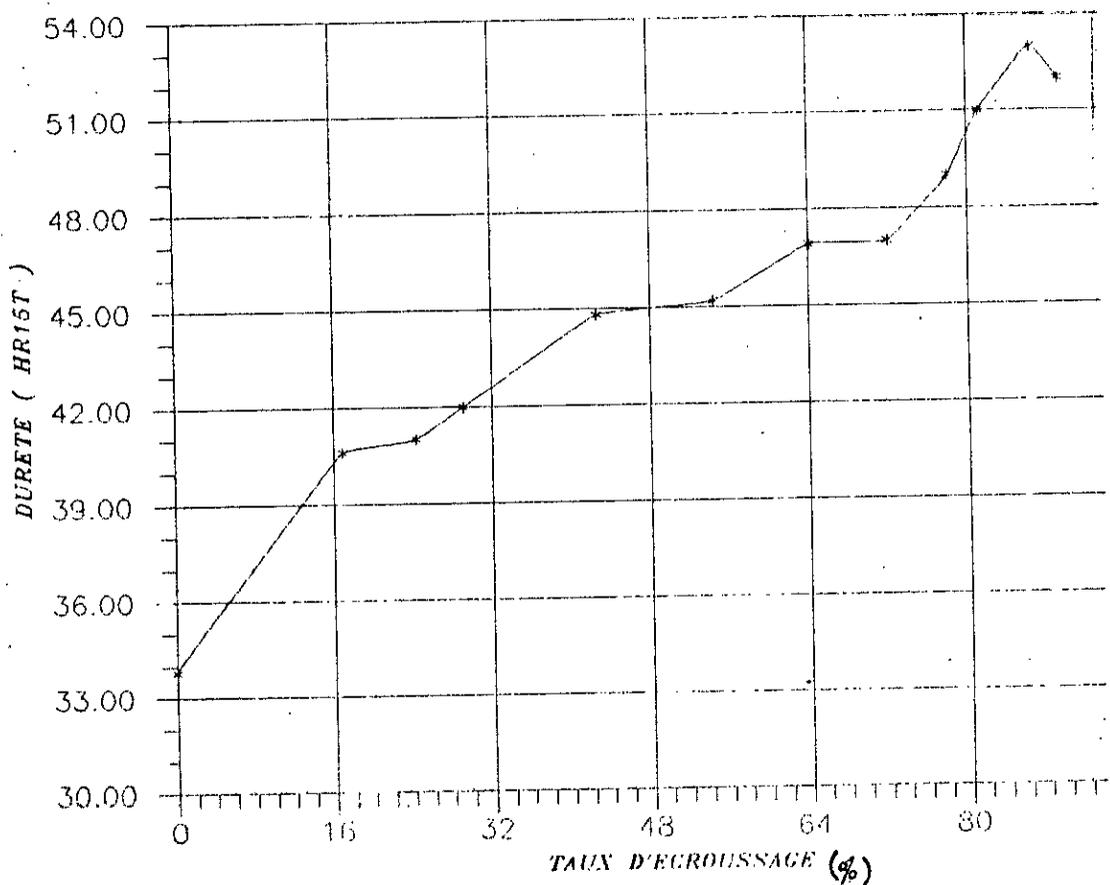
5-1-1-2 Evolution des propriétés physiques

- Variation de la résistivité électrique (fig. V-4)

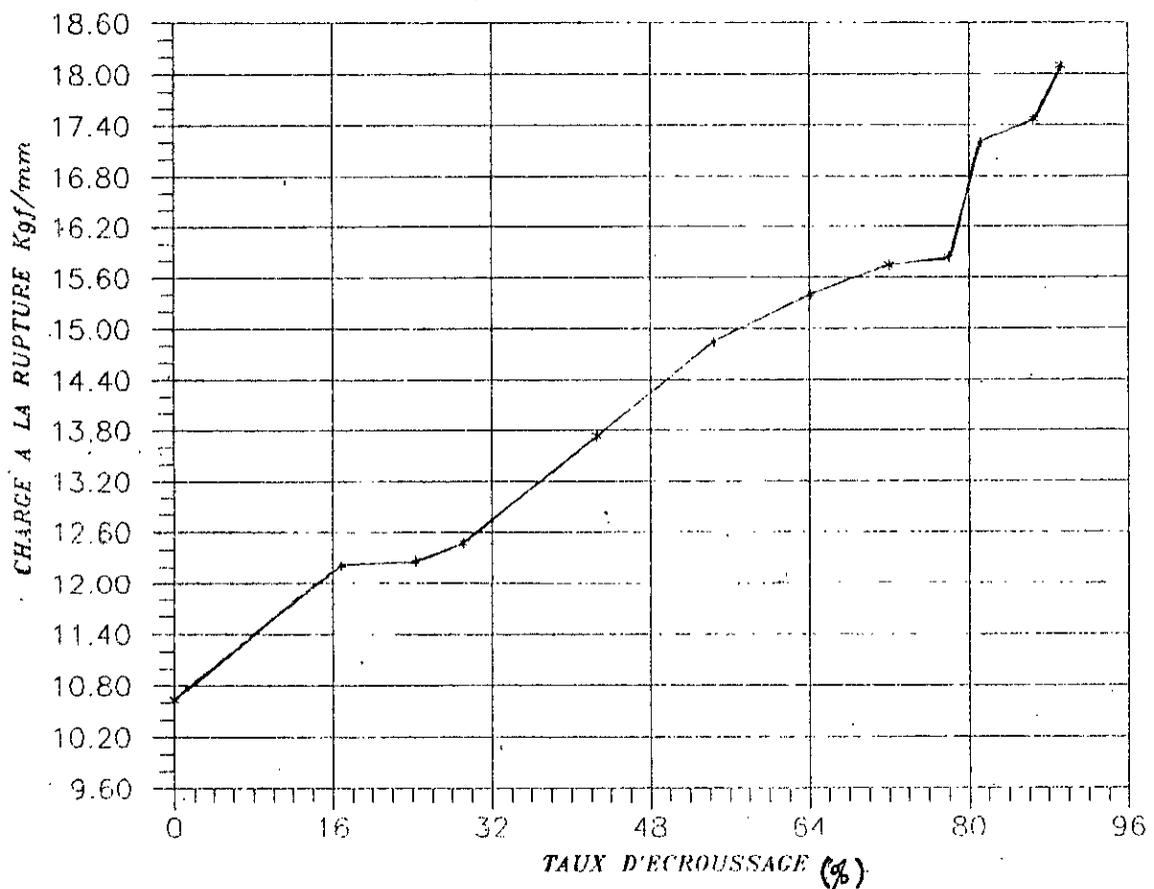
Les résultats obtenus montrent que l'érouissage engendre une augmentation de la résistivité électrique.

L'accroissement de la résistivité est important pour la première passe de tréfilage, il décroît pour devenir presque constant pour les passes suivantes.

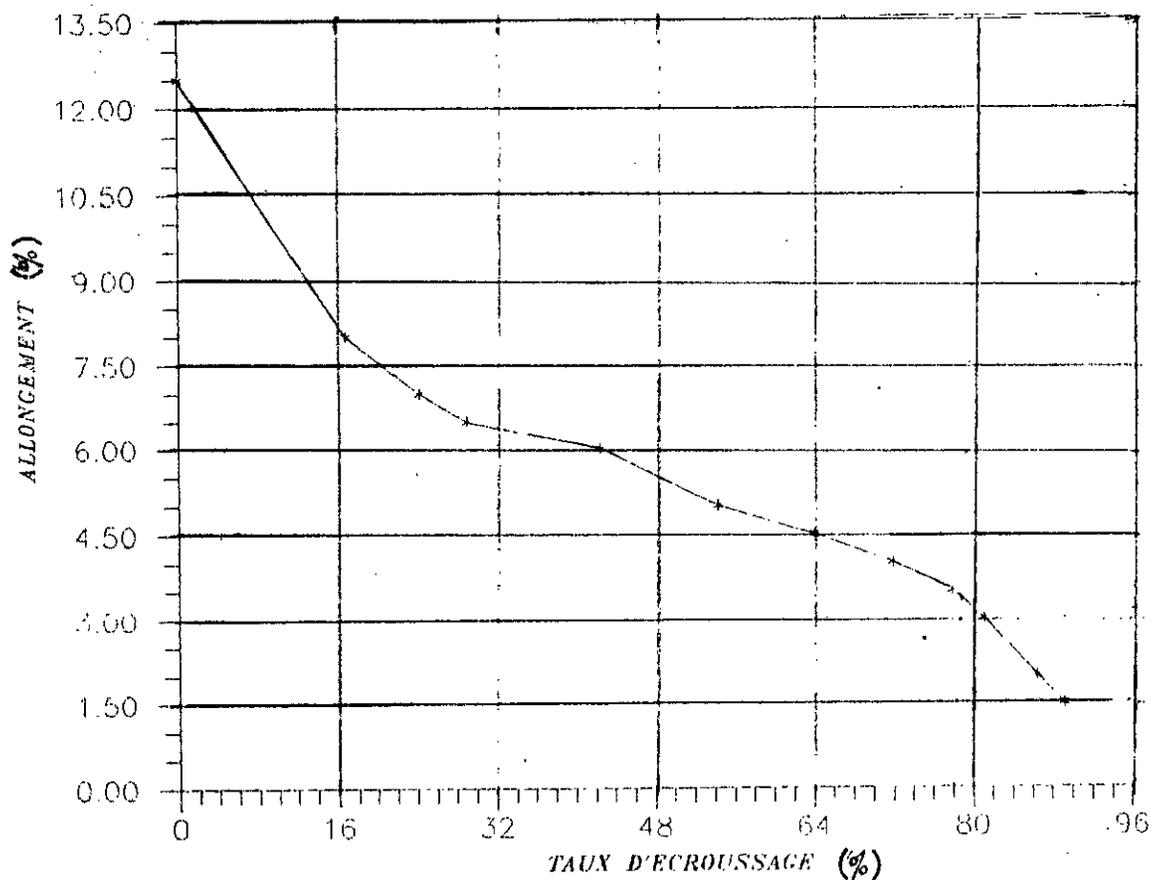
FIG(V.1) VARIATION DE LA DURETE EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE



