

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Génie Mécanique

Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم: الهندسة الميكانيكية

المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Réalisation d'un appareil de fluage des métaux

Présenté par :

LAOUINI Abdeldjalil

Soutenu publiquement le 27 Juin 2012

Devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Dr. AMRAN Mohamed Nadir | Professeur | Président | Université de Biskra |
| Dr. BOUMERZOUG Zakaria | Professeur | Rapporteur | Université de Biskra |
| Dr. HECINI Mabrouk | Professeur | Examineur | Université de Biskra |
| Dr. BOUAZIZ Ahmed | Maitre de conférences "A" | Examineur | Université de Biskra |

Remerciements

Remerciements

Louange à Dieu, qui nous a éclairés sur le chemin de la science et de la connaissance et nous a aidé à accomplir ce devoir de nous accorder le succès et l'achèvement de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier très chaleureusement mon encadreur le Professeur BOUMERZOUG Zakaria, de à l'université de Biskra, qui m'a dirigé afin d'aboutir à ce résultat.

Je remercie également monsieur BERIBECHE Abedellatif qui ma aussi aidé dans la réalisation de l'appareil d'essai de fluage.

Je remercie profondément les responsables de l'ENICAB Biskra qui nous ont fourni des fils de cuivre.

J'exprime toute ma gratitude à Messieurs :

Monsieur AMRAN Mohamed Nadir maitre de conférence de l'université de Biskra ait accepté la présidence de ce jury je le remercie vivement.

Je remercie Monsieur HECINI Mabrouk maitre de conférence de l'université de Biskra ait accepté d'être membre de jury.

Je remercie Monsieur BOUAZIZ Ahmed maitre de conférence de l'université de Biskra ait accepté d'être membre de jury.

J'exprime mes remerciements les plus sincères à Monsieur N. MOUMMI chef de département de génie mécanique, je voudrais également exprimer mes remerciements sincères à Monsieur B.BENSASSI Chef de service laboratoire dans L'ENICAB, Pour leurs aides aimablement servies.

Sommaire

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Structure, Déformation et Mise en Forme | |
| I.1 Introduction..... | 2 |
| I.2 Microstructures des matériaux..... | 2 |
| I.2.1 Liaison atomique..... | 2 |
| I.3 Structure cristalline des métaux..... | 5 |
| I.3.1 Les principaux types de défauts cristallins..... | 7 |
| I.4 Déformation..... | 12 |
| I.4.1 Déformation élastique..... | 19 |
| I.4.1 Déformation élastique..... | 19 |
| I.4.2 La déformation plastique..... | 20 |
| I.4.3 Aspects micrographiques de la déformation plastique..... | 20 |
| I.4.4 Types de déformations..... | 22 |
| I.5 Procédés de mise en forme de cuivre..... | 27 |
| I.5 .1 Laminage..... | 28 |
| I.5 .2 Tréfilage..... | 29 |
| Chapitre II : Les Essais Mécaniques | |
| II.1 Généralités | 34 |
| II.2 Essai de dureté | 34 |
| II.2.1 Définition de dureté | 34 |
| II.2.2 Principe de l'essai de pénétration | 34 |
| II.2.3 Procédé avec action statique | 35 |
| II.3 Essais de résilience | 42 |
| II.3.1 Principe de CHARPY..... | 42 |
| II.3.2 Machine de CHARPY | 42 |
| II.3.3 Eprouvettes | 43 |
| II.3.4 Conduite de l'essai | 44 |
| II.4 Essai de traction | 45 |
| II.4.1 But d'essai | 45 |
| II.4.2 Principe..... | 45 |
| II.4.3 Eprouvettes | 45 |

| | |
|--|----|
| II.4.4 Machine d'essai | 46 |
| II.4.5 Diagramme de traction | 47 |
| II.4.6 Caractéristiques de l'essai | 48 |
| II.5 Essais de fatigue | 49 |
| II.5.1 But | 49 |
| II.5.2 Eprouvettes | 49 |
| II.5.3 Dimensions | 50 |
| II.5.4 Machine d'essai | 50 |
| II.5.5 Description de la machine | 51 |
| II.5.6 Courbe de Wöhler | 52 |
| II.5.7 Caractéristique de graphe | 53 |
| II.6 Essai de fluage | 53 |
| II.6.1 Définition | 53 |
| II.6.2 Diagramme typique de fluage (fluage restauration) | 54 |
| II.6.3 Différents stade de fluage restauration A | 55 |
| II.6.4 Eprouvettes | 55 |
| II.6.5 Dispositif d'application de la charge | 56 |
| II.6.6 Four | 57 |
| II.6.7 Mesure du déplacement | 58 |
| II.6.8 Effets de la température et de la contrainte sur le comportement en fluage | 60 |
| II.6.9 Effets de la taille de grain sur le comportement en fluage | 60 |
| II.6.10 Variations de ε et de $\dot{\varepsilon}$ avec le temps | 60 |
| II.6.11 Variation de la vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon}$) avec la température | 61 |
| II.6.12 Caractéristiques de fluage | 62 |
| II.6.13 Les différents mécanismes de fluage | 63 |
| II.7 Les différents types des appareils d'essai de fluage | 64 |
| II.7.1 premier exemple | 64 |
| II.7.2 Deuxième exemple | 67 |

Chapitre III : Description de l'appareil réalisé

| | |
|--|----|
| III.1 Description de la machine de fluage..... | 72 |
| III.2 Conception de la machine..... | 73 |
| III.2.1 Bâti | 73 |
| III.2.2 Bras de levier | 75 |
| III.2.2 Mors mobile et mors fixe | 76 |
| III.2.4 Axe et pignon | 77 |
| III.2.5 Couvercle de roulement | 80 |
| III.2.6 Roulement | 82 |
| III.2.7 Four électrique | 83 |
| III.2.8 Thermorégulateur | 86 |
| III.2.9 Système d'acquisition | 86 |
| III.3 Etude de la résistance | 86 |
| III.3.1 Etude de la résistance à la flexion du bras de levier | 86 |
| III.3.2 La condition de résistance de bras de levier: | 88 |
| III.3.3 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de l'articulation: | 92 |
| III.3.4 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de transmission: | 93 |
| III.3.5 Etude de la résistance au cisaillement de la vis d'anneau | 94 |

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

| | |
|--|------------|
| IV.1 Introduction..... | 96 |
| IV.2 Matériau étudié | 96 |
| IV.3 Tréfilage du cuivre et de l'aluminium | 96 |
| IV.3.1 Technique de recuit de fil tréfiles | 97 |
| IV.3.2 Eprouvettes forme et dimension | 97 |
| IV.4 Recuit..... | 98 |
| IV.4.1 Définition | 98 |
| IV.4.2 But | 98 |
| IV.5 Résultats et discussions..... | 99 |
| IV.5.1 L'effet du temps de recuit | 99 |
| Conclusion..... | 106 |
| Références bibliographiques..... | 107 |

Liste des figures

Liste es Figures

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure I.1 | Représentation schématique d'une liaison covalente dans une molécule de méthane (CH_4)..... | 3 |
| Figure I.2 | Exemple de liaisons covalente la molécule de dichorée Cl_2 | 3 |
| Figure I.3 | Représentation schématique de liaisons ioniques dans du chlorure de sodium (Na Cl)..... | 4 |
| Figure I.4 | Exemple de liaisons ionique chlorure de sodium (Na Cl)..... | 4 |
| Figure I.5 | Représentation schématique de liaisons métalliques..... | 5 |
| Figure I.6 | Exemple de liaisons métalliques cristal de sodium Na | 5 |
| Figure I.7 | Représentation schématique de liaisons de van der Waals..... | 6 |
| Figure I.8 | structure cristalline cubique centrée..... | 8 |
| Figure I.9 | La structure cristalline cubique à faces centrées..... | 8 |
| Figure I.10 | La structure cristalline hexagonale compacte..... | 8 |
| Figure I.11 | Défaut ponctuel simple la lacune ou défauts de SCHOTTKY..... | 10 |
| Figure I.12 | ponctuel simple atomes interstitiels ou défauts de FRENKEL..... | 10 |
| Figure I.13 | Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides désordonnée..... | 11 |
| Figure I.14 | Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides ordonnée..... | 11 |
| Figure I.15 | Observation en microscopie à transmission de lignes de dislocation dans un acier inoxydable 316 L..... | 13 |
| Figure I.16 | (a) Cristal parfait, (b) Dislocations coin, (c).Dislocations vis..... | 14 |
| Figure I.17 | vecteur de BURGERS d'une dislocation..... | 14 |
| Figure I.18 | Poly cristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de phases..... | 15 |
| Figure I.19 | Schématisation à deux dimensions d'un joint de macle. Le cristal maclé et le cristal mère sont identiques à une symétrie près..... | 15 |
| Figure I.20 | défaut d'empilement..... | 16 |
| Figure I.21 | Schématisation à deux dimensions d'une paroi d'antiphase dans un alliage ordonné. a) Cristal parfaitement ordonné. b) Cristal traversé par une paroi d'antiphase. c) Paroi d'antiphase bordée par une dislocation partielle..... | 18 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure I.22 | a) Précipité cohérent : continuité de certains plans cristallins entre le précipité et la matrice. b) Précipité semi-cohérent : les déformations sont relaxées par la présence de dislocations aux interfaces. c) Précipité incohérent..... | 18 |
| Figure I.23 | Variations de l'énergie d'interaction et de la force d'interaction entre deux atomes en fonction de leur distance d . De part et d'autre de la distance d'équilibre d_0 , la force de rappel est approximativement proportionnelle à l'écart $d - d_0$ | 19 |
| Figure I.24 | Glissement dans les éprouvettes..... | 20 |
| Figure I.25 | lignes de glissement sur un monocristal d'aluminium..... | 21 |
| Figure I.26 | Blocs de cellules et murs denses de dislocations..... | 24 |
| Figure I.27 | Structure de cellules de dislocations dans un alliage d'aluminium..... | 26 |
| Figure I.28 | Recristallisation dynamique : a) structure déformée restaurée et non recristallisée; b) germination de nouveaux grains; c) grains à des niveaux différents d'écroutissage; d) exemple d'une microstructure d'un acier austénitique présentant des grains écrouis et recristallisés..... | 26 |
| Figure I.29 | Schéma des trains de laminoirs..... | 28 |
| Figure I.30 | Schéma de principe de laminage..... | 29 |
| Figure I.31 | Schéma d'un banc à tréfiler..... | 30 |
| Figure I.32 | Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées..... | 31 |
| Figure I.33 | Schéma de principe de tréfilage..... | 31 |
| Figure I.34 | Savonnier..... | 32 |
| Figure I.35 | Evolution de la rhéologie du savon lors d'une opération de tréfilage élémentaire..... | 32 |
| Figure I.36 | Bancs de tréfilage multi passe de l'EN.I.CA.B..... | 33 |
| Figure II.1 | vecteur de BURGERS d'une dislocation..... | 36 |
| Figure II.2 | Poly cristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de phases..... | 36 |
| Figure II.3 | Schématization à deux dimensions d'un joint de macle. Le cristal maclé et le cristal mère sont identiques à une symétrie près..... | 37 |
| Figure II.4 | défaut d'empilement..... | 38 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figure II.5 | Schématisation à deux dimensions d'une paroi d'antiphase dans un alliage ordonné. a) Cristal parfaitement ordonné. b) Cristal traversé par une paroi d'antiphase. c) Paroi d'antiphase bordée par une dislocation partielle..... | 39 |
| Figure II.6 | a) Le cône, b) La bille..... | 40 |
| Figure II.7 | Pénétrateur pyramidal | 41 |
| Figure II.8 | Machine de CHARPY..... | 42 |
| Figure II.9 | Appui de l'éprouvette vue d'en haut..... | 42 |
| Figure II.10 | Choc CHARPY en position debout avec éprouvette à simple entaille..... | 43 |
| Figure II.11 | Choc CHARPY à plat..... | 44 |
| Figure II.12 | Types d'entailles..... | 44 |
| Figure II.13 | Exemple d'une éprouvette de traction..... | 46 |
| Figure II.14 | Machine de traction..... | 46 |
| Figure II.15 | Diagramme de traction..... | 47 |
| Figure II.16 | Essai de fatigue..... | 49 |
| Figure II.17 | Eprouvette de fatigue..... | 50 |
| Figure II.18 | Eprouvette d'essai de fatigue..... | 50 |
| Figure II.19 | La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140..... | 51 |
| Figure II.20 | Courbe schématique de Wöhler ou courbe d'endurance..... | 52 |
| Figure II.21 | Courbes de fluage..... | 54 |
| Figure II.22 | (a) Allure générale d'une courbe de fluage, Evolution de la déformation et (b) la vitesse de déformation en fonction du temps..... | 55 |
| Figure II.23 | Eprouvette de fluage prismatique..... | 56 |
| Figure II.24 | Machine de fluage..... | 57 |
| Figure II.25 | Fours tubulaires..... | 57 |
| Figure II.26 | Dispositif de mesure de la déformation pour essai de fluage..... | 58 |
| Figure II.27 | (a) jauge collée sur une éprouvette (image CdM), (b) schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de déformation..... | 59 |
| Figure II.28 | Extensomètres diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction (Cliché CdM)..... | 59 |
| Figure II.29 | Courbe d'Arrhenius..... | 61 |
| Figure II.30 | a)Fluage logarithmique..... | 62 |
| | b) Fluage de puissance..... | 63 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Figure II.31 | Représentation schématique des modes de déformation en fonction de la température..... | 64 |
| Figure II.32 | Schéma de la machine de luage..... | 64 |
| Figure II.33 | Les constituants de machine de fluage..... | 65 |
| Figure II.34 | Dessin d'ensemble de la machine..... | 66 |
| Figure II.35 | Machine de fluage complète..... | 66 |
| Figure II.36 | Schéma des principaux composants de la machine de fluage et de la chambre à vide..... | 68 |
| Figure II.37 | a) les deux machines de fluage d'exploitation avec le vide système; vue de face b) et c) vue de dos des deux chambres à vide sur la machine de fluage..... | 69 |
| Figure II.38 | Machine de test de traction / fluage..... | 70 |
| Figure II.39 | Comparateur à cadran..... | 71 |
| Figure III.1 | Schéma d'une machine de fluage..... | 72 |
| Figure III.2 | Dessin d'ensemble du bâti..... | 75 |
| Figure III.3 | Dessin de définition de bras de levier..... | 76 |
| Figure III.4 | Dessin de mors mobile et fixe..... | 76 |
| Figure III.5 | Dessin de définition des anneaux des mors mobile et fixe..... | 77 |
| Figure III.6 | Dessin de définition d'axe de transmission..... | 78 |
| Figure III.7 | Dessin de définition de pignon..... | 79 |
| Figure III.8 | Dessin de définition de couvercle..... | 81 |
| Figure III.9 | Dessin de définition de roulement..... | 82 |
| Figure III.10 | Dessin de four..... | 84 |
| Figure III.11 | Le four électrique..... | 85 |
| Figure III.12 | Thermorégulateur..... | 86 |
| Figure III.13 | Schéma de la machine de fluage..... | 87 |
| Figure III.14 | Schéma représentatif des forces appliquées sur le bras de levier..... | 88 |
| Figure III.15 | Diagramme d'effort tranchant..... | 90 |
| Figure III.16 | Diagramme de moment fléchissant | 91 |
| Figure III.17 | représentative la force appliqué sur l'axe d'articulation de bras de levier.. | 92 |
| Figure III.18 | Schéma représentative de force appliqué sur l'axe transmission..... | 93 |
| Figure IV.1 | Eprouvettes des fils de cuivre tréfilé..... | 97 |
| Figure IV.2 | Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre sans traitement thermique dans la | |

| | | |
|--------------|--|-----|
| | condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 100 |
| Figure IV.3 | Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre sans traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 100 |
| Figure IV.4 | Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 101 |
| Figure IV.5 | Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 101 |
| Figure IV.6 | Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 102 |
| Figure IV.7 | Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 102 |
| Figure IV.8 | Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 103 |
| Figure IV.9 | Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 103 |
| Figure IV.10 | Courbes de fluage de fil tréfilé de cuivre à différentes traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 104 |
| Figure IV.11 | Courbes des vitesses de déformation du fil tréfilé de cuivre à différentes traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)..... | 104 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau I.1 | Propriétés des matériaux et types de liaisons..... | 6 |
| Tableau II.1 | Tableau pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop..... | 35 |
| Tableau IV.1 | Propriétés physiques du fil machine de cuivre..... | 96 |
| Tableau IV.2 | Propriétés mécaniques du fil machine de cuivre..... | 96 |
| Tableau IV.3 | Les taux de réduction des fils de cuivre tréfilés à l'ENICAB Biskra.. | 97 |
| Tableau IV.4 | Composition chimique du fil machine de cuivre..... | 99 |
| Tableau IV.5 | Influence du recuit sur la dépendance de la vitesse de fluage, la déformation et la durée de stade secondaire..... | 105 |

Introduction générale

Introduction générale

La connaissance des propriétés mécaniques des métaux et des alliages métalliques nécessitent des tests mécaniques. Parmi ces tests, on a l'essai de fluage qui a pour but de connaître le comportement d'un matériau lors de l'application d'une charge constante mais à une température donnée. Parmi les matériaux, on peut citer l'exemple des fils électriques de cuivre et d'aluminium et qui sont utilisés dans le domaine de transport de l'électricité et qui nécessitent la connaissance de leur résistance au fluage.

Par conséquent, un appareil d'essai de fluage est nécessaire pour effectuer ce genre d'essai. D'autre part, et d'après nos recherches bibliographiques, on a remarqué qu'il y a plusieurs types d'appareil d'essai de fluage, tel que chaque laboratoire réalise sa propre machine.

Pour ce projet de mémoire de magister, nous avons réalisé un appareil d'essai de fluage qui a une caractéristique différente par rapport aux autres machines déjà réalisés.

Après une introduction générale, le manuscrit est composé de quatre chapitres.

- Le premier chapitre est consacré aux notions de structure, déformation et mise en forme de métaux. Des notions de base ont été présentées afin de faciliter la compréhension du reste du mémoire.
 - Le deuxième chapitre est réservé aux différents types d'essais mécaniques, c'est-à-dire, des essais comme la dureté, la résilience, la traction, la fatigue et le fluage sont bien détaillés.
 - Le troisième chapitre décrit la machine d'essai de fluage réalisée, ou des dessins techniques de chaque pièce et aussi de l'ensemble de l'appareil ont été expliqués.
 - Le quatrième chapitre comprend quelques résultats de fluage, c'est-à-dire des courbes de fluage obtenues sur des fils de cuivre ont été présentées et interprétées.
- Enfin une conclusion générale qui rassemble l'essentiel de cette étude.

Chapitre I

Structure, déformation et mise en forme

I.1 Introduction

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante augmentation. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- (1) les matériaux de structure, et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.
- (2) les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

Certains matériaux se trouvent à la frontière entre les applications mécaniques et physiques, comme par exemple les matériaux piézo-électriques qui délivrent un effort lorsqu'on les soumet à une différence de potentiel électrique.

Cependant, même en se restreignant aux matériaux de structure, le nombre de matériaux existant reste considérable.

I.2 Microstructures des matériaux

I.2.1 Liaison atomique

Les liaisons atomiques ont une influence directe sur les propriétés physiques des matériaux qu'elles unissent. On distingue 4 types de liaisons [1].

- Liaisons covalentes
- Liaisons ioniques
- Liaisons métalliques
- Liaisons de faible intensité

I.2.1.1 Liaison covalente

Cette liaison se caractérise par la mise en commun d'électrons afin de saturer les couches électroniques externes de chacun des atomes de la molécule. Cette liaison permet par exemple d'expliquer l'association de deux atomes d'hydrogène pour former la molécule de dihydrogène (Fig. I.1). La liaison covalente est également une liaison forte puisque elle permet de saturer la couche électronique externe des atomes [1].

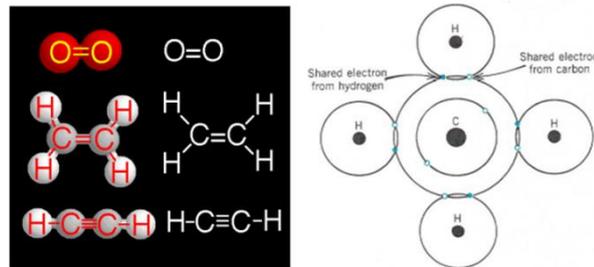


Figure I.1 : Représentation schématique d'une liaison covalente
dans une molécule de méthane (CH_4)

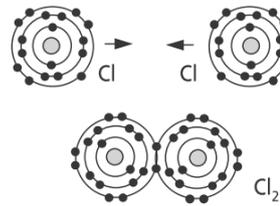


Figure I.2 : Exemple de liaisons covalente la molécule de dichlorée Cl_2 [1].

I.2.1.2 Liaison ionique

Cette liaison se caractérise par l'échange d'électrons entre deux atomes. Cette liaison est forte car elle sature la couche extérieure des atomes qui deviennent des ions. Cette liaison concerne essentiellement les éléments qui ont peu d'électrons sur leur couche externe (colonnes 1 et 2 du tableau périodique) et les éléments qui ont des couches externes presque saturées (colonnes 16 et 17 du tableau périodique). Par exemple, le sodium Na, présente une structure électronique comme suit : $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1$. Il devient donc un ion Na^+ . Par ailleurs le Chlore Cl, présente une structure électronique comme suit $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^5$, il devient donc un ion Cl^- , on obtient alors le composé stable NaCl. Cette liaison est forte car elle stabilise fortement la structure électronique des atomes en saturant leur couche électronique externe (Fig. I.3) [1].

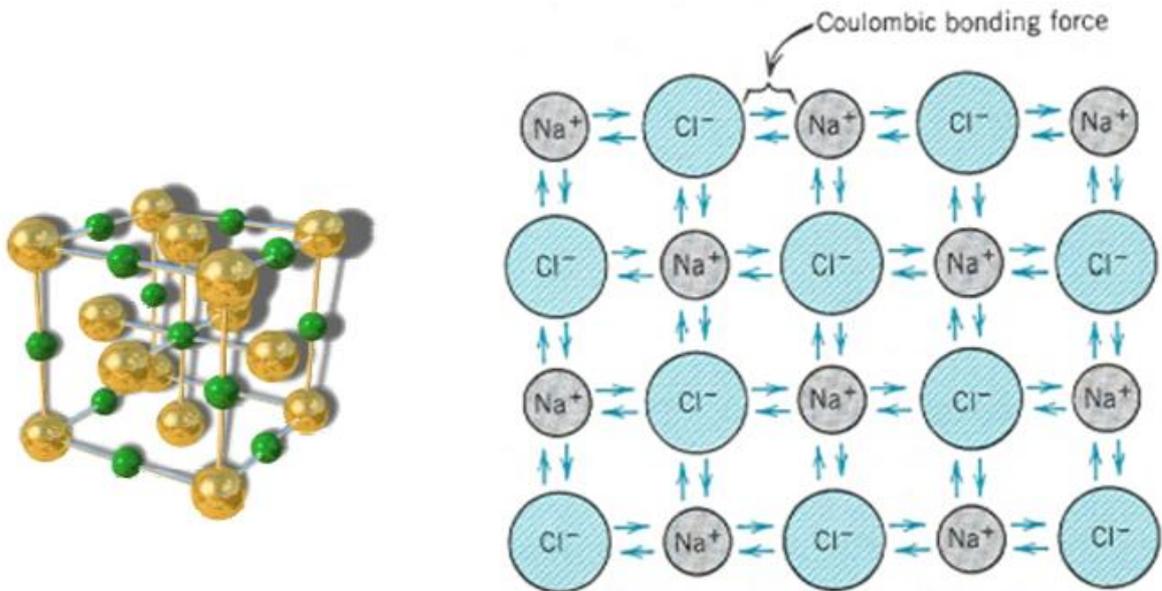


Figure I.3 : Représentation schématique de liaisons ioniques dans du chlorure de sodium (Na Cl)

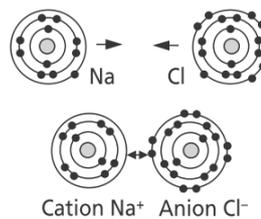


Figure I.4 : Exemple de liaisons ionique chlorure de sodium (Na Cl) [1].

I.2.1. 3 Liaison métallique

Cette liaison se caractérise aussi par la mise en commun d'électrons entre plusieurs atomes afin de saturer les couches électronique externes. A la différence de la liaison covalente, la liaison métallique est délocalisée, c'est-à-dire que chaque atome peut être considéré comme un ion baignant dans un gaz d'électron. Les orbitales externes des atomes « coalescent » lorsque le cristal se forme. Ainsi les électrons de la couche externe ont-ils la liberté de se déplacer partout dans le cristal. Le matériau est alors conducteur électrique et thermique. Les atomes qui, isolés, présentent en couche externe des orbitales de type s ou d, dont la forme est assez isotrope, ont davantage tendance, lorsqu'ils sont sous forme de cristaux, à former des liaisons métalliques. Cette liaison est un peu moins forte que les liaisons covalente ou ionique mais elle reste une liaison forte [1].

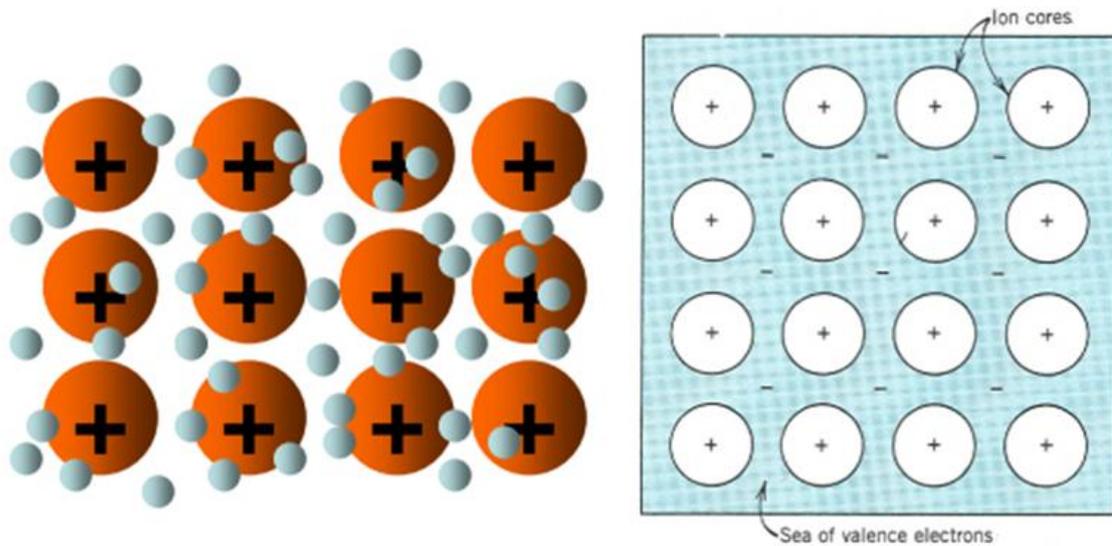


Figure I.5 : Représentation schématique de liaisons métalliques

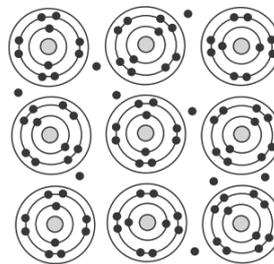


Figure I.6 : Exemple de liaisons métalliques cristal de sodium Na [1].

I.2.1.4 Liaisons faibles intensité ou secondaires

Il existe également des liaisons électrostatiques faibles entre les molécules (et non pas entre atomes). Divers mécanismes font que les liaisons entre deux atomes d'une molécule peuvent être légèrement dissymétriques. La liaison se comporte alors comme un dipôle électrique. Lorsque plusieurs molécules sont assemblées, les pôles positifs et négatifs des dipôles auront tendance à s'attirer. Ainsi apparaissent des liaisons faibles entre molécules.

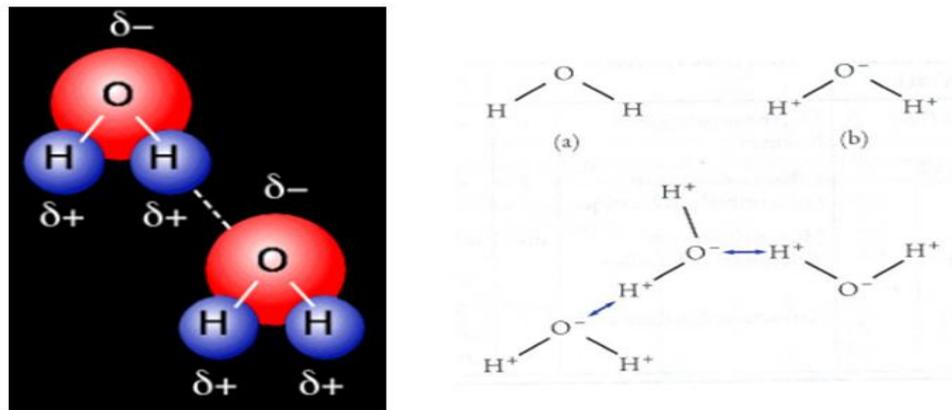


Figure I.7 : Représentation schématique de liaisons de van der Waals

Propriétés des matériaux et types de liaisons refaire

| Type de liaison | Exemple et énergie de liaison (eV/at) | Nature de la liaison | Propriété | | | | |
|-----------------|---------------------------------------|--|-----------|-----|----------|----------|-----------|
| | | | T_f | E | α | σ | Ductilité |
| Covalente | Diamant (7.0) | Electrons partagés et localisés | e | e | f | f | f |
| Ionique | NaCl (3.3) | Echange d'électrons : attraction électrostatique | e | e | f | f | f |
| Métallique | Na (1.1) Cu (3.5) Ti (4.8) | Mise en commun d'électrons délocalisés | m-e | m-e | m-f | m-e | e |
| Van der waals | | Attraction dipolaire | f | f | e | f | m-f |

Tableau I.1 : Propriétés des matériaux et types de liaisons [1].

Avec

T_f = température de fusion

f = faible

E = module de Young

e = élève

α = coefficient de dilatation linéique

m = moyen

σ = conductivité électrique

I.3 Structure cristalline des métaux

Un cristal se compose d'atomes (ions) répartis suivant une succession déterminée qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Pour décrire une structure cristalline, on recourt à la notion de réseau spatial ou cristallin c'est-à-dire un réseau spatial imaginaire ayant pour les nœuds les atomes (ions) constitutifs du métal (corps cristallin solide). Le volume minimal d'un cristal qui permet de juger de la structure atomique de volume tout entier s'appelle maille cristalline élémentaire [2].

Le réseau de la majorité des métaux usités dans l'industrie s'établit d'après un des systèmes suivants à symétrie élevée et à empilement compact des atomes (Fig. I.8, I.9, I.10) :

- La structure cristalline cubique centrée (manganèse, chrome,...) (Fig. I.8).

Une autre structure cristalline courante est dotée d'une maille élémentaire de forme cubique comprenant un atome situé à chacun des 8 coins et un seul atome au centre du cube (CC).

- La structure cristalline cubique à faces centrées (alu, cuivre, argent,...) (Fig. I.9).

De nombreux métaux présentent une structure cristalline à géométrie cubique, où les atomes de la maille élémentaire sont situés à chacun des coins et des centres de chacune des faces d'un cube. Cette structure est dite, à juste titre, cubique à faces centrées (CFC). Elle se retrouve dans des métaux bien connus comme le cuivre, l'aluminium, l'argent et l'or.

- La structure cristalline hexagonale compacte (magnésium, zinc,...) (Fig. I.10).

Certains métaux sont dotés d'une maille élémentaire de forme autre que cubique ; ainsi, la dernière structure cristalline métallique courante qui sera examinée ici possède une maille élémentaire de forme hexagonale (HC) [3].



Figure I.8 : La structure cristalline cubique centrée

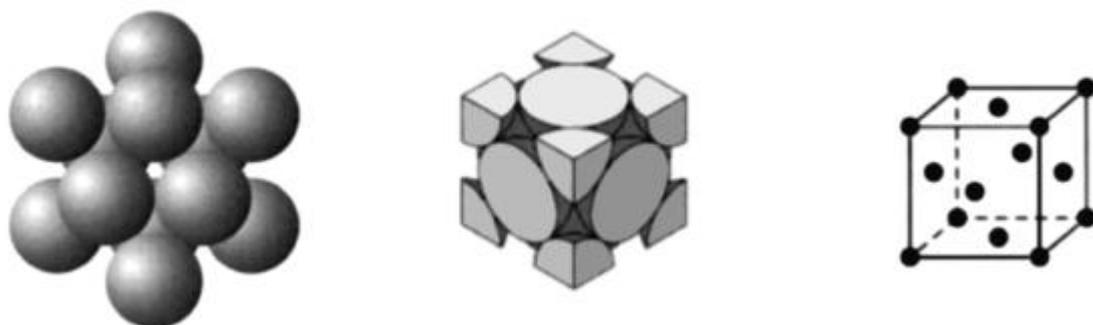


Figure I.9 : La structure cristalline cubique à faces centrées

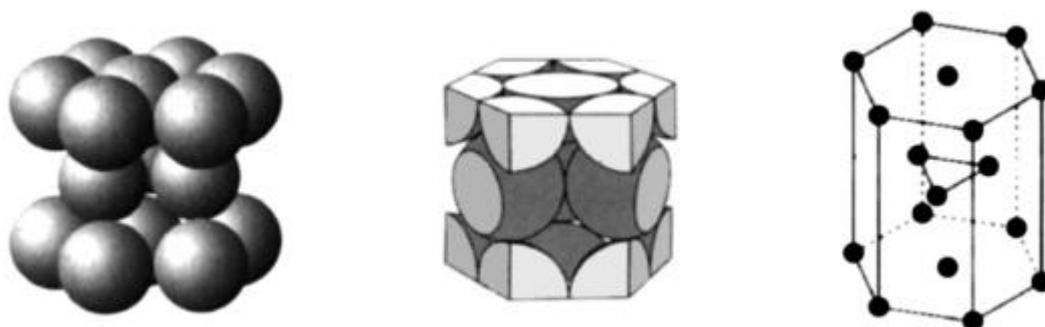


Figure I.10 : La structure cristalline hexagonale compacte

I.3.1 Les principaux types de défauts cristallins

Les défauts cristallins sont des défauts d'arrangement atomique d'un cristal. Tout cristal réel comporte toujours des défauts ou imperfections de structure, suivant les caractéristiques géométriques. Les défauts et leurs interactions jouent un rôle fondamental sur les propriétés physiques macroscopiques des matériaux cristallins en proportion de leur concentration.

