

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU

ⵝⵓⵏⵉⵔ ⵏ ⵓⵏⵉⵎⵓⵏ ⵏ ⵓⵏⵉⵎⵓⵏ

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de Master professionnel en Génie Mécanique

Option: Fabrication Mécanique et productique

Présenté par:

OUALI Omar

KHADIR Samir

THEME

Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution
des caractéristiques d'élasticité, de plasticité et structurales de
l'alliage corroyé 2017A trempé dans l'huile.

Devant le jury composé de:

M ^r .	ZAZI	Nacer	M.C.A en Génie Mécanique	UMMTO	Président
M ^r .	HAKEM	Ahmed	M.A.A en Génie Mécanique	UMMTO	Rapporteur
M ^{me}	MOHELLEBI	Fadila	M.A.A en Génie Mécanique	UMMTO	Examinatrice
M ^r .	MOHELLEBI	Mouloud	M.A.A en Génie Mécanique	UMMTO	Examineur

Date de la soutenance : 10/09/2013

Année Universitaire: 2012/2013

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

ⵝⵓⵏⵉⵔ ⵉⵎⵓⵏⵉⵔ ⵉⵎⵓⵏⵉⵔ ⵉⵎⵓⵏⵉⵔ



Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Mémoire

de fin d'études en vue de l'obtention du
Diplôme de Master professionnel en Génie Mécanique
Option: Fabrication Mécanique et productique

THEME

Influence de la variation de la température de revenu sur
l'évolution des caractéristiques d'élasticité, de plasticité et
structurales de l'alliage corroyé 2017A trempé dans l'huile.

Proposé et dirigé par :
HAKEM Ahmed

Présenté par:
OUALI Omar
KHADIR Samir

ANNEE: 2012 - 2013

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- Mes très chers parents,
- Mes frères,
- Mes sœurs,
- Et tous mes amis

.....Omar

Je dédie ce travail à :

- Mes très chers parents,
- Mes frères,
- Mes sœurs,
- Et tous mes amis

.....Samir

Remerciements

Nos sincères remerciements vont à monsieur HAKEM Ahmed qui a bien voulu nous faire l'honneur de nous confier ce sujet et l'aide essentiel qu'il a apporté à ce travail.

Nous remercions aussi tous les travailleurs du hall de technologie d'OUED AISSI et du laboratoire SDM, sans oublier les travailleurs de la bibliothèque du Département de Génie Mécanique.

Nous remercions les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont apporté leurs conseils ou leur contribution.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Quelques groupes d'alliages d'aluminium.....	6
Tableau I.2 : Désignation des états métallurgiques de base.....	7
Tableau I.3 : Famille d'alliages d'aluminium corroyés.....	7
Tableau I-4 : Répartition des matériaux constituant certains appareils d'Airbus industries (% en masse).....	7
Tableau I-5 : Composition chimique de l'alliage 2024 (% massique).....	8
Tableau I-6 : Composition chimique de l'alliage 2017A.....	17
Tableau I-7: Influence des éléments d'adition.....	17
Tableau I-8: Les dimensions des éprouvettes de résiliences.....	39
Tableau II.9 : Composition chimique de l'alliage étudié.....	61
Tableau. III.1 : Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques de traction (σ_e , σ_m , σ_r , ϵ_m , ϵ_e , ϵ) et du module d'Young de l'alliage AlCu4%.....	80
Tableau.III.2 : valeurs moyennes de la dureté HB pour les dix états.....	86
Tableau.III.3 : valeurs moyennes de la dureté Hv0, 01 pour les dix états.....	87
Tableau. III.4 : valeurs moyennes des caractéristiques de ductilité de l'alliage AlCu4% pour les des10 états.....	89
Tableau.III.5 : valeurs moyennes Valeurs de coefficient de poisson de l'alliage AlCu4% Pour les dix états.....	92