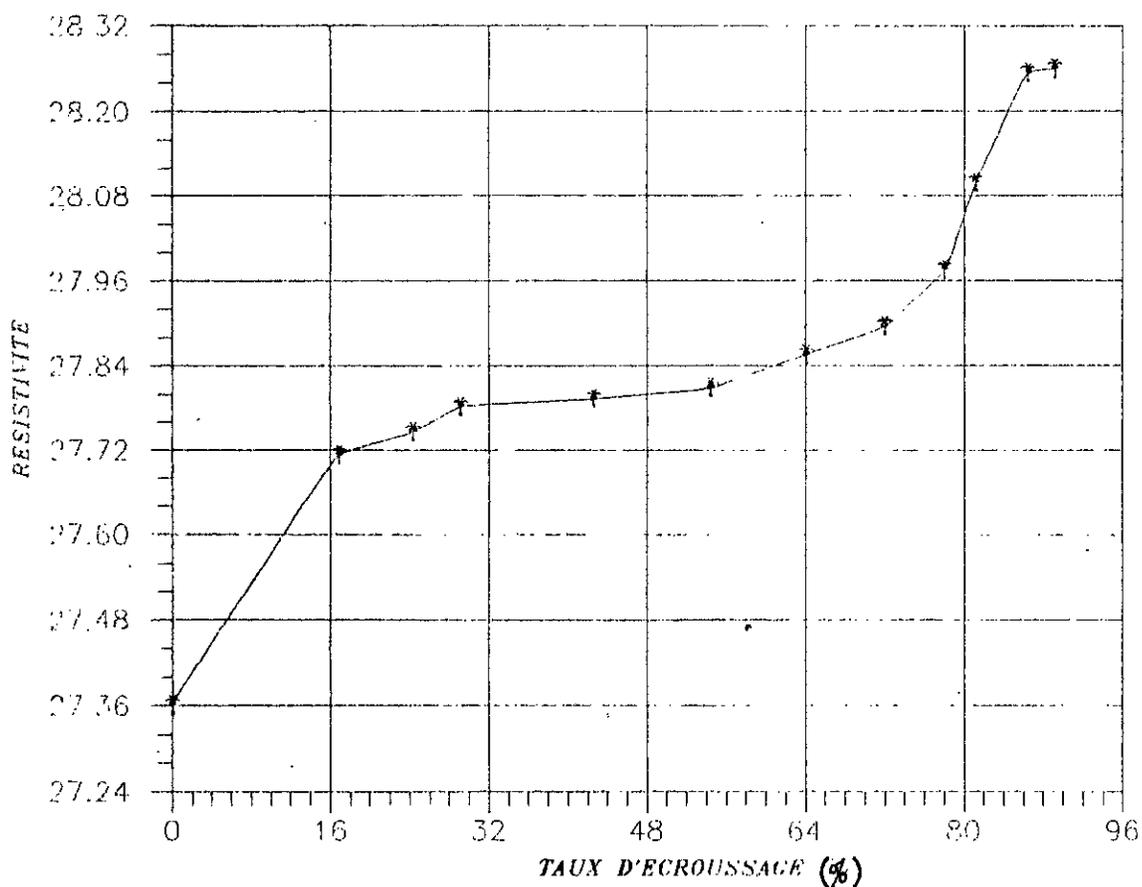
FIG(V.2) VARIATION DE LA CHARGE A LA RUPTURE EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE



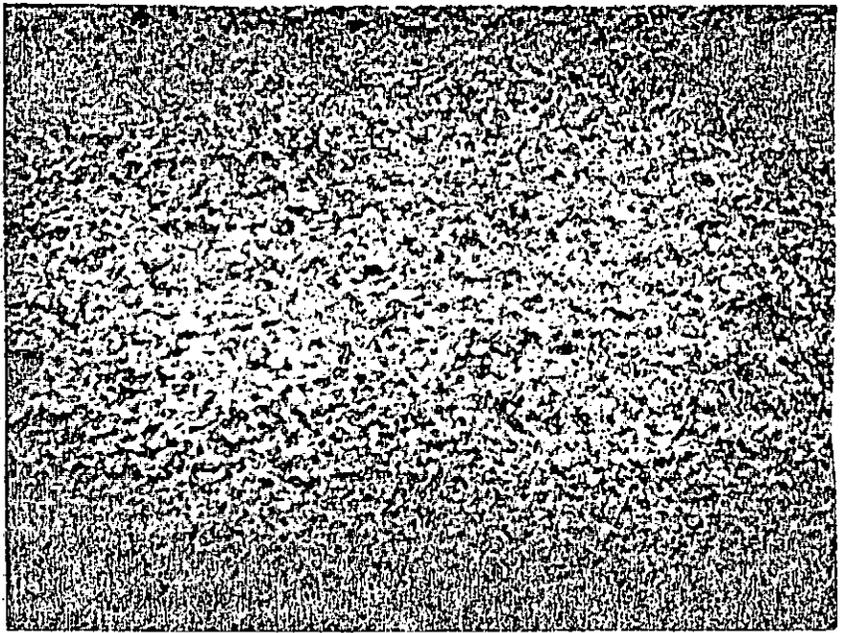
FIG(V.3) VARIATION DE L'ALLONGEMENT EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE



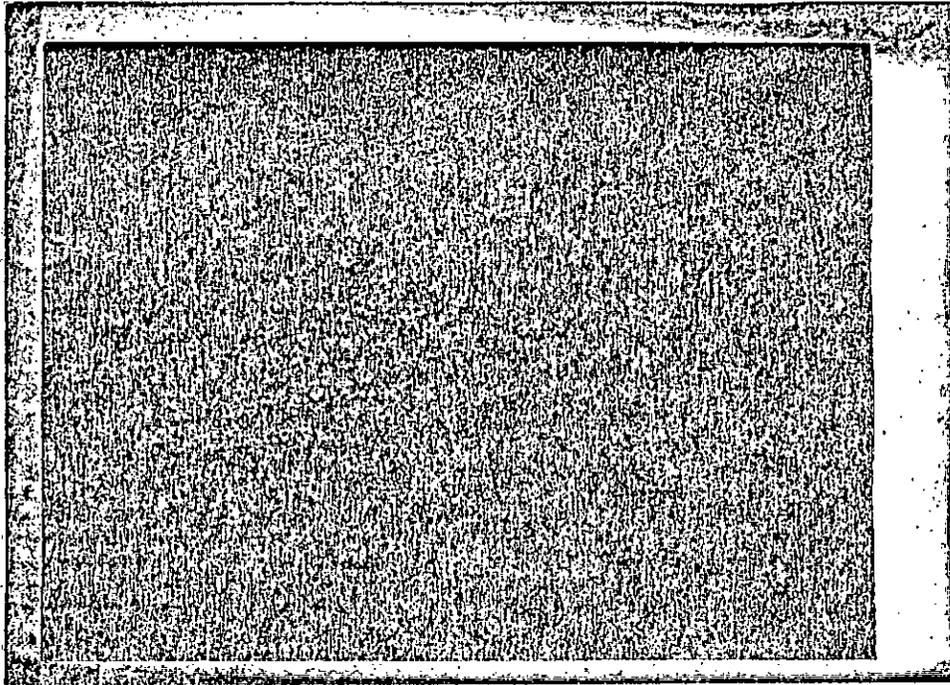
FIG(V.4) VARIATION DE LA RESISTIVITE EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE



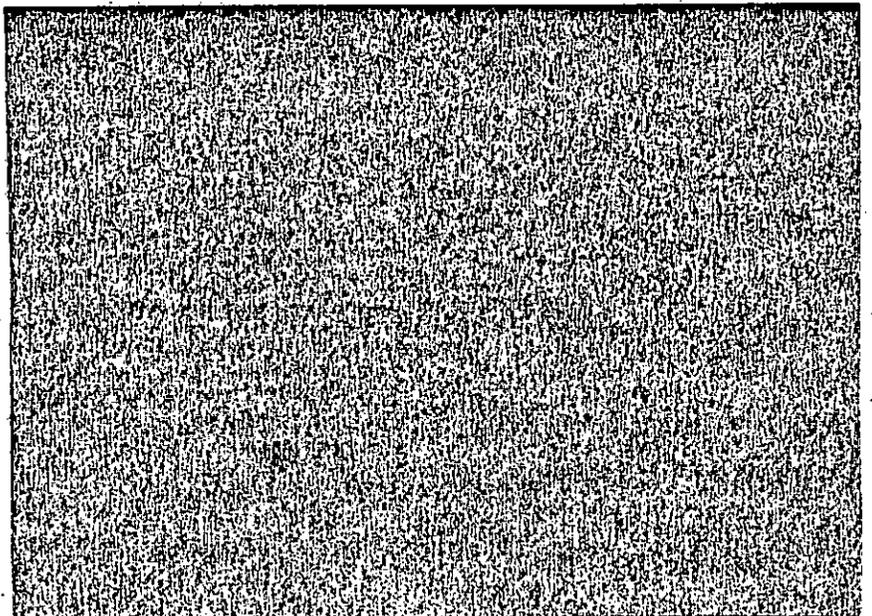
Fil-Machine d'Aluminium
Grossissement : 500



Fil d'aluminium
Taux de reduction : 24,34
Grossissement : 500



Fil d'aluminium
Taux de reduction : 78,07
Grossissement : 500



(pl :I)

5-1-1-3 Evolution structurale

Comme le montre la planche (PL1), au cours du tréfilage, les grains subissent une déformation en s'allongeant suivant l'axe de tréfilage.

Au premier stade de tréfilage, les grains sont légèrement déformés. La structure est presque identique à celle du fil-machine, la taille des grains ne semble pas avoir changé.

A un stade supérieur de tréfilage les grains sont très allongés et possèdent une structure fibreuse très fine.

5-2 Influence de la température de recuit

Pour étudier l'effet du recuit sur les propriétés mécaniques, électriques et structurales du fil d'aluminium, nous avons réalisé des recuits pour différents taux de réduction aux températures 150° C et 350° C avec des durées de maintien d'une heure.

Les tableaux ci dessous résument les valeurs obtenues lors des essais effectués après recuit.

ϕ (mm) donné	ϕ (mm) trouvé	S (mm ²)	ϵ %	ϕ ($\mu\Omega$ mm)	Rr (Kgf/mm ²)	A%	HR15T
9,60	9,60	72,34	0,00	27,0134	9,43	11	33
8,76	8,75	60,10	16,92	27,1604	11,1166	7,5	38,2
8,27	8,35	54,73	24,34	27,2290	11,77	7	39
8,10	8,08	51,24	29,16	27,2208	11,768	6,5	40
7,32	7,27	41,48	42,65	27,3414	11,80	-	41,9
6,48	6,48	32,96	54,43	27,6997	11,93	5,5	43
5,74	5,75	25,95	64,12	27,7358	12,12	4	45
5,08	5,08	20,25	72,01	27,8120	13,5	4,5	46,8
4,50	4,50	15,89	78,07	27,9160	14,12	3	45,6
3,99	4,08	13,06	81,19	28,0178	15,93	2	47
3,54	3,53	9,78	86,48	28,0913	16,8	1,5	47,5
3,15	3,16	7,83	89,18	28,1097	17,9	1	49

Tableau n°2: récapitulatif d'un recuit pendant 1 heure à T=150°C.

ϕ (mm) donné	ϕ (mm) trouvé	S (mm ²)	ϵ %	ϕ ($\mu\Omega$ mm)	Rr (Kgf/mm ²)	A%	HR15T
9,60	9,60	72,34	0,00	26,40	5,80	23,8	36
8,76	8,75	60,10	16,92	26,5191	5,84	25,72	35
8,27	8,35	54,73	24,34	26,71	5,98	26,10	32
8,10	8,08	51,24	29,16	26,85	6,10	24,2	34
7,32	7,27	41,48	42,65	27,09	5,9	27	35
6,48	6,48	32,96	54,43	27,31	6,97	26	32
5,74	5,75	25,95	64,12	27,59	5,01	27	28,5
5,08	5,08	20,25	72,01	27,75	6,91	29	27
4,50	4,50	15,89	78,07	27,83	6,88	30	30
3,99	4,08	13,06	81,19	27,81	6,07	29,5	29
3,54	3,53	9,78	86,48	27,88	7,14	32	30
3,15	3,16	7,83	89,18	27,95	7	28	31

Tableau n°2: récapitulatif d'un recuit pendant 1 heure à
T=350°C.