On trouve principalement 3 types de défauts cristallins [4].

- Les défauts ponctuels: lacunes et interstitiels...
- Les défauts étendus:

Les défauts linéaires : dislocations coins, vis et mixtes...

Le défaut bi- ou tridimensionnel : joints de grains macles, parois d'antiphase et fautes d'empilement.

I.3.1.1 Les défauts ponctuels (de dimension nulle ou 0 dimension)

Les principaux défauts ponctuels sont :

- les lacunes ou défauts de SCHOTTKY.
- les atomes interstitiels ou défauts de FRENKEL.
- les atomes étrangers en substitution sur un site cristallographique.
- les défauts ponctuels combinés comme les centres colorés.

a- Les lacunes ou défauts de SCHOTTKY

Le défaut ponctuel le plus simple est la lacune : là où l'on s'attend à trouver un atome, sur l'un des sites cristallographiques de la structure, il n'y en a pas. La lacune s'appelle aussi défaut de SCHOTTKY et se représente, dans l'écriture chimique, soit par un carré vide, soit par la lettre V assortie en indice du symbole chimique de l'élément manquant (Fig. I.11). Par exemple, dans le chlorure de sodium Na Cl une lacune en sodium se note V_{Na} et une lacune en chlore V_{Cl} . L'équilibre électrique exigeant qu'il y ait autant d'ions positifs que d'ions négatifs, l'ion qui crée une lacune se trouve en fait rejeté à la surface du cristal.

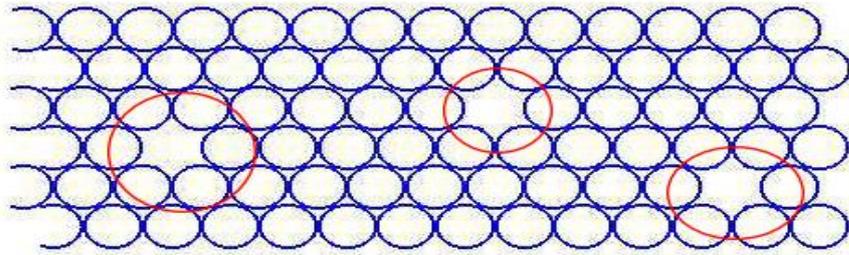


Figure I.11 : Défaut ponctuel simple la lacune ou défauts de SCHOTTKY

b- Les atomes interstitiels

Un atome interstitiel est un atome supplémentaire qui n'occupe pas une place prévue à cet effet dans la structure cristalline. Il faut communiquer une énergie considérable à un atome pour le déplacer de son site cristallographique et le mettre sur un site non prévu de la structure. Il y a alors formation d'un défaut de Frenkel, association d'une lacune et d'un atome interstitiel. Un atome étranger de taille convenable peut dans certaines conditions venir occuper un site cristallographique vacant de la structure "hôte". On a affaire dans ce cas à une solution solide interstitielle (Fig. I.12). Dans les deux cas le réseau cristallin se trouve déformé par la présence de l'atome supplémentaire, sauf si sa taille est inférieure ou égale à celle du site qu'il occupe.

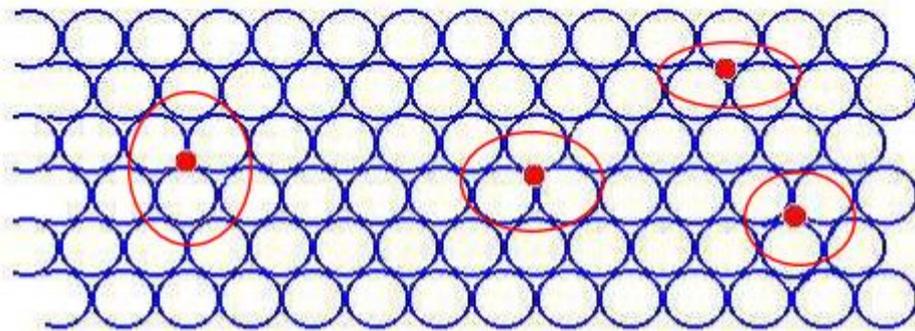


Figure I.12 : Défaut ponctuel simple atomes interstitiels ou défauts de FRENKEL

c-Les impuretés en substitution

Lorsqu'on remplace un atome dans une structure cristalline donnée par un autre atome, en général de taille et de :

Propriétés physico-chimiques voisines, on opère une substitution. Il existe de très nombreuses possibilités de solutions solides de substitution, chaque fois que l'élément substituant est très proche de l'élément substitué (Fig. I.13). Par exemple le cuivre et le nickel sont solubles à l'état solide en toutes proportions (les alliages sont les cupronickels utilisés dans la fabrication des pièces de monnaie). De la même manière l'or et l'argent, ou le silicium et le germanium, sont entièrement miscibles à l'état solide.

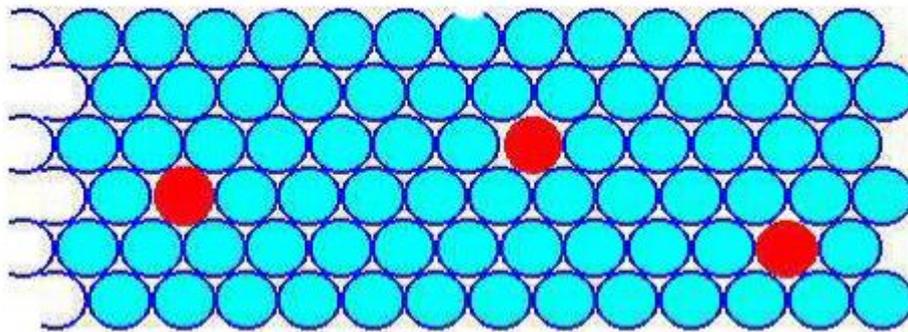


Figure I.13 : Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides désordonnée.

Le cuivre et l'or donnent des solutions solides de substitution, mais à la différence du système or-argent, certaines d'entre elles peuvent être ordonnées du point de vue cristallographique, pour certaines compositions (Fig. I.14). On les appelle sur structures. Par exemple les alliages Au Cu, Cu_3Au , Au_3Cu , obtenus solides par refroidissement lent de la phase liquide, s'ordonnent dans des sur structures où alternent les plans d'atomes de cuivre et d'atomes d'or .

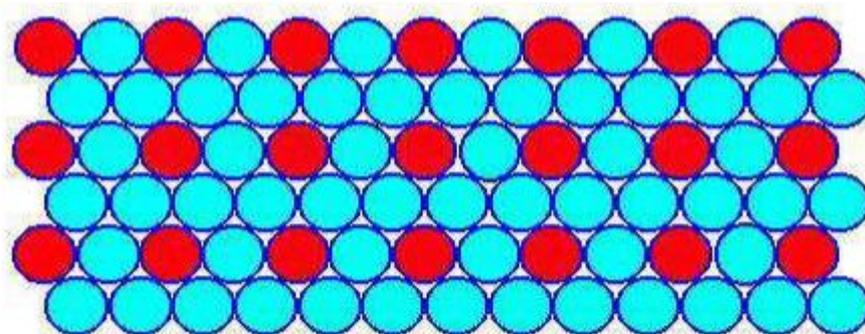


Figure I.14 : Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides ordonnée.

d-Les défauts associés

➤ Les défauts de Frenkel

Le défaut associé le plus simple est celui qui combine une lacune et un atome interstitiel, lorsqu'un atome quitte son site cristallographique pour occuper un site voisin, en principe vacant, cela sous l'action d'un fort apport d'énergie, une irradiation par exemple. C'est un défaut de Frenkel.

➤ Les doubles lacunes

Il est possible de trouver, dans les structures macromoléculaires covalentes ou dans les structures ioniques par exemple, l'association de deux lacunes : dans Zn S, une lacune de zinc et une lacune de soufre voisines, les deux atomes étant manquants; dans Na Cl, une lacune de sodium et une lacune de chlore voisines. Il s'agit dans les deux cas d'une double lacune. Si la perturbation géométrique demeure et se trouve même amplifiée par rapport à une lacune simple, la perturbation électrique est réduite.

➤ Les centres colorés

Un centre coloré est un défaut cristallin qui absorbe la lumière dans le domaine du visible. Une lacune simple ne colore pas un cristal, mais certaines associations de défauts le font.

I.3.1.2 Les défauts étendus

I.3.1.2.1 Les défauts linéaires

On distingue principalement deux catégories de défauts étendus : les défauts linéaires et le défaut bi- ou tridimensionnel.

Les dislocations sont des défauts linéaires pouvant se propager dans toute l'étendue du cristal.

Les glissements sont des défauts plans séparant deux parties d'un cristal qui se sont déplacées parallèlement l'une par rapport à l'autre.

Les macles sont des défauts plans séparant les deux parties d'un cristal images l'une de l'autre (symétriques) par rapport au plan de macle.

Les défauts d'empilement qui, comme leur nom l'indique, marquent une discontinuité, aléatoire ou ordonnée, dans l'empilement des espèces chimiques.

Les rassemblements sont des défauts tridimensionnels dans lesquels une seule sorte d'atomes ségrége et se rassemble dans une zone du cristal, dans certains types d'alliages par exemple.

➤ Les dislocations

Les dislocations sont des défauts linéaires particulièrement importants qui interviennent dans les mécanismes de déformation des métaux et des matériaux d'une manière plus générale. Une dislocation est une ligne d'imperfection qui délimite dans le cristal une région qui a glissé relativement à une autre non déformée, la densité de ces défauts est importante en général.

La dislocation est une distorsion du réseau cristallin très localisée selon deux directions et très étendue dans la troisième direction. On peut l'assimiler à une ligne. On observe ainsi très bien en microscopie à transmission les zones distordues d'un réseau cristallin, qui apparaissent comme des lignes noires (Fig. I.15). Il n'est pas rare d'observer des lignes de dislocation qui traversent tout le grain.

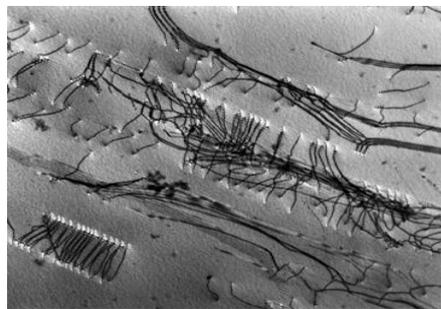


Figure I.15: Observation en microscopie à transmission de lignes de dislocation dans un acier inoxydable 316 L

➤ Dislocations vis et coin, vecteur de Burgers

La dislocation est donc un défaut linéique. Il en existe schématiquement deux types, les dislocations vis (Fig. I.16c) et les dislocations coin (Fig. I.16b). La figure I.16b représente une dislocation coin, la ligne de dislocation est perpendiculaire au plan de coupe. On peut définir le vecteur de burgers de la dislocation en imaginant un circuit fermé suivant la matière dans le cristal parfait puis le même circuit dans le cristal contenant un défaut. Le circuit est ouvert lorsque le cristal contient un défaut. Le vecteur liant les deux extrémités du circuit est appelée le vecteur de Bürgers, et noté \mathbf{b} . Ce vecteur est orthogonal à la ligne de dislocation dans le cas d'une dislocation coin et parallèle dans le cas d'une dislocation vis.

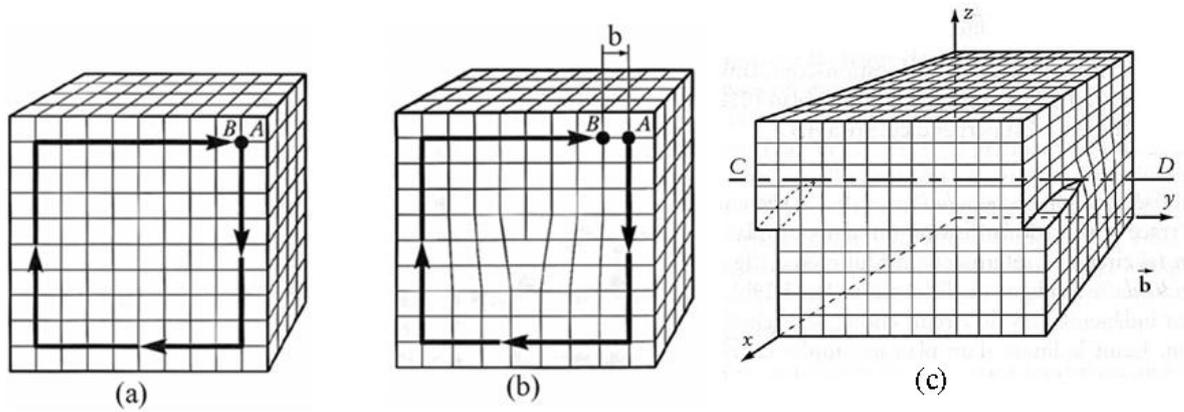


Figure I.16 : (a) Cristal parfait, (b) Dislocations coin, (c).Dislocations vis.

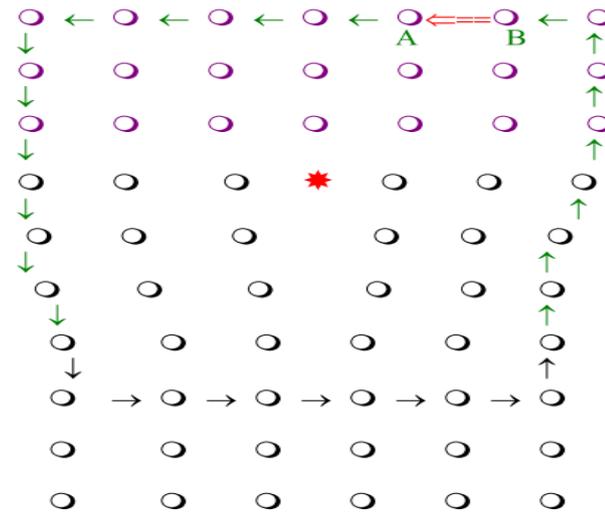


Figure I.17 : vecteur de BURGERS d'une dislocation

I.3.1.2.2 Les défauts surfaciques

➤ Joint de grains, joint de phases

Sauf élaboration particulière, la quasi-totalité des solides cristallins est constituée d'un agglomérat de cristaux, ou grains accolés avec des orientations différentes. La taille des grains varie de quelques microns à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration. Si ces cristaux sont de nature identique, leur surface d'accolement est appelée joint de grains. Si les cristaux sont de nature différente, leur surface d'accolement est appelée joint de phases (Fig. I.18) [5].

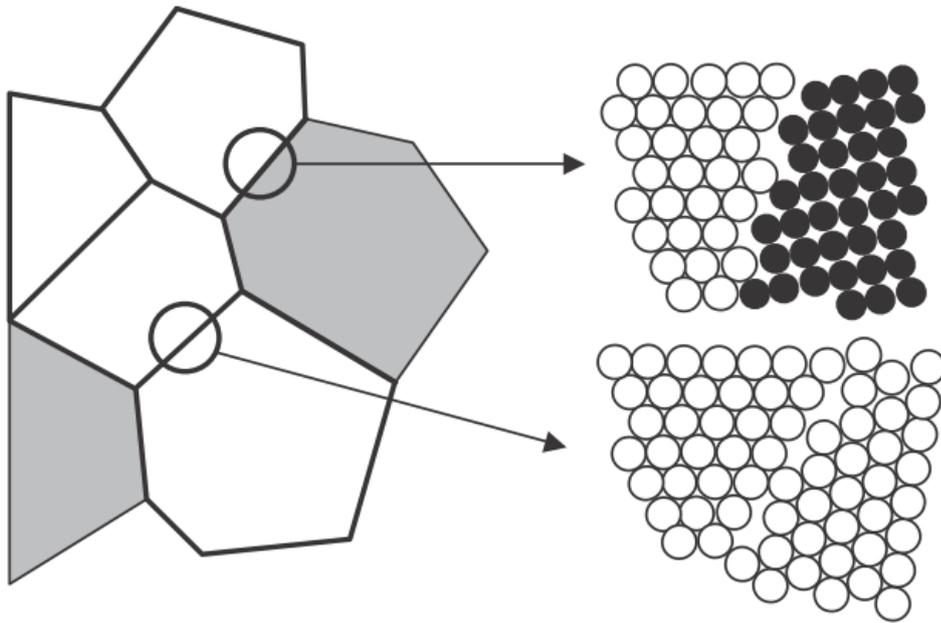


Figure I.18 : Poly cristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de phases [5].

➤ Joint de macle

Il peut exister des plans cristallographiques particuliers autorisant le cristal à se disposer indifféremment dans le prolongement de son orientation initiale (cristal-mère) ou en position symétrique par rapport à ce plan particulier (cristal maclé) ceci suppose que les niveaux d'énergie des atomes en position initiale et en position symétrique soient identiques. Les joints de macle sont aisément reconnaissables à leur tracé rectiligne (Fig. I.19) [5].

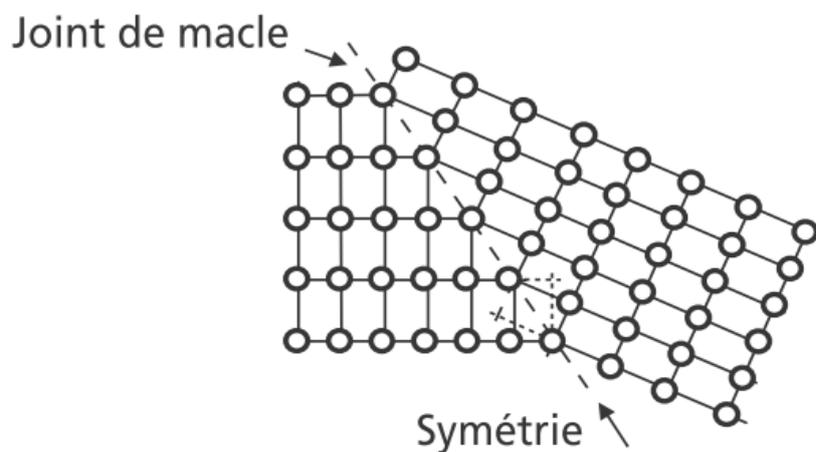


Figure I.19 : Schématisation à deux dimensions d'un joint de macle.

Le cristal maclé et le cristal mère sont identiques à une symétrie près [5].

➤ Les glissements

Les métaux sont caractérisés par leur ductilité, on dit aussi plasticité. Cela signifie qu'ils se déforment sous l'action d'une contrainte sans changer de structure, c'est à dire en conservant la même structure atomique. Cela est possible parce que les rangées atomiques peuvent glisser les unes par rapport aux autres, le glissement ne nécessitant pas une énergie considérable, mais à condition qu'il soit facilité par la présence d'une dislocation. En effet, sans dislocation l'énergie de glissement serait environ 100 fois plus grande. Le glissement est équivalent au déplacement de la dislocation le long du plan de glissement [5].

➤ Les fautes d'empilement

Prenons l'exemple de l'empilement cubique à faces centrées sur un plan de base (111) noté A; le plan suivant noté B est identique et vient se placer de telle sorte que les atomes occupent les interstices du plan A; le troisième plan, noté C, se place sur le plan B de façon à ce que les atomes occupent les interstices du plan B, à la verticale des interstices de A laissés vacants. En réalité il y a très peu de différence du point de vue énergétique avec l'empilement hexagonal compact et cela explique qu'il puisse y avoir, de temps en temps, des fautes d'empilement conduisant à des séquences :

A B C A **B A B** C A B C ...

ou A B C A B **C B C** A B C A...

au lieu de A B C A B C A B C A B C...

La figure I.20 obtenue au microscope électronique à très haute résolution, donne un exemple de faute d'empilement dans un cristal de germanium.

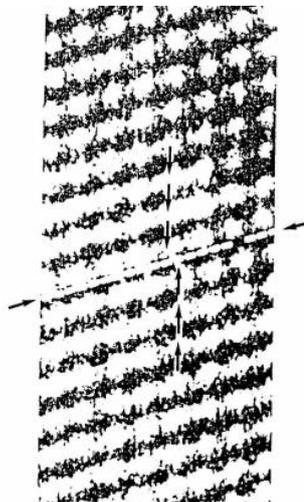


Figure I.20 : défaut d'empilement [5].

➤ Les rassemblements

Les rassemblements sont des défauts tridimensionnels intéressant de quelques centaines ou quelques milliers d'atomes, autrement dit quelques dizaines ou centaines de mailles. C'est un défaut volumineux par rapport au défaut ponctuel, mais c'est un petit défaut par rapport à la taille du cristal. Dans une solution solide désordonnée, les atomes de soluté sont distribués au hasard. Il faut rappeler que la solubilité d'un élément dans un autre dépend de différents facteurs, dont la température; d'une manière générale la solubilité diminue lorsque la température diminue. Ainsi, dans un duralumin (alliage d'aluminium et de cuivre dans les proportions 96%-4%) trempé, c'est à dire refroidi brutalement de la température du liquide à la température ambiante, les atomes de cuivre sont bloqués au hasard dans la structure de l'aluminium. Mais à la température ambiante, la solubilité du cuivre dans l'aluminium est inférieure à 4% : elle ne vaut que 0,5%. Les atomes de cuivre en excès devraient donc "sortir" de la solution solide, mais ils ne le peuvent pas car l'agitation thermique est insuffisante pour leur communiquer l'énergie nécessaire. Seuls quelques mouvements permettent à un petit nombre d'atomes de cuivre de se rassembler : le résultat est que l'alliage comporte un très grand nombre de très petits rassemblements d'atomes de cuivre, ce qui se traduit par une modification de certaines propriétés, mécaniques en particulier. Les rassemblements sont importants en métallurgie car leur principal effet est de s'opposer à la migration des dislocations, ils les bloquent. Ils ont donc un effet sur la plasticité des matériaux [5].

On note que la couleur, la diffusion, la conduction ionique sont autant de propriétés issues des défauts ponctuels : et donc augmenter la température d'un cristal revient à les créer et à les accroître.

Grâce à une grande densité de dislocations et à leur facilité de déplacement, une déformation macroscopique importante peut être obtenue en peu de temps dans les matériaux métalliques par des procédés de formage à basse température.

Les joints de grains : leurs effets varient en fonction de leur concentration, de la nature des cristaux et des interactions avec d'autres défauts. Mais de façon générale, les joints de grains trouvent leur utilité dans la résistance mécanique ; en association avec les dislocations, ils participent au durcissement des métaux par écrouissage.

On trouve aussi d'autres défauts comme par exemple les défauts tridimensionnels volumiques qui correspondent à des imperfections beaucoup plus importantes par rapports aux défauts ci-dessus.

➤ Paroi d'antiphase

Dans un cristal ordonné, c'est une surface (en général parallèle à un plan atomique) le long de laquelle existe un décalage qui détruit l'ordre à courte distance dans le cristal (Fig. I.21) [5].

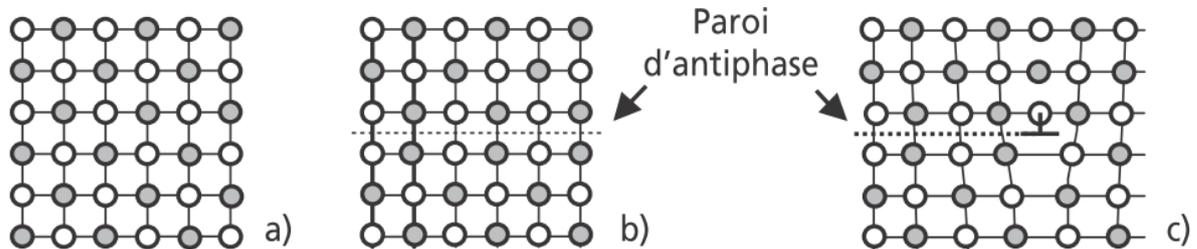


Figure I.21 : Schématisation à deux dimensions d'une paroi d'antiphase dans un alliage ordonné. a) Cristal parfaitement ordonné. b) Cristal traversé par une paroi d'antiphase. c) Paroi d'antiphase bordée par une dislocation partielle [5].

I.3.1.2.3 Défauts volumiques

- Pore : Cavité fermée à l'intérieur d'un cristal ou d'un poly cristal.
- Inclusion : Particule d'un solide de nature différente enrobée dans le solide principal ou matrice.
- Précipité : Particule solide de petite taille entièrement enrobée à l'intérieur d'un grain qui constitue sa matrice (Fig. I.22). En général les précipités apparaissent dans un cristal à l'issue de réactions à l'état solide. Selon les caractéristiques des deux réseaux cristallins, les joints de phases entre précipité et matrice peuvent avoir différentes structures : interface cohérente, semi-cohérente, incohérente [5].

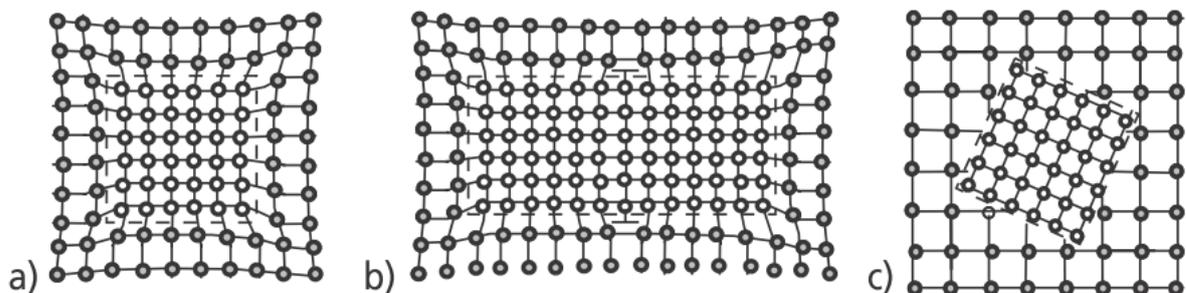


Figure I.22 : a) Précipité cohérent : continuité de certains plans cristallins entre le précipité et la matrice. b) Précipité semi-cohérent : les déformations sont relaxées par la présence de dislocations aux interfaces. c) Précipité incohérent [5].

I.4 Déformation

On donne le nom déformation à la modification des dimensions et de la forme d'une substance sous l'action des forces appliquées. La déformation est provoquée par l'application des forces extérieures ou par des processus physiques et mécaniques variés, dont le corps est le siège (par exemple, modification du volume des cristaux isolés sous l'effet de transformation de phase ou du gradient thermique).

I.4.1 Déformation élastique

Est une déformation dont l'action sur la forme, la structure et les propriétés d'un corps cesse complètement lorsque la charge appliquée est supprimé, cette déformation ne provoque pas de modifications permanentes perceptibles de structures et de propriétés du métal ; la charge appliquée ne produit qu'un déplacement relatif et parfaitement réversibles des atomes ou le pivotement des blocs de cristal [2].

I.4.1.1 Origine physique

Dans un solide, la distance moyenne d entre deux atomes s'établit à une valeur d_0 fonction de la nature des liaisons (Fig. I.23). Si on impose aux atomes un déplacement au voisinage de leur position d'équilibre, la force d'interaction les rappelle à la distance d_0 (sauf dans le cas d'un écartement au-delà de d_d , distance de dissociation des atomes). De telles déformations élastiques nécessitent donc l'application d'une force extérieure pour vaincre la force de rappel et sont réversibles lorsque cette force extérieure est supprimée.

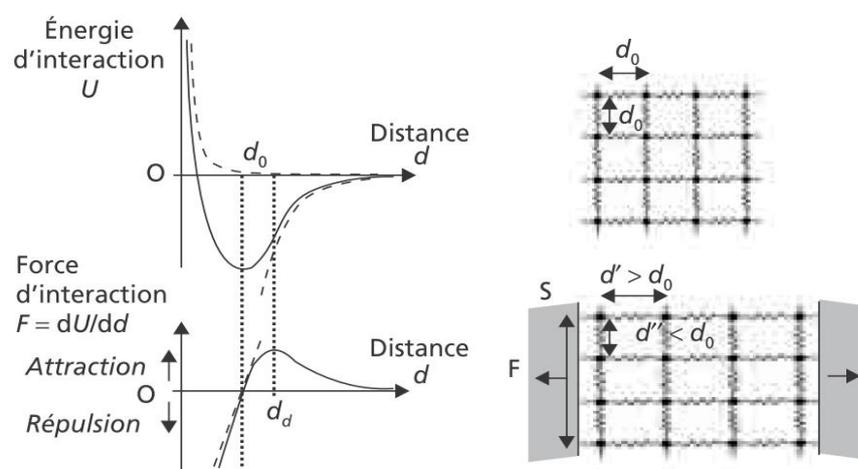


Figure I.23 : Variations de l'énergie d'interaction et de la force d'interaction entre deux atomes en fonction de leur distance d . De part et d'autre de la distance d'équilibre d_0 , la force de rappel est approximativement proportionnelle à l'écart $d - d_0$ [5].

I.4.2 La déformation plastique

L'étude des propriétés mécaniques des métaux et en particulier leurs propriétés plastiques a un intérêt pratique considérable. Une grande partie de la recherche en métallurgie a pour but la mise au point d'alliages à résistance mécanique et à tonalité de plus en plus élevée. L'effort de traction à vitesse constante d'allongement permet l'étude détaillée des propriétés mécaniques de base, mais cette étude peut être complétée par des observations micrographiques, qui peuvent mettre en évidence les modes de déformation plastique, l'étape de perfection de la structure cristalline (présence de défauts cristallins) [2].

Dans ce contexte, la théorie des dislocations joue un rôle important, car elle nous permet de prévoir quelques données essentielles de la déformation plastique. Considérons un monocristal soumis à un effort de traction. Diverses familles de plans de glissements sont possibles pour les dislocations, les plans (111) par exemple dans la structure CFC (Fig. I.24) [2].

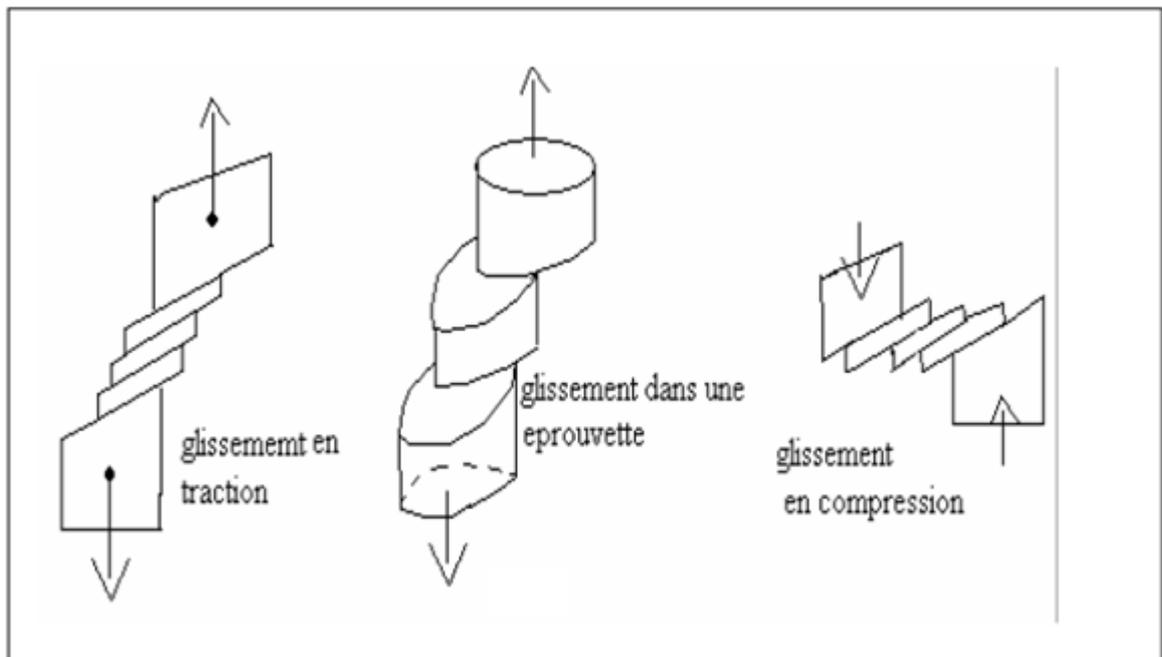


Figure I.24 : Glissement dans les éprouvettes [2].

I.4.3 Aspects micrographiques de la déformation plastique

I.4.3.1 Glissement

La déformation plastique s'effectue essentiellement par glissement suivant le schéma de Figure I.24 et plus rarement (basse température, forte vitesse) par maillage.

I.4.3.1.1 Lignes de glissement

L'observation au microscope optique montre d'une manière générale des faisceaux de lignes parallèles sur la surface, dont le nombre croît avec la déformation plastique. Ces lignes sont en fait des marches dues au processus de glissement des dislocations.

(Fig. I.25) montre l'aspect de ces lignes sur un monocristal d'aluminium initialement poli électrolytiquement, puis déformé de 5%. Connaissant l'orientation du cristal, le système de glissement peut être déterminé.

Cependant, l'observation micrographique normale est parfois trompeuse, et des "bandes" de glissement assez larges, étudiées au microscope électronique grâce à la technique des répliques, apparaissent formées de petits segments de lignes de glissement fines et droites. La distance entre lignes de glissement est de l'ordre de 0.01 à 1 μm et la valeur du glissement (hauteur de la marche): 10 à 1000 \AA . Dans les métaux CC, (le fer α en particulier), les lignes de glissement ne sont généralement pas rectilignes, elles sont sinueuses (sauf à basse température). En effet, le fer n'a pas un système de glissement simple, et, pour une direction de glissement, plusieurs plans de glissement sont actifs qui appartiennent tous à une même zone $\langle 111 \rangle$. Ce phénomène peut s'interpréter en termes de glissement dévié [2].