Liste des figures

Figure.I.1 : Diagramme de phase Al-Cu entre 0 et 60 % massique d'élément cuivre.....	9
Figure.I.2 : Microstructure d'un alliage Al- 4 % pds Cu obtenue soit par refroidissement lent (a), soit par refroidissement rapide (b).....	10
Figure I.3.: Etapes de production de l'aluminium.....	15
Figure I.4. : schéma d'une électrolyse produit l'aluminium pur.....	16
Figure. I.5. : Principe de laminage.....	19
Figure.I.6. Exemple d'une Tôle d'aluminium produite par coulée continue.....	19
Figure.I.7. Cycle thermique.....	23
Figure. I.8. Traction.....	27
Figure.I.9.: Les éprouvettes de traction.....	28
Figure.I.10. Comportement possible du matériau.....	29
Figure.I.11. Courbe de traction.....	30
Figure.I.12. Module d'Young.....	32
Figure.I.13. Courbe rationnelle de traction.....	33
Figure.I.14. Air sous -tendue par la courbe rationnelle (ténacité).....	34
Figure.I.15: Essai de Brinell.....	36
Figure. I.16: Essai de Vickers.....	36
Figure.I.17: Essai de dureté Rockwell HRB.....	38
Figure.I.18: Essai CHARPY.....	40
Figure.I.19: cycle symétrique.....	41
Figure.I.20: cycle asymétrique.....	42
Figure.I.21: cycle répéter.....	42
Figure.I.22: cycle Ondulée.....	43
Figure.I.23: diagramme d'endurance.....	44
Figure.I.24: Types de défauts ponctuels.....	46
Figure.I.25: Dislocation coin.....	46
Figure.I.26: Dislocation Vis.....	47
Figure.I.27: Types de défauts ponctuels.....	47
Figure.I.28: Atome voisins d'un atome à l'intérieur et d'un atome sur la surface.....	48
Figure.I.29: Joints de grains.....	49
Figure.I.30: Représentation schématique d'un pore.....	49

Figure.I.3.1 : Différents précipités.....	50
Figure.I.3.2 : mécanismes de diffusion à l'échelle atomique.....	51
Figure.II.1 : Schéma de principe d'élaboration par laminage.....	54
Figure.II.2 : Scie mécanique	55
Figure.II.3 : Fraiseuse.....	55
Figure.II.4 : Epreuve finie.....	55
Figure.II.5 : Four de trempe.....	56
Figure II.6: Etuve utilisée.....	57
Figure II.7: Machine de traction.....	57
Figure II.8: Epreuves subit un essai de traction.....	57
Figure II.9: Les Polisseuses.....	58
Figure II.10: duromètre.....	59
Figure II.11: Microduromètre.....	59
Figure II.12: Microscope optique.....	59
Figure. II.13: Microscope électronique à balayage(MEB).....	60
Figure. II.14: Cycle Thermique.....	63
Figure. II.15: Formes et dimensions d'éprouvette de traction.....	64
Figure. II.16: échantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté.....	64
Figure.III.1 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état brut coulé.....	66
Figure . III.2 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état trempé.....	67
Figure. III.3 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 04 éprouvettes à l'état de H-Rv 150°C.....	68
Figure. III.4 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de H-Rv 160°C.....	69
Figure. III.5 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de H-Rv 170°C.....	70
Figure. III.6 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de H-Rv 180°C.....	71

Figure. III.7 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de H-Rv 190°C.....	72
Figure. III.8 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de H-Rv 200°C.....	73
Figure. III.9 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de H-Rv 220°C.....	74
Figure. III.10 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de H-Rv 240°C.....	75
Figure. III.11 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes, respectivement pour les états (BC, T, H-Rv150) °C.....	76
Figure. III.12 : Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (BC, T, H-Rv150) °C.....	76
Figure. III.13: Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes, respectivement pour les états (H-Rv160, H-Rv170, H-Rv180) °C.....	77
Figure. III.14 : Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (H-Rv160, HRv170, H-Rv180) °C.....	77
Figure. III.15: Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes, respectivement pour les états (H-Rv190,H-Rv200, H-Rv220) °C.....	78
Figure. III.16 : Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (H-Rv190, HRv200, H-Rv220) °C.	78
Figure. III.17: Courbe de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes, pour l'état H-Rv240 °C.....	79
Figure. III.18: Courbe moyenne de traction (contrainte-déformation) pour la série de 5 éprouvettes pour l'état H-Rv240 °C.....	79
Figure. III.19: Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour les 10 états.....	79
Figure. III.20: Graphe, histogramme et secteur des modules d'Young E moyens pour les dix états.....	81
Figure. III.21: Graphe, histogramme et secteur des σ_e moyennes pour les dix états.....	82
Figure. III.22: Graphe, histogramme et secteur des σ_m moyennes pour les dix états.....	83
Figure. III.23: Graphe, histogramme et secteur des σ_r moyennes pour les dix états.....	84
Figure. III.24: Graphe et histogramme des contraintes σ_e , σ_m , σ_r moyennes pour les dix états.....	84
Figure. III.25: Graphe, histogramme et secteur des $\square$ moyennes pour les dix états.....	85
Figure. III.26: Graphe, histogramme et secteur des HB moyennes pour les dix états.....	86