Nous avons également effectué une série de recuits isochrones avec des taux de réduction fixes $\epsilon_1 = 54,43\%$ et $\epsilon_2 = 89,18\%$. La durée de maintien égale à 1 heure et la température varie de 50°C à 350°C.

Le tableau ci dessous regroupe les résultats obtenus.

T° C	$\epsilon_1 = 54,43 \%$				$\epsilon_2 = 89,18 \%$			
	Rr (Kgf/mm ²)	A%	ϕ ($\mu\Omega$ mm)	HR15T	Rr (Kgf/mm ²)	A%	ϕ ($\mu\Omega$ mm)	HR15T
50	14,12	5	27,70	44	17,9	2	28,25	50
100	13,99	5	27,70	44	17,5	2,5	28,15	49
150	11,93	5,5	27,69	43	17,9	1,5	28,10	49
200	10,14	12	27,50	35,2	14,8	3	28,01	40,8
250	9,85	25	27,45	33,5	10,3	5	27,86	35
300	7,16	27,5	27,29	29,8	7,3	22,5	27,97	32
350	6,97	32	27,31	26	7	31	27,95	28

Tableau n°4 : récapitulatif pour un recuit d'une heure.

5-2-1 Evolution des propriétés au cours du recuit

5-2-1-1 Evolution des propriétés mécaniques

a) Evolution de la dureté

Comme le montre la figure (V-5) à la température de recuit 150°C la variation de dureté est faible par rapport à celle mesurée à la température ambiante et ceci quelque soit le taux d'écrouissage, alors que cette variation devient beaucoup plus importante à 350°C ceci peut s'expliquer par le fait qu'à 150°C la structure n'a pas tellement changé, il y a une diminution des défauts ponctuels (lacunes et interstitiels) alors qu'à 350°C la structure est recristallisée.

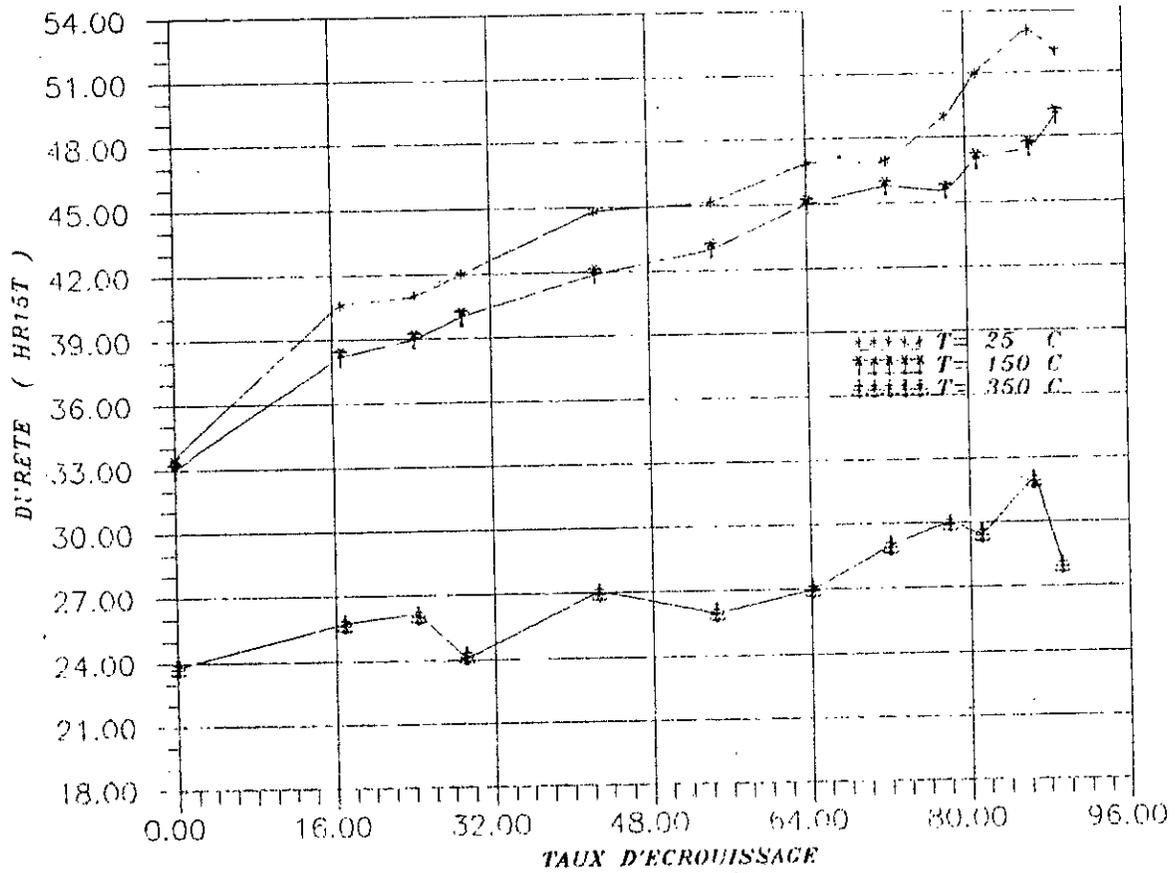
b) Evolution de la charge à la rupture

Les passes comprises entre quatre et neuf, nous remarquons une diminution plus au moins importante de la charge à la rupture, cela est peut être dû au mode opération ou à la pureté du métal. Cette variation de charge à la rupture résulte de la restauration c'est à dire réduction du nombre de défauts ponctuels par migration et annihilations réciproques ou élimination en des points (dislocation-joints) et l'annihilation mutuelle des dislocations de signe opposé. Par contre à 350°C la diminution de la charge à la rupture est importante pour toutes les passes de tréfilage, ceci explique que le métal a été totalement recristallisé comme le montre la figure (V-6).

c) Evolution de l'allongement à la rupture

La figure (V-7) montre qu'au cours de recuit à 150°C l'allongement est presque invariable, cependant on remarque une légère variation pour les deux premières passes de tréfilage. A 350°C on remarque que l'allongement a subi une augmentation importante donc nous pouvons dire à cette température, le métal est recristallisé.

FIG(V.5) VARIATION DE LA DURETE EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE



FIG(V.6) VARIATION DE LA CHARGE A LA RUPTURE EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE

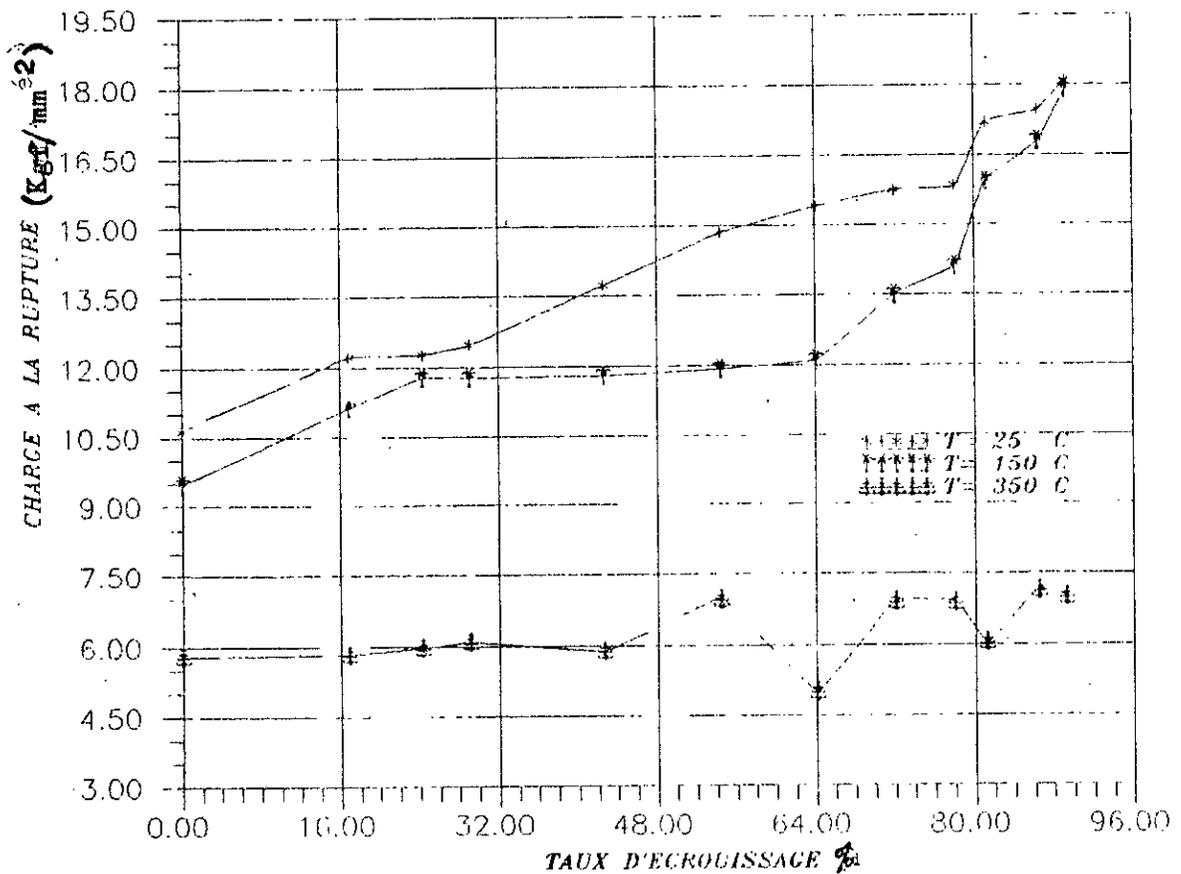


FIG (V.7) VARIATION DE L'ALLONGEMENT EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE