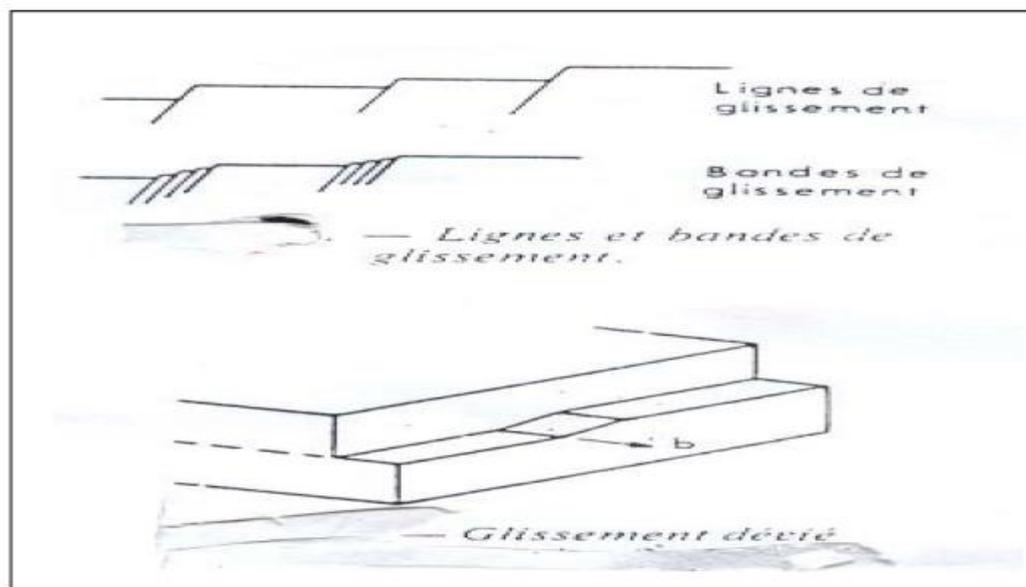


Figure I.25 : lignes de glissement sur un monocristal d'aluminium [2].

La composante vis de la dislocation pouvant changer de plan de glissement, quand il en existe plusieurs pour une même direction de glissement b . Le glissement peut être observé également dans la masse du métal, en attaquant une section polie par un réactif mettant en évidence les points d'émergences des dislocations, les figures d'attaque sont alignés suivant l'intersection du plan de glissement avec la surface observée. La topographie des rayons X se prête bien à l'observation des débuts du glissement dans un cristal de haute perfection.

I.4.3.1.2 Systèmes de glissement

L'observation micrographique de monocristaux d'orientation connue permet de déterminer les systèmes de glissement.

I.4.3.1.3 Courbes effort-déformation

L'interprétation de l'effort de traction est donnée par une courbe charge appliquée F en fonction de l'allongement Δl .

I.4.4 Types de déformations

I.4.4.1 Déformation à froid

On appelle déformation à froid celle qui s'effectue aux températures inférieures à la température de recristallisation [2].

La déformation plastique à froid conduit à l'écrouissage du matériau, donc à son durcissement. Cet écrouissage dépend de la composition chimique du matériau, du taux de déformation appliqué et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation). En effet, la déformation à froid entraîne une importante augmentation de la densité de dislocations (i.e. énergie élastique stockée) dans le matériau. Il s'ensuit une hétérogénéité de la microstructure et de la texture cristallographique à l'intérieur des grains. Pour conférer au matériau les propriétés mécaniques souhaitées, celui-ci est recuit après déformation. Ce recuit conduit à une réorganisation de la microstructure par diminution ou suppression des obstacles les plus importants aux mouvements des dislocations. Lors du traitement thermique après déformation, deux phénomènes plus ou moins concurrents ont lieu : la restauration et la recristallisation. Ces deux types d'évolution structurale ont la même force motrice c'est-à-dire l'énergie élastique emmagasinée au cours de la déformation à froid [6].

Lors d'une déformation à froid, la microstructure évolue en fonction du taux de déformation. Au cours du premier stade de déformation, les grains se subdivisent, changent de forme et s'allongent selon la direction de sollicitation. Une sous-structure de dislocations apparaît à l'intérieur des grains, dépendant de leur orientation cristallographique [7, 8].

La subdivision des grains donne lieu à une configuration cellulaire (blocs de cellules) constituée de "parois" à forte densité de dislocations entourant des volumes à faible densité de dislocations.

Quand le taux de déformation augmente, les parois des cellules s'affinent pour former des sous-joints (Fig. I.26). Cette transformation est accompagnée par une diminution de la taille des cellules [8, 9].

Ainsi que par une augmentation progressive de leur désorientation (1° à environ 5°). Les joints de blocs des cellules sont identifiés comme étant des murs denses de dislocations (Dense Dislocations Walls DDW) [7, 10].

Pour les fortes déformations, d'autres formes d'hétérogénéités apparaissent :

- Des microbandes constituées par des cellules de dislocations de taille plus faible que la valeur moyenne des cellules de dislocations au sein du même matériau.
- Des bandes de cisaillement, typiquement à 30 ou 40° de la direction de sollicitation, sous forme de longues bandes d'épaisseur $0,1$ à $2 \mu\text{m}$ et de longueur 10 à $100 \mu\text{m}$ [10, 11].
- La localisation de la déformation dans ces bandes est d'autant plus importante que la température et l'énergie de défauts d'empilement sont faibles.
- Des bandes de transition séparent des zones adjacentes fortement désorientées d'un même grain. Elles sont souvent parallèles à la direction de déformation principale et accommodent des désorientations supérieures à 20° sur des épaisseurs de 1 à $2 \mu\text{m}$. La déformation plastique crée également une quantité importante de défauts ponctuels (lacunes et interstitiels), mais qui s'éliminent en grande partie soit pendant la déformation (restauration dynamique si $T \geq 0,2 T_f$), soit lors d'un recuit ultérieur même à basse température [4].

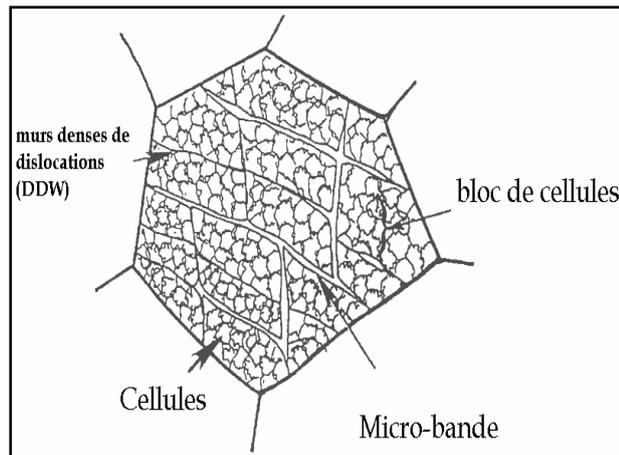


Figure I.26 : Blocs de cellules et murs denses de dislocations [10].

I.4.4.2 Déformation à chaud

La déformation est dite à chaud si elle se fait à une température supérieure à celle de recristallisation, pour obtenir une structure complètement recristallisée. A ces températures, la déformation produit également un effet durcissant (écrouissage à chaud), éliminée partiellement ou complètement par polygonisation et recristallisation réalisées aux températures de traitement et suivis de refroidissement. A la différence d'une polygonisation et d'une recristallisation statique examinées dans ce qui précède, les processus de polygonisation et recristallisation associées à la déformation sont dits dynamiques. Dans le traitement à chaud (laminage, formage, forgeage, estampage, etc.), le durcissement par écrouissage (augmentation de la densité de dislocation) directement au cours de la déformation alterne avec le processus d'adoucissement (diminution de la densité de dislocation) par polygonisation et recristallisation dynamiques pendant la déformation et le refroidissement. Lorsque les degrés de déformation sont très faibles, le chauffage ne provoque pas de recristallisation. A la déformation de 3% à 15%, la grosseur de grain après recuit augmente brusquement et peut dépasser de nombreuses fois la dimension du grain initial. Ce niveau de déformation est dit critique ; il ne déclenche pas non plus le processus de recristallisation suivant le mécanisme de formation de nouveaux grains et de leur croissance. Lorsque le degré de déformation est élevée, la vitesse de germination produite par la recristallisation croît plus vite que la vitesse de croissance des grains ; il en résulte la formation des grains fins. Il convient de souligner que les limites entre la déformation à chaud et à froid sont conventionnelles et dépendent de la vitesse, du mode et de la température de traitement, des conditions de refroidissement, ainsi que de la vitesse de recristallisation du métal (alliage) [2].

I.4.3.2.1 Evolution microstructurale lors de la déformation à chaud

On distingue deux classes de sollicitations des solides en fonction de la température, celles à basses températures et celles à hautes températures. En effet, au-delà d'environ $0,5 T_f$ (T_f désignant la température de fusion en Kelvin), l'agitation thermique est telle que des mécanismes de réorganisations atomiques spécifiques apparaissent. La diffusion peut en effet changer les conditions de mobilité des atomes, ou des dislocations et donc les modes de déformation. Le taux de déformation imposé et la vitesse à laquelle on sollicite le matériau jouent également un rôle notable dans l'activation de ces mécanismes.

Si l'on s'intéresse à la mise en forme à chaud (opérations industrielles telles que le forgeage, le matriçage, l'estampage ou le laminage à chaud), on est amené à considérer des quantités de déformation souvent très importantes réalisées sur des périodes de temps relativement courtes, c'est à dire à des vitesses de déformation typiquement comprises entre 0.1 et 100 s⁻¹. Au cours de ces opérations, les matériaux vont être le siège d'évolutions microstructurales importantes qui vont permettre d'agir sur l'organisation atomique et l'architecture, et donc conditionner leurs caractéristiques mécaniques finales. Ces évolutions microstructurales pendant la déformation à chaud sont essentiellement des combinaisons de l'écroûissage avec la restauration dynamique et avec la recristallisation dynamique.

I.4.4.2.2 Restauration dynamique

La déformation induit une création de dislocations, qui, comme nous l'avons vu précédemment peuvent se déplacer et amener le développement de sous-structures. Lorsque les dislocations sont effectivement très mobiles, on voit se former, à l'intérieur des grains initiaux, des sous-grains, c'est à dire des cellules contenant peu de dislocations et désorientées les unes par rapport aux autres de quelques degrés (Fig. I.27). Pendant la suite de la déformation, les sous-grains se détruisent et se reforment continuellement lors d'une étape appelée repolygonisation, avant d'atteindre un état quasi stationnaire qui repose sur un équilibre entre la création de dislocations, et l'arrangement et l'annihilation de dislocations. L'ensemble de ces phénomènes constitue les caractéristiques de la restauration dynamique.

Quand les sous-grains adjacents présentent des désorientations importantes (supérieures à 15°), on peut alors parler de développement de grains nouveaux et de processus de recristallisation dynamique continue.

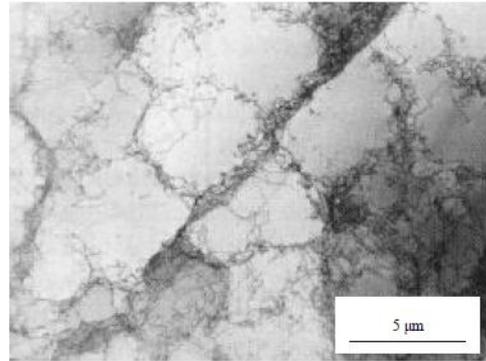


Figure I.27 : Structure de cellules de dislocations dans un alliage d'aluminium [12].

I.4.4.2.3 Recristallisation dynamique discontinue

Dans d'autres matériaux, les dislocations sont au contraire peu mobiles et restent très dispersées, si bien que le phénomène de restauration dynamique est peu efficace. A partir d'un certain taux de déformation, on voit alors apparaître des germes de nouveaux grains, avec leur propre orientation cristallographique, qui se développent dans la matrice écrouie en annihilant les dislocations. C'est donc un phénomène typique de germination croissance schématisé à la figure I.28 Mais, comme la déformation se poursuit, les grains recristallisés s'écrouissent à leur tour ; dans différentes zones du matériau, se mettent alors en place des cycles d'écrouissage et de recristallisation successifs qui ne sont pas a priori synchronisés. A partir de ce stade, le matériau est donc constitué de volumes de matière présentant différents taux d'écrouissage.

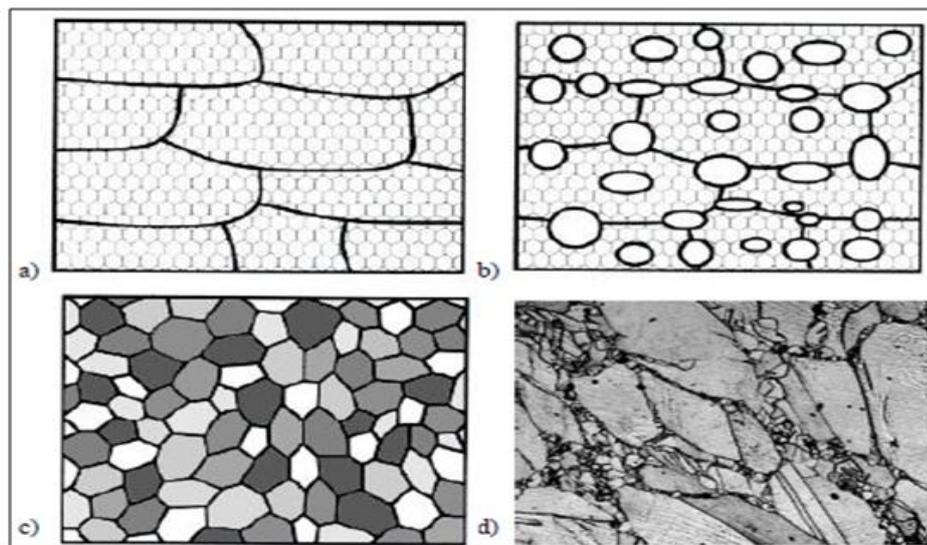


Figure I.28 : Recristallisation dynamique : a) structure déformée restaurée et non recristallisée; b) germination de nouveaux grains; c) grains à des niveaux différents d'écrouissage; d) exemple d'une microstructure d'un acier austénitique présentant des grains écrouis et recristallisés [13].

I.5 Procédés de mise en forme de cuivre

Les métaux et les alliages sont commercialisés sous différentes formes, en fonction de leur utilisation ultérieure, dans l'industrie actuellement les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement donnant naissance par la suite à divers variantes, grâce à la déformation plastique qui est une propriété spéciale aux métaux qui leur donne la possibilité de se déformer sans rupture, produire des pièces de forme très complexes et facilite la mise en forme.

Il existe deux types de transformation et plusieurs procédés de mise en forme :

➤ **Première transformation et fonderie**

Première transformation :

- fabrication des fils : tréfilage
- fabrication des barres, profilés et barres creuses : filage et étirage,
- Fabrication des méplats, planches et bandes : laminage.
- Fabrication des tubes : filage et laminage, étirage [14].

Fonderie :

- Fusion
- Coulée semi-continue
- Coulée continue

➤ **Deuxième transformation**

- Transformation à chaud : Forage, matriçage
- Transformation à froid : Découpage, Pliage et cintrage, Emboutissage frappe à froid, Usinage [14].

I.5 .1 Laminage

I.5 .1.1 Définition

Le laminage consiste à mettre en forme des alliages par étirage longitudinal et diminution d'épaisseur lors du passage de la matière entre deux cylindres parallèles et tournant en sens inverse. Lorsque le laminoir ne comporte que deux cylindres, il forme un duo (Fig. I.29. a), mais dans ce cas après une passe, il faut ramener la pièce au point de départ, pour procéder à une nouvelle passe, d'où perte de temps et de chaleur. C'est pourquoi on utilise de préférence un trio (3 cylindres en parallèles), (Fig. I.29 b) dans ce laminoir, le retour de pièces permet une opération de laminage. On peut également éviter le passage à vide en inversant le sens de rotation après chaque passe (laminoir réversible) [15].

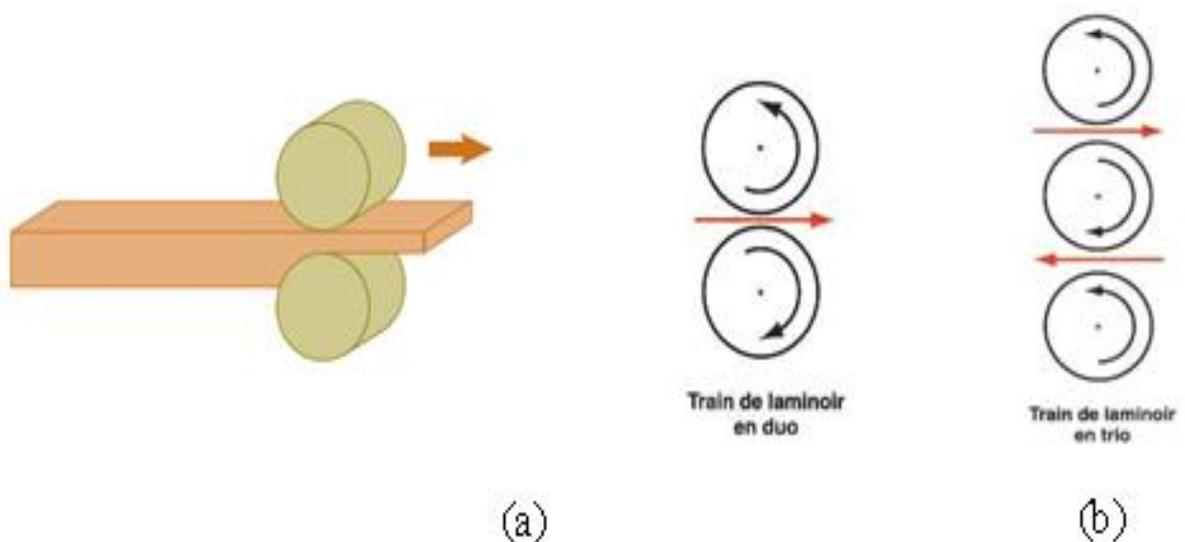


Figure I.29 : Schéma des trains de laminoirs [8].

I.5 .1.2 Principe

Le laminage consiste à réduire l'épaisseur e_1 d'une tôle à une valeur e_2 sous l'action d'un effort d'écrasement w et d'un couple d'entraînement C (Fig. 1.30). Le taux de réduction $(1 - e_2/e_1)$ est une donnée essentiel du procédé, puisque un taux important signifie une gamme de mise en forme plus courte et moins coûteuse.

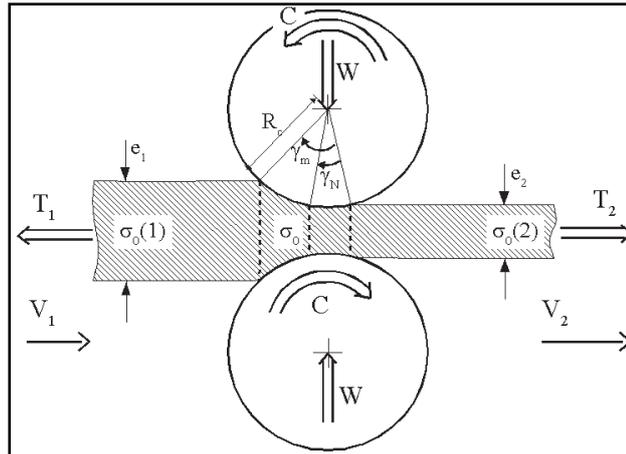


Figure I.30 : Schéma de principe de laminage [16].

I.5 .2 Tréfilage

I.5 .2 .1 Définition

Le tréfilage est un procédé de mise en forme largement utilisé pour la fabrication de fils métalliques. Cette partie a pour but de présenter les techniques propres au tréfilage des fils ultrafins en cuivre et en alliages cuivreux recouverts d'un revêtement métallique ou non, dont le diamètre est de l'ordre du centième de millimètre [17].

I.5 .2 .2 Tréfileuses

La figure I.30 représente un modèle type d'une tréfileuse qui se compose de :

- Le dévidoir : qui permet le déroulement continu de couronne de fil.
- La boîte à savon : qui permet de logement du porte filière et le logement du lubrifiant.
- porte de filière : qui permet le positionnement de la filière et le refroidissement de celles-ci.
- La bobine : qui permet de tirer le fil à travers la filière et l'enrouler en spire.
- L'extracteur : permettant d'enlever la couronne de fil de la bobine.
- La boîte de vitesse : qui permet de varier la vitesse de rotation de la bobine.
- La filière (passe) : est un bloc en générale cylindrique percé en orifice calibré ayant les dimensions et la forme du produit que l'on désire à tréfilé.

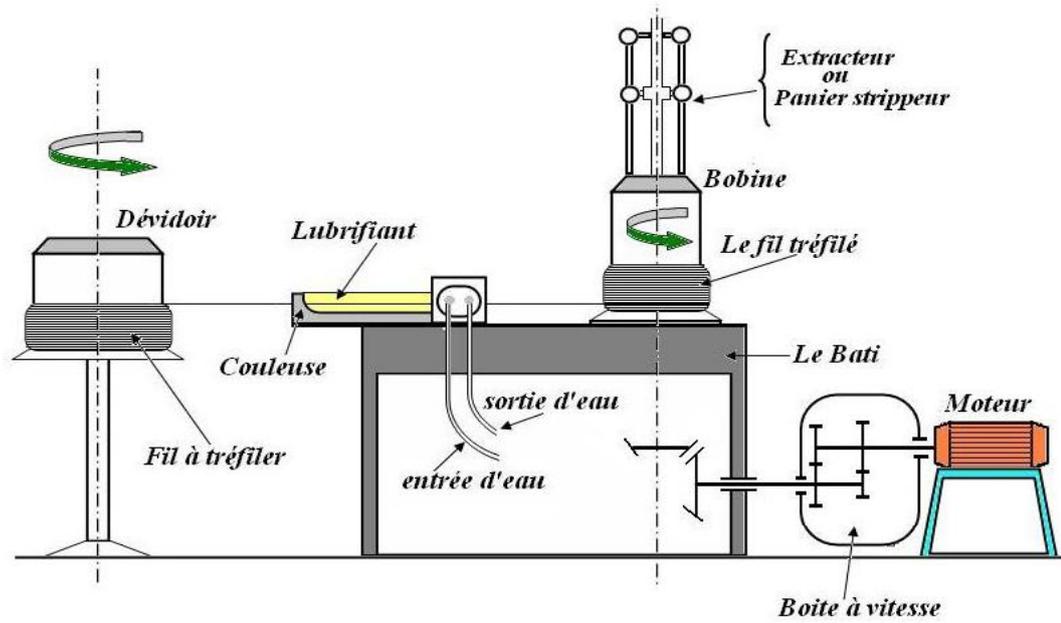


Figure I.31 : Schéma d'un banc à tréfiler

L'allongement du fil λ

La conservation du volume (Fig. I.32), entre l'entrée et la sortie de filière, au cours de la déformation plastique permet d'écrire que $S_e \cdot L_e = S_s \cdot L_s$. Nous avons alors

$$\lambda = \frac{L_s}{L_e} = \left(\frac{R_e}{R_s}\right)^2 \quad (I.1)$$

Avec L_e , L_s : les longueurs initiales et finales de fil.

Avec R_e , R_s : les rayons initiaux et finaux de fil [18].

La réduction du fil

$$r = 1 - \left(\frac{R_s}{R_e}\right)^2 \quad (I.2)$$

la déformation

$$\varepsilon = \ln \lambda = 2 \ln \left(\frac{R_e}{R_s}\right) \quad (I.3)$$

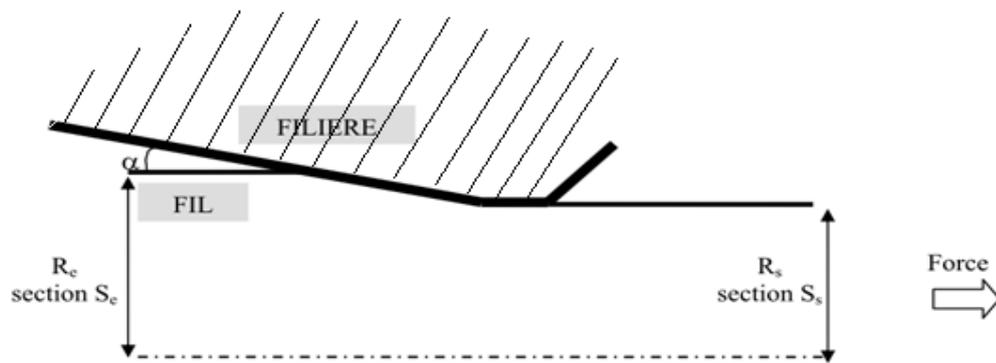
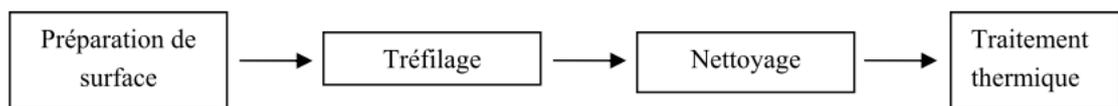


Figure I.32 : Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées [18].

I.5.2.3 Principe

Le principe du tréfilage est de faire passer le fil machine préalablement décapé, traité et lubrifié à travers une série d'orifices calibrés appelés filières (Fig. I.33). La filière est l'élément essentiel du tréfilage. Elle est constituée d'un élément dur en carbure de tungstène contenu dans un support d'acier. La partie active de la filière est constituée du cône de travail ou cône de tréfilage.

Une opération industrielle de tréfilage se compose de quatre étapes élémentaires :



**Diminuer la
taille des caractères**

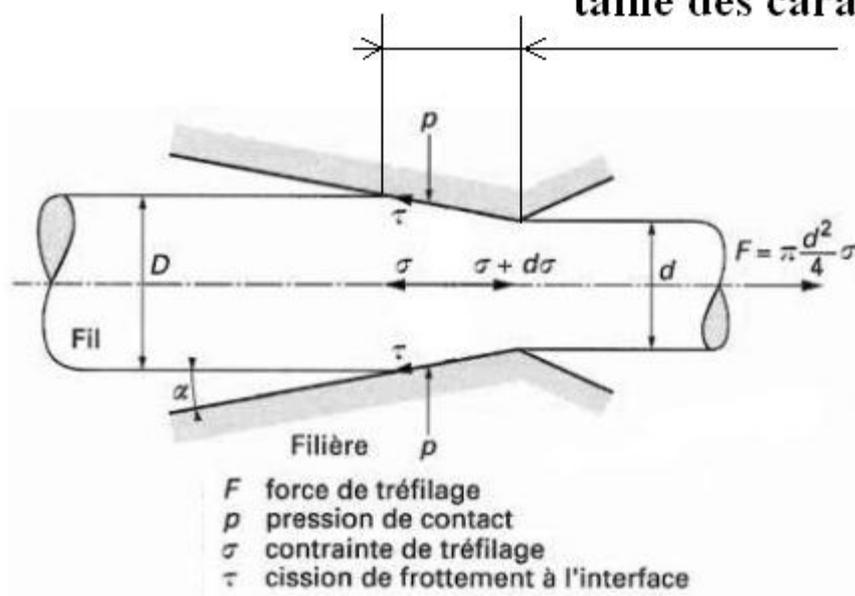


Figure I.33 : Schéma de principe de tréfilage [18].

I.5 .2 .4 Utilisation des savons

La pratique la plus répandue et la plus simple est d'utiliser les savons sous forme pulvérulente en remplissant les savonniers placés en amont de la filière (Fig. I.34)



Figure I.34 : savonnier [18].

Toutefois, l'entraînement du savon par le fil n'est jamais garanti : il dépend de facteurs tels que l'état de surface du fil et son diamètre, la coupe granulométrique de la poudre de savon, de la vitesse, etc. Des solutions ont donc été proposées pour augmenter la prise de savon et améliorer ainsi la lubrification :

Application sur le fil de savon sous forme de film solide avant tréfilage (Fig. II.35). Le principe de ce procédé est de convertir le lubrifiant pulvérulent en une dispersion aqueuse dans laquelle le fil va être immergé. Il est cependant nécessaire que le savon présente une stabilité physique et chimique et qu'il se dissolve partiellement. Après séchage, le fil est recouvert uniformément d'une couche de lubrifiant dense, très adhérente et de forte viscosité dont la qualité et l'épaisseur dépendent de paramètres tels que la composition et la température du bain de revêtement, et des paramètres de séchage [18].

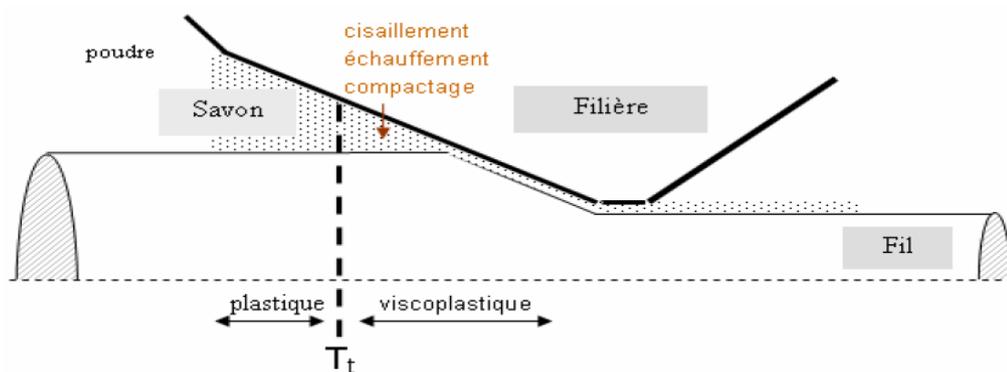


Figure I.35 : Evolution de la rhéologie du savon lors d'une opération de tréfilage élémentaire [18].

I.5.2.5 Machine de tréfilage

Pour amener le fil au calibre souhaité, il est nécessaire de faire plusieurs passes (de l'ordre de 5 à 7), à l'aide de bancs de tréfilage multipasse (Fig. I.36) qui sont essentiellement de trois types :

Banc multiple continu : dans ce type de banc, la vitesse des tambours est réglée afin que chaque tambour débite exactement la quantité de fil nécessaire.

Banc multiple à accumulation : dans ce type de banc, la vitesse des tambours n'est pas équilibrée, ce qui entraîne une accumulation du fil sans glissement d'un tambour par rapport à l'autre.

Banc multiple à glissement : dans ce cas, la vitesse des tambours n'est pas équilibrée et il n'y a pas accumulation. Pour que ces bancs puissent fonctionner, il y a un glissement du fil sur le tambour.

Pour ce faire, les tambours, le fil et les filières sont immergés dans un lubrifiant liquide. En général, ce type de banc est alimenté par du fil fin ébauché.

Le tréfilage proprement dit a pour but de réduire la section du fil, d'obtenir de bonnes tolérances dimensionnelles et d'augmenter les caractéristiques mécaniques par écrouissage [19].



Figure I.36 : Bancs de tréfilage multi passe de l'EN.I.CA.B

Chapitre II

Les essais mécaniques

II.1 Généralités

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportements des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire sans dimensions). Il est à noter qu'il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la forme de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc : la forme de la pièce dont est fait le matériau on parle d'éprouvette, Comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette on parle d'essai normalisé.

II.2 Essai de dureté

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. Les essais de la dureté permettent de définir quelques caractéristiques des matériaux tels que ; (les modules d'Young et de Coulomb, coefficient de poisson, dureté, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.), mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration [20, 21].

II.2.1 Définition de dureté

La définition valable pour la dureté est la résistance qu'oppose un corps à la pénétration d'un corps plus dur. La dureté est un complément indispensable de l'examen métallographique, qui donne une première impression sur les caractéristiques mécaniques et corrobore souvent l'interprétation des textures. Selon le type de charge du corps d'essai lors de la pénétration dans le matériau, on distingue deux procédés: [22].

- procédé avec action statique (par pénétration).
- procédé par action dynamique (par rebondissement) [22].

II.2.2 Principe de l'essai de pénétration

Il consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est moins dur. La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte :

$$H = \frac{F}{S} \quad (\text{II.1})$$

Les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell (Tableau. II.1) [23].

| Pénétrateur | Brinell | Rockwell | | Vickers | Knoop |
|-------------|---|---|--|---|---|
| Nature | Acier trempé ou carbure de tungstène | Diamant | Acier trempé | Diamant | Diamant |
| Forme | Sphère | Cône | Sphère | Pyramide à base carrée | Pyramide à base losange |
| Dimensions |  $D = 10 \text{ mm} ; 5 \text{ mm} ; 2,5 \text{ mm} ; 1 \text{ mm}$ |  $\theta = 120^\circ$ |  $D = 1/16'' (1,587 \text{ mm})$ $D = 1/8'' (3,175 \text{ mm})$ |  $\theta = 136^\circ$ |  $\alpha = 130^\circ$ $\theta = 172^\circ 30'$ |

Tableau II.1 : Tableau pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop [20].

II.2.3 Procédé avec action statique

Les différentes méthodes d'essai faisant partie de ce procédé sont les essais du domaine macro avec force d'essai $F > 30 \text{ N}$ tels que:

- essai Brinell
- essai Rockwell
- et l'essai Vickers [22].

II.2.3.1 L'essai de dureté Brinell

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F , et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge (Fig. II.2). La dureté Brinell HB est un nombre proportionnel au rapport F/S , où S est la surface en millimètre carrés de l'empreinte [23].

II.2.3.2 Principe

On interpose entre la bille et la charge un bloc de dureté connue (le bloc étalon). La comparaison entre l'empreinte relevée sur le bloc étalon S et l'empreinte relevée sur la pièce S' permet de déterminer la dureté de cette dernière (Fig. II.1.a).

$$H' = H \cdot \frac{S}{S'} \quad (\text{II.2})$$

L'appareil portatif (Fig. II.1.b) permet des essais de dureté directement sur les pièces quelles que soient leurs dimensions [24].

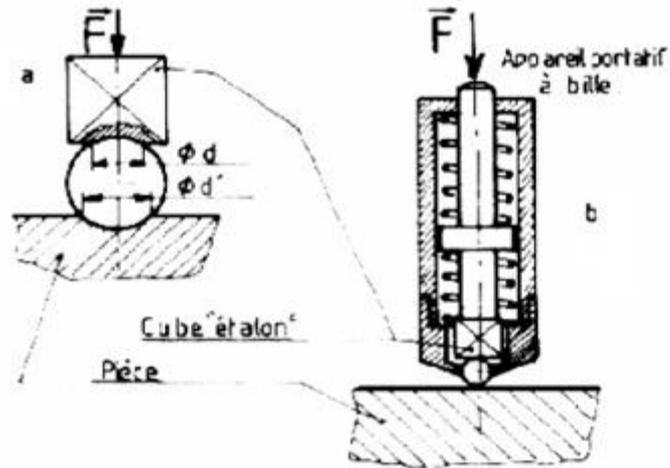


Figure II.1 : Appareil portatif à bille [24].