Figure. III.27: Graphe, histogramme et secteur des Hv0, 01 moyennes pour les dix états dans la Zone blanche.....	87
Figure. III.28: Graphe, histogramme et secteur des Hv0, 01 moyennes pour les dix états dans la Zone noir.....	88
Figure. III.29: Graphe, histogramme et secteur des A% moyens pour les dix états.....	89
Figure. III.30: Graphe, histogramme et secteur des Z% moyens pour les dix états.....	90
Figure. III.31: Graphe, histogramme et secteur des Zu% moyens pour les dix états.....	91
Figure. III.32: Graphe et histogramme des caractéristiques mécaniques A%, Z% et Zu% moyens pour les états.....	92
Figure. III. 33: Graphe, histogramme et secteur des v moyens pour les dix états.....	93
Figure. III.34: Micrographie de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et a la température de revenu 160°C par microscope optique.....	94
Figure. III.35: Micrographie de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et a la température de revenu 160° par MEB.....	95
Figure. III.36: Micrographie des facies de rupture de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et a la température de revenu 160° par MEB.....	95

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

❖ Partie I : Recherche bibliographique

Chapitre I.1 : Aluminium et ses alliages

1.1.Aperçu historique.....	3
1.2.Propriétés de l'aluminium.....	3
1.2.1Propriétés physiques.....	3
1.2.2.Propriétés mécaniques.....	3
1.2.3. Propriétés chimiques.....	4
1.2.4. Propriétés de mise en forme	4
I.3.Alliages d'aluminium.....	4
I.4.Classification des alliages d'aluminium.....	4
❖ Alliages moulage.....	4
❖ Alliages corroyés.....	4
❖ Alliages élaborés par frittage.....	4
I.4.1 Alliages corroyés.....	5
a) Désignation de la composition.....	5
a.1. Partie commune aux désignations numériques et symboliques.....	5
a.2.Désignation numérique (NF EN 573-1)	5
a.3.Désignation symbolique (NF EN 57362).....	6
b) Etats de livraison - Etats métallurgiques.....	7
I.5.Les alliages Aluminium / Cuivre.....	7
I. 5. 1. Généralités.....	7
I. 5. 2. Microstructure des alliages de la série 2000.....	8
I.5.3.Quelques alliages d'aluminium _ cuivre	12
• Alliage 2014.....	12
• Alliage 2117.....	12
• Alliage 2017.....	12
• Alliage 2024.....	12
• Alliage 2618.....	13
• Alliage 2030.....	13
• Alliage 2011.....	13

Chapitre I.2 : Elaboration des alliages AlCu

Composition chimique de l'alliage 2017A.....	13
Influence des éléments d'addition.....	13
Elaboration et préparation de l'alliage 2017A.....	18

Chapitre I.3 : Traitements thermiques

I. Généralité.....	20
II. Importance des traitements thermiques pour aluminium.....	20
II.1. Principaux type de traitements thermiques.....	21
II.1.1. Traitement d'homogénéisation.....	21
II.1.2 Traitement d'adoucissement.....	21
II.1.3. Traitement de trempe structural.....	22
a). Mise en solution.....	22
b). Trempe.....	22
c). Revenu (vieillissement artificiel)	22
d). Maturation (vieillissement naturel)	22
Le but de revenu.....	23
d). Recuit.....	23
III.1.Cycle thermique.....	23
III. Traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	23
➤ Chauffage (courbe OA)	24
➤ Le maintien (droite AB).....	24
➤ Refroidissement (courbe BC)	24
III. Microstructure.....	24
III.1. La macrographie.....	24
III.2. La micrographie.....	25
III.2.1. observation par microscopie.....	25
a-Observation par microscope optique.....	25
b-Microscopie électronique à balayage.....	25
III.2.2 : Importance de la métallographie.....	25