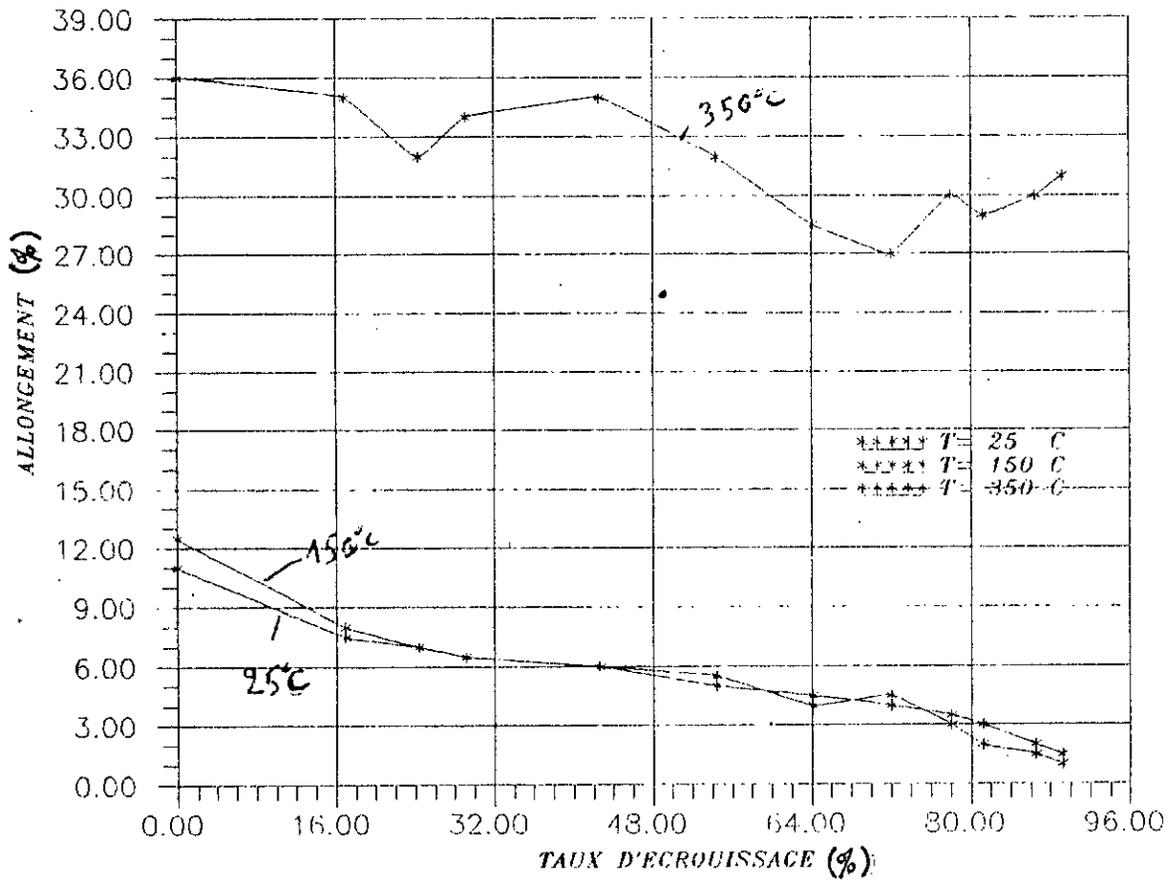
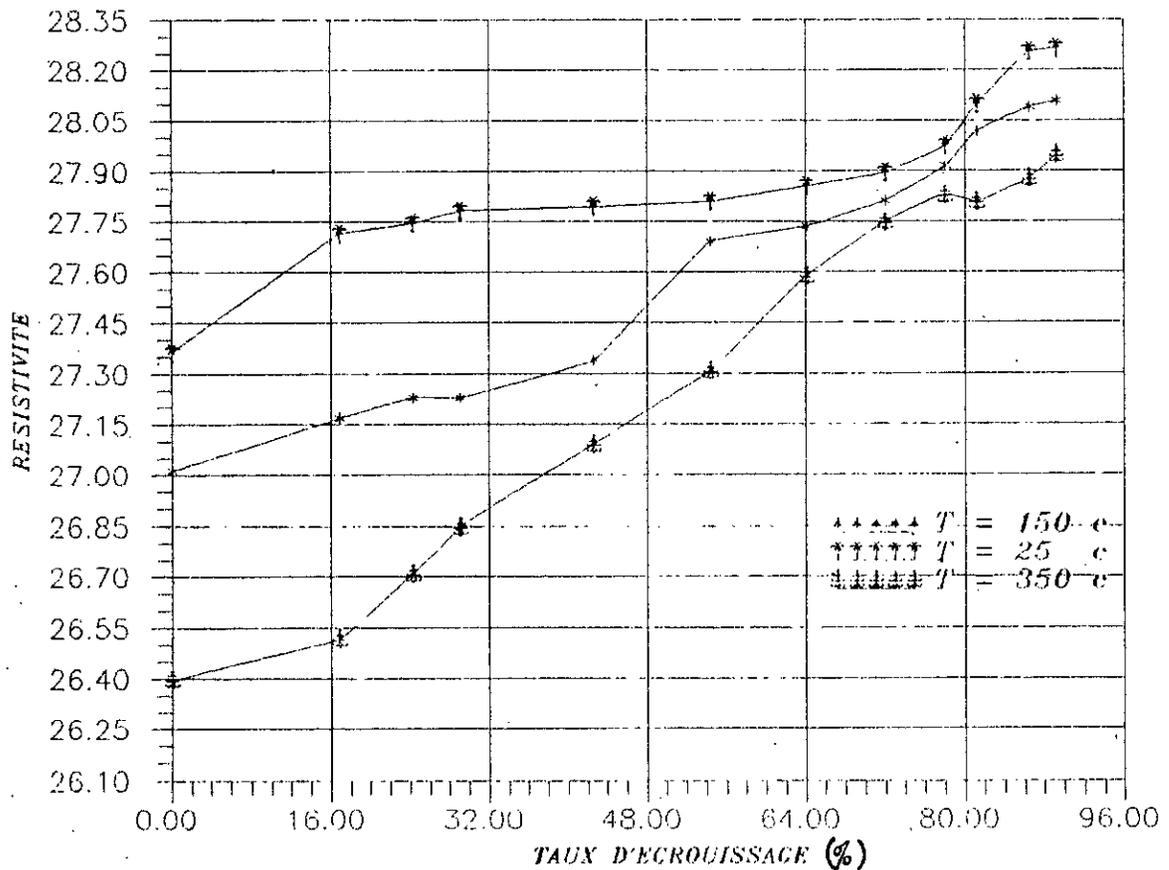
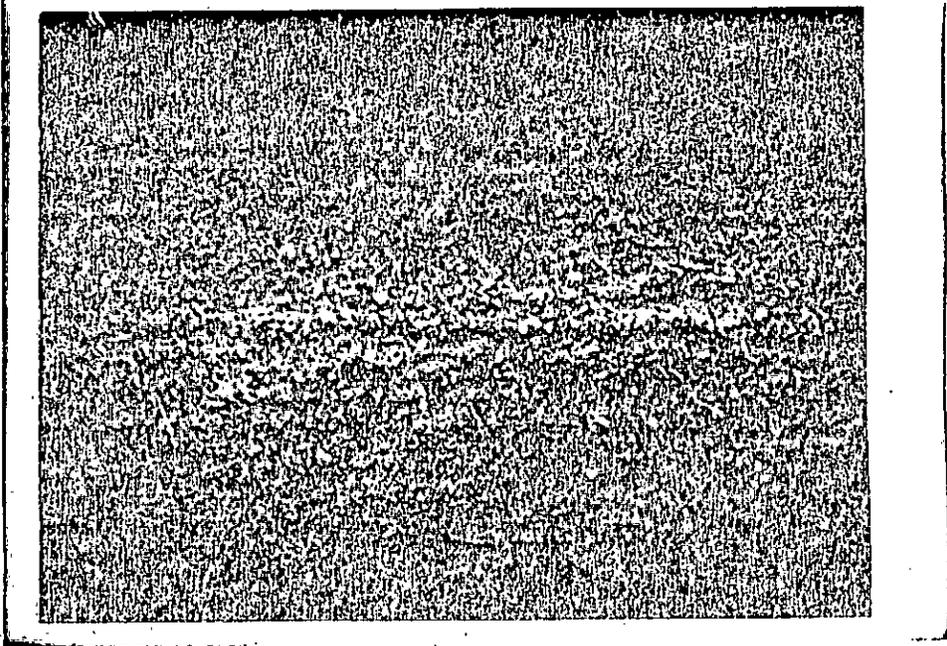


FIG (V.8) VARIATION DE LA RESISTIVITE EN FONCTION DU TAUX D'ECROUISSAGE

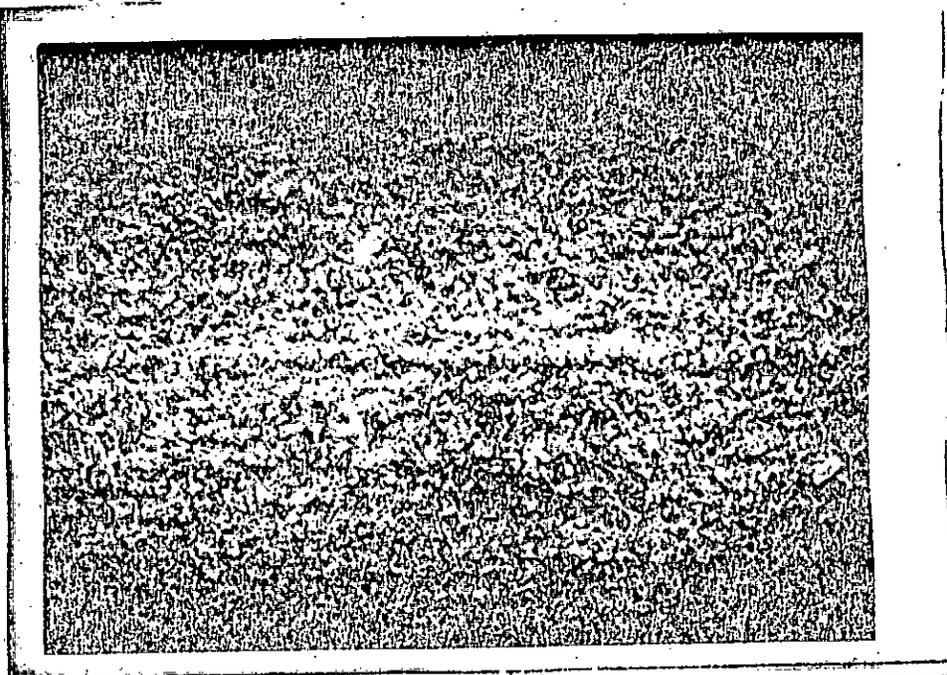


Fil d'aluminium
Recuit a 150c

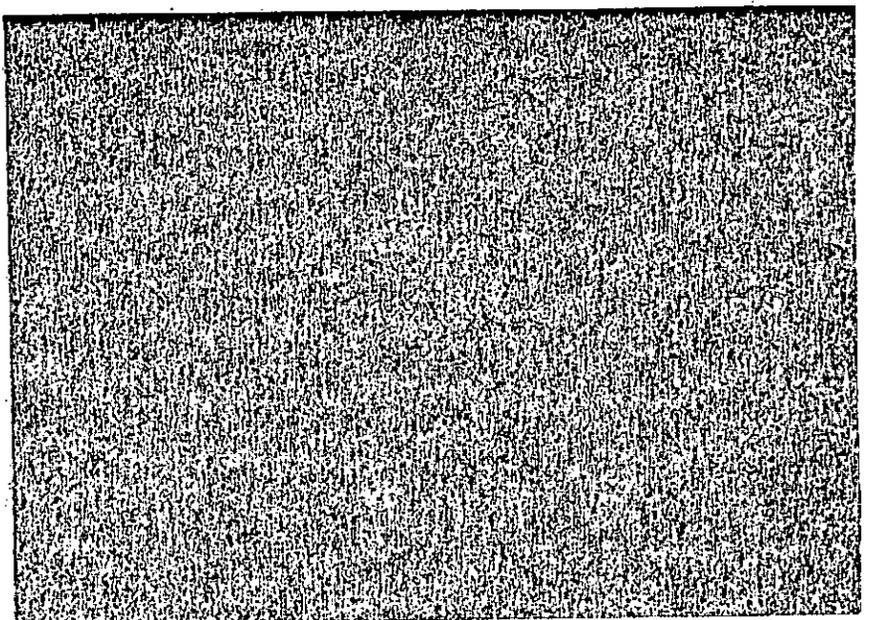
Taux de reduction : 24,34%
Grossissement : 500