II.2.3.3 Pénétrateur d'essai

Le diamètre de la bille ne peut être inférieur à 1 mm. Diamètres et tolérances sont fixés par la norme : $\emptyset 10 - 5 - 2,5 - 2 - 1$.

Les billes sont en acier trempé ou en carbure de tungstène [24].

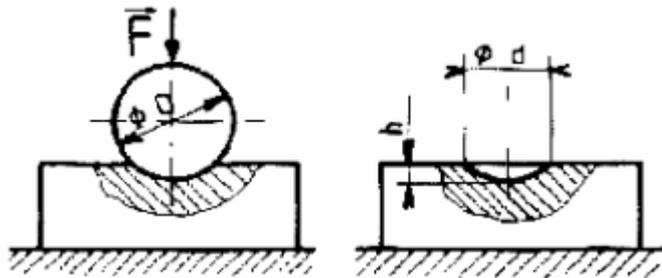


Figure II.2: Essai Brinell [24].

II.2.3.4 Machine d'essai

La plus courante est schématisée (Fig. II.3). L'éprouvette à tester est placée sur le plateau P. L'opérateur amène la bille au contact grâce au volant V agissant sur la vis. Une friction entre la vis et le volant limite l'effort de façon à éviter toute pénétration de la bille due à cette manœuvre.

L'action sur le bras B, détermine la rotation de la came qui agit sur le levier L.

L'articulé sur les couteaux C, comprime les rondelles «Belleville» qui forment ressort de compression, assurant ainsi la force de pénétration [24].

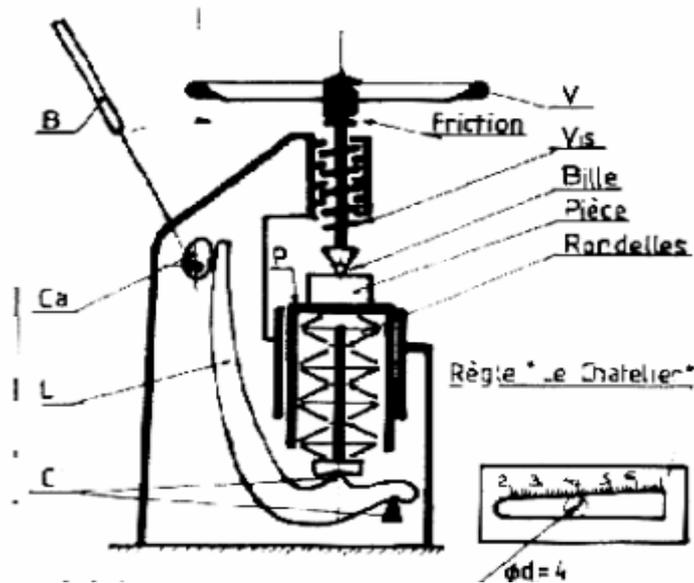


Figure II.3: Machine d'essai de dureté [24].

II.2.3.5 Conduite de l'Essai

On applique la charge normalement à la surface et sans choc, en la faisant croître progressivement de manière à atteindre en 15 s la charge fixée. On la maintient pendant 10 à 30 s, on décharge et on mesure le diamètre de l'empreinte [24].

L'essai s'effectue à la température ambiante. La surface de la pièce à étudier doit être lisse et propre : éventuellement pratiquer un meulage sur une surface brute.

- La pièce est mise en place et la bille amenée au contact ; en principe, la distance au centre de l'empreinte au bord de la pièce doit être supérieure à 2,5 fois le diamètre de l'empreinte.

Le bras est amené en butée, sans choc, ni vibration, de manière à atteindre la charge d'essai [24].

II.2.3.6 Caractéristiques de l'essai

La dureté Brinell HB est déterminée par le rapport entre la force F et la surface de l'empreinte A et se calcule sans mesure.

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} \quad (II.3)$$

F= force d'essai en newton.

A= surface de l'empreinte en mm²

$$A = \pi \cdot D \cdot h \quad (II.4)$$

D= diamètre de la bille.

H= profondeur de pénétration.

Le facteur 0.102 pour donner la dureté en système SI.

La calculé Durant l'essai on ne mesure pas la hauteur de pénétration h, mais on selon:

$$h = \frac{D - (D^2 - D^2)^2}{2} \quad \text{D'où} \quad \text{HB} = \frac{2,102.F.2}{\pi.D[D - (D^2 - D^2)^{1/2}]} \quad (\text{II.5})$$

Le diamètre de l'empreinte d est mesuré à l'aide de la règle le Chatelier (Fig. II.4), qui est une plaque en verre sur laquelle sont gravées deux droites concourantes dont l'une est graduée et indique les millimètres. La règle est posée de façon que les deux droites soient tangentes à l'empreinte. Le diamètre est lu sur la division correspondante au point de tangence [22].

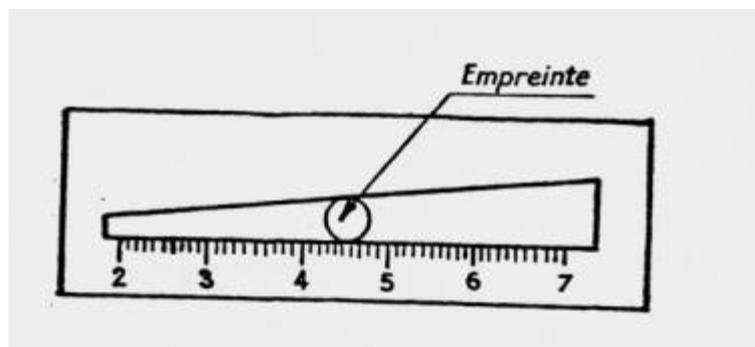


Figure II.4: Règle de mesure de l'empreinte [22].

II.2.4.1 Essai de dureté Rockwell

L'essai Rockwell consiste à imprimer dans la couche superficielle du métal une empreinte à l'aide d'une bille ou pointe de diamant sous l'action d'une charge connue.

La détermination de la dureté Rockwell se réduit par la mesure de la profondeur de pénétration. Plus le métal sera dur, moins il y aura de pénétration et plus grand sera le chiffre de Rockwell lu sur la comparateur de mesure.

II.2.4.2 Pénétrateur de L'essai

La figure II.5 présente les pénétrateurs.

- Cône de diamant : essai HRC
- Bille en acier trempé : $\varnothing 3,175$ essai HRE et $\varnothing 1,5875$ essai HRB et HRE

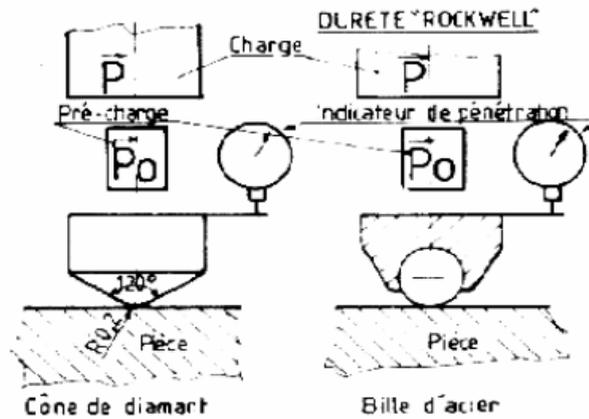


Figure II.5: Les pénétrateurs [24].

II.2.4.3 Machine d'essai

Elle comporte essentiellement :

- 2 mécanismes permettant d'assurer distinctement la pré-charge P_0 et la charge P (Fig. II.5).
- Un dispositif indicateur de pénétration constitué par un comparateur [24].

II.2.4.4 Conduite de l'essai

Essai avec le cône (Fig. II.6.a) essai avec la bille (Fig. II.6.b)

- Le pénétrateur est amené au contact.
- La pré-charge P_0 est appliquée (la couche superficielle est brisée). L'indicateur de pénétration est réglé sur 100 pour l'essai avec le cône ou 130 pour l'essai avec la bille.
- La charge P est appliquée 1 400 N (cône) ; HRC ; 1 000 N (bille) : MRB ; 900 N ; HRE ; 500 N ; HRF
- La charge P est supprimée. La suppression des déformations élastiques est constatée sur l'indicateur de pénétration. Le pénétrateur remonte un peu. On lit la valeur de HR sur le cadran du comparateur [24].

II.2.4.5 Caractéristiques de l'essai

L'indicateur d'enfoncement est un comparateur permettant les mesures, au micromètre près, de la profondeur de pénétration e après suppression de la charge F_1 . La dureté est exprimée par la différence à 100 ou 130, les formules utilisées étant :

$$\text{Echelle Rockwell avec Cône en diamant HRC} = 100 - e$$

$$\text{Ou Echelle Rockwell avec Bille en acier HRB} = \text{HRE} = \text{HRF} = 130 - e$$

Avec e exprimée en millimètres.

La dureté est naturellement d'autant plus grande que la pénétration e est moindre. La lecture sur le cadran se fait directement en unités Rockwell. Une unité Rockwell correspond à un enfoncement de 0,002 mm [24].

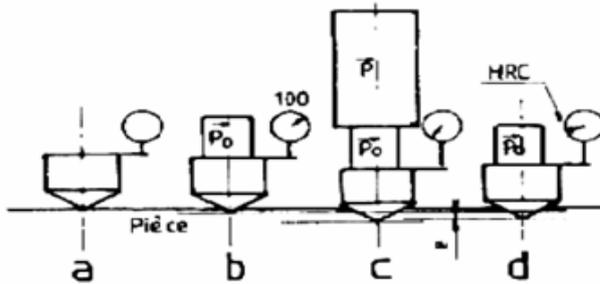


Figure II.6.a: le cône

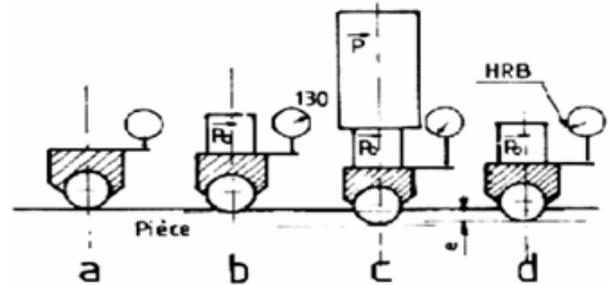


Figure II.6.b: la bille

II.2.5.1 Essai de dureté Vickers

La détermination de la dureté selon vickers s'effectue de la même façon que le procédé brinell, il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° . On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur [22, 24].

II.2.5.2 Principe de L'essai

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer. Un pénétrateur pyramidal sous l'effet d'une charge F et à mesurer la diagonale de l'empreinte (Fig. II.7) après suppression de la charge [24].

II.2.5.3 Pénétrateur de L'essai

Dans ce procédé le pénétrateur est un diamant pyramidal à base carrée dont l'angle au sommet (l'angle dièdre des deux faces opposées) vaut 136° (Fig. II.7) [22].

II.2.5.4 Conduite de l'essai

- L'essai est normalement effectué à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement, sans choc ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes.
- On prépare la surface pour éviter toute altération.
- On choisira l'épaisseur de la pièce $\geq 1.5x_d$.

II.2.5.5 Caractéristiques de l'essai

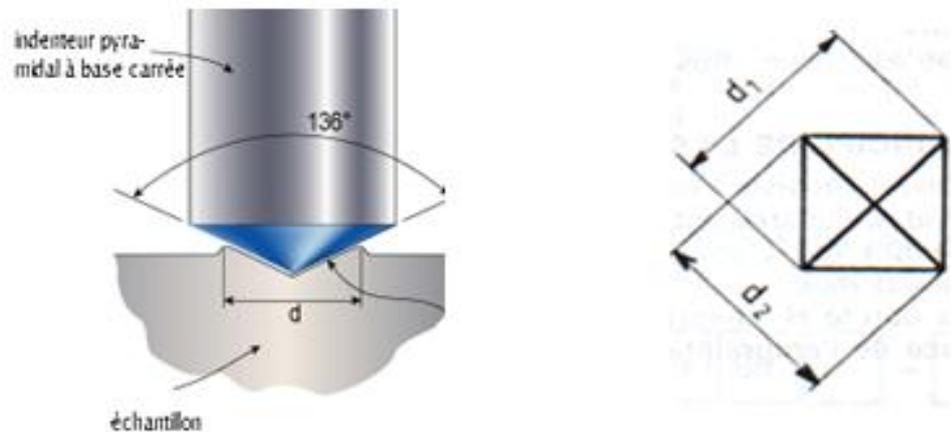


Figure II.7 : Pénétrateur pyramidal [23].

Angle au sommet du pénétrateur : 136° .

F : charge d'essai en newton à \pm

d : diagonale de l'empreinte en mm.

Avec $d = (d_1 + d_2) / 2$ (Fig. II.4).

Dureté Vickers = HV = $0.189 F / d^2$.

$$HV = \frac{F(N)}{e(mm^2)} \quad (II.7)$$

II.2.5.6 Conclusion

L'essai Brinell laisse sur les pièces une empreinte importante. De plus, il ne peut être utilisé sur des pièces très dures ou pour des épaisseurs minces. On réservera donc l'essai aux essais sur des pièces brutes et assez épaisses : (laminés, barres, etc...).

Par contre, les essais Vickers et Rockwell laissent des empreintes très très petites et peuvent être employés pour les essais sur des pièces usinées, des pièces dures cémentées, trempées (couche superficielle dure) ou pour des épaisseurs minces.

II.3 Essais de résilience

La résilience caractérise la résistance de la rupture par choc d'un matériau. Un métal résistant bien au choc à une grande résistance symbole K , le plus souvent l'essai de résilience est réalisé à l'aide de l'appareil appelé (mouton pendule de CHARPY), avec des éprouvettes standardisées [22].

II.3.1 Principe de CHARPY

La résistance au choc CHARPY d'une éprouvette, souvent notée a_{cU} dans les cas d'éprouvettes non-entaillées et a_{cN} dans le cas d'éprouvettes entaillées, représente l'énergie de choc absorbée par la rupture de l'éprouvette, rapportée à la section droite initiale de l'éprouvette [25].

Masse pendulaire tombant d'une hauteur (H) (W_i = Énergie initiale) et, après rupture, remontant d'une hauteur (h) sous l'effet de l'énergie résiduelle (W_r).

$$K = \frac{W_i - W_r}{S} = \frac{P(H - h)}{S} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (joule)}}{\text{section au droit de l'entaille (cm}^2\text{)}} \quad (\text{II. 8})$$

II.3.2 Machine de CHARPY

L'essai mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant (Fig. II.8) pour briser une éprouvette entaillée ou non du matériau à tester [25].

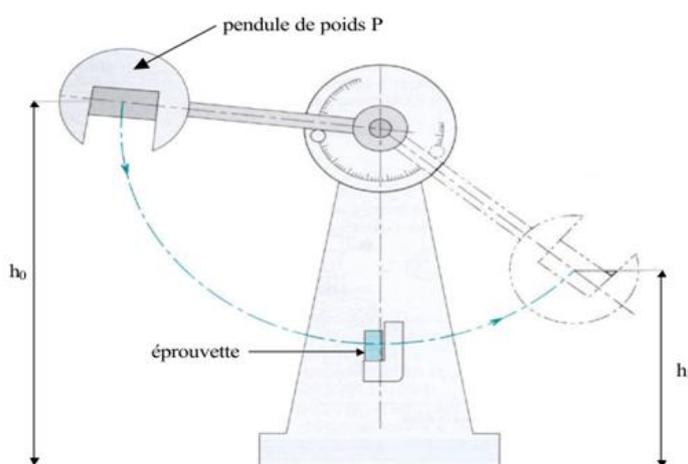


Figure II. 8 : Machine de CHARPY [25].

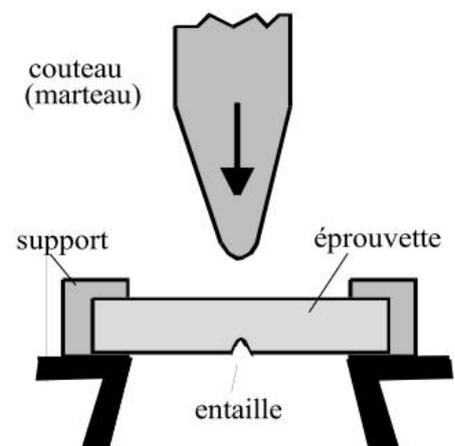


Figure II.9 : Appui de l'éprouvette vue d'en haut [25].

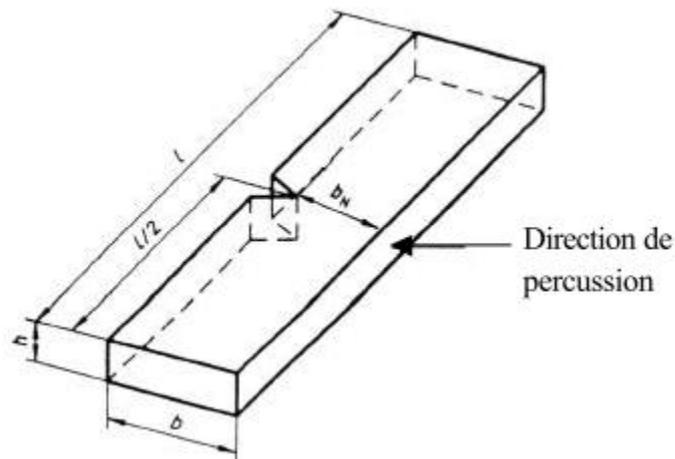
II.3.3 Eprouvettes

L'effet de la forme de l'éprouvette sur l'énergie de rupture est très prononcé. Selon le type d'essai réalisé, les éprouvettes peuvent être disposées de différentes façons sur le bâti et posséder ou non une entaille. Il existe plusieurs types d'éprouvettes selon le type de matériau testé [25].

Dans le cas d'essais sur des thermoplastiques, les dimensions sont les suivantes :

| Longueur l | Largeur b | Epaisseur h | Distance entre appuis L |
|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 80 ± 2 mm | $10,0 \pm 0,2$ mm | $4,0 \pm 0,2$ mm | $62^{+0,5}_0$ mm |

Les schémas suivants (Fig. II.10, Fig. II.11 et Fig. II.12) présentent les deux principaux types de chocs sur éprouvettes thermoplastiques, ainsi que les types d'entailles [25].



*Figure II. 10 : Choc CHARPY en position debout
avec éprouvette à simple entaille*

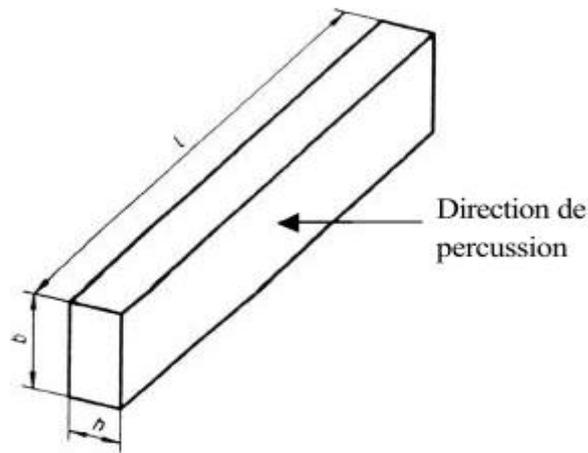


Figure II.11 : Choc CHARPY à plat

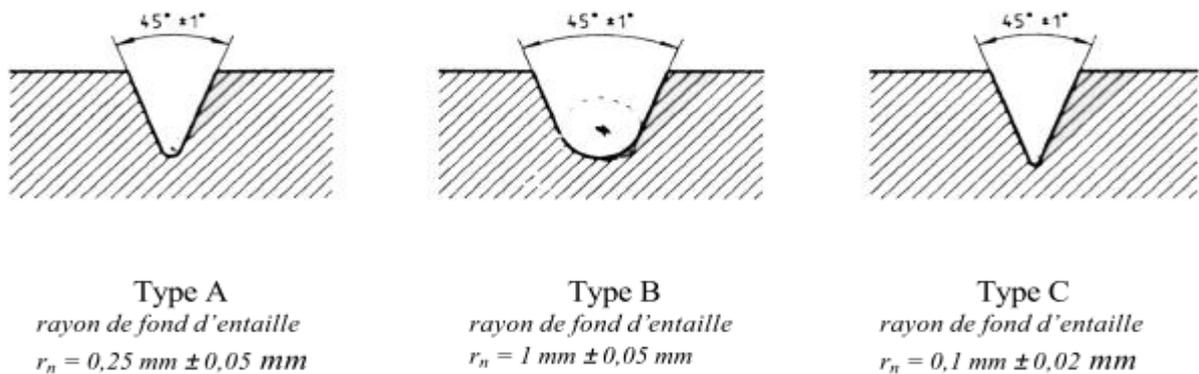


Figure II.12: Types d'entailles [25].

II.3.4 Conduite de l'essai

- Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie départ (Fig. II.8)

$$W_0 = 300 \text{ Joules.}$$

- On libère le couteau, dans sa chute, en passant à la verticale, il brise l'éprouvette.
- On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée W_1 .
- On calcule la différence $W_0 - W_1 = W$ (énergie absorbée), $W = p(h^0 - h^1)$ (II.8)

II.4 Essai de traction

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment. Il consiste à réaliser, dans une éprouvette, un champ de contrainte uniforme uniaxiale de traction et à enregistrer l'allongement résultant [26].

II.4.1 But d'essai

Ces essais permettent de tracer une courbe de traction à partir de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites :

- La déformation élastique en fonction de la force appliquée d'où on peut déduire, connaissant les dimensions de l'éprouvette, le module d'Young.
- la limite élastique souvent notée R_e , ou bien la limite d'élasticité à 0,2% $R_{e0,2}$.
- la déformation plastique.
- la résistance à la traction ou tension de rupture souvent notée R_r .

II.4.2 Principe

L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de L_0 , et on mesure simultanément l'effort F et l'allongement.

$$\Delta L = L - L_0 \quad (\text{II.10})$$

II.4.3 Eprouvettes

L'essai de traction est exécuté soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques (Fig. II.13), ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Afin de garantir des résultats obtenus sous contrainte uniaxiale, toutes les déterminations faites au cours de l'essai ne portent que sur une partie de la longueur de l'éprouvette.

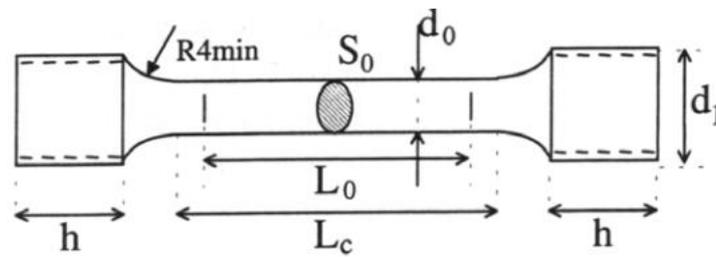


Figure II. 13 : Exemple d'une éprouvette de traction [27].

d_0 = \emptyset partie calibrée

d_1 = \emptyset des têtes filetées ou diamètre initial

L_0 = longueur entre repère = $5 d_0$

L_c = longueur calibrée

S_0 = section initiale

h = longueur des têtes

Conventionnelles:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$$

II.4.4 Machine d'essai

Une machine de traction moderne (Fig. II.14), dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce aux micro-ordinateurs, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches [27].

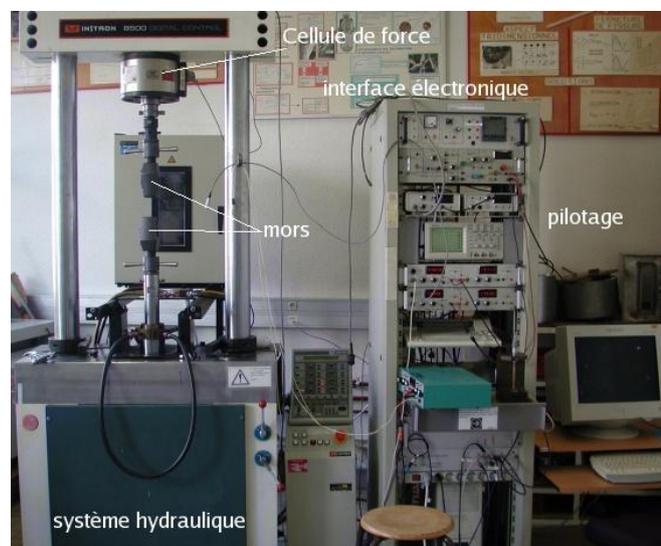


Figure II.14 : Machine de traction [28].

II.4.5 Diagramme de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (II.11)$$

De même la déformation ε , se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale) [29].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (II.12)$$

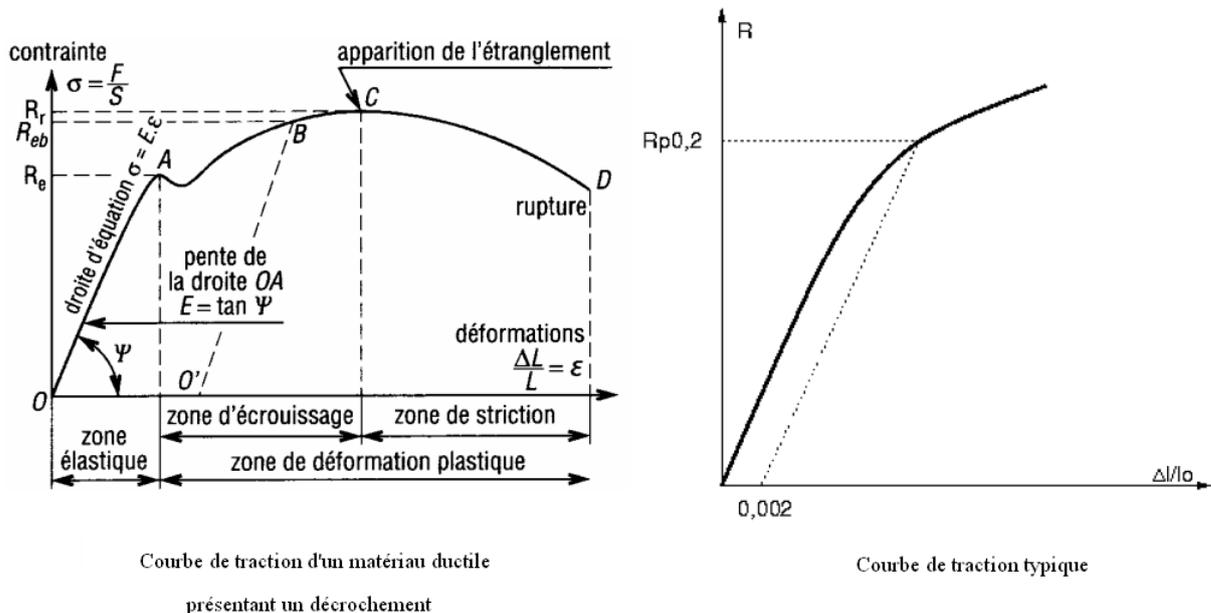


Figure II.15 : Diagramme de traction

Première période : c'est la période élastique ou de résistance à la déformation des matériaux. Si on relâche les forces appliquées avant d'atteindre la limite $(R_e)t_1$ le matériau reprend sa forme initiale, c'est la limite élastique.

Deuxième période : c'est la période de déformation permanente ou période de mise en forme des matériaux. Le matériau se déforme, mais ne rompt pas et gardera la déformation même si on relâche les forces appliquées.

Troisième période : c'est la période de striction ou de décohésion structurale localisée entraînant la rupture de l'éprouvette.

II.4.6 Caractéristiques de l'essai

Limite élastique (Re)t :

C'est la charge unitaire (charge par unité de section) exprimée en hb (hectobar) ou 10^7 Pa (environ 102 kgf/cm² pour les anciens) correspondant à la fin de la première période.

$$(Re)t = \frac{\text{Force élastique } (F_e)}{\text{Section éprouvette } (S_0)} \quad (\text{II.13})$$

Résistance de rupture (Rr)t :

C'est la charge unitaire maxi que peut supporter l'éprouvette avant rupture exprimée en hb (hectobar) ou 10^7 Pa (environ 1,02 kgf/mm² pour les anciens).

$$(Rr)t = \frac{\text{Force rupture } (F_r)}{\text{Section éprouvette } (S_0)} \quad (\text{II.14})$$

Allongement (A %) :

C'est le rapport de changement de longueur après rupture de la partie travaillante (l_0) exprimé en %.

$$A\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (\text{II.15})$$

Striction (Z%) :

C'est le rapport de changement de section après rupture

$$Z\% = \frac{S_f - S_0}{S_0} \cdot 100 \quad (\text{II.16})$$

Dans cette expression, L_0 et L_f sont respectivement les longueurs initiales et finales après rupture.

Module d'élasticité longitudinal ou module de YOUNG :

Il caractérise la stabilité dimensionnelle sous charge pendant la première période. C'est le rapport de la charge unitaire sur l'allongement unitaire correspondant dans la première période de proportionnalité.

$$E = \frac{(Re)t}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (\text{II.17})$$

Plus le module est important et plus la stabilité dimensionnelle de la pièce est grande.

II.5 Essais de fatigue

La fatigue est la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux [30].

II.5.1 But

Le but de l'essai de fatigue est de déterminer les conditions de résistance des matériaux soumis à des efforts variables dans le temps et de la limite pratique de fatigue. Considérons une éprouvette cylindrique soumise à des efforts de flexion (Fig. II.16) [22].

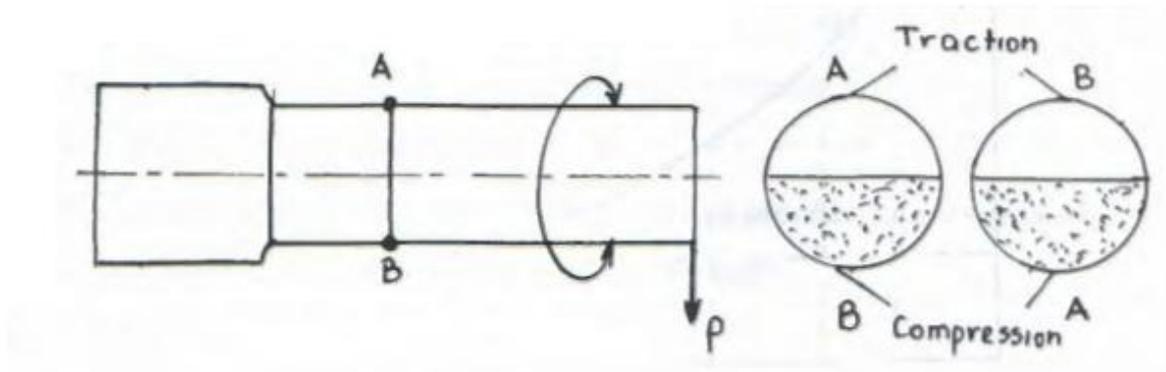


Figure II.16 : Essai de fatigue [22].

II.5.2 Eprouvettes

Les éprouvettes peuvent être de géométries variées, en fonction de ce que l'on cherche à caractériser. Classiquement, elles peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable, comme celle présentée sur la (Fig. II.17). Enfin, les éprouvettes peuvent être lisses ou entaillées. L'état de surface doit être particulièrement soigné et répétitif, et l'usinage ne doit pas introduire de contraintes résiduelles importantes. Comme on peut le voir, la surface de l'éprouvette est parfaitement polie pour retarder au maximum la rupture par fatigue [31].

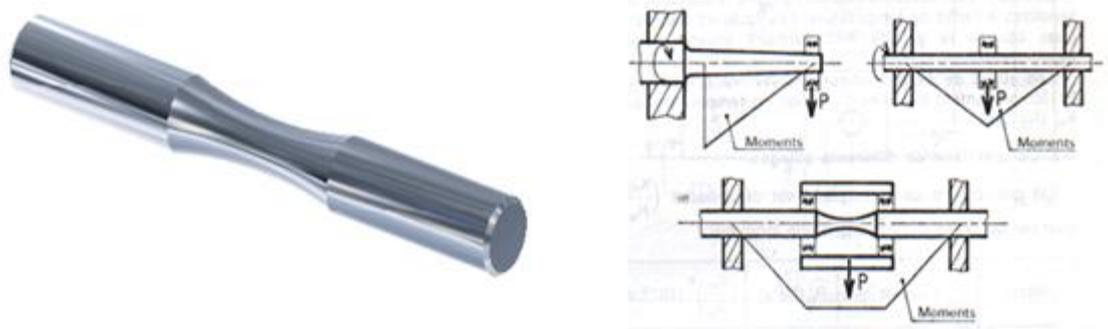


Figure II.17 : Epreuve de fatigue [31].

II.5.3 Dimensions

Elles dépendent de la capacité de la machine (charge d'essai maximale : 25% de la capacité de la machine) et de ces caractéristiques (fréquence propre de l'éprouvette supérieure à deux fois la fréquence d'essai).

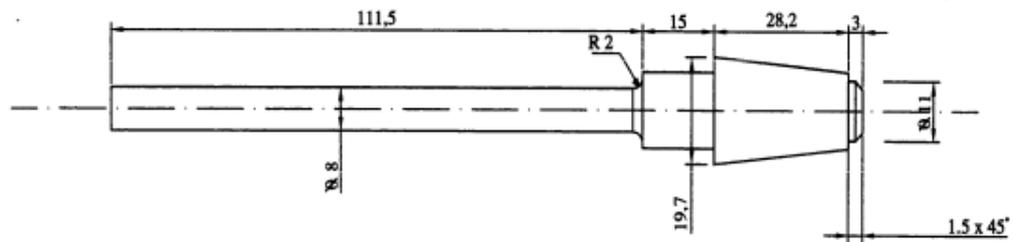


Figure II.18 : Epreuve d'essai de fatigue.

II.5.4 Machine d'essai

On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue, selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.).

Comme exemple, le laboratoire de la résistance des matériaux (RDM) du département de génie mécanique de l'université de Biskra contient une machine d'essai de fatigue en flexion rotative modèle : GUNT, de type : WP 140, qui a les caractéristiques suivantes.

- Courant alternatif: 220 V.
- Fréquence: 50 Hz.
- Charge maximale: 500 N.
- Échelle de graduation : 5 N.
- Environnement: air ambiant.
- Température: ambiante.