Chapitre I.4. Essais mécaniques

I.1. Introduction.....	27
I.2. Essai de traction.....	27
I.2.1. Principe de l'essai.....	27
I.2.2. Eprouvettes.....	28
I.2.3. Courbes de traction.....	29
I.2.4. Diagramme conventionné.....	30
I.2.5. Courbe de traction	30
I.2.5.1. Lecture et interprétation de la courbe de traction	30
• Limite d'élasticité.....	31
• Résistance à la traction.....	31
• Allongement à la rupture.....	31
• Coefficient de striction.....	31
• Module d'élasticité longitudinale.....	31
• Allongement de striction.....	31
• Module d'Young E.....	32
I.2.6. Diagramme rationnel.....	32
❖ Contrainte vraie.....	32
❖ Déformation rationnelle ϵ	33
❖ Coefficient d'écrouissage n	33
❖ Ductilité.....	33
❖ Ténacité.....	34
I.2.7. Conditions d'essai.....	34
I. 3. Essai de dureté.....	35
1.3.1. Définition.....	35
1.3.2. Principe de l'essai de pénétration.....	35
1.3.3. Type essais.....	35
1.3.3.1. Essai brinell.....	35
1.3.3.2 : Essai Vickers	36
1.3.3.3: Essai Rockwell.....	37
❖ Essai Rockwell C(HRC)	37

❖ Essai Rockwell B (HRB)	38
I.3.4. Autres essai de dureté.....	38
I.4. Essais de résilience.....	39
I.4.1. L'éprouvette.....	39
I.4.2. Machine de résilience.....	40
I.5. La fatigue.....	41
❖ Alternée symétrique.....	42
❖ Alternée dissymétrique.....	42
❖ Répétée.....	43
❖ Ondulée.....	43
I.5.1. Les caractéristiques d'un cycle.....	44
I.5.2. Limite d'endurance.....	44
I.5.3. Diagramme d'endurance (courbe de Wöhler)	44

Chapitre . I. 5. Défauts cristallins

I. Introduction.....	45
II. Les défauts ponctuels.....	45
II.1. Lacune.....	45
II.2. Atome auto interstitiel.....	45
II.3. Atome étranger en substitution.....	45
II.4. Atome étranger en insertion.....	45
III. Défauts linéaires.....	46
III.1. Dislocation Coin.....	46
III.2. Dislocation Vis.....	47
III.3. Dislocation mixte.....	47
IV. Défauts surfacique.....	47
IV.1. Surface libre.....	47
IV.2. Energie d'interface.....	48
IV.3. Défauts à deux dimensions (défauts plans)	48
IV.3.1. Les joints de grains.....	48

IV.3.2. Joints de macles.....	49
IV.4. Défauts trois dimensions	49
IV.4.1. Les pores.....	49
IV.4.2. Les inclusions.....	50
IV.4.3. Les précipités.....	50
V. La diffusion.....	51
V.1. Définition.....	51
V.2. Mécanismes de la diffusion.....	51
a- Autodiffusion.....	51
b- Diffusion d'atomes de soluté en insertion.....	51
V.3. Lois de la diffusion.....	52
V.3.1.Etat stationnaire (première loi de Fick)	52
V.3.2.Etat non stationnaire (deuxième loi de Fick).....	52

❖ **Partie II : Expérimentale**

Chapitre. II.1 : Appareillage

Introduction.....	54
I. Appareillages.....	54
I.1.Le laminage.....	54
I.2.Le découpage.....	55
I.3.Le fraisage.....	55
I.4. Les traitements thermiques.....	56
I.4.1. Four de trempe.....	56
I.4.2. Four de revenu.....	56
I.5. Les essais mécaniques.....	57
I.5.1. Machine de traction.....	57
I.6. Microscopie.....	58

I.6.1. Les polisseuses.....	58
I.6.2. Duromètre et microduromètre.....	58
I.6.4. Microscope électronique à balayage (MEB)	59
❖ Principe et performances.....	59

Chapitre II. 2. Matériaux et modes opératoires

I.1. Matériau étudié.....	61
I.2. Elaboration du matériau étudié.....	61
✓ L'électrolyse.....	61
✓ Mélange.....	61
✓ Le laminage.....	61
I.2. Usinage	61
✓ Le découpage.....	61
✓ Fraisage.....	62
✓ Tournage.....	62
I.3. Traitements thermiques.....	62
✓ I.4. Cycle thermique.....	62
I.5. Essais mécaniques.....	63
I.5.1. Essais de traction.....	63
➤ Forme et dimension des éprouvettes.....	63
I.5.2. Essais de dureté et microdureté.....	64
I.5.3. Examen micrographique.....	64
I.5.4. Préparation des surfaces	65
➤ Dressage.....	65
➤ Dégrossissage.....	65
➤ Finissage.....	65
I.5.5. Microscope électronique à balayage (MEB)	65
I.5.6. Attaque chimique.....	65
I.5.7. Microscopie.....	65