Taux de reduction : 42,65%
Grossissement : 500



Taux de reduction : 86,48%
Grossissement : 500

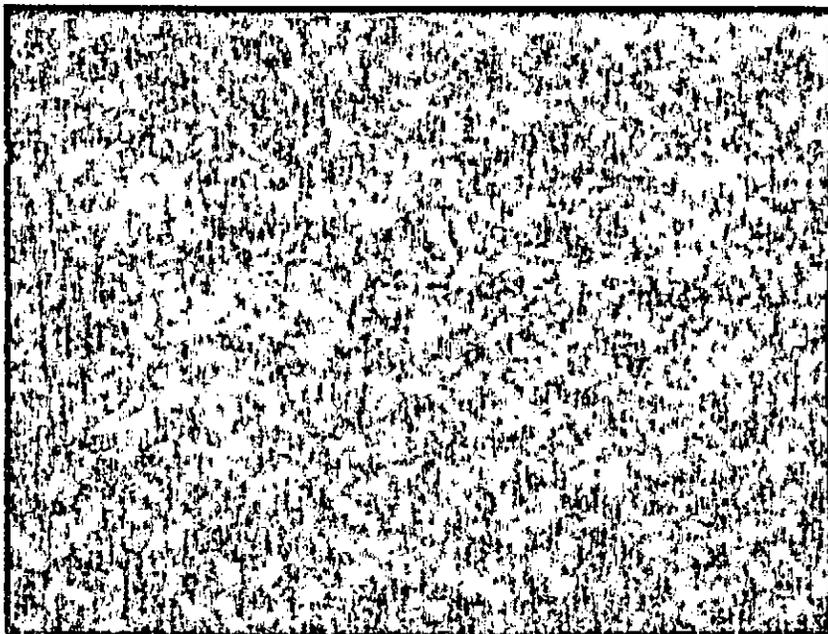


Fil d'aluminium

Recuit a 350°

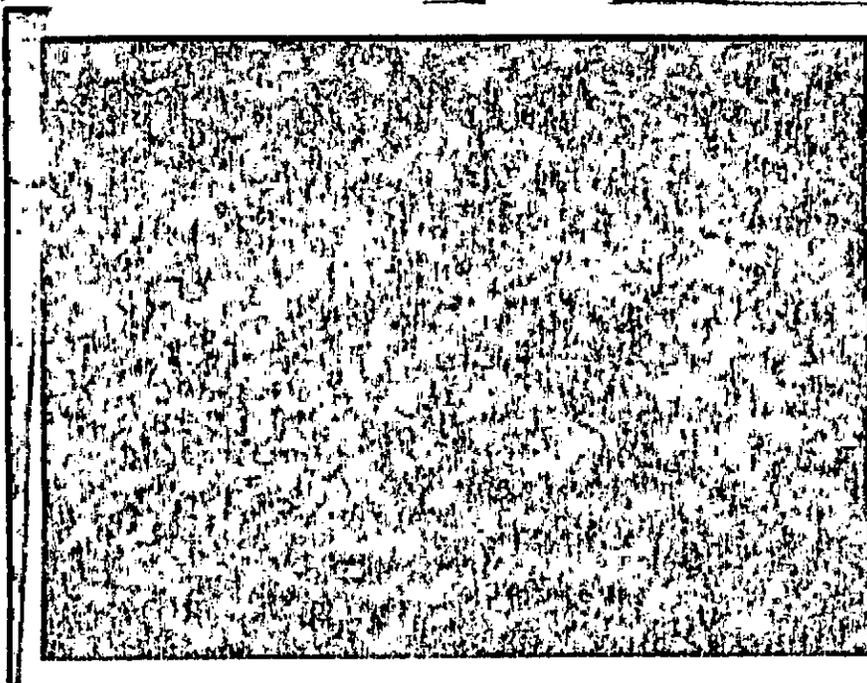
Taux de reduction : 29,16%

Grossissement : 500



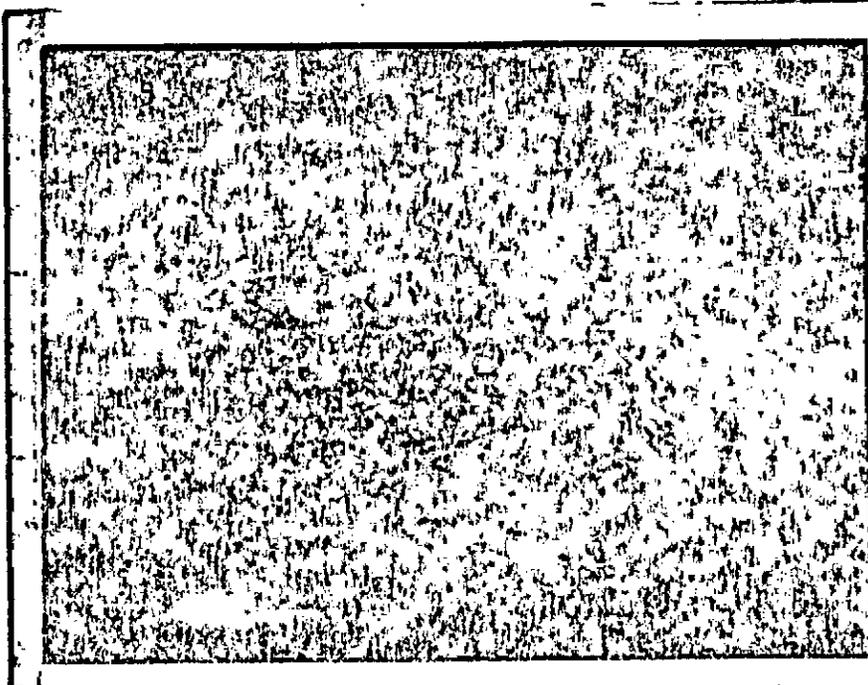
Taux de reduction : 64,12%

Grossissement : 500



Taux de reduction : 89,18%

Grossissement : 500



d) Evolution de la résistivité électrique

La figure (V-8), montre que pour un taux d'écroûissage donné, la résistivité électrique diminue avec l'augmentation de la température.

Nous constatons également que cette variation de résistivité électrique, importante pour les faibles déformations devient plus petite lorsque le taux de déformation devient plus important.

5-2-1-3 Evolution structurale

Comme le montre la planche (PL2), que la structure de l'aluminium n'a pas évolué à la température de 150°C par contre à 350°C la structure a été remplacé par une autre structure orientée aléatoirement.

5-2-2 Evolution des propriétés au cours d'un recuit isochrome

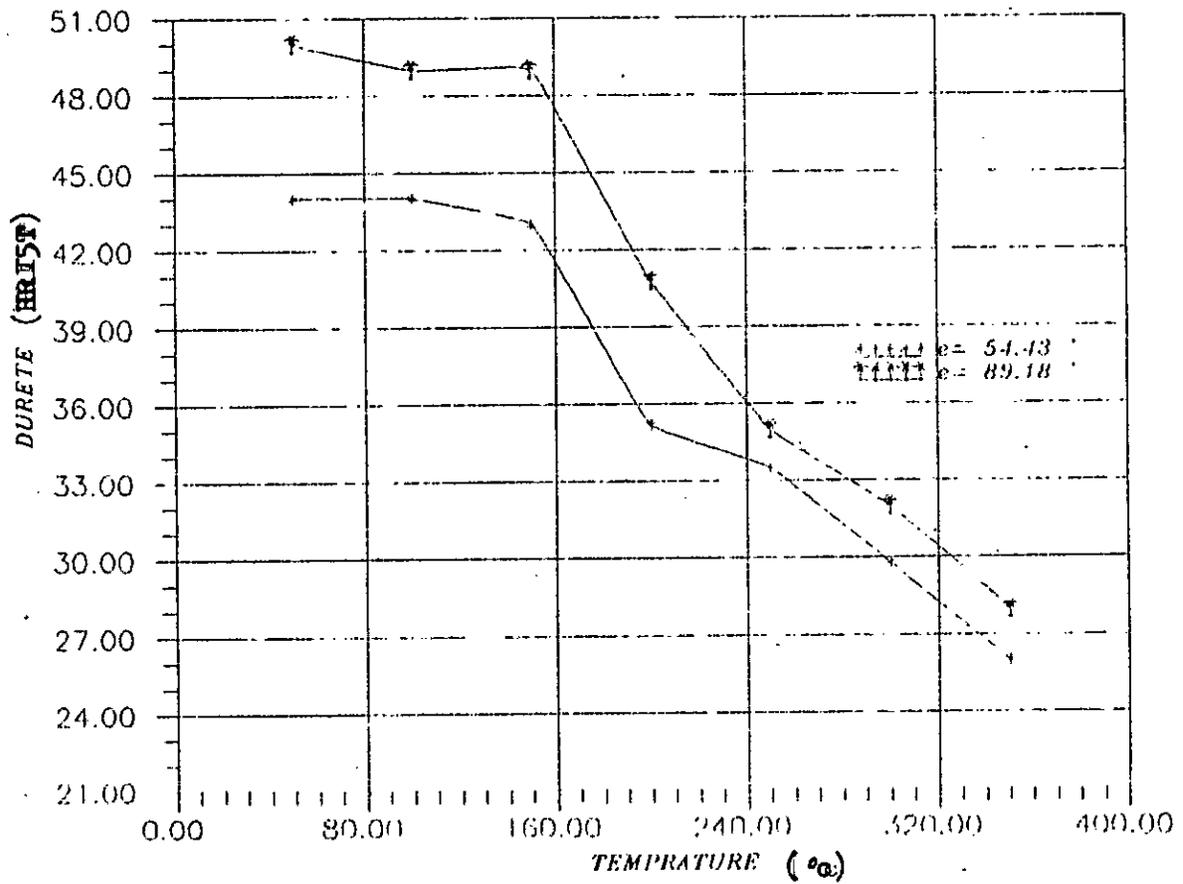
a) Evolution de la dureté

La dureté diminue avec la température de recuit (la structure s'adoucit par élimination des défauts ponctuels et linéaires). Pour les deux taux d'écroûissage les courbes ont la même allure c'est à dire que dans les deux cas on retrouve trois zones avec des pentes différentes. (voir fig. V-9)

b) Evolution de la charge à la rupture.

La figure (V-10), montre qu'au fur et à mesure que la température de recuit augmente, la charge à la rupture de l'aluminium diminue entre 100°C et 250°C. La charge à la rupture est plus faible pour le taux d'écroûissage le plus petit et à partir de 250°C la charge à la rupture est pratiquement la même pour les taux d'écroûissage.