II.5.5 Description de la machine

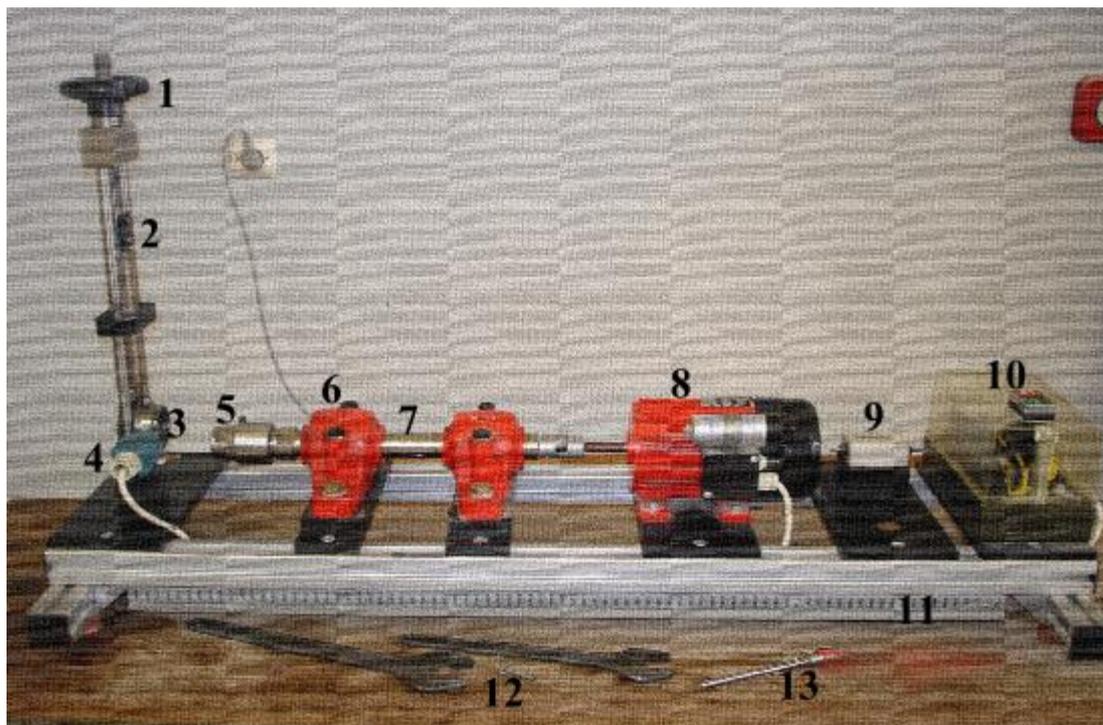


Figure II.19 : La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140.

- | | |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1 Volant. | 8 Moteur électrique. |
| 2 Chariot transversal gradué. | 9 Compteur. |
| 3 Roulement. | 10 Tableau de commande. |
| 4 Fin de course. | 11 Châssis. |
| 5 Mandrin. | 12 Clés. |
| 6 Palier lisse. | 13 Eprouvette. |
| 7 Arbre de transmission | |

II.5.6 Courbe de Wöhler

Les essais de fatigue permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture pour une sollicitation donnée. Ces résultats sont présentés sous la forme d'une courbe semi-logarithmique dite de Wöhler (ou courbe SN, pour Stress et Number of cycles to failure, en anglais). Une courbe type est présentée (figure II.20) On y distingue les zones de :

- *Domaine I* : zone de fatigue oligocyclique. Dans cette partie du diagramme, la contrainte dépasse la limite d'élasticité conventionnelle à chaque cycle. La rupture survient rapidement au bout de quelques milliers de cycles après une déformation généralisée importante.
- *Domaine II* : zone d'endurance limitée. Dans ce domaine, on applique une contrainte inférieure à la limite d'élasticité. La rupture est atteinte pour un nombre limité de cycles, qui augmente quand la contrainte diminue. L'ordre de grandeur de la durée de vie dans ce cadre varie typiquement de 10^4 à 10^6 cycles.
- *Domaine III* : zone d'endurance illimitée. Il s'agit du domaine des faibles contraintes jusqu'à une contrainte seuil appelée limite d'endurance en dessous de laquelle la durée de vie est théoriquement illimitée.

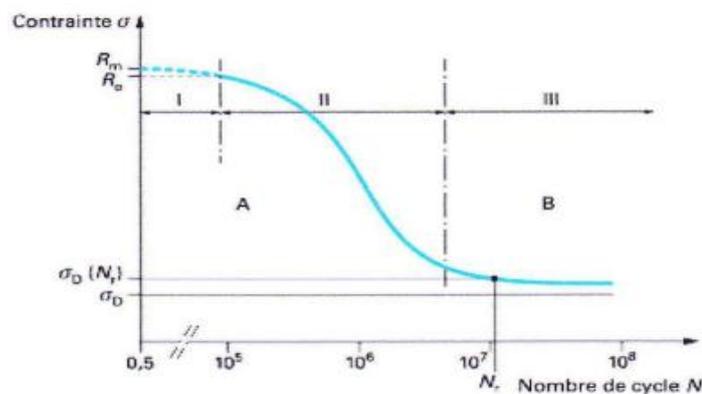


Figure II.20 : Courbe schématique de Wöhler ou courbe d'endurance.

II.5.7 Caractéristique de graphe

I=zone de fatigue oligocyclique.

II= zone d'endurance limitée.

III= zone d'endurance illimitée.

A=zone de non-rupture probable.

B= zone de rupture probable.

R_m =charge de rupture.

R_e =limite d'élasticité.

σ_D =limite de fatigue.

$\sigma_D(N_f)$ =limite d'endurance conventionnelle à (N_f) cycle.

II.6 Essai de fluage

La déformation d'un matériau induite pendant le maintien constant de la température et de la contrainte est appelée fluage. Il s'agit d'une déformation permanente évoluant avec le temps, autrement dit de nature viscoplastique. Si ce genre de déformation est possible à toute température au dessus du zéro absolu, elle n'intervient de manière significative qu'à des températures relativement élevées. Typiquement, ce genre de phénomène est pris en compte à partir de températures avoisinant $0,2.T_f$, où T_f est la température de fusion du matériau [32].

II.6.1 Définition

Le fluage est la déformation isotherme sous contrainte constante en fonction du temps.

Le fluage d'un matériau se produit à haute température et correspond à un régime de déformation lente, sous charge constante, la contrainte étant potentiellement inférieure à la limite d'élasticité. Ces essais intéressent donc les domaines où les matériaux sont soumis à des températures élevées, tels que l'aéronautique ou le nucléaire.

Les essais de fluage nécessitent l'usage d'une machine de mise en charge, d'un four et d'un extensomètre. Dans le cas des métaux, les essais de fluage sont le plus souvent effectués en traction, quoique des essais de compression sont également possibles pour des matériaux fragiles, le risque d'endommagement étant plus limité dans ce mode (les fissures perpendiculaires à l'axe de sollicitation ne pouvant pas se développer) [33].

Les courbes de fluage représentent la variation de l'allongement en fonction du temps. Leur aspect général est schématisé sur la (Fig. II.21). Le courbe n° 1 est caractéristique du fluage logarithmique qui se manifeste aux températures relativement basses ($T < 0,3 T_f$) et ne conduit pas à la rupture. La courbe n° 2 est relative au fluage restauration ($T > 0,3 T_f$) très largement gouverné par des processus de diffusion. La courbe n° 3 correspond au fluage visqueux (ou fluage Nabarro), observé au voisinage de la température de fusion pour des contraintes faibles[33].

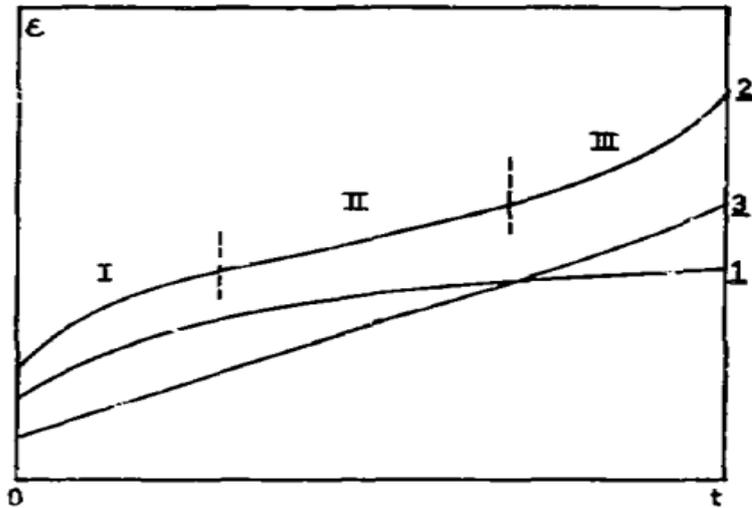


Figure II.21 : Courbes de fluage [33] 1 : Fluage logarithmique
2 : Fluage restauration
3 : Fluage visqueux

Le courbe n° 2 représente le cas le plus général. Elle se compose de trois stades (Fig. II.22.a):

II.6.2 Diagramme typique de fluage (fluage restauration)

Typiquement, le fluage des matériaux présente trois phases : le fluage primaire, pendant lequel la vitesse de déformation décroît continûment, le fluage secondaire, à vitesse de déformation minimum, et enfin le fluage tertiaire pendant lequel la vitesse de déformation augmente jusqu'à la rupture de l'échantillon. La (Fig. II.22.a) présente une courbe type d'essai de fluage [34].

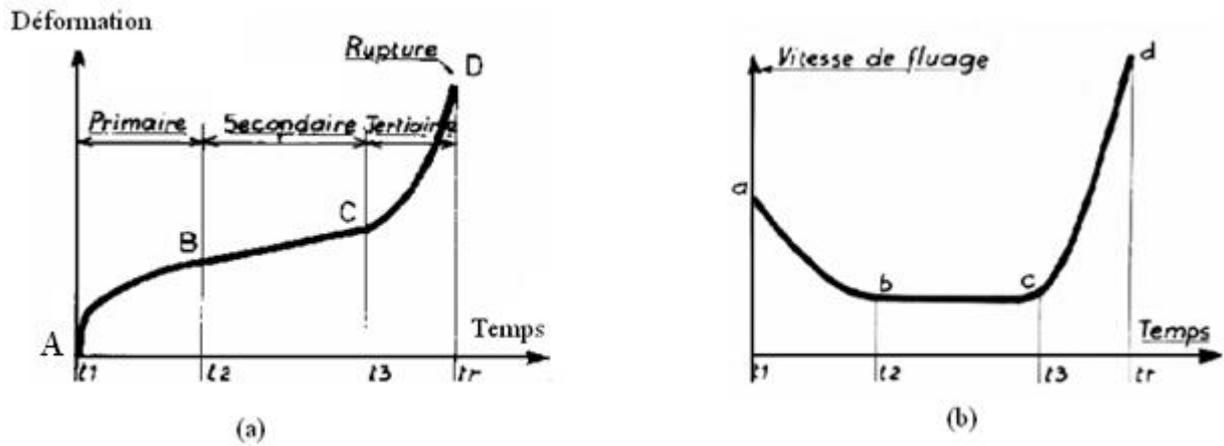


Figure II.22 : (a) Allure générale d'une courbe de fluage, Evolution de la déformation et (b) la vitesse de déformation en fonction du temps [32].

II.6.3 Différents stades de fluage restauration A

On distingue généralement trois stades d'évolution de la déformation (Fig. II.22.a):

Le stade primaire, ou transitoire (AB) : pendant lequel la vitesse de déformation diminue avec le temps, ce qui traduit une augmentation de la résistance du matériau. Cette tendance provient en général d'un accroissement de la densité de dislocations jusqu'à saturation.

Le stade secondaire, ou stationnaire (BC) : pendant lequel la vitesse de déformation se stabilise. Cette phase correspond à l'équilibre atteint entre les phénomènes de durcissement et ceux de restauration à l'échelle des dislocations.

Le stade tertiaire (CD) : où la vitesse de déformation augmente jusqu'à rupture de l'éprouvette. La densité et la mobilité des dislocations augmentent. En parallèle, des phénomènes de cavitation interne et d'endommagement en surface vont mener à la création de fissures. Ces dernières vont diminuer la surface portante de l'éprouvette entraînant la rupture par augmentation de la contrainte macroscopique [35].

II.6.4 Eprouvettes

Les éprouvettes de fluage sont analogues à celles utilisées en pour les essais de traction uniaxiale ordinaires, éprouvettes cylindriques (Fig. II.23) ou plates, encore que d'autres géométries peuvent être utilisées selon la disponibilité du matériau ou les contraintes géométriques. Il est préférable, toutefois, étant donnée la faible vitesse de déformation, de disposer d'éprouvettes relativement longues pour augmenter la précision de la mesure du déplacement.

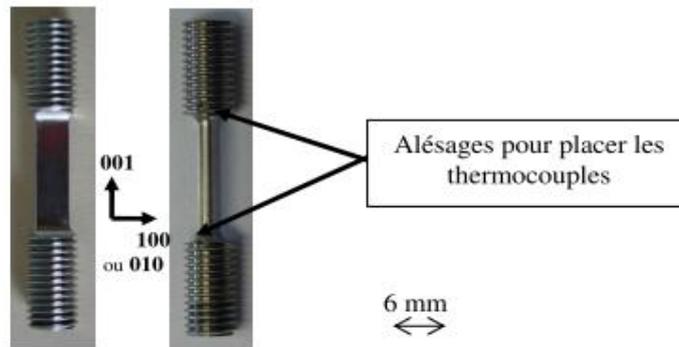


Figure II.23: Eprouvette de fluage prismatique [36].

II.6.5 Dispositif d'application de la charge

Lors d'une expérience de fluage, il est plus courant de travailler à charge qu'à contrainte constante, toutefois il est possible d'effectuer des essais à contrainte constante, ce qui implique de faire varier la charge appliquée au fur et à mesure de la déformation de l'échantillon. Les dispositifs de fluage sont généralement composés d'un poids et d'un bras de levier relié à un mors sur lequel l'éprouvette est fixée (Fig. II.24). Il peut être nécessaire, pour conserver l'équilibre de cette balance, de disposer d'un moteur qui compense l'élongation de l'éprouvette, les dispositifs correctement conçus pouvant tout de même assurer une précision satisfaisant les normes pour des angles du bras de levier de l'ordre de 10° . Il faut porter une attention particulière à l'alignement des têtes d'amarrage, afin de limiter les moments de flexion imposés à l'éprouvette (la norme ASTM recommande une déformation en flexion inférieure à 10 % de la déformation axiale).

Une étape sensible de l'essai de fluage est la mise en charge qui doit être accomplie de façon soignée pour éviter de perturber l'essai. L'éprouvette doit déjà être à la température de l'essai pour cette opération. La mise en charge peut être réalisée soit de manière "instantanée" pour s'approcher de la courbe théorique de fluage, mais cela peut entraîner une perturbation du dispositif de mesure de la déformation ou un effet de choc sur l'éprouvette qui entraîne l'apparition d'un transitoire. Autrement, on peut procéder à un chargement progressif qui a l'avantage d'être reproductible, soit par paliers discontinus (ajout de masses), soit en augmentant continûment la charge, typiquement à l'aide de petites billes de plomb [35].

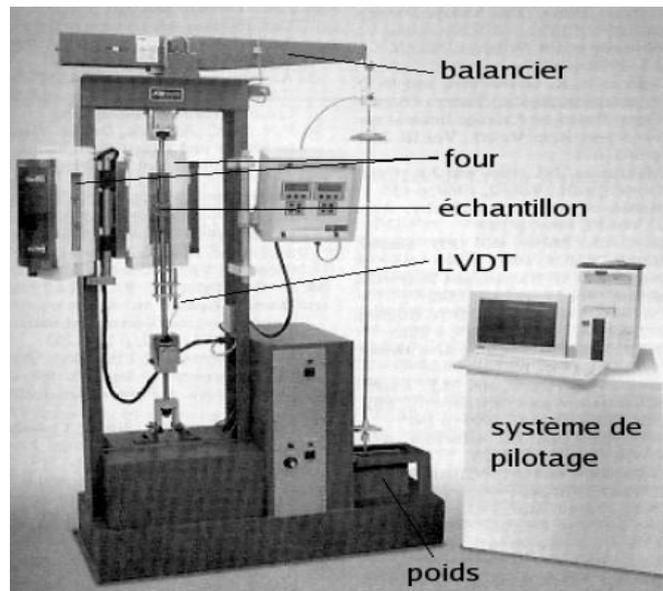


Figure II.24 : Machine de fluage [35].

II.6.6 Four

Les fours utilisés sont en général des fours tubulaires à résistance électrique qui chauffe par radiation (Fig. II.25). Les variations de température ayant un impact fort sur les résultats de fluage, il est important d'assurer un contrôle précis de la température (la norme fixe une variation maximale de $\pm 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ au-dessous de $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\pm 2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ au-dessus. La montée en température à elle seule peut durer plusieurs heures pour éviter de dépasser la température d'essai, ce qui invaliderait les résultats. La mesure de température est généralement effectuée par un thermocouple fixé sur l'échantillon. Les éprouvettes longues peuvent imposer d'utiliser plusieurs thermocouples afin de s'assurer de l'homogénéité de la température [35].



Figure II.25: Fours tubulaires

II.6.7 Mesure du déplacement

La mesure du déplacement est effectuée par extensomètre. Détaille les différentes techniques d'extensomètre existantes sur la (Fig. II.26). Dans le cas des essais de fluage, la température élevée interdit le plus souvent de placer l'extensomètre directement dans le four et on utilise un système de tiges capables de supporter la température d'essai, transférant la déformation à un LVDT .comme présenté sur la (Fig. II.26). Il est aussi possible de faire appel à de l'extensomètre sans contact, ce qui implique de disposer d'une fenêtre dans le four pour suivre la déplacement des points de la surface pris comme repères [35].

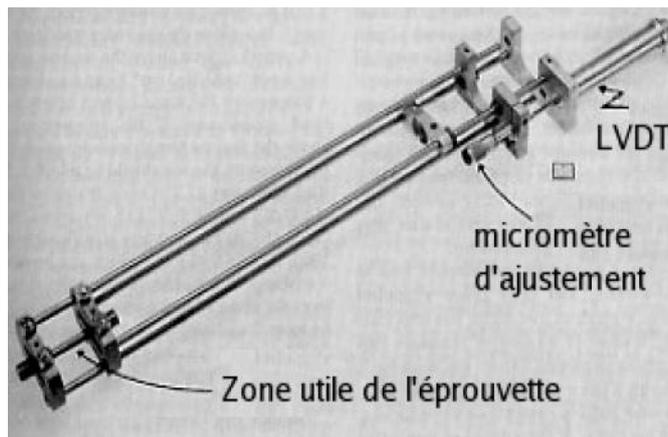


Figure II.26: Dispositif de mesure de la déformation pour essai de fluage [35].

➤ Jauges de déformation

Un premier type d'extensomètres avec contact sont des dispositifs traduisant en variation de résistance électrique leur propre déformation, en principe égale à celle de la structure à l'endroit où ils sont collés. Ils permettent typiquement de mesurer des déformations de $\pm 1\mu\text{m/m}$. L'image de gauche de la (Fig. II.27) présente le schéma de fonctionnement de ces dispositifs [35].

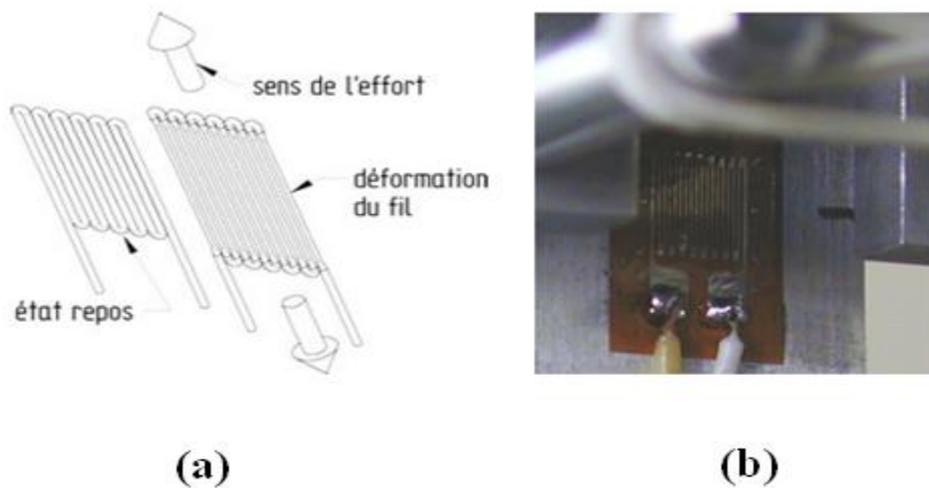


Figure II.27: (a) jauge collée sur une éprouvette (image CdM), (b) schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de déformation [35].

➤ Extensomètres à pinces

Le deuxième type d'extensomètres avec contact sont les extensomètres à pinces (Fig. II.28). Il en existe deux types. Les extensomètres à LVDT (Linéaire variable différentiel transformer) ont un corps constitué d'un noyau central autour duquel s'enroulent trois bobines. Une de ces bobines - primaire - est alimentée en courant et lorsque le noyau coulisse, cela induit du courant dans les bobines secondaires dont les variations sont proportionnelles au déplacement du noyau.

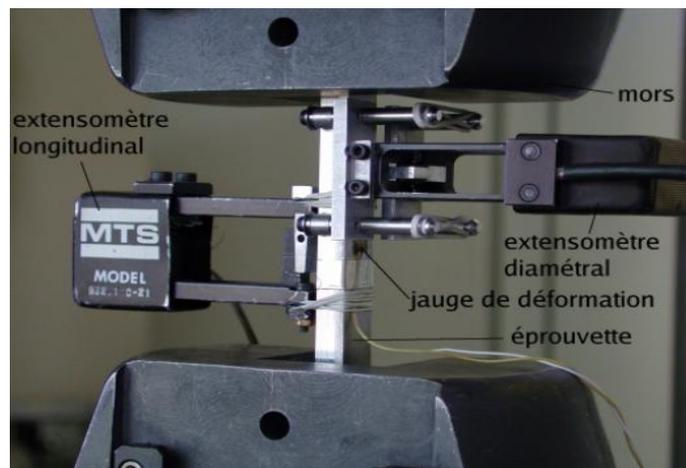


Figure II.28: Extensomètres diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction (Cliché CdM) [35].

Le deuxième type d'extensomètre à pince repose sur la mesure de la déflexion d'une barre par des jauges de déformation. Cette barre, située dans le corps de l'extensomètre, fléchit sous le déplacement des couteaux suite à la déformation de l'échantillon.

II.6.8 Effets de la température et de la contrainte sur le comportement en fluage

On a vu différents types de fluage que le fluage présentait trois stades différents si la température était supérieure à environ $0,3 T_f$ et se réduisait à un fluage de nature logarithmique pour des températures inférieures.

On distingue aussi les essais réalisés à des contraintes σ inférieures à la limite d'élasticité σ_e et ceux réalisés à des contraintes supérieures. Dans ce dernier cas, le stade secondaire est d'autant plus réduit que le taux d'écrouissage $\frac{d\varepsilon}{d\sigma}$ du matériau est faible lors d'un essai de traction. C'est le cas, en particulier, pour les superalliages base nickel.

D'une manière générale, la vitesse de fluage augmente avec la contrainte σ et la température T . La durée du fluage primaire et tertiaire augmente avec σ et T , tandis que celle du fluage secondaire diminue [36].

II.6.9 Effets de la taille de grain sur le comportement en fluage

La vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ varie de façon inversement proportionnelle à la taille de grain. Pour augmenter la résistance au fluage, il faut augmenter la taille de grain [36].

II.6.10 Variations de ε et de $\dot{\varepsilon}$ avec le temps

Les variations de ε (et de $\dot{\varepsilon}$) avec le temps sont souvent données par la somme de quatre fonctions :

Avec ε_1 Déformation instantanée correspondant à la mise en charge,

ε_2 fonction du temps de type λt^x , avec $x < 1$ (stade primaire),

ε_3 fonction linéaire du temps (stade secondaire),

ε_4 fonction du temps de type λt^y , avec $y > 1$ (stade tertiaire).

Cette expression permet de décrire une courbe de fluage à une température et une contrainte données. Pour chacune des fonctions ε_2 , ε_3 et ε_4 , il existe un très grand nombre d'équations différentes. Les fonctions ε qui décrivent le mieux les courbes de fluage sont la somme d'une fonction puissance avec une fonction linéaire et une fonction logarithmique. Il faut garder à l'esprit que bien souvent ces fonctions ne sont valables que dans un intervalle de contrainte set de températures données. L'expression la plus courante est la loi d'Andrade [36]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \lg(1 + k t) \quad (\text{II.18})$$

Ou encore, pour la vitesse de déformation :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\beta}{3(1+\beta t^{1/3})t^{2/3}} + k \quad (\text{II.19})$$

Où k et β sont des paramètres ajustables.

II.6.11 Variation de la vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon}$) avec la température

La vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon}$) augmente avec la température : elle est thermiquement activée. ($\dot{\varepsilon}$) suit une loi de type Arrhenius [36]:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_d \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Avec $\dot{\varepsilon}$ vitesse de déformation pendant le fluage secondaire.

Q ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) énergie d'activation.

R constante molaire des gaz ($8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

T (K) température.

$\dot{\varepsilon}_d$ (s^{-1}) Paramètre de dimensionnement.

La figure II.29 présente une courbe d'Arrhenius et qui permet de déterminer l'énergie d'activation Q .

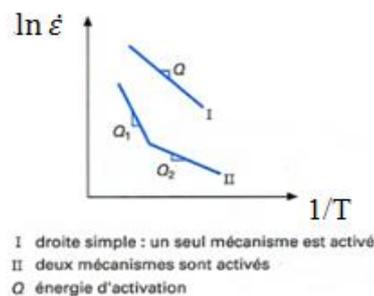


Figure II. 29 : Courbe d'Arrhenius [36].

On remarque que cette expression est indépendante de la contrainte. À partir de cette équation, il est possible d'exprimer déformation (ε) en fonction du temps et de la température par intégration [36].

II.6.12 Caractéristiques de fluage

II.6.12.1 Fluage logarithmique

A basse température et à faible contrainte la courbe montre seulement la transition du fluage avant que la déformation devienne constante (Fig. II. 30.a). Ce fluage est décrit par l'équation [37]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + a \log t \quad (\text{II.20})$$

Où ε : représente la déformation après un temps t .

a : est une constante.

ε_0 : est la déformation instantanée.

Ce type de fluage est appelé logarithmique

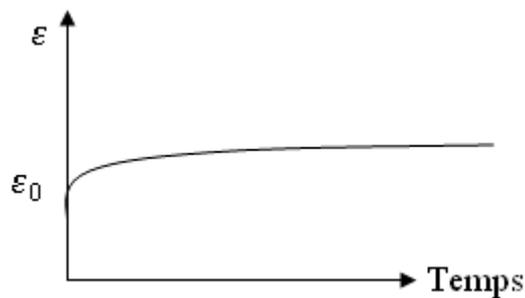


Figure II.30-a : Fluage logarithmique [37].

II.6.12.2 Fluage de puissance

A haute température et forte contrainte l'équation de fluage est de la forme :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m \quad (\text{II.21})$$

Où β et m sont des constantes avec la valeur de m compris entre 0 et 1. Pour plusieurs matériaux polycristalin à température élevée $m = 1/3$.

β : constante en fonction de la température et la contrainte.

Ce type est appelé fluage de puissance (Fig. II.30.b).

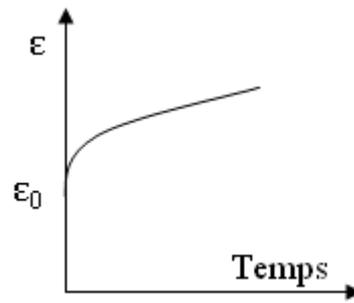


Figure II.30-b : Fluage de puissance [37].

Les deux équations (a) et (b) indiquent la diminution de la vitesse de déformation $\frac{d\varepsilon}{dt}$ avec le temps, l'équation de la vitesse de déformation s'écrit :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = t^{-n} , \text{ où } n \text{ est une constante} \quad (\text{II.22})$$

A des basses températures $n = 1$ et à haute température $n = 1-m$.

La transition du premier stade de fluage vers le deuxième stade est caractérisée par l'équation:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m + \dot{\varepsilon}_s \cdot t \quad (\text{II.23})$$

II.6.13 Les différents mécanismes de fluage

Il existe deux grandes classes de mécanismes à l'origine de la déformation plastique à haute température: le fluage dislocation et le fluage diffusion. La déformation du matériau est gouvernée par l'un ou l'autre des mécanismes, en fonction de la température ou de la contrainte appliquée. Nous exposerons ici les mécanismes prédominants par ordre croissant de température, ce qui correspond à un ordre décroissant de la contrainte [38, 39].

La figure II.31 présente schématiquement les différents modes de déformation en fonction de la température.

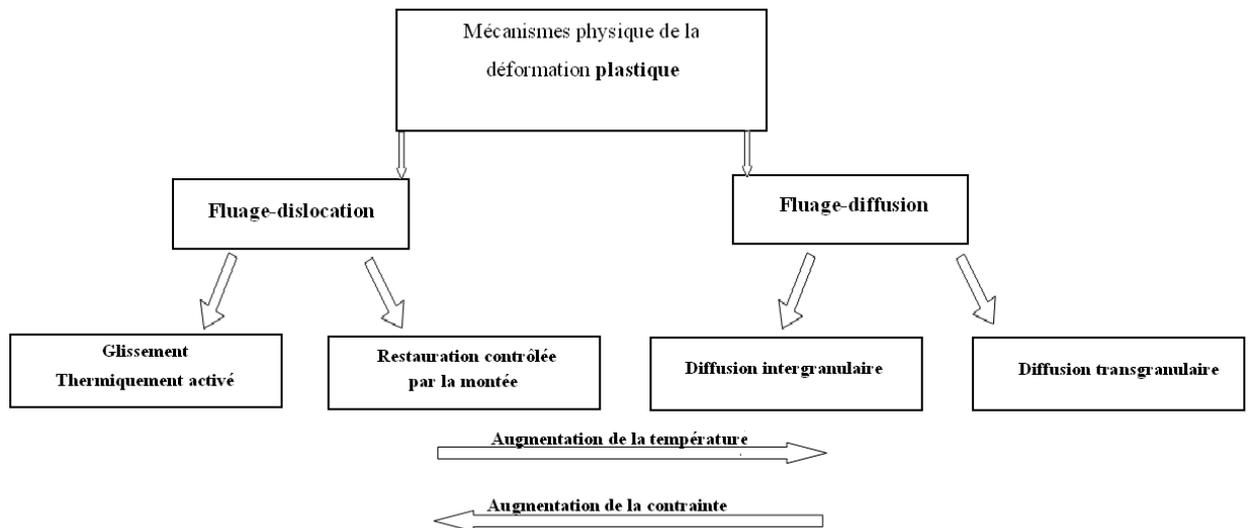


Figure II.31 : Représentation schématique des modes de déformation en fonction de la température [40].

II.7 Les différents types des appareils d'essai de fluage

II.7.1 premier exemple

Diha a réalisé une machine de fluage (Fig. II.33) pour les fils de cuivre et d'aluminium [41].

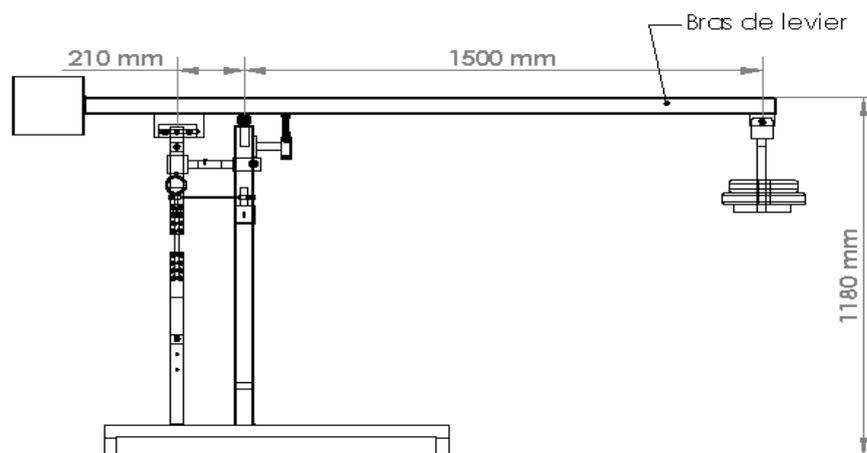


Figure II.32 : Schéma de la machine de fluage [41].

Les constituants de la machine sont :

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| 1- Bielle. | 9 -Contre poids. |
| 2- Mors mobile. | 10- Articulation. |
| 3 -Mors fixe | 11 -Bras de levier. |
| 4- Porte mors fixe. | 12- Porte La charges (masses). |
| 5 -Support. | 13- Mass |
| 6- Comparateur | 14 -Eprouvette |
| 7 -Système de guidage. | 15-Bâti. |
| 8 -Buté. | |

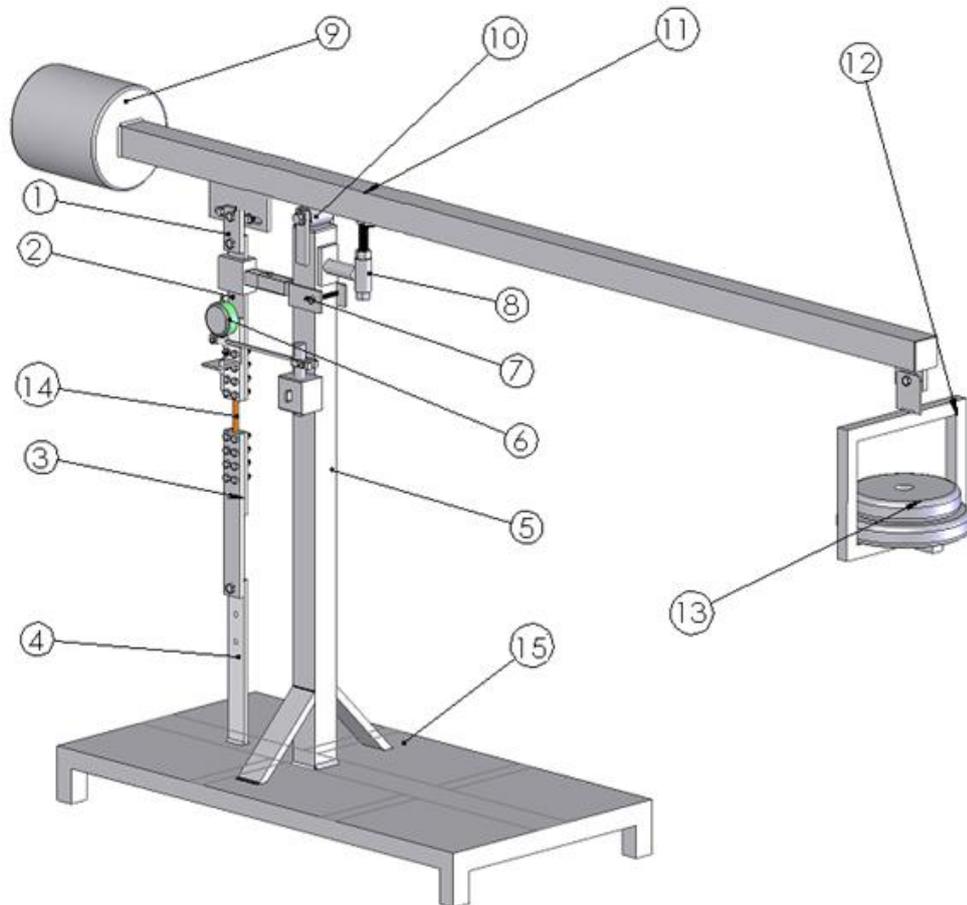


Figure II.33 : Les constituants de machine de fluage [41].

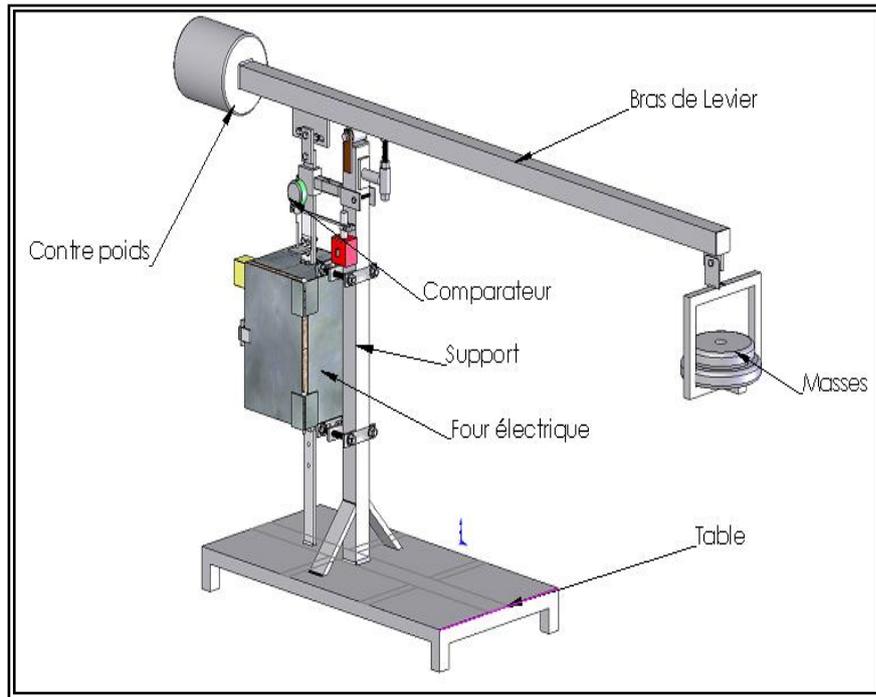


Figure III.34 : Dessin d'ensemble de la machine [41].

La figure II.35 c'est un dispositif complet de tous les éléments constitutifs qui ont été réalisés avec un choix étudié de la matière et des opérations d'usinages, soudages, assemblages.



Figure II.35 : Machine de fluage complète [41].

II.7.2 Deuxième exemple

Les figures II.36 et II.37 montrent d'autres types d'appareil d'essai de fluage.

II.7.2.1 Les éléments de la machine

Deux chambres à vide ont été conçues et construites pour être utilisées pour les essais mécaniques à haute température sous vide ou tout autre type d'environnement inerte. La forme et les dimensions de leurs composants et les détails de systèmes appropriés pour mesurer la température et la déformation ont été définis en fonction des détails de la structure des machines d'essai qui existent déjà dans le fluage laboratoire. (Fig. II. 35) montre une vue générale de l'appareil. Ce qui est intéressant fait au sujet de ces machines est qu'elles permettent la réalisation de tests de fluage soit à charge constante ou à un stress constant par permutation convenablement comes mécaniques avec des profils différents situés dans leurs leviers de port en lourd. La condition de charge constante est atteinte par un profil de came circulaire, tandis que l'état de contrainte constante par une came Andrade-Chalmers [42].

Les chambres ont été conçues pour recevoir en eux tous les composants du train de charge, de l'extensomètre et thermocouples. Les extensomètres fonctionnés avec transducteurs LVDT et les thermocouples étaient du type chromel-alumel. Le plus grand bien avec ces chambres est qu'ils ont été conçus pour être rigidement fixé sur la base des machines de fluage, de sorte que la tige inférieure de traction est reliée à une articulation sphérique fixée à l'intérieur de l'instrument (Fig. II.36). Certains types de chambres d'environnement sont conçus pour être connectés directement à des tiges de traction, étant difficile à fonctionner pendant la préparation du fluage de test et susceptibles de causer des obstructions mécaniques avec l'axe de charge spécimen. Avec le modèle actuel la plupart de ces problèmes ont été grandement minimisés. (Fig. II.37) présente des photographies d'une vue d'ensemble de deux machines de fluage fonctionnant avec le système de vide avec des détails de la face et de dos des chambres et les composants du système sous vide [42].

La chambre est divisée en trois composantes principales:

- Un composant inférieur comprenant une section d'un tube en acier inoxydable (304) ayant environ 200 mm de diamètre, une épaisseur de 3 mm et 300 mm de longueur, avec deux sorties latérales avec des brides et des joints à vide (o-rings), comme indiqué dans les (Fig. II.37.b et 37 c). L'ouverture frontale est principalement utilisée pour l'installation du LVDT à des membres des extensomètres. Le disque couvrant cette bride a les raccords pour

la conduite à dépression. Le disque de recouvrement arrière de la bride a les connexions pour le LVDT et des thermocouples conduit.

- Un composant intermédiaire qui traverse la zone chaude du four constitué par un tronçon de tube en acier inoxydable (Type 310) ayant environ 90 mm de diamètre, une épaisseur de 5 mm et 700 mm de longueur. Deux brides avec joints hermétiques (joints toriques) dans ses extrémités sont utilisés pour la connexion avec les deux autres composants, comme représenté sur la (Fig. II.36 et Fig. II.37.a).
- un élément supérieur constitué par un soufflet métallique de couplage ayant deux brides avec joints (vide joints toriques) pour connexion avec la partie intermédiaire et l'arbre de traction supérieure (Fig. II.36) et (Fig. II.37.a).

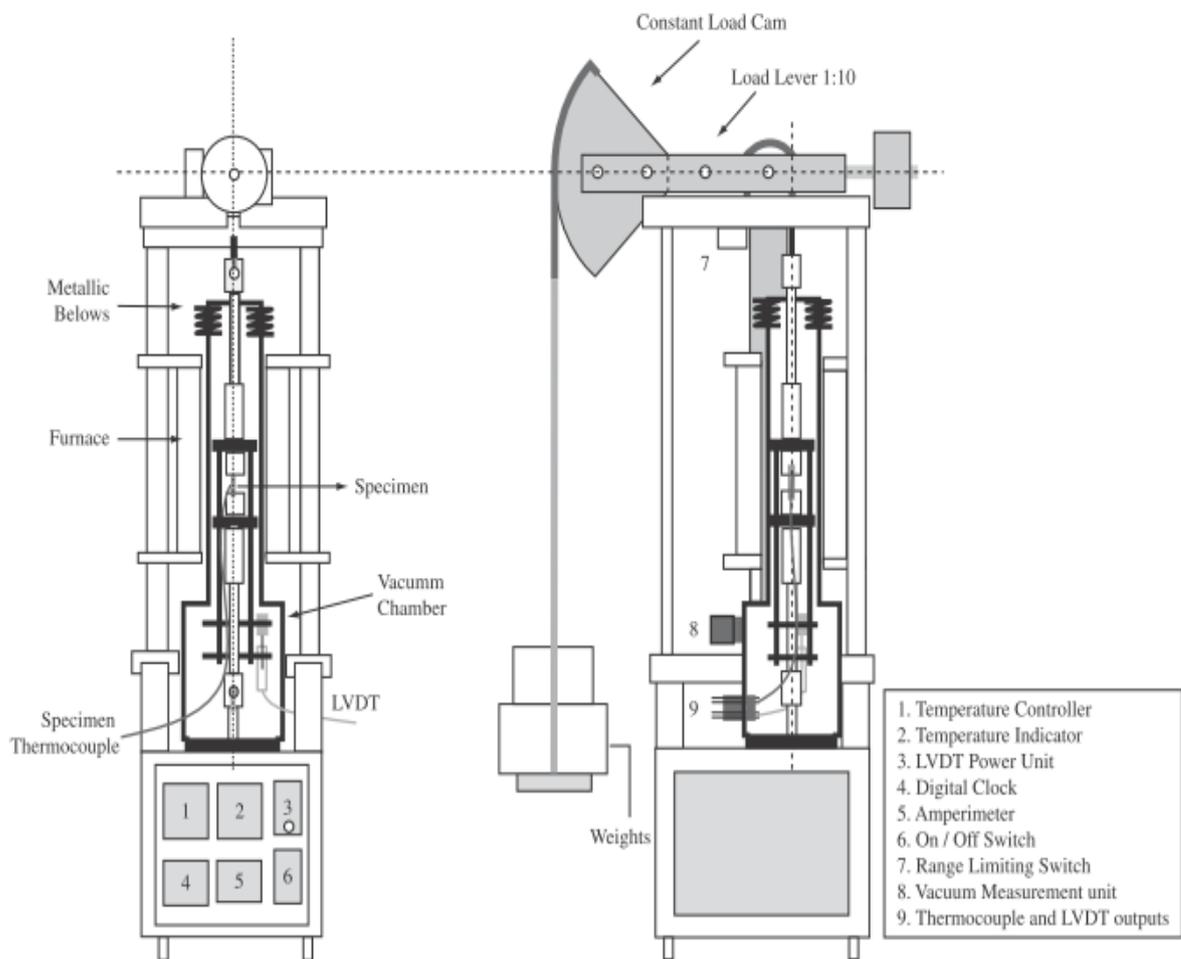


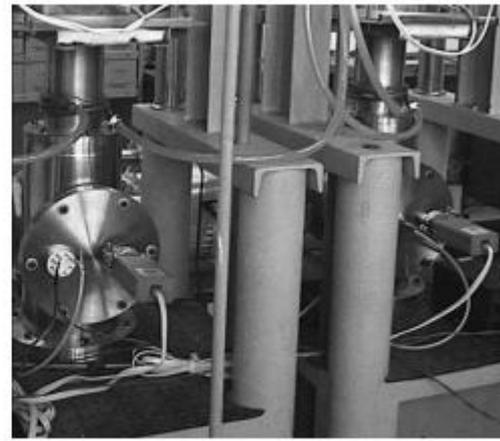
Figure II.36 : Schéma des principaux composants de la machine de fluage et de la chambre à vide [42].



(a)



(b)



(c)

Figure II.36 : a) les deux machines de fluage d'exploitation avec le vide système; vue de face b) et c) vue de dos des deux chambres à vide sur la machine de fluage [42].

II.7.2.2 Méthode de mesure

Les mesures d'allongement des échantillons et la température ont été surveillée en permanence pendant le test avec des données Fluke une hydre enregistreur modèle - Série II-2635A. Le système peut stocker un grand nombre de lectures à partir de chaque machine pour traitement ultérieur. Taux de numérisation typiques utilisées dans ce travail étaient les suivants: 1 lecture/s, au début de chaque essai, 1 lecture / minute ou 1 lecture / 10 minutes pendant la majeure partie de la durée de l'essai, en fonction du taux de déformation de fluage impliqués dans chaque cas. Pour chaque test un total d'environ 1000 à 3000 points ont été stockés qui ont ensuite été filtré à environ 100 à 200 lectures seulement. Ce nombre de points ont été jugés suffisants pour bien définir la forme de chaque courbe de fluage [42].

Troisième exemple

J.J. Momoh, a réalisé une machine de test de traction / fluage comme le montre la figure II.38. constituée de quatre grandes parties, à savoir [43]:

- Stand / Traverse en U
- Plaques supérieure et inférieure
- Système d'application des charges
- Système de mesure de déformation (Fig. II. 39)

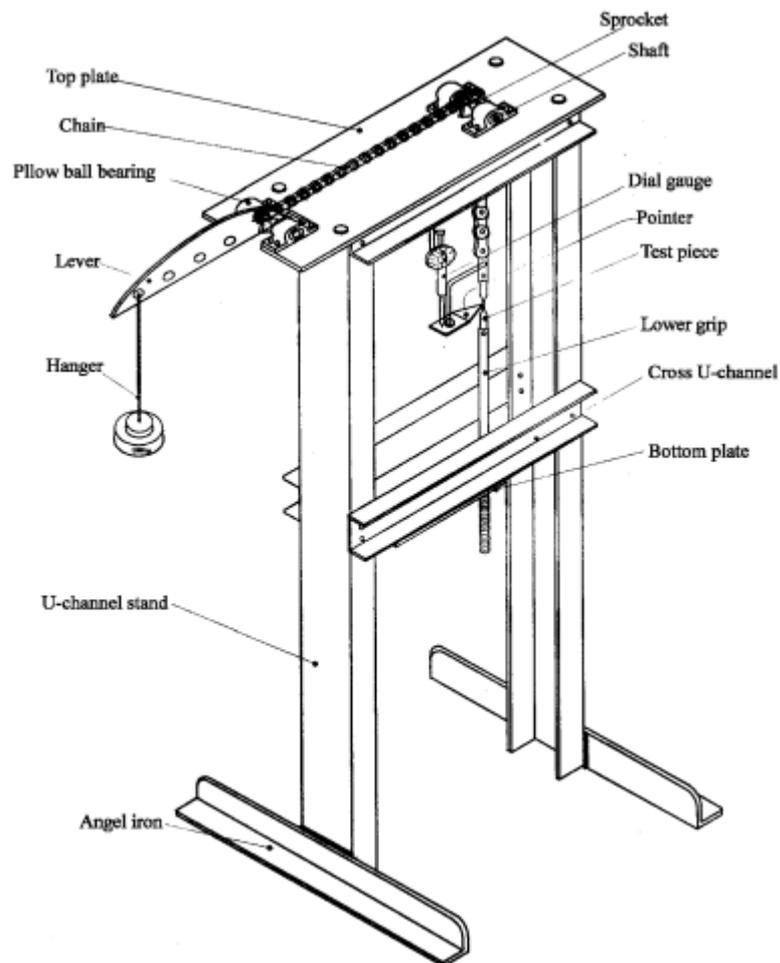


Figure II. 38 : Machine de test de traction / fluage [43].

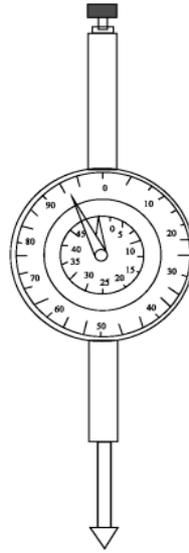


Figure II. 39 : Compateur à cadran [43].

Chapitre III

Description de l'appareil réalisé

III.1 Description de la machine de fluage

En général, les essais de fluage sont réalisés sur des machines à charge constante utilisant la force de pesanteur : une masse est fixée à l'éprouvette ou, bien souvent, pour les essais de longue durée, un système d'amplification de la charge à bras de levier est utilisé.

Notre dispositif de fluage est composé d'un bâti et d'un bras de levier relié à une chaîne relié à un mors mobile sur lequel l'éprouvette est fixée dans le mors fixe et d'un four électrique et thermorégulateur (fig. III.1).

La machine de fluage que nous avons réalisé est d'une capacité de 268.51 N à levier à force constante. La force est imposée par un ensemble de masses calibrées via un levier qui permet d'appliquer une multiplication de l'effort d'un facteur 10.83.

L'allongement de l'éprouvette est mesuré par un système d'acquisition lié à un ordinateur.

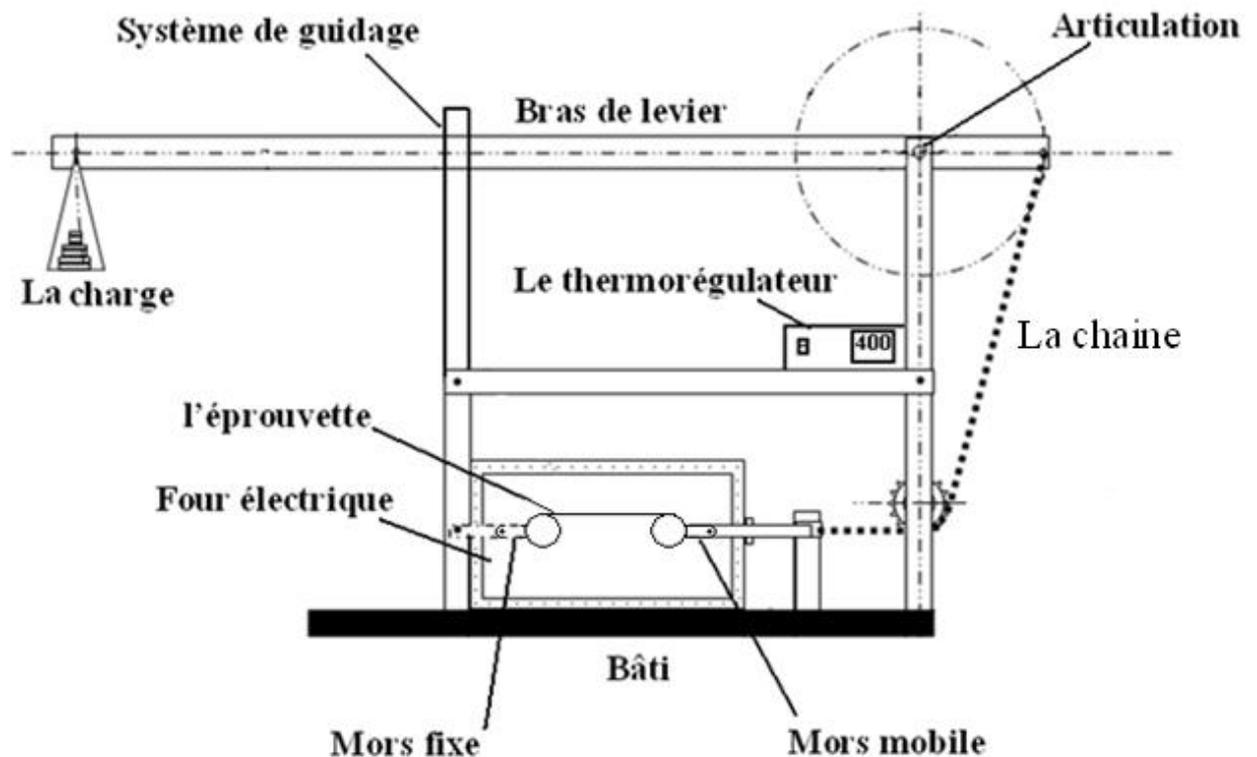


Figure III.1 : Schéma d'une machine de fluage

III.2 Conception de la machine

Notre but consiste à réaliser une machine de fluage qui servira comme un support d'équipement pour le laboratoire de recherche des sciences des matériaux. Pour la réalisation de cette machine nous avons procédé tout d'abord à l'établissement de :

- Schéma de principe de l'ensemble.
- Dessin de définition de chaque pièce.
- Dessin d'ensemble de la machine.
- Dessin d'ensemble du four électrique.

Ensuite nous avons choisi un matériau convenable pour chaque élément de la machine suivi d'un calcul de résistance aux différentes sollicitations qui lui sont appliquées.

Finalement nous avons procédé à l'usinage des différentes pièces et ensuite le montage de l'ensemble.

Les constituants de la machine sont :

- Bâti.
- Bras de levier.
- Mors mobile.
- Mors fixe.
- Système de guidage.
- La chaîne.
- Axe et pignon.
- Porte La charges.
- Four électrique.
- Thermorégulateur.

III.2.1 Bâti

Le bâti se compose de deux parties, à savoir la base et le support (Fig. III.2).

III.2.1.1 La base

La base de la machine de fluage qui est composé de cinq pièces essentielle en acier et qui seront présentées successivement.

Les pièces 1 et 2: composent le levier. Il a une longueur de 1000 mm et une section carrée de distance 50×50 mm et une épaisseur de 5 mm. Les deux pièces fabriquées en acier, et forment la base de l'appareil.

Les Pièces 3 et 4, des cornières en acier, de longueur 360 mm et de section $50 \text{ mm} \times 50$ mm et une épaisseur de 5 mm. Les pièces 3 et 4, sont montées sur les pièces 1 et 2.

La pièce 5 : est une cornière en acier, de longueur 360 mm et de section $50 \text{ mm} \times 50$ mm, La pièce 5 est montée sur les pièces 1 et 2.

III.2.1.2 Le support

Le support de l'appareil de fluage est composé de six pièces essentielles en acier (Fig. III.2).

Les pièces 1 et 2 : de longueur 1100 mm et de section carré 50×50 mm fixées verticalement sur la base, La fonction des pièces 1 et 2 est de porter le bras de levier.

Les pièces 3 et 4 : fabriquées en cornières de longueur 1100 mm et de section carrée 50×50 mm fixées verticalement sur la pièce 5. Les pièces 3 et 4 ont deux rôles :

- Porteur du bras de lever, en mouvement et au repos.
- Guidage du bras de lever en mouvement.

Les pièces 5 et 6 : aussi fabriquées de deux cornières de longueur 805 mm et de section carré de distance 30×30 mm et fixé horizontalement sur et entre 1,2 et 3,4 fonction de les pièces 5 et 6 rigidité de l'appareil et portage du thermocouple.

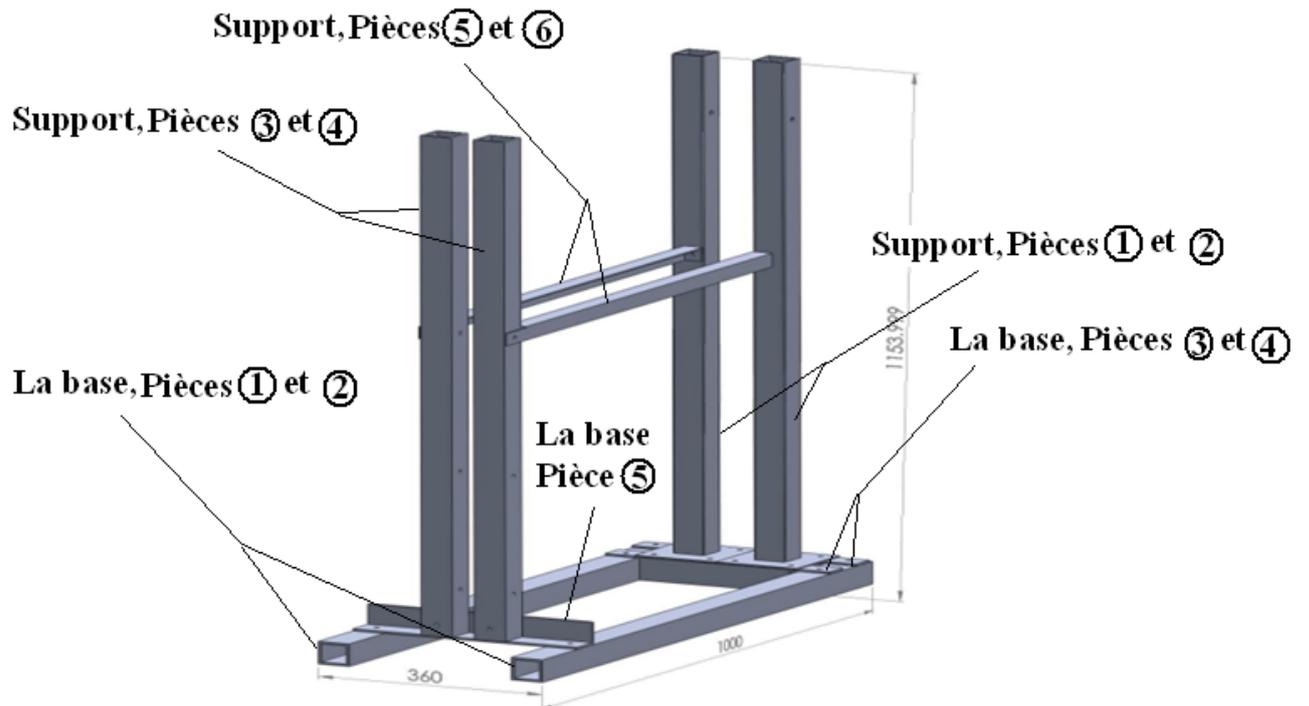


Figure III.2 : Dessin d'ensemble du bâti

III.2.2 Bras de levier

C'est un élément important dans le dispositif, fabriqué en acier, de longueur 2200 mm et de section rectangulaire de 60x30 mm. L'intérêt du bras de levier (Fig. III.3) est de multiplier l'effort (force) appliqué sur l'éprouvette pendant l'essai de fluage.



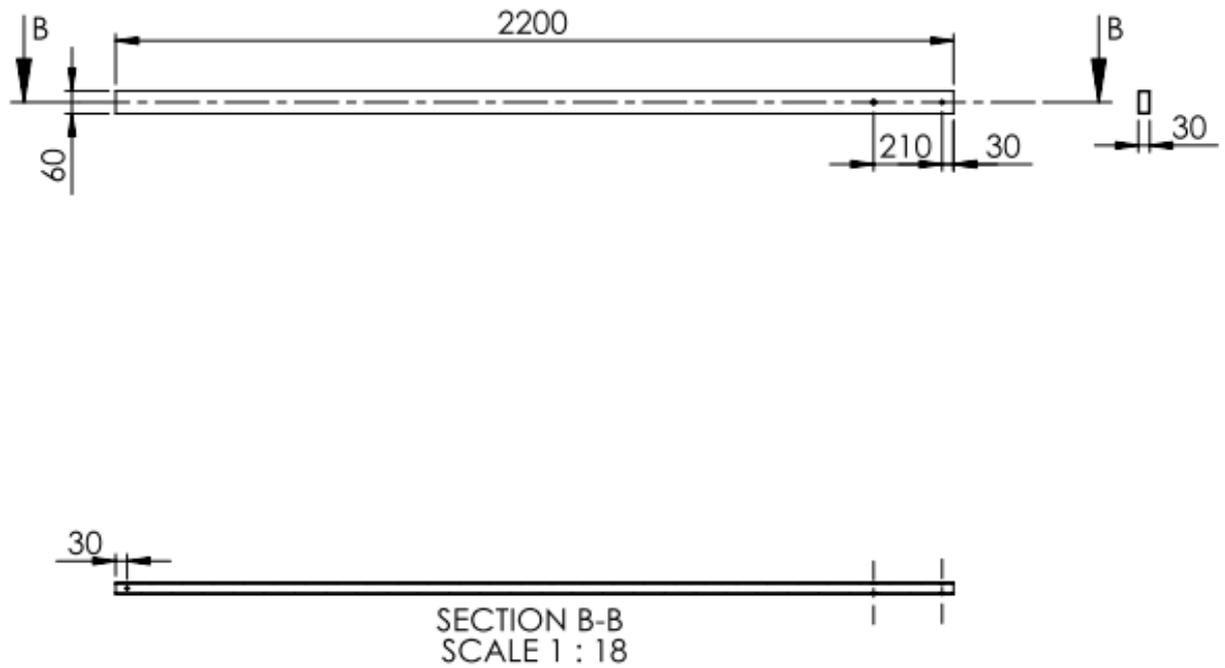


Figure III.3 : Dessin de définition de bras de levier

III.2.2 Mors mobile et mors fixe

Les deux mors représentant les éléments les plus importants dans le dispositif (Fig. III.4), Ils sont en acier traité, la fonction des mors est la fixation de l'éprouvette, Ils sont composés de deux pièces (une tige et un anneau).

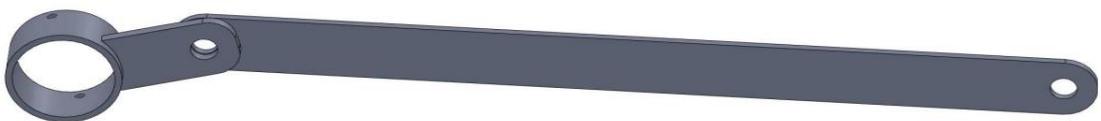


Figure III.4 : Dessin de mors mobile et fixe

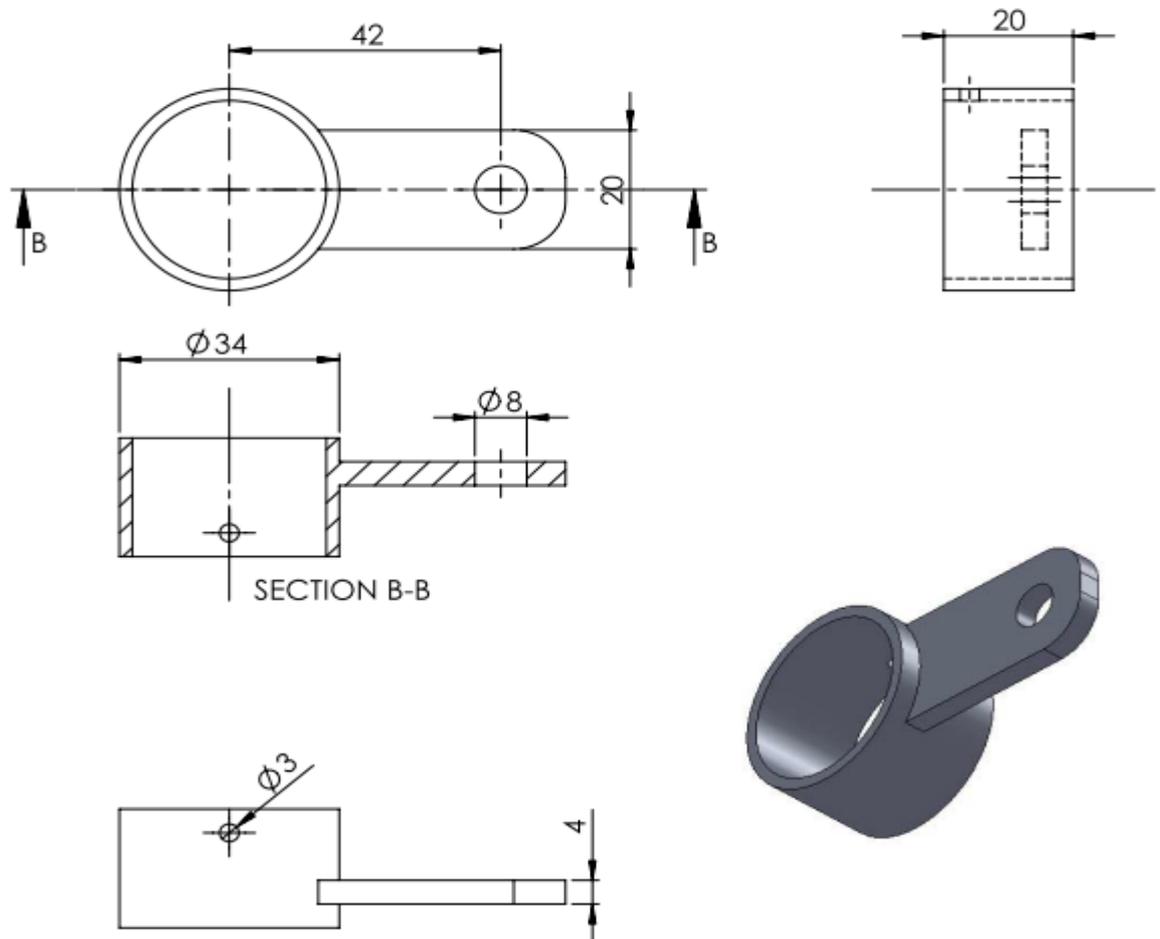


Figure III.5 : Dessin de définition des anneaux des mors mobile et fixe

III.2.4 Axe et pignon

Axe

Fabriqué en acier et usiné sur la machine de tour parallèle. La fonction de cet axe est la transmission (Fig. III.6), et de provoquer le mouvement rotatif du système d'acquisition.

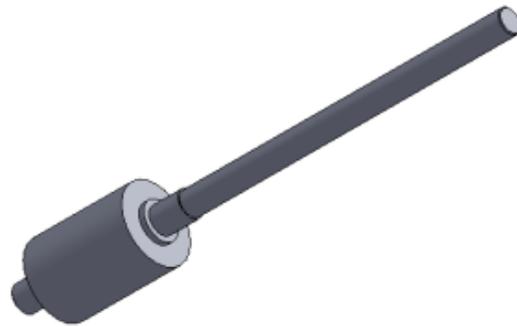
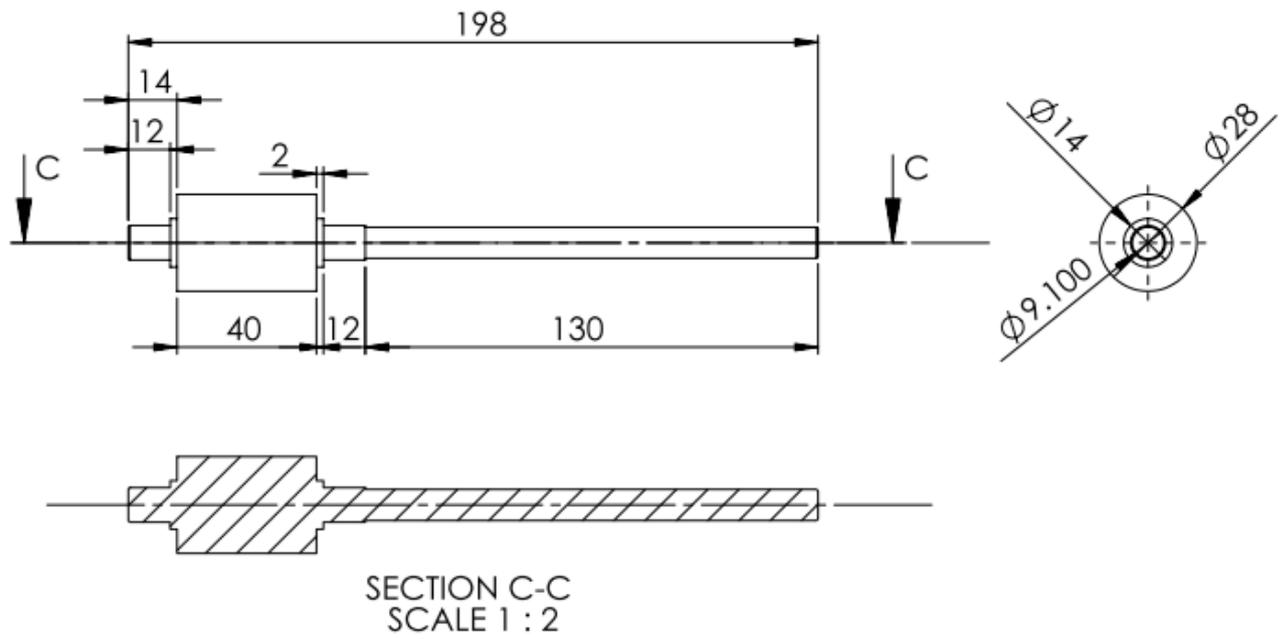


Figure III.6 : Dessin de définition d'axe de transmission

Pignon

Le Pignon (Fig. III.7) est fixé sur l'axe pour engrainer avec la chaîne de traction pour transformer le mouvement de translation de l'éprouvette en mouvement de rotation.