**FIG (V.9) VARIATION DE LA DURETE
EN FONCTION DE LA TEMPERATURE**



**FIG (V.10) VARIATION DE LA CHARGE A LA RUPTURE
EN FONCTION DE LA TEMPERATURE**

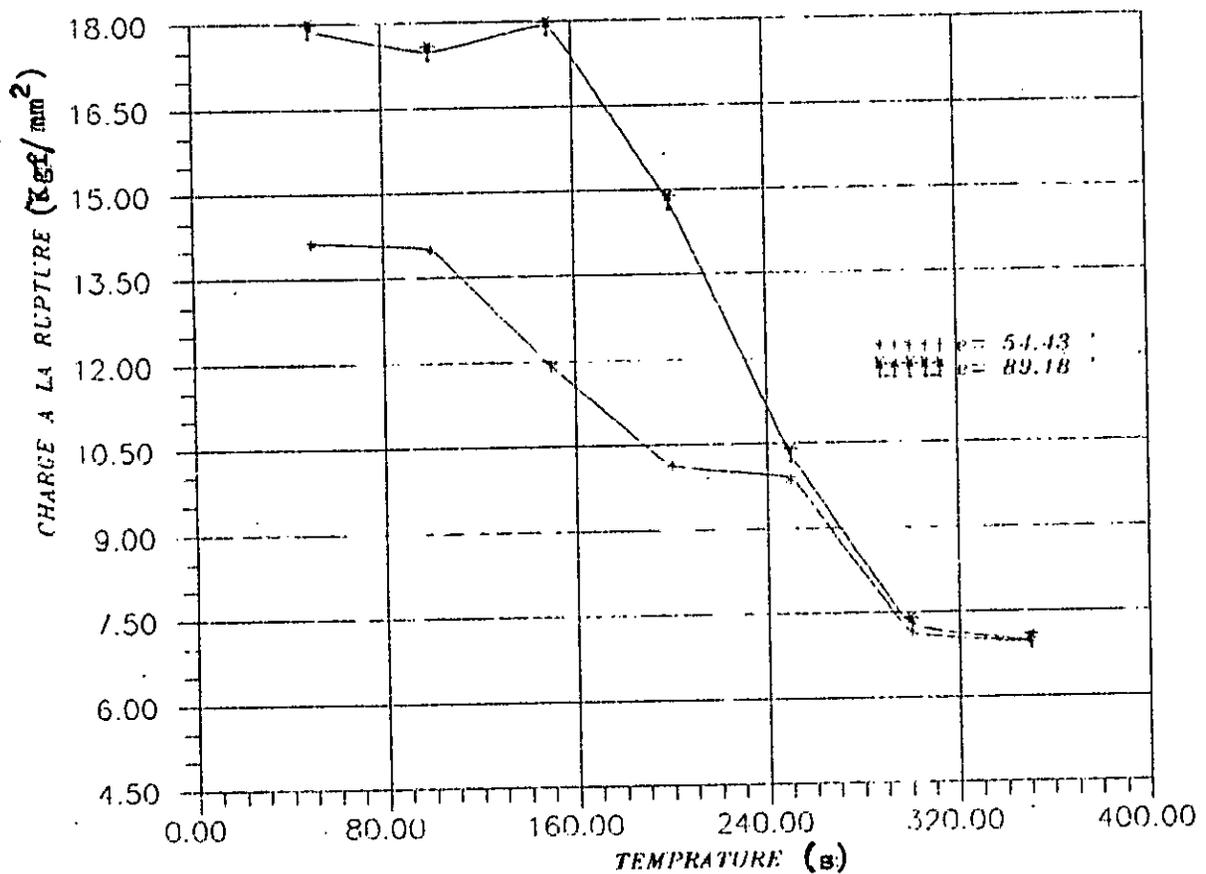


FIG (V.11) VARIATION DE L'ALLONGEMENT A LA RUPTURE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

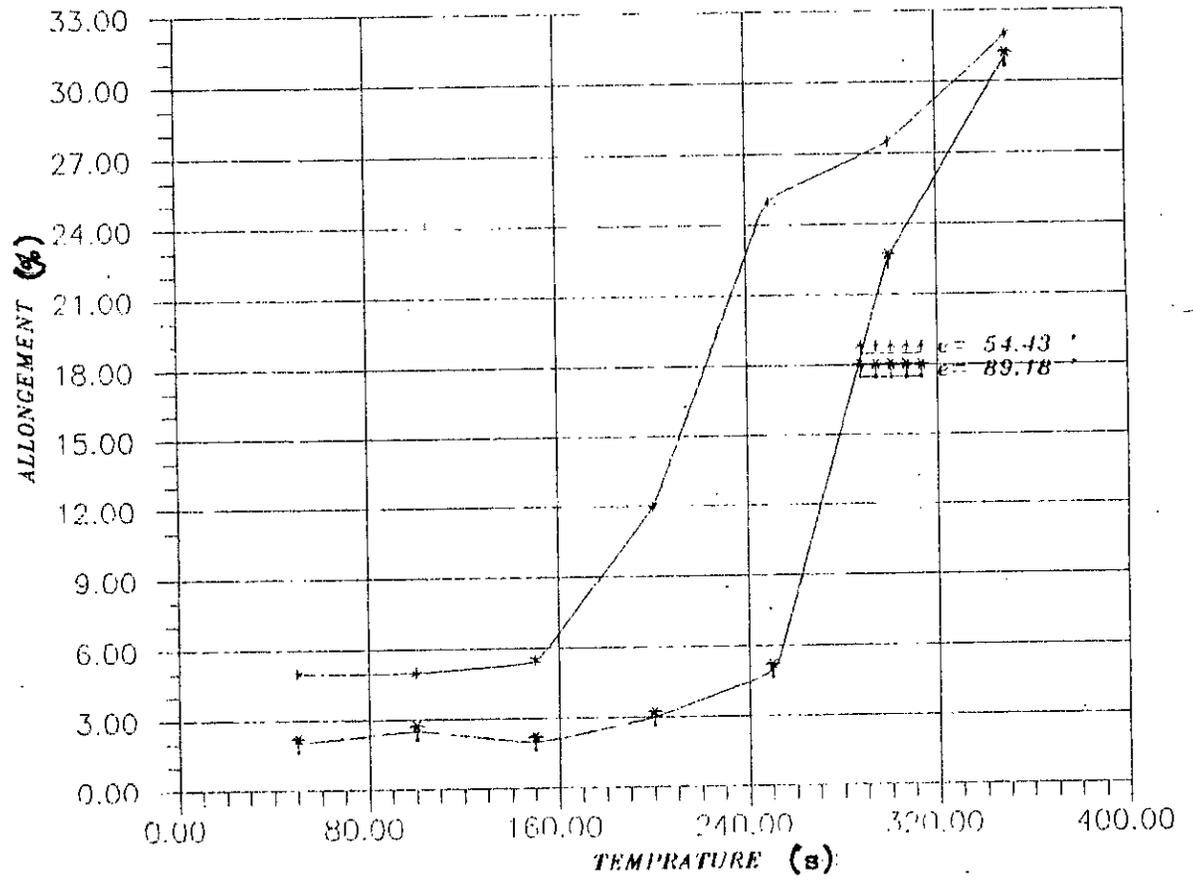
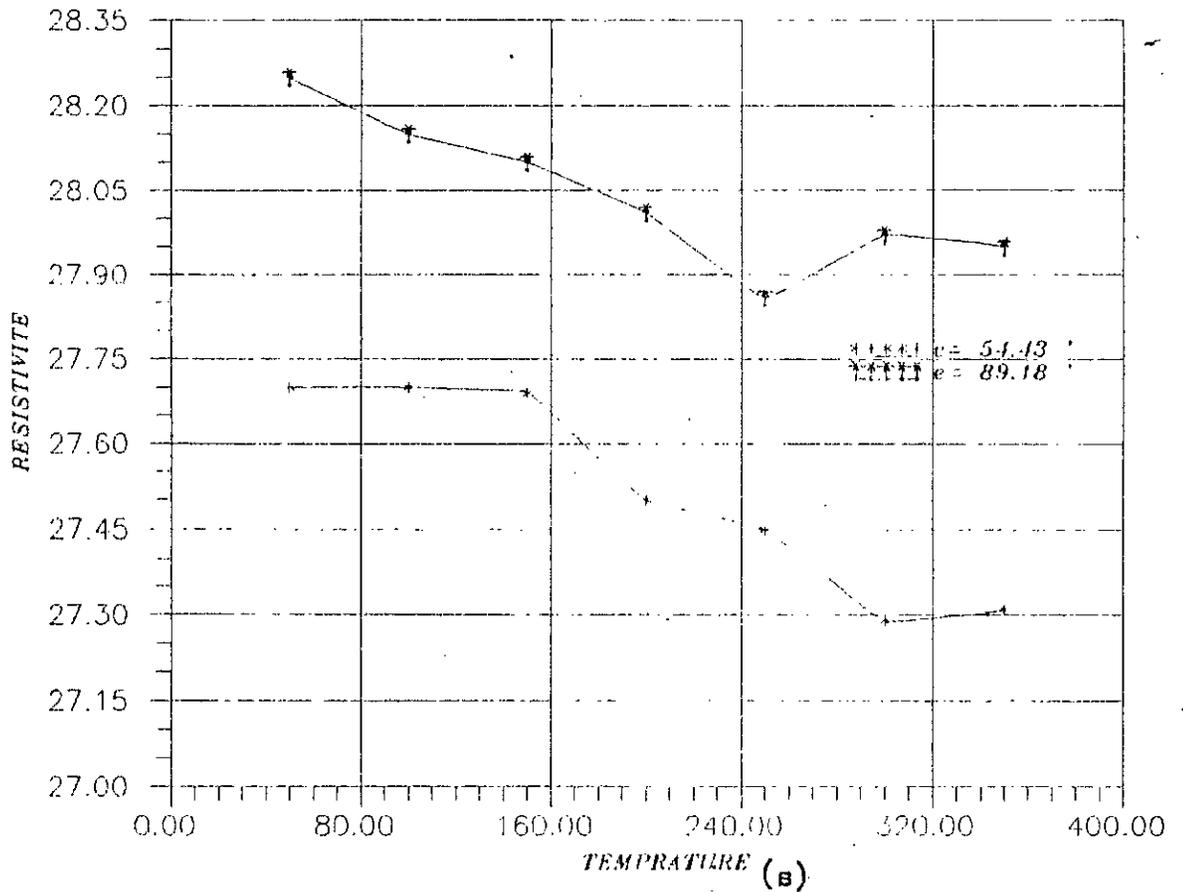


FIG (V.12) VARIATION DE LA RESISTIVITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE



c) Evolution de l'allongement à la rupture

La fig. (V-11), montre qu'au cours du recuit l'allongement croît avec l'élévation de la température.

On remarque que pour les deux taux d'écroissage les courbes obtenues ont la même allure.

d) Evolution de la résistivité

La figure (V-12), nous montre que la résistivité de l'aluminium diminue avec l'augmentation de la température, nous constatons également que quelque soit la température de l'essai la résistivité est plus grande lorsque le taux d'écroissage est plus élevé. Notons enfin que cette résistivité tend à se stabiliser vers la température de 300°C et ce pour les deux taux d'écroissage.