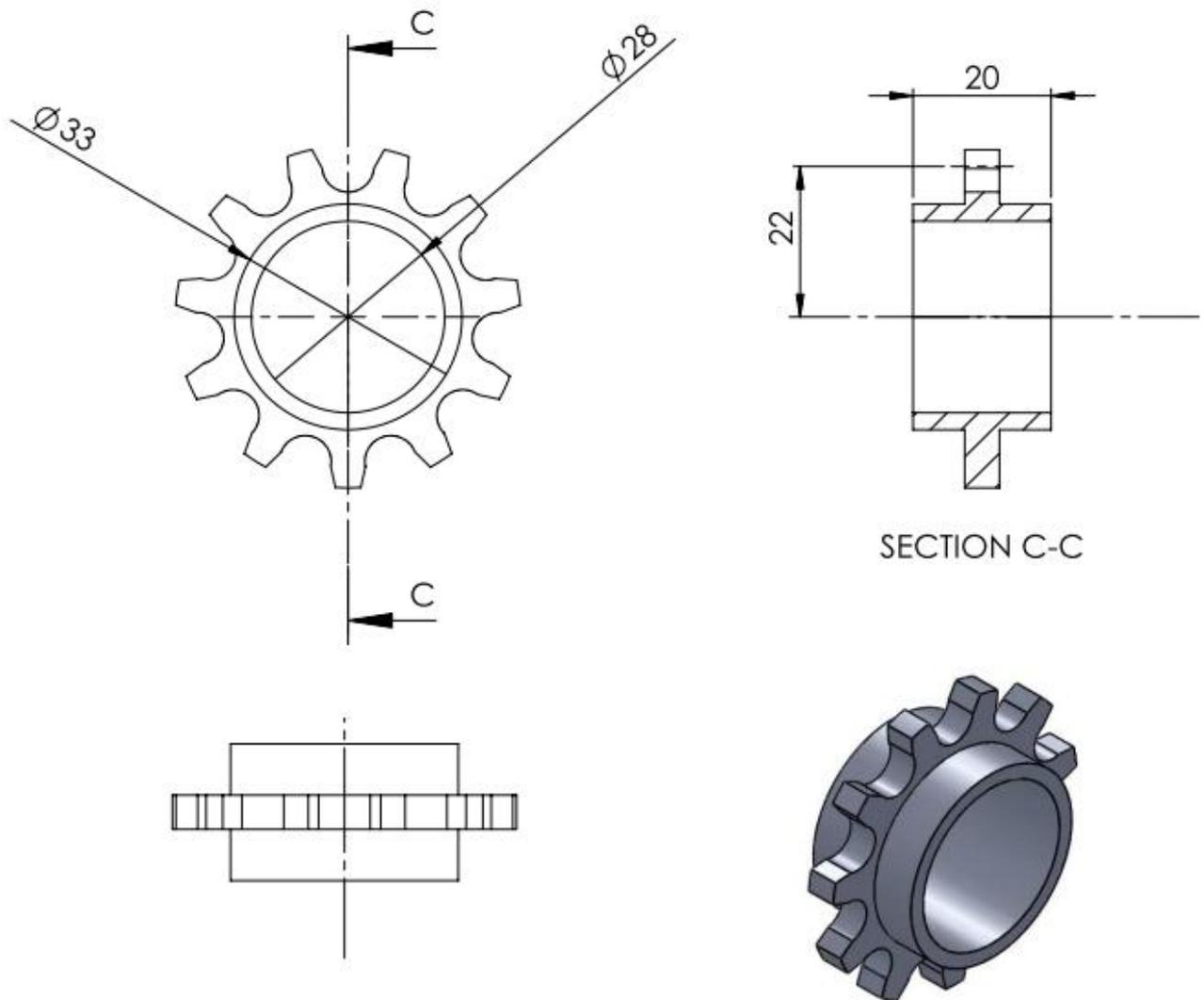
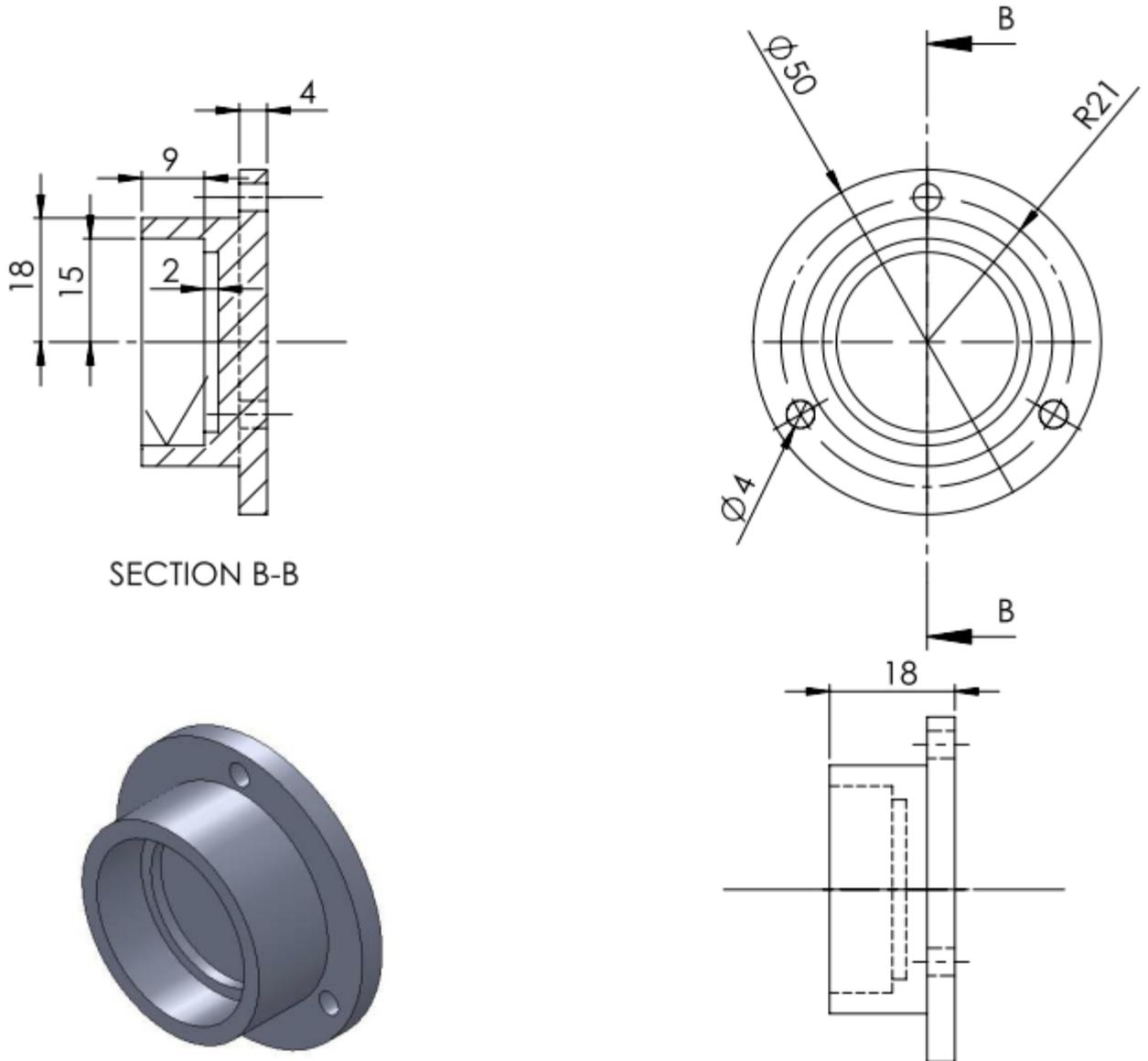


Figure III.7 : Dessin de définition de pignon

III.2.5 Couvercle de roulement

Couvercle (Fig. III.8) en acier, réalisé sur le tour parallèle, pour une bonne localisation de roulement.



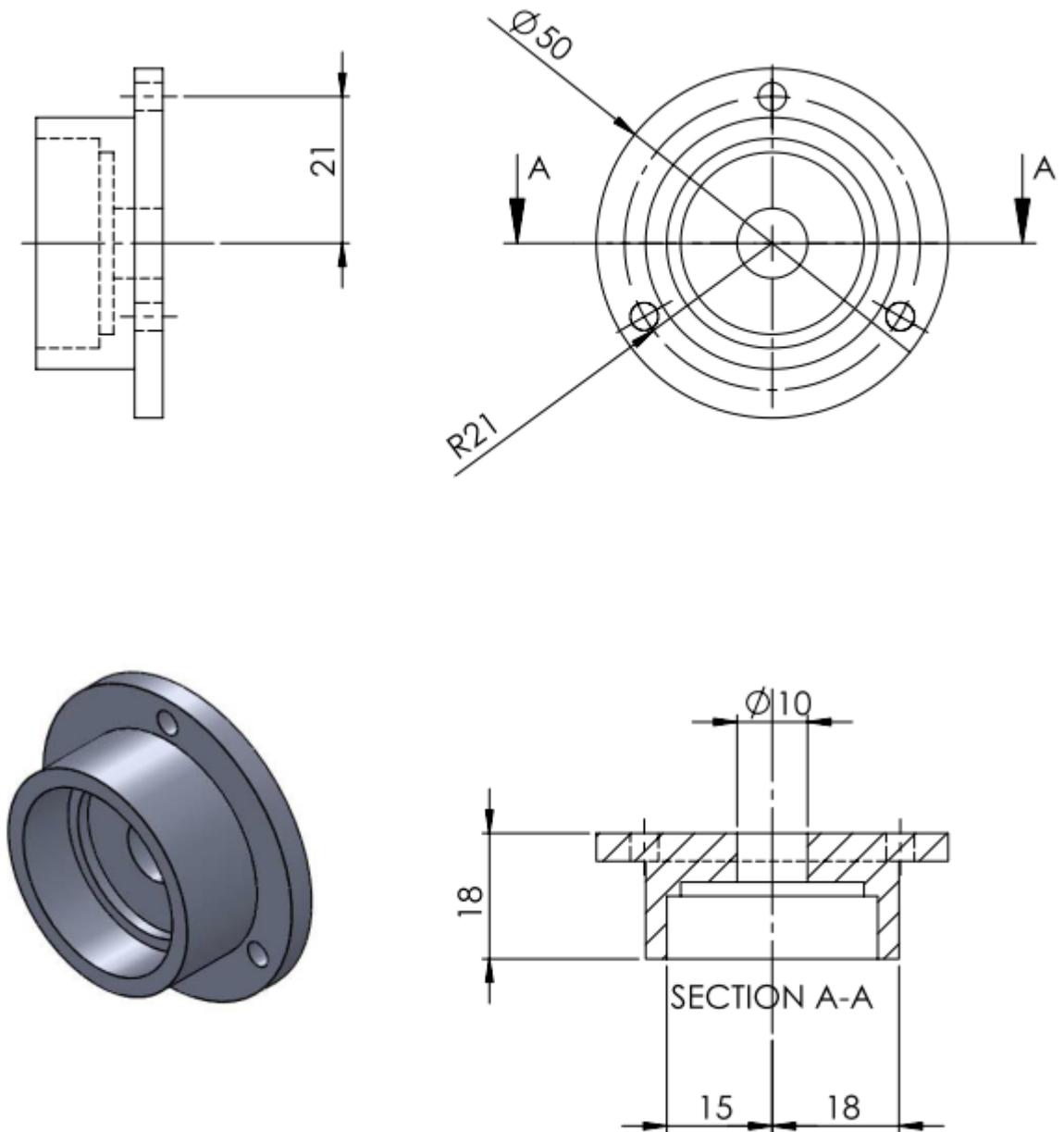


Figure III.8 : Dessin de définition de couvercle

III.2.6 Roulement

Le roulement (Fig. III.9) est un type BC (roulement a une rangée de billes, a contact radial) et qui résiste forces radiales.

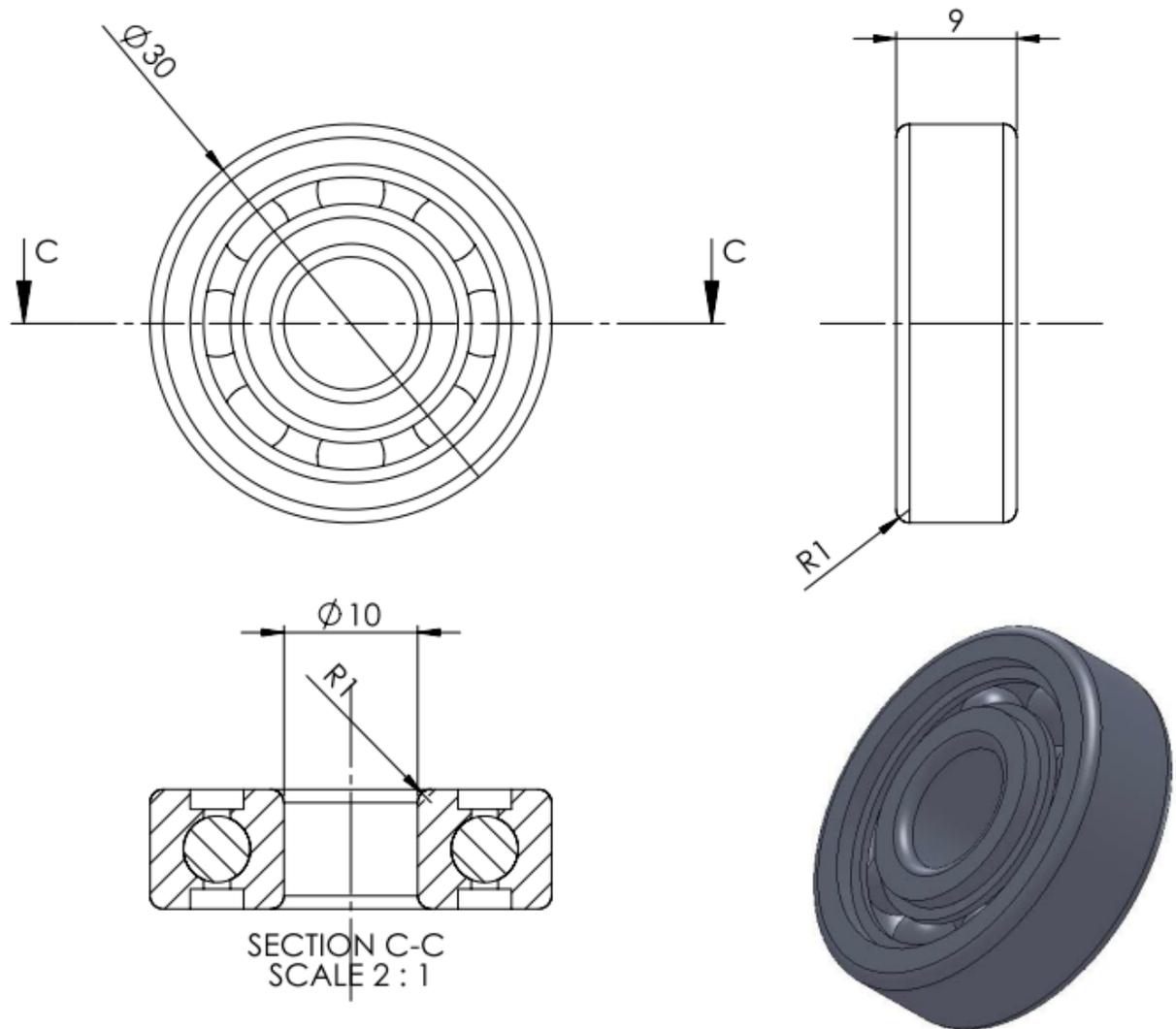


Figure III.9 : Dessin de définition de roulement

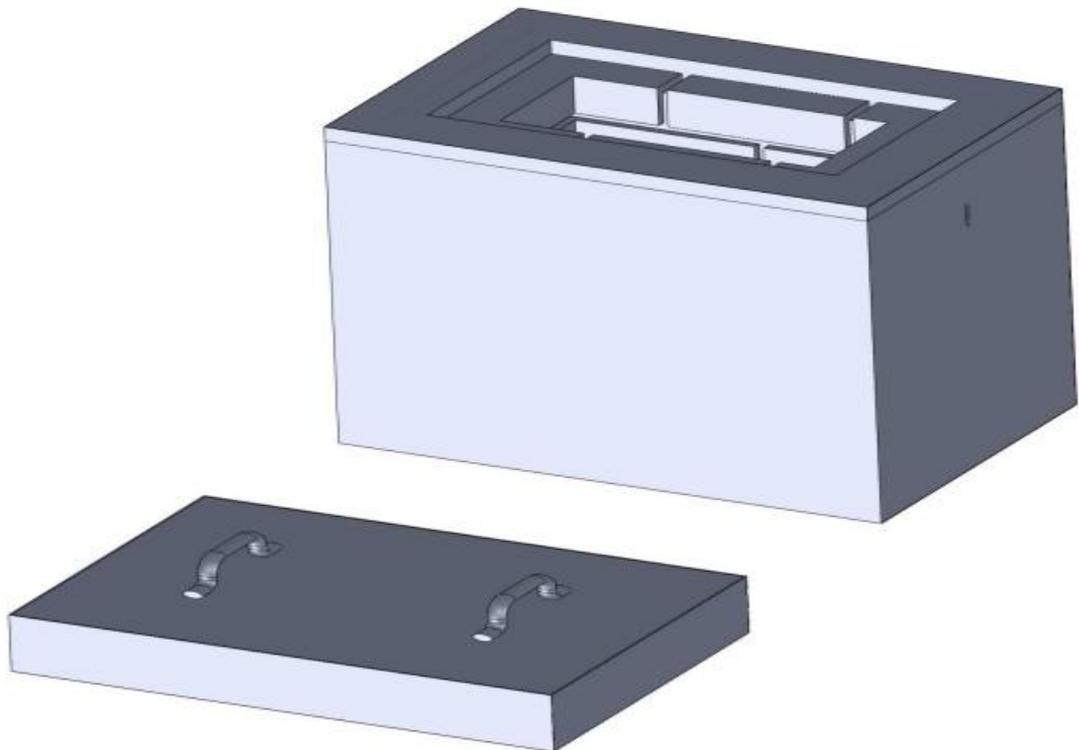
III.2.7 Four électrique

Pour effectuer des essais de fluage, nous avons conçu un four électrique (Fig. III. 10) qui s'adapte selon nos objectifs expérimentaux.

Les constituants du four électrique sont:

- Résistance électrique.
- Briques réfractaires.
- Ciment réfractaires.
- Boitier en acier.
- Line de verre.
- Thermorégulateur.

..



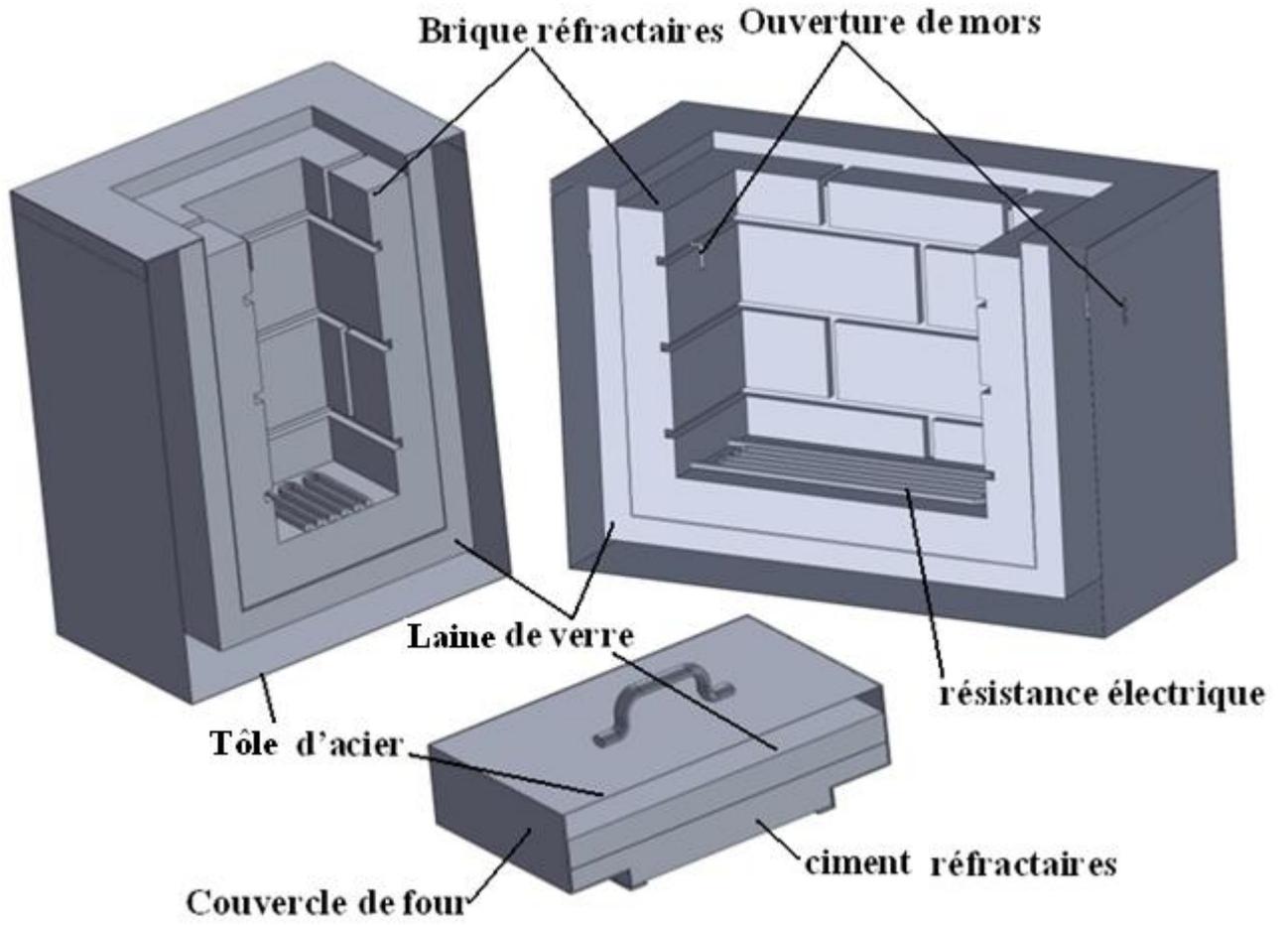


Figure III.10 : Dessin de four

III.2.7.1 Conception du four

Les fours à résistances (Fig. III.11) comprennent essentiellement:

- Une chambre de chauffe fabriquée en brique réfractaire collé par le ciment réfractaire.
- Une enceinte intérieure en tôle d'acier pour supporter la brique réfractaire.
- Un matériau isolant (laine de verre) placé entre l'enceinte intérieure et l'enceinte extérieure.
- Le vide entre l'enceinte extérieure et le matériau isolant pour diminuer la perte de chaleur.
- Une carcasse, métallique, assurant la rigidité du four.
- Des résistances électriques constituant le corps de chauffe et leur dispositif d'alimentation.
- Un système de régulation de la température (thermorégulateur).



Figure III.11 : Le four électrique

III.2.8 Thermorégulateur

Le contrôle de température effectué par un thermorégulateur avec une plage de travail de 0 à 400 °C et un thermocouple de type J avec une précision de $\pm 2^\circ\text{C}$ placé au contact de l'éprouvette.



Figure III.12 : Thermorégulateur

III.2.9 Système d'acquisition

Le système fonctionne pour transformer le mouvement de rotation (Le mouvement de l'échantillon à la traction), les signaux et les renvoie à l'ordinateur qui prouve ces signaux comme suit <1 1> <1 2> <1 3> <19006 1452>, Les secondes sont à gauche et à droite représentent la déformation.

III.3 Etude de la résistance

III.3.1 Etude de la résistance à la flexion du bras de levier

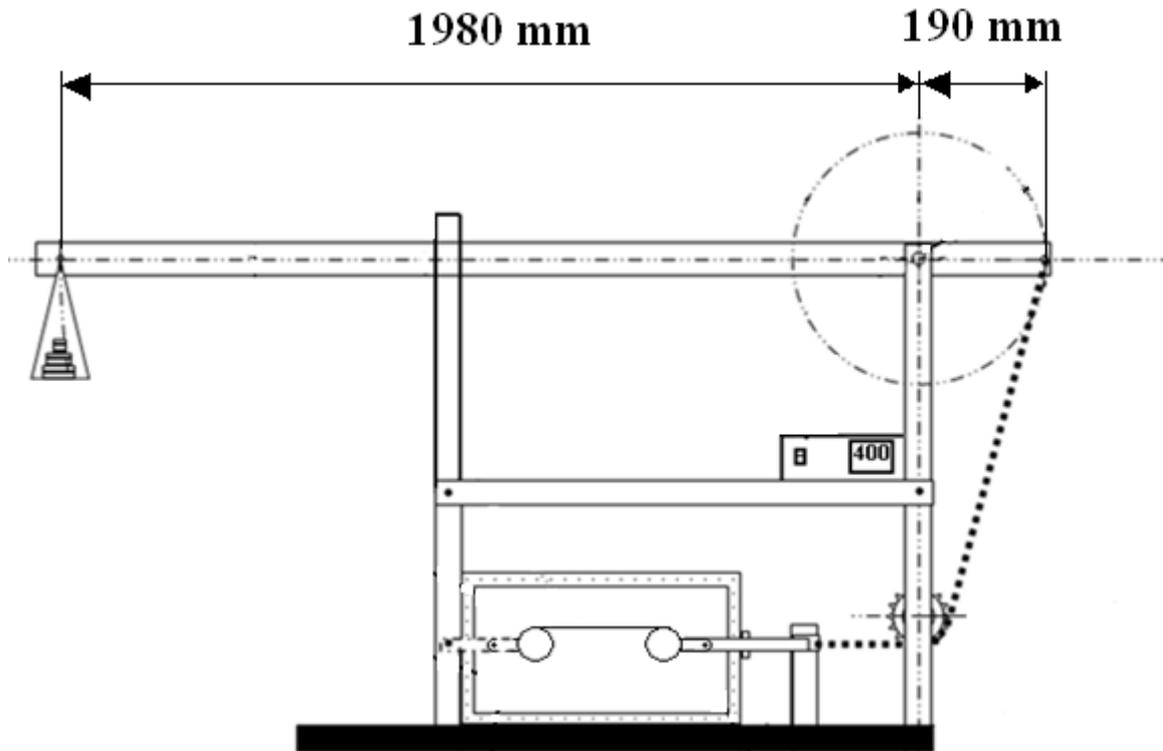
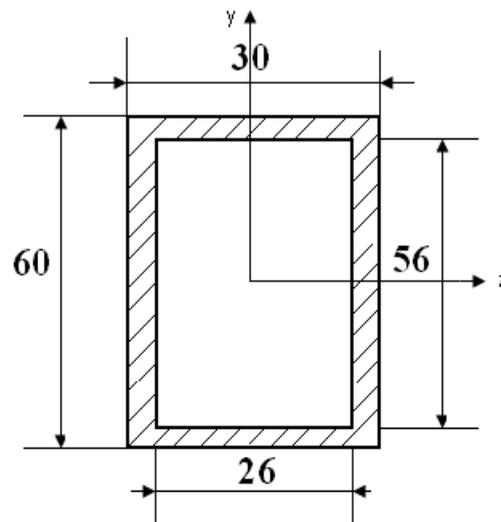


Figure III.13 : Schéma de la machine de fluage



Section A-A

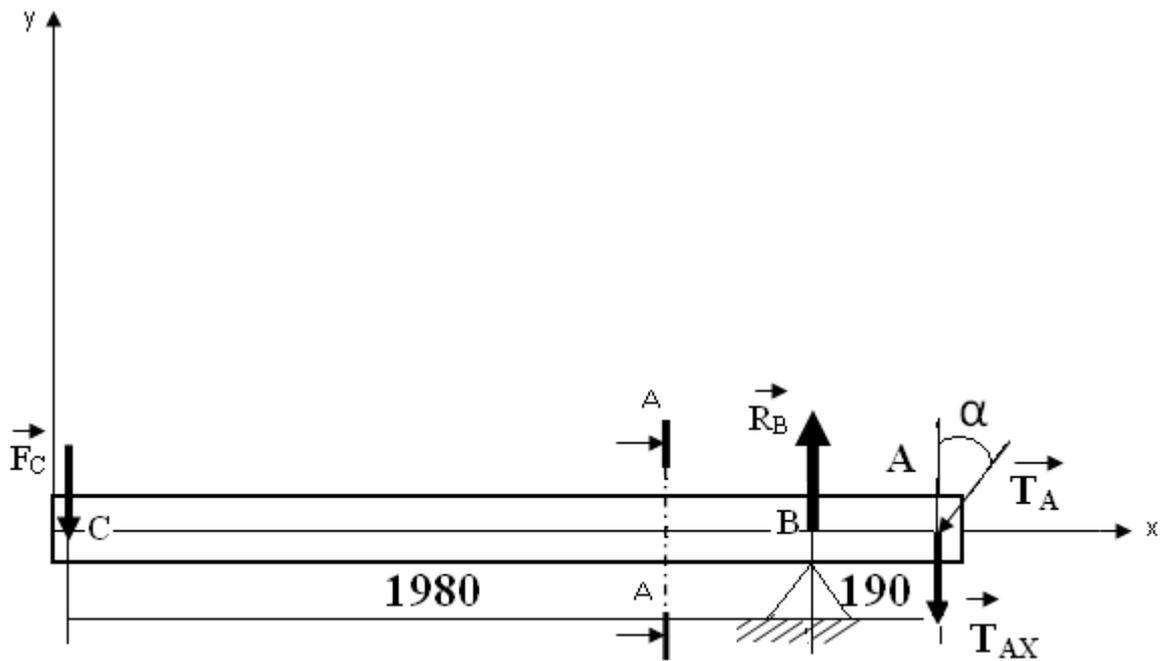


Figure III.14 : Schéma représentatif des forces appliquées sur le bras de levier

III.3.2 La condition de résistance de bras de levier:

$$\sigma \leq \sigma_p \quad (\text{III.1})$$

$$\sigma_p = 100 \text{ N/mm}^2 \quad [44].$$

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{I_{GZ}/v} \quad (\text{III.2})$$

Calcul de moment fléchissements maximal M_{\max}

Etudions la zone BC :

$$1980 \geq X \geq 0$$

$$M_{(x)} = -F_c \cdot x$$

$$X = 0, M_{(0)} = 0$$

$$M_{\max} = F_c \cdot 1980$$

Calcul du moment quadratique

$$I_{GZ} = \frac{B H^3}{12} - \frac{b h^3}{12} \quad (\text{III.3})$$

$$I_{GZ} = 159498.66 \text{ mm}^4$$

$$v = \frac{H}{2} = 30$$

$$\sigma = \frac{F_c \cdot 1980}{159498.66/30}$$

$$\frac{F_c \cdot 1980}{159498.66/30} \leq 100$$

$$F_c \leq 27 \text{ Kg}$$

D'après (Fig. III.14), Le bras de levier est sollicité par une flexion sous l'action de trois forces T_{AX} , R_B , F_C , tel que la charge $F_C = 268.5 \text{ N}$. (sous une masse maximal = 27 kg).

Nous pouvons calculer la force T_A et la réaction R_B comme suit :

$$\Sigma F_{\text{ext}} = 0 \text{ ----- (1).}$$

$$\Sigma M_{\text{f ext/B}} = 0 \text{ ----- (2).}$$

$$\text{De (1), nous pouvons écrire } \vec{T}_{AX} + \vec{F}_C - \vec{R}_B = \vec{0}.$$

$$\text{Par projection des forces sur l'axe y on aura } R_B = T_{AX} + F_C \text{ -----(3).}$$

$$\text{De (2), } M\vec{T}_{AX/B} + M\vec{R}_B/B + M\vec{F}_C/B = 0. \text{ ----- (4)}$$

$$T_{AX} \cdot 190 - (F_C \cdot 1980) = 0.$$

$$T_{AX} = 2798 \text{ N, donc de (3) on trouve } R_B = 3066.5 \text{ N}$$

Effort tranchant

Etudions la zone AB:

$$190 \geq X \geq 0$$

$$T_1 = -T_{AX} = -2798 \text{ N}$$

Etudions la zone BC:

$$2170 \geq X \geq 190$$

$$T_2 = -T_{AX} + R_B = -2798 + 3066.5 = 268.5 \text{ N.}$$

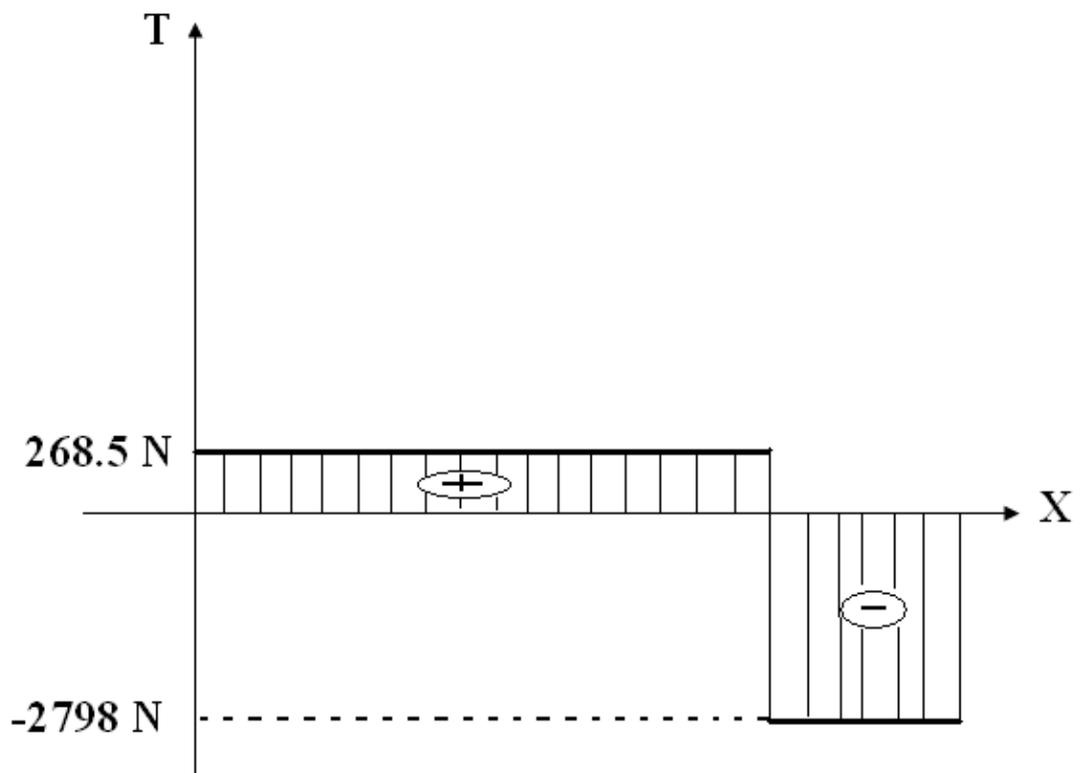


Figure III.15 : Diagramme d'effort tranchant.

Moment fléchissant

Etudions la zone AB:

$M_{fl_{AB}} = T_{AX} \cdot X$, si $X = 0$ donc $M_{fl_{AB}} = 0$, si $X = 190$ donc

$M_{fl_{AB}} = 531620 \text{ N.mm}$,

Etudions la zone BC:

$M_{fl_{BC}} = -F_C (X-2170)$, si $X = 190$ donc $M_{fl_{BC}} = 531630 \text{ N.mm}$,

si $X = 2170$ donc $M_{fl_{BC}} = 0 \text{ Nmm}$

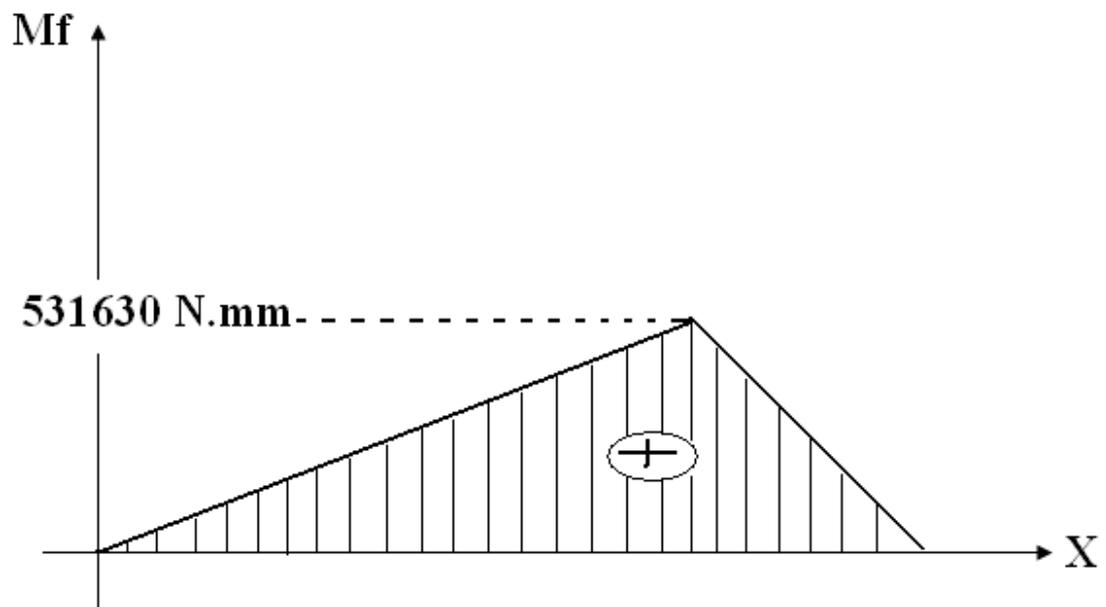


Figure III.16 : Diagramme de moment fléchissant.

III.3.3 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de l'articulation:

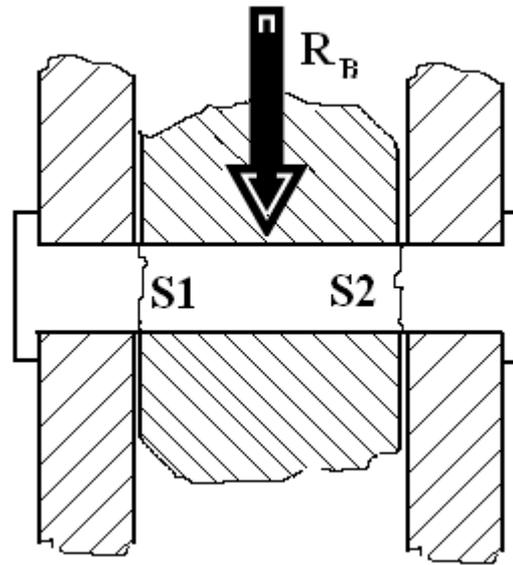


Figure III.17 : Schéma représentatif la force appliquée sur l'axe d'articulation de bras de levier.

A partir de l'effort de réaction R_B calculé auparavant nous pouvons vérifier la résistance au cisaillement de l'axe de l'articulation :

La condition de résistance d'axe d'articulation

La matière d'axe acier de $R_e = 500 \text{ N/mm}^2$

$$\frac{T}{S} \leq \tau_p \text{ d'où } \frac{T}{\tau_p} \leq S \quad (\text{III.4})$$

Remarquons qu'il ya deux sections cisillées, donc

$$T = \frac{R_B}{2} \text{ avec } \tau_p = \frac{\tau_e}{s} \quad (\text{III.5})$$

$$R_B = 3066.5 \text{ N}$$

$$\tau_e = 0.7 R_e \quad (\text{III.6})$$

Le coefficient de sécurité $s = 5$, donc $\tau_p = \frac{350}{5} = 70 \text{ N/mm}^2$

Avec $S = \pi r^2$, la relation (III.) s'écrit :

$$S \geq \frac{R_B}{2 \tau_p} \quad \text{Donc } R \geq \frac{R_B}{2 \pi \tau_p}$$

$$R \geq \sqrt{\frac{3066.5}{2 \cdot 3,14 \cdot 70}} = 2.64 \text{ mm}$$

Le diamètre d'axe d'articulation $\varnothing = 8 \text{ mm}$ pour résiste bien au cisaillement.

III.3.4 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de transmission:

La condition de résistance d'axe transmission

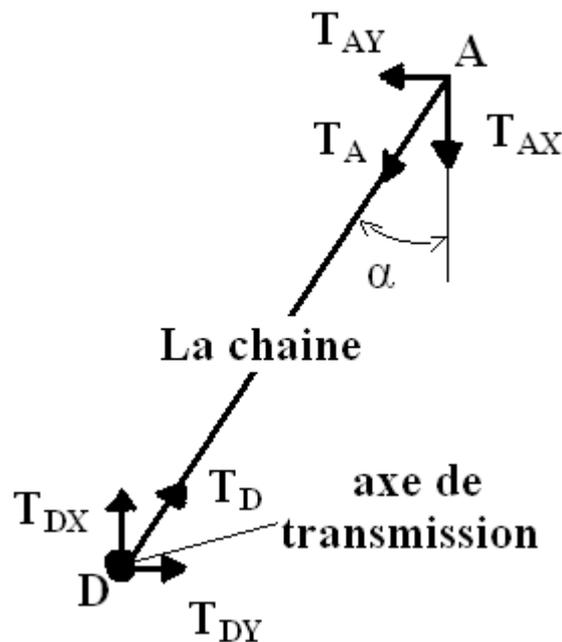


Figure III.18 : Schéma représentative de force applique sur l'axe transmission

Le même condition et le même cas d'axe d'articulation mais la force de cisaillement différent.

$$\frac{T}{\tau_p} \leq S$$

$$T_{AX} = 2798 \text{ N}$$

$$T_{DX} = 2798 \text{ N}$$

Le coefficient de sécurité $s = 3$, donc $\tau_p = \frac{\tau_e}{s} = \frac{350}{3} = 70 \text{ N/mm}^2$

$$R \geq \sqrt{\frac{2798}{2 \cdot 3,14 \cdot 70}} = 2,52 \text{ mm}$$

Le diamètre d'axe de transmission $\varnothing = 8 \text{ mm}$ pour résiste bien au cisaillement.

III.3.5 Etude de la résistance au cisaillement de la vis d'anneau :

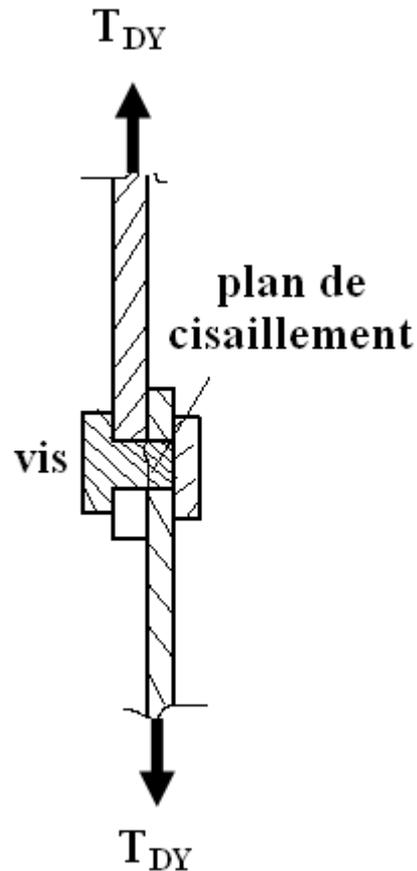


Figure III.19 : schéma représentative de force applique sur les vis des anneaux

Comme la vis 15 est soumise au cisaillement sous l'effort T_{DY} calculé Auparavant, la condition de résistance s'écrit:

$$\frac{T}{S} \leq \tau_p \text{ d'où } \frac{T}{\tau_p} \leq S$$

$$\tau_p = \frac{\tau_e}{s}$$

$$T_{DY} = 901 \text{ N}$$

le coefficient de sécurité $s = 5$

$$\tau_e = 0.7\sigma_e$$

La vis est en acier mi- dur alors $\sigma_e = 500 \text{ N/mm}^2$.

$$\tau_e = 350 \text{ N/mm}^2.$$

$$\text{donc } \tau_p = \frac{\tau_e}{s} = \frac{350}{5} = 70 \text{ N/mm}^2$$

Avec $S = \pi r^2$, la relation (III.) s'écrit :

$$S \geq \frac{T_{DY}}{\tau_p} \text{ Donc } R \geq \frac{T_{DY}}{\pi \tau_p}$$

$$R \geq \sqrt{\frac{901}{3,14 \cdot 70}} = 2.02 \text{ mm}$$

Le diamètre de vis des anneaux $\emptyset = 6 \text{ mm}$ pour résiste bien au cisaillement

Chapitre IV

Résultats et interprétations

IV.1 Introduction

L'objectif de cette partie d'étude est tester notre appareil d'essai de fluage sur des fils de cuivre.

IV.2 Matériau étudié

Le matériau étudié dans ce mémoire est le cuivre à l'état tréfilé et aussi tréfilé puis recuit (figure IV.1), fabriqués par l'entreprise des industries du câble de Biskra (EN.I.CA.B), qui dispose d'un atelier de tréfilage et de câblage spécialisés dans la fabrication des fils et câbles nus de basse, moyenne et haute tension. L'entreprise fabrique des fils de cuivre, d'aluminium et d'alliage d'aluminium de propriétés bien définies. Les tableaux IV. 1 et IV. 2 rassemblent les propriétés de cuivre.

| Propriétés | Valeurs |
|---------------------------|---|
| Densité | 8.9 g/cm ³ |
| Température de fusion | 1083 °C |
| Résistivité électrique | $\leq 0.017241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ |
| Conductibilité électrique | $\geq 58.0 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ |
| Conductivité thermique | 385.2 W/K.m |

Tableau IV.1: Propriétés physiques du fil machine de cuivre

| Propriétés | Valeurs |
|--------------------------------|-----------|
| Résistance à la traction (MPa) | 200 - 240 |
| Allongement à la rupture (%) | ≥ 35 |

Tableau IV.2 : Propriétés mécaniques du fil machine de cuivre

IV.3 Tréfilage du cuivre et de l'aluminium

Le tréfilage est la réduction progressive de la section de fil façonné à froid par le passage du fil à travers des filières de diamètres décroissants.

L'entreprise fabrique des fils tréfilés de diamètre indiqués dans le tableau IV. 3

| Diamètre de fil (mm) | Taux de réduction (%) |
|----------------------|-----------------------|
| 8 | 0 |
| 6 | 25 |
| 4.8 | 40 |
| 4 | 50 |
| 3.2 | 60 |
| 2 | 75 |
| 1.8 | 77.5 |
| 1.2 | 85 |

Tableau IV.3 : Les taux de réduction des fils de cuivre tréfilés à l'ENICAB Biskra

IV.3.1 Technique de recuit de fil tréfilés

Le recuit est en continu chauffage électrique dans les poulies du recuiseur de la tréfileuse. Pour notre étude on a appliqué des recuits isothermes à 500 °C sur le fil tréfilé de diamètre $\varnothing=1.8$

IV.3.2 Eprouvettes forme et dimension

L'éprouvette est obtenue à partir par d'un prélèvement des fils de cuivre tréfilés de diamètres 1,8 mm et d'une longueur totale L_t de 560 mm et de longueur initiale L_0 de 100 mm (Fig. IV.1).



Figure IV.1 : Eprouvettes des fils de cuivre tréfilé.

IV.4 Recuit

IV.4.1 Définition

Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

IV.4.2 But

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité (résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture).

Le recuit a pour but de :

- Diminuer la dureté d'un trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes

IV.5 Résultats et discussions

Pour mettre en évidence l'effet des traitements thermiques préalable, on a pris considération, les deux paramètres et qui sont la température de traitement thermique et le temps de recuit.

Ces essais sont effectués sur des fils de cuivre tréfilé à froid, de taux de réduction $\varepsilon=77.5\%$ de diamètre ($\varnothing=1.8\text{mm}$) $R_e=280\text{ MPa}$ de composition (tableau IV.4).

| Eléments | Teneur (%) |
|-----------|---------------------|
| Cu + Ag | ≥ 99.9 |
| O 2 | < 0.04 ou 400 PPM |
| Bismuth | max 0.001 |
| Antimoine | max 0.002 |
| Arsenic | max 0.002 |
| Fer | max 0.005 |
| Nickel | max 0.002 |
| Plomb | max 0.005 |
| Etain | max 0.002 |
| Soufre | max 0.004 |
| Zinc | max 0.004 |

Tableau IV.4 : Composition chimique du fil machine de cuivre

Ces essais sont effectués sous une seule contrainte et température, mais qui sont appliqués sur les fils préalablement tréfilés et recuit.

IV.5.1 L'effet du temps de recuit

Les figures IV.2 - IV.9 présentent les résultats d'essai de fluage effectués sur des fils tréfilés et aussi sur des fils tréfilés et recuits à une même température. Chaque courbe de fluage est accompagnée par une courbe de vitesse de fluage.

Globalement les différents stades de fluage (primaire, secondaire et tertiaire) sont observés.

Cependant, le comportement lors de l'essai de fluage des fils recuits est totalement différent du fil tréfilé sans recuit.

Ce comportement est dû au phénomène de restauration et recristallisation dans les fils tréfilés et recuit, car les fils tréfilés se sont des fils déformés et qui subissent une recristallisation lors de recuit.

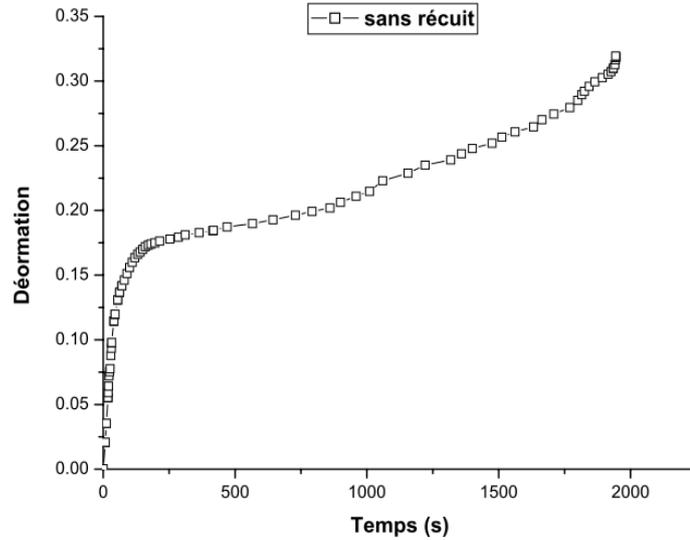


Figure IV. 2 : Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre sans traitement thermique dans la condition ($\sigma=140 \text{ Mpa}$, $T=240^\circ \text{C}$)

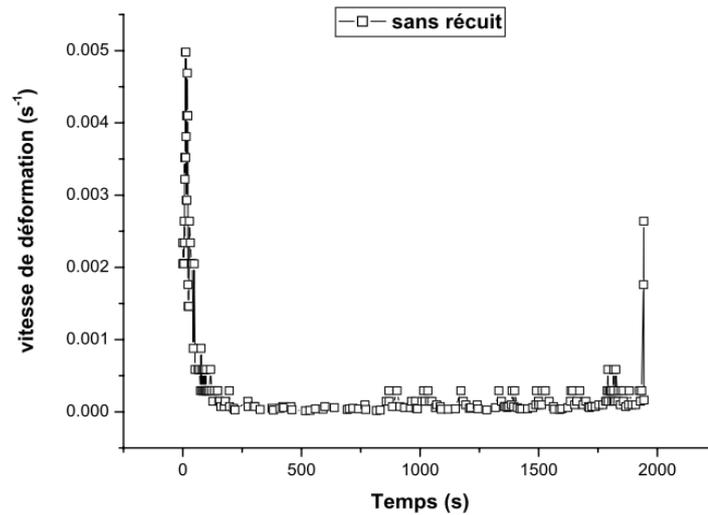


Figure IV. 3: Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre sans traitement thermique dans la condition ($\sigma=140 \text{ Mpa}$, $T=240^\circ \text{C}$)

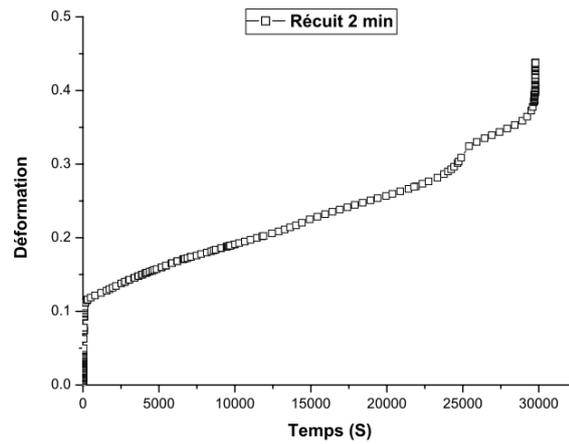


Figure IV.4 : Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

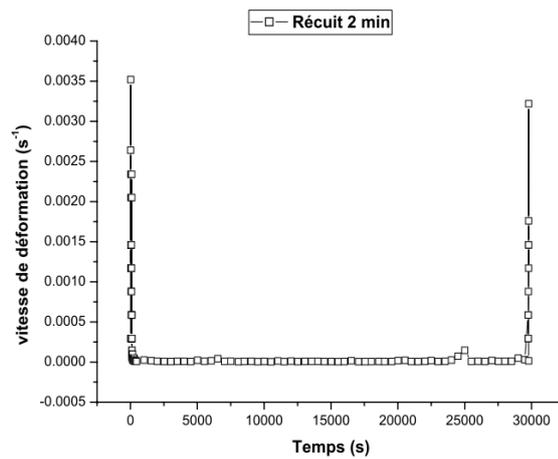


Figure IV.5 : Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

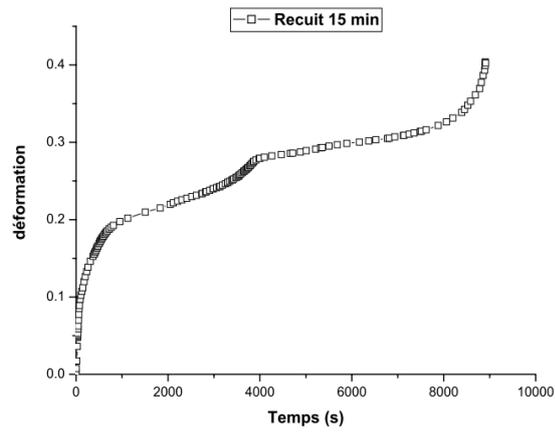


Figure IV.6 : Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

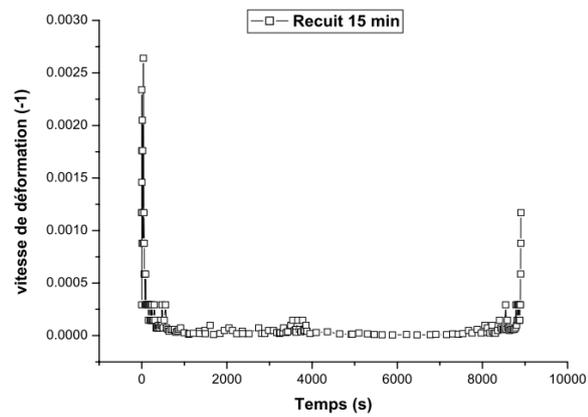


Figure IV.7 : Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

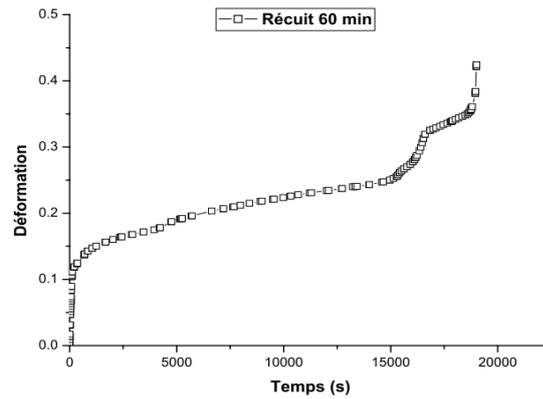


Figure IV.8 : Courbe de fluage de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

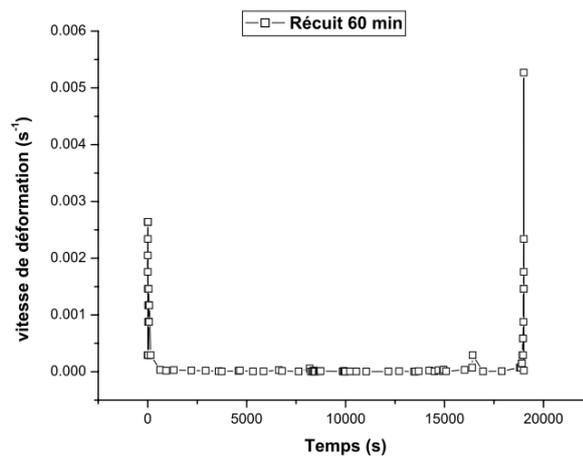


Figure IV.9 : Courbe de vitesse de déformation de fil tréfilé de cuivre à traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

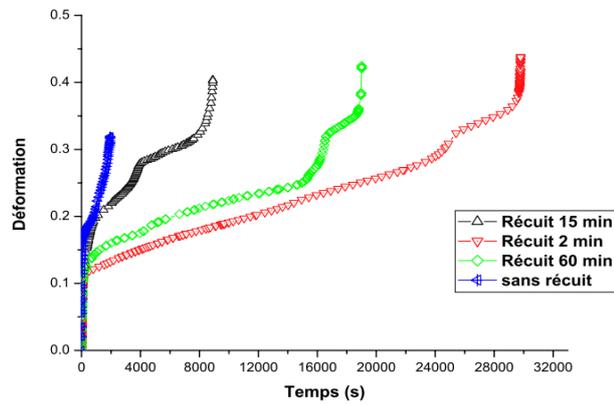


Figure IV.10 : Courbes de fluage de fil tréfilé de cuivre à différents traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

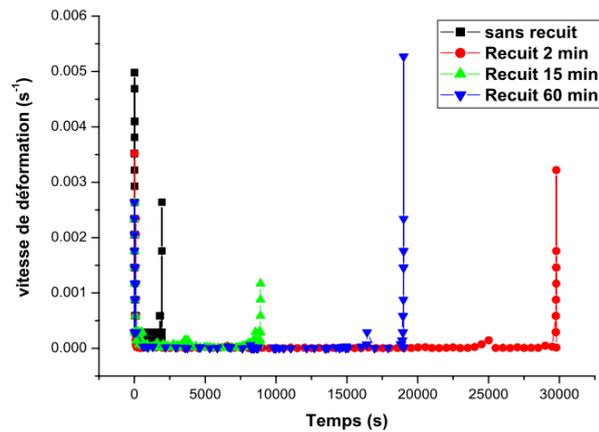


Figure IV.11 : Courbes des vitesses de déformation du fil tréfilé de cuivre à différentes traitement thermique dans la condition ($\sigma=140$ Mpa, $T=240^{\circ}\text{C}$)

Le tableau IV. 6 rassemble les caractéristiques de chaque fil après les quatre essais de fluage.

La durée de vie du fil tréfilé et recuit 2 minutes est la plus grande.

| Traitement (500 °C) | Durée de stade secondaire (S) | $\dot{\epsilon}$ (s⁻¹) | ϵ |
|--------------------------------|--|---|------------------------------|
| Sans recuit | 1397 | 6.10^{-6} | 0.31 |
| Recuit 2 min | 20000 | 7.10^{-7} | 0.43 |
| Recuit 15 min | 5981 | 2.10^{-5} | 0.40 |
| Recuit 60 min | 12565 | 7.10^{-7} | 0.42 |

Tableau IV.5 : Influence du recuit sur la dépendance de la vitesse de fluage, la déformation et la durée de stade secondaire

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire de magister était la réalisation d'un appareil d'essai de fluage.

L'appareil réalisé est composé d'un système de chauffage. Ce système est basé sur un four électrique horizontal qui permet d'effectuer des essais de fluage à différentes températures. De même, un système d'acquisition des données de chaque expérience en tant réel a été aussi réalisé, c'est-à-dire l'enregistrement automatique de l'allongement de l'éprouvette en fonction du temps.

La position horizontale du four nous a facilité d'effectuer des essais de fluage à haute température. Cette température est homogène dans l'enceinte du four.

D'autre part, des essais de fluage sur des fils de cuivre ont été aussi réalisés afin de confirmer la fiabilité de l'appareil. Des courbes de fluage ont été obtenues et qui ressemblent aux courbes théoriques. Les différents stades de fluage ont été observés, c'est-à-dire le stade primaire, secondaire et tertiaire.

Références bibliographiques

- [1] I. Ammara, Micro-structures des matériaux, Ecole de technologie Supérieure, ed Marseille, (2009).
- [2] I.Lakhtine, Métallographie et traitements thermiques des métaux, édition Mir, (1982).
- [3] A. Pineau, "Propriétés physico-chimiques des matériaux," université Paris-sud, (2000).
- [4] L. B. A. Begat, G. Bellocq, A. Benros, C. Bernez, "Les Défauts Du Réseau Cristallin," (2010).
- [5] M. Dupeux, aide-mémoire science des matériaux, Edition DUNOD, (2005).
- [6] S. Jakani, "Effets des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé," Université Paris sud-Orsay, (2004).
- [7] D. A. Hughes, N. Hansen, Materials Science and Technology, (1991).
- [8] D. A. Hughes, Proceedings of the Sixteenth Riso International Symposium on Material Science 21, Edited by N. Hansen, D. Juul Jensen, Y.L. Liu, B. Ralph, Roskilde, Denmark ed, (2000).
- [9] A. S. M. M. Hatherly Metals Tech, (1979).
- [10] N. Hansen, Scripta Metallurgica and Materialia, (1992).
- [11] D. A. H. R.D. Doherty, F.J. Humphreys, Current issues in recrystallization, vol. A238, (1997).
- [12] C. Perdrix, "Comportement mécanique et évolution structurale de l'aluminium au cours de la déformation à chaud," l'Ecole des Mines de Paris, (1983).
- [13] H. Tsukahara, "Etude thermo-mécanique et microstructurale de l'acier Z10MC18-8. Application au forgeage des frettes," l'Ecole des Mines de Paris, (1995).
- [14] G. Trapied, "Mise en forme du cuivre et des alliages de cuivre," Technique de l'ingénieur M 660, (1995).
- [15] R. B. J. Kesler, H. chauvel, "Génie des matériaux, Edition Casteila," (2001).
- [16] J. MOLIMARD, "Etude expérimentale du régime de lubrifiant en filme mince-application aux fluides de laminage," in Thèse INSA de Lyon, (1999).
- [17] J. P. L. R. N. YU, "Tréfilage des fils cuivreux ultra-fins," Technique de l'ingénieur M 646, (2000).
- [18] C. Levrau, "compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec les savons secs," Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris, (2006).
- [19] P. J. Cunat, "Acier inoxydable, Fabrication," Technique de l'ingénieur M 454, (2000).
- [20] D. François, "Essais mécaniques des métaux, Essais de dureté," Techniques de l'Ingénieur M 123, (1995).

- [21] A. Boudilmi, "étude théorique et expérimentale des essais de dureté pour matériaux massifs et revêtus, Thèse de magister " Université M Boudiaf de M'sila, (2008).
- [22] A. P. G. Doubenski, "Resistance des matériaux," université d'Annaba, (1977).
- [23] A. D. A. Castell, "Technologie, Professionnelle générale, 3ème livre," (1978).
- [24] L. é. d. C. G. Mécanique, guide de travaux pratiques, ed Royaume du Maroc, (2002).
- [25] J. Devalloir, "instrumentation d'un choc CHARPY," Ecole des Mines de Douai, (2002).
- [26] D. François, "Essais mécaniques des métaux, Détermination des lois de comportement," Technique de l'ingénieur M120, (1996).
- [27] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, Student Edition McGraw-Hill, (1976).
- [28] A. S. O. du Roure, A. Buguin, "Ladoux, Force mapping in epithelial cell migration," in Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, (2005).
- [29] A. Nadai, Theory of flow and fracture of solids, Edition McGraw-Hill, (1950).
- [30] L. Saidani, "étude expérimentale du comportement en fatigue des métaux par flexion rotative," in Thèse de magister: Université Med Boudiaf de M'sila, (2007).
- [31] A. P. D. François, and A. Zaoui, "Comportement mécanique des Matériaux," Hermès, (1995).
- [32] T. Billot, "Comportement et endommagement en fatigue et fatigue-fluage à haute température de différents états microstructuraux du superalliage base-nickel Udimet 720," (2010).
- [33] M. T. B. marzouk, influence du molybdène sur la résistance mécanique a haute température des aciers inoxydables du type 18 - 14 et particulièrement sur la tenue au fluage vers 700 °c, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, (1977).
- [34] M. Arnoux, "Etude du comportement en fluage à haute température du superalliage monocristallin à base de nickel MCNG :Effet d'une surchauffe," (2006).
- [35] M. Blétry, "Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux," (2007).
- [36] S. Antoine, "Essai de fluage," Technique de l'ingénieur M140, vol. Vol.M1II, (1995).
- [37] Jacobs, "Engineering materials technology, 3ème édition," éditions Odile, (1997).
- [38] J. P. Poirier, Plasticité à haute température des solides cristallins, Ed. Eyrolles ed, (1976).
- [39] U. F. Kocks, "Realistic constitutive relations for metal plasticity, Materials Science and Engineering," (2001).
- [40] S. Dubiez, "Comportement et endommagement d'un superalliage élaboré par compression isostatique à chaud," in ENSMP, (2003).
- [41] A. Diha, "comportement des fils tréfilés lors de fluage," Thèse de magister, Biskra, (2010).

- [42] L. M. Vitor Luiz Sordi, "Constant Load Creep Data in Air and Vacuum on 2.25Cr-1Mo Steel from 600 °C to 700 °C," Departamento de Engenharia de Materiais, DEMa, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, (2005).
- [43] J. J. Momoh, "development of a Low Cost Mechanically Operated Tensile and Creep Testing Machine," Journal of Engineering and Applied Sciences 3 (6):491-495, 2008, (2008).
- [44] P. Agat and N. Mattera, *Mécanique de soilde*, DUNOD ed, Paris (2004).

Résumé

L'objectif principal de cette étude était la réalisation d'une machine de fluage. La machine réalisée est équipée d'un four électrique et d'un système d'acquisition des résultats. De plus, des tests de fluage ont été aussi effectués et qui ont confirmé la fiabilité de la machine.

ملخص

لقد كان الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو انجاز جهاز خاص بتجربة الزحف. إن الجهاز المنجز مجهز بفرن كهربائي ونظام تسجيل النتائج. بالإضافة إلي ذلك، ولقد تم انجاز بعض تجارب الزحف والتي أكدت صلاحية الجهاز.

Abstract

The main goal of this study was to make a machine for creep tests. This machine is equipped with electric furnace and aquisition system of the results. In addition, some creep tests have been done in this machine which have confirmed a fiability of this machine.