5-3 Influence de temps de recuit

Pour étudier l'effet de temps de recuit sur les propriétés mécaniques (dureté), nous avons réalisé le recuit à des temps variables (10 mn, 20 mn, 30 mn, 45 mn, 60 mn, 70 mn) pour des températures allant de 100°C à 350°C, pour un taux de déformation $\epsilon = 54,43\%$.

Les tableaux ci dessous regroupent les valeurs obtenues par les différents essais effectués:

t (mn)	10	15	20	30	45	60	75
dureté	44,2	44	43	45	42	43,8	42
HR15T							

a - Recuit à 100 °C.

t (mn)	10	15	20	30	45	60	75
dureté	40,8	40,5	39	35	31	29	28
HR15T							

b- Recuit à 200 °C

t (mn)	10	15	20	30	45	60	75
dureté HR15T	38,9	34	30,1	28	27,5	27	26

c - Recuit à 300 °C

t (mn)	10	15	20	30	45	60	75
dureté HR15T	38	31	30,1	27	26	23	22

d - Recuit à 350 °C

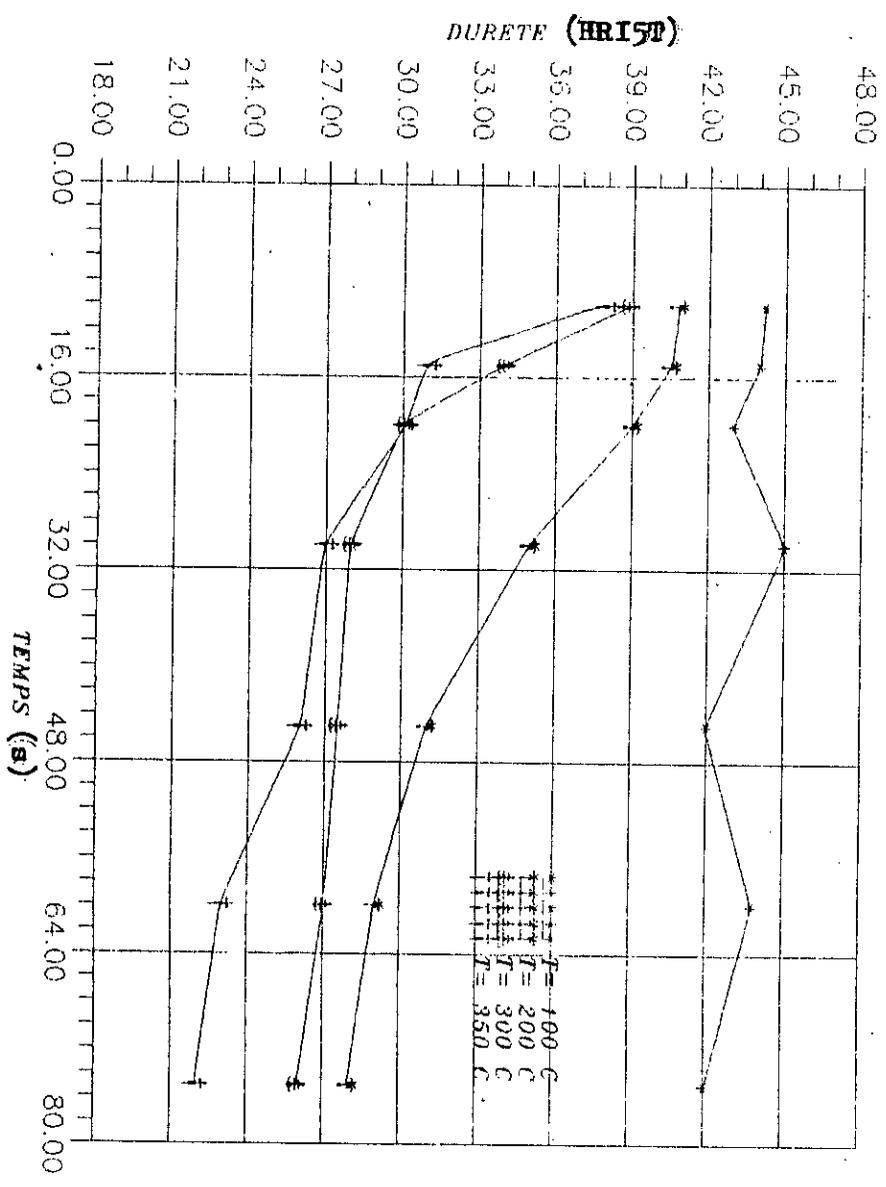
Tableau n°5: Evolution de la dureté au cours du temps de recuit pour différentes températures.

5-3-1 Evolution de la dureté en fonction de la durée de recuit

Comme le montre la figure (V-13), pour la température de recuit de 100°C la structure n'a pas été recristallisée, elle est restée à l'état écroui c'est pour cette raison que la dureté n'a pas tellement évoluée par contre pour les autres températures nous constatons pour chaque courbe la présence de trois zones.

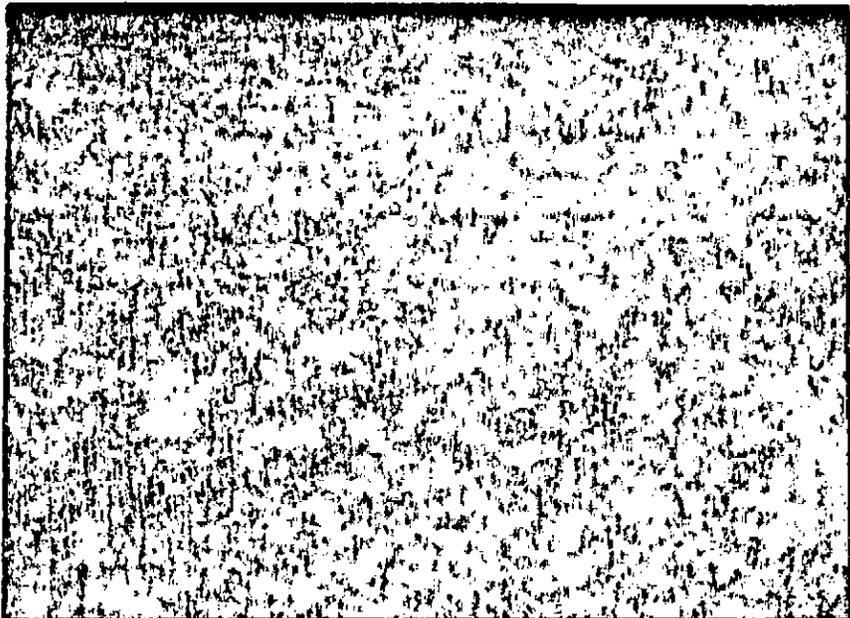
- Le premier tronçon de chaque courbe affecte une faible pente: ce tronçon est d'autant plus court que la température est plus élevée. Il correspond à la phase restauration au cours de laquelle le motif de l'orientation cristalline de l'état écroui **et** sensiblement conservé .
- Le deuxième tronçon, de pente plus forte apparaît pour chaque température au delà d'un certain temps d'autant plus court que la température est plus élevée. A ce stade il y a apparition progressive de nouveaux cristaux, cette phase correspond à la recristallisation primaire.

FIG (T.43) VARIATION DE LA DURETE EN FONCTION DU TEMPS

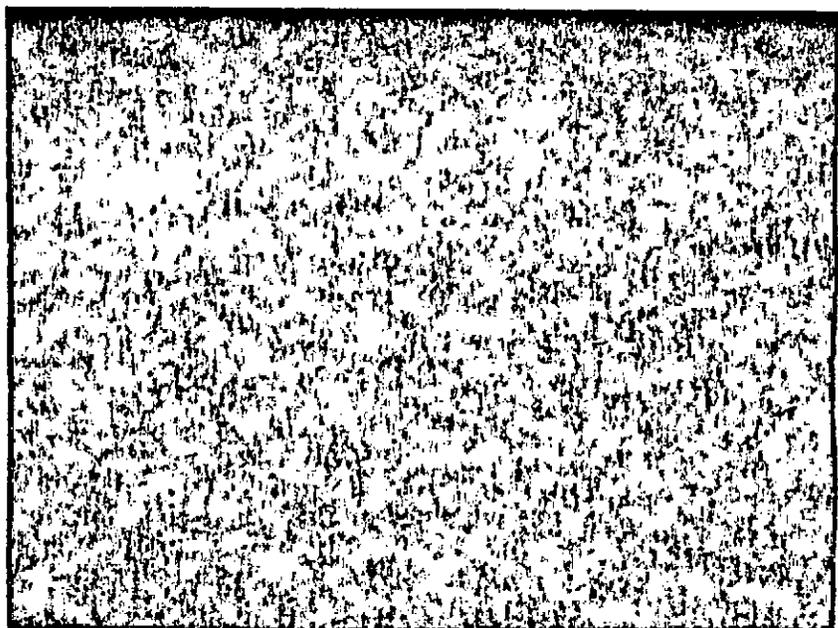


Taux de réduction : 54,43 %

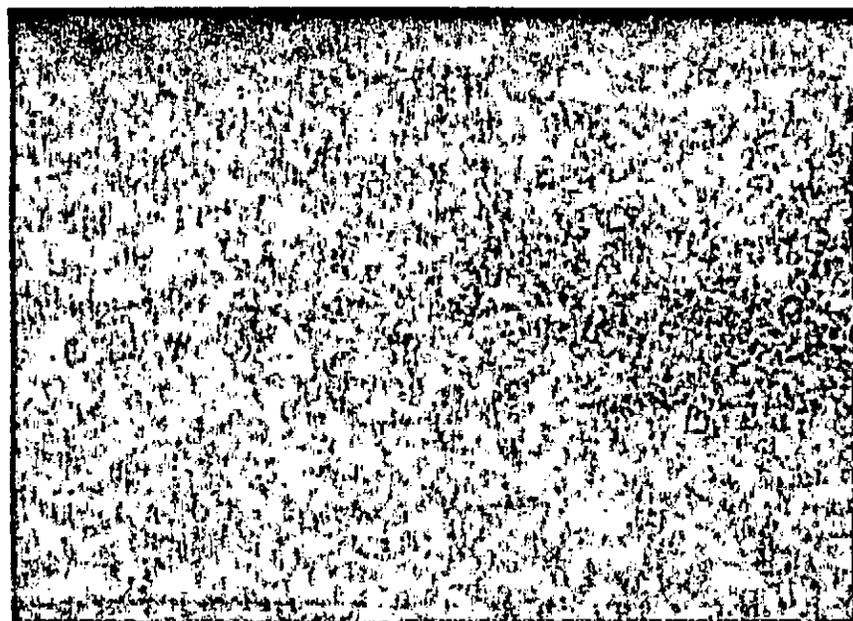
Aluminium recuit à 100 °C
pendant 45 mn
Grossissement : 900



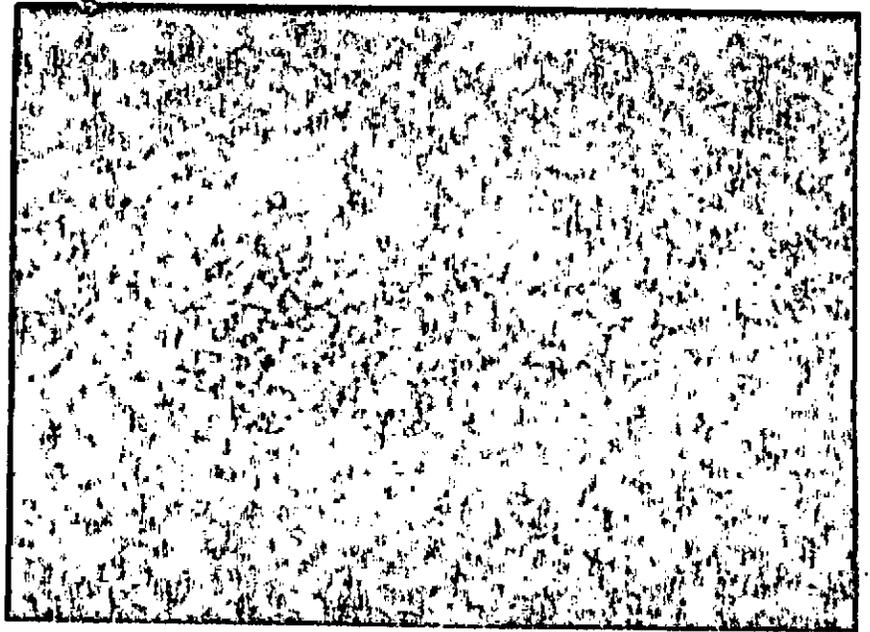
Aluminium recuit à 200°C
pendant 20 mn
Grossissement : 500



Aluminium recuit à 200°C
pendant 60 mn
Grossissement : 500



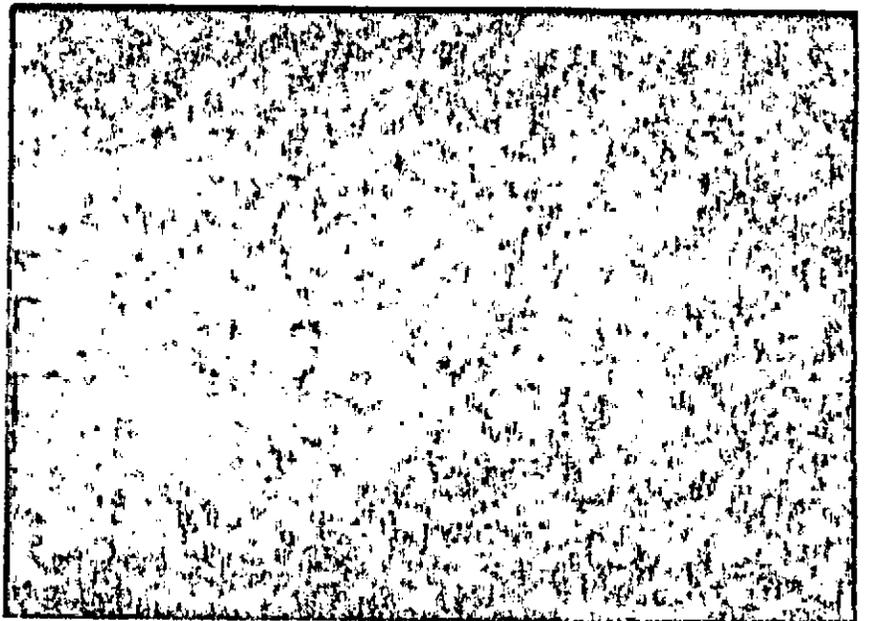
Aluminium recuit a 300 °
pendant 30 mn
Grossissement : 500



Aluminium recuit a 300 °
pendant 75 mn
Grossissement : 500



Aluminium recuit a 350 °
pendant 75 mn
Grossissement : 500



- Le troisième tronçon de pente sensiblement nulle, correspond au grossissement du grain alors que la recristallisation est complètement terminée.

5-3-2 Evolution de la structure

Comme le montre la planche (PL3), à la température de 100°C la structure n'a pas été changée les grains restent allongés et possèdent encore la structure fibreuse, et au delà de 200°C la structure altérée au cours de l'écrouissage a été restituée, nous constatons que les grains recristallisés sont isotropes et orientés aléatoirement.

Au stade supérieur de recuit la taille des grains recristallisés est d'autant plus importante que la température de recuit et le temps de maintien sont élevés.

CHAPITRE VI

INTERPRETATION GENERALE

Effet de l'écroutissage sur les propriétés mécaniques et physiques

Nous avons remarqué que les propriétés mécaniques et physiques varient pendant l'écroutissage par tréfilage.

L'écroutissage augmente la résistivité électrique, la charge à la rupture et la dureté, et en contre partie diminue l'allongement et l'aptitude à la déformation.

La conductibilité électrique est due à la circulation des électrons dans le métal. Elle se trouve en relation avec le nombre des "électrons libres", et leur liberté de circulation dans la masse de métal. Les électrons sont ralentis par leur chocs avec les atomes, et l'on conçoit que la conductibilité électrique soit affectée par tout ce qui détruit la "continuité" de la matière ceci a toutes les échelles atomiques, microscopiques ou macroscopiques. La conductibilité électrique de l'aluminium peut être diminuée par la présence des impuretés qu'ils peuvent contenir. Les atomes des métaux en solution provoquent des distorsions du réseau cristallin, qui freinent les déplacements des électrons, cette action est beaucoup moins importantes si l'impureté est hors solution, les éléments de transition telle que : titane, vanadium, chrome et manganèse absorbent facilement les électrons servent à compléter leur bande incomplètement remplies et réduisent donc le nombre électrons disponibles pour la conductibilité.

La conductibilité est affectée par l'écroutissage qui perturbe profondément l'ordonnance du réseau cristallin (imperfection géométrique; dislocation, lacune interstitiels).

L'augmentation de la charge à la rupture et de la dureté suivi de la diminution de l'allongement à la rupture est due à la contrainte appliquée qui engendre l'augmentation de la densité de dislocations et leurs interactions. Une forte proportion se trouve bloquée dans le cristal sous forme de blocs d'empilements par les joints de grains et les précipités

répartis dans l'ensemble du métal, ainsi le passage de nouvelles dislocations devient plus difficile, avec l'élévation de la contrainte appliquée, d'où l'augmentation de la densité de dislocation (obstacles). D'autre part l'aluminium étant un métal à forte énergie de défauts (réarrangement des dislocations relativement facile), la restauration des propriétés mécaniques se produit avant la recristallisation.

Effet de recuit de restauration et recristallisation:

Au cours de la restauration, il n'y a pas création de nouveaux grain mais seulement réduction de défauts ponctuels par migration et annihilation réciproque ou élimination en de puits de dislocation, joints, l'annihilation mutuelle des dislocations de signe opposé.

Le réarrangement des dislocations en réseau plus stable par glissement et moité et ceci à la température de 150 °C inférieur à celle de la recristallisation, ce qui explique, charge à la rupture, dureté et une légère augmentation de l'allongement.

Au cours de recuit de recristallisation à des températures voisines de 350 °C. L'aluminium tend vers son état de plus grande stabilité thermodynamique.

Après écrouissage par tréfilage le recuit de recristallisation a pour effet de restituer à l'aluminium sa structure qui a été altérée et d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques (électrique) qui ont été modifiés.

Le passage de la structure déformée à la structure de recristallisation se traduit par la formation de nouveaux grains disposés aléatoirement et désorientés les uns par rapport aux autres.

Ce qui explique la variation importante des propriétés mécaniques et physiques. La résistivité, la charge à la rupture et la dureté ont tendance à diminuer par contre, l'allongement à tendance à augmenter.

CONCLUSION

La déformation à froid par tréfilage engendre le phénomène d'écrouissage de l'aluminium. Cette écrouissage se traduit par la formation d'une texture fibreuse parallèle à l'axe de déformation par tréfilage, par la diminution de la résistivité électrique et par une baisse de la ductilité.

Ces effets sont d'autant plus marqués que le degré d'écrouissage est élevé. Lors de la restauration les propriétés mécaniques et physiques sont partiellement restituées. Par contre au cours de la recristallisation la texture fibreuse, antérieurement formée disparaît après une température critique caractéristique du matériau et du taux d'écrouissage pour laisser la place à une nouvelle structure isotrope plus ou moins régulière et l'aluminium devient plus ductile.

Il aurait été intéressant de compléter ce travail en étudiant l'évolution de la structure cristalline par la théorie des dislocations en examinant par microscopie électronique la structure du métal tréfilé à froid.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I : Mise en forme des métaux par déformation plastique

1-1 Mécanisme de la déformation plastique	2
1-2 Influence des divers facteurs sur la plasticité	4
1-3 Influence de la déformation sur la structure et les propriétés	5

CHAPITRE II : Ecouissage

2-1 Phénomène d'écrouissage pendant le déformation plastique	8
2-2 Interaction entre dislocation et défaut cristallins ...	9
2-3 Structure du métal écrouit	14

CHAPITRE III : Restauration recristallisation

3.1 Evolution structurale au cours d'un recuit.	16
3.2 Textures de recristallisation	20

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I : Procédé de fabrication du fil électrique d'aluminium

CHAPITRE II : Procédé de tréfilage

CHAPITRE III : Etude de la restauration et recristallisation de l'aluminium

3-1 Caractéristiques du fil machine d'aluminium	35
3-2 Ecouissage à différents taux par tréfilage	35
3-3 Prélèvement des éprouvettes:	36
3-4 Traitement thermique (recuit)	36
3-5 Préparation métallographique	37

CHAPITRE IV : Essai mécanique et résistivité électrique

4-1 Essais mécaniques	38
4-2 Essai de dureté	39
4-3 résistivité électrique	39

CHAPITRE V : Résultats

5-1 Influence de la déformation sur les propriétés du fil .	40
5-2 Influence de la température de recuit	42
5-3 Influence de temps de recuit	46

CHAPITRE VI : Interprétation générale

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

1. J. BENARD
METALLURGIE GENERALE
2. P. COULOMB
LES TEXTURES DANS LES METAUX ET ALLIAGES
3. B. CHALMERS
METALLURGIE PHYSIQUE
4. I. LAKHTINE
METALLOGRAPHIE ET TRAITEMENT THERMIQUES DES
METAUX
5. A. ROOS
PRECIS DE METALLURGIE APPLIQUEE
6. P. BAQUE
MISE EN FORME DES METAUX
7. G. CHAUSSIN
ALLIAGES METALLIQUES
8. B. BOUTIN
INFLUENCE DES IMPURETES SUR LA RECRISTALLISATION
DE L'ALUMINIUM
9. P. MAJOLIN
RECRISTALLISATION ET TEXTURES
10. ALUMINIUM PECHENEY
LES TRAITEMENTS THERMIQUES DE L'ALUMINIUM ET SES
ALLIAGES
11. CNRC
MISE EN FORME DES METAUX ET ALLIAGES
12. READ
LES DISLOCATIONS DANS LES CRISTAUX
13. Y. QUERE
DEFAUTS PONCTUELS DANS LES METAUX
14. G. CHAMPER
DEFORMATION PLASTIQUE DES METAUX ET ALLIAGES
15. TECHNIQUE DE L'INGENIEUR
16. REVUE DE L'ALUMINIUM JUILLET 1978.