❖ **Partie .III. Résultats et interprétation**

I. Influence des traitements thermiques sur les caractéristiques de traction.....	66
I.1 Caractéristiques de résistance	80
II. Effets des traitements thermiques sur les caractéristiques de dureté HB et la microdureté HV0, 01.....	86
II.1.Caractéristiques de ductilité.....	89
III. effets du mode d'élaboration et des traitements thermiques sur la microstructure de l'alliage alcu4%.....	94
a) Influence des traitements thermiques.....	96
b) Influence du mode d'élaboration.....	96
Conclusion.....	97

Introduction générale

Les alliages à base de fer représentent environ 90% de la production des matériaux métalliques avec une vaste gamme de caractéristiques qu'on peut contrôler par les traitements thermiques, mais leurs propriétés restent insuffisantes, il faut alors d'autres métaux et alliages comme ceux à base d'aluminium pour répondre aux exigences de l'industrie. L'aluminium et ses alliages sont appréciés notamment pour leur résistance à la corrosion, leur bonne tenue à chaud, leur facilité de recyclage et compatibilité alimentaire.

Bien qu'il ne soit passé dans le domaine industriel qu'à la fin du XIX^e siècle, l'aluminium et ses alliages sont devenus les principaux métaux non ferreux, grâce à leur légèreté, leur inaltérabilité pratique, leurs bonnes conductibilités électrique et thermique et leur grande résistance mécanique qui leur donnent des débouchés tels que : dans les transports, l'industrie électrique, l'électrotechnique et l'électronique de puissance, l'emballage, le bâtiment, l'aéronautique, navale, ferroviaire, l'automobile, l'armement, les constructions mécaniques diverses, etc.

L'aluminium non allié ne possède pas de hautes performances mécaniques du point de vue résistance, comparé aux aciers notamment pour des sollicitations élevées mais ses alliages présentent un large spectre de caractéristiques mécaniques.

Une telle gamme de caractéristiques mécaniques est obtenue en agissant conjointement sur la composition des alliages et en effectuant des traitements thermiques qui engendrent des modifications microstructurales importantes, généralement durcissantes.

Toutefois, les traitements thermiques n'ont pas comme seul objectif d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils influencent aussi un nombre de propriétés, parfois ils sont utilisés pour avoir des caractéristiques à usage spécial ou très importantes pour les utilisateurs.

Dans ce travail on s'intéresse aux différentes transformations de phase et l'évolution microstructurale produite par les différents traitements thermiques (trempe, vieillissement et revenu) de l'alliage d'aluminium Al-Cu ainsi que leur influence sur ses caractéristiques mécaniques en particulier.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés aussi bien aux caractéristiques mécaniques et microstructurales de l'alliage de corroyage Al-4% mass Cu (0,20 - 0,8)% Si et (0,40 - 1,0)% Mg en lui subissant des traitements thermiques spécifiques suivants : Traitement de mise en solution suivi d'une homogénéisation qui engendre une diffusion des atomes en solution solide de substitution et qui se fait dans un four de trempe à une température avoisinante (500) °C et d'un maintien de 8h, suivi immédiatement d'une trempe à l'huile à température ambiante de (20 – 25)°C, d'une maturation de 17h à l'air ambiante et de différents revenus à des températures respectivement de (150,160,170,180,190,200,220 et 240)°C pendant 20h dans un four de revenu et d'un refroidissement dans le four .

Les pièces élaborées à partir de cet alliage sont très utilisées comme accessoires dans plusieurs réalisations (bâtis, culasses couvercles, corps de pompe, pistons de moteurs, ...etc)

Notre étude s'articule autour d'une introduction générale, de trois parties et finalement on termine par une conclusion générale.

La première partie est réservée à la recherche bibliographique et elle contient cinq chapitres :

Chapitre I.1 : traite l'aluminium et ses alliages.

Chapitre I.2: est consacré à la théorie d'élaboration de l'alliage Al Cu-4%Mg-Si

Chapitre I.3 : vise les traitements thermiques et la microstructure.

Chapitre I.4 : comprend les essais mécaniques.

Chapitre I.5 : fait l'objet des défauts cristallins et diffusion.

- La deuxième partie: est réservée à la présentation de la partie expérimentale et comprend deux chapitres :

Chapitre II.1 : Appareillages utilisés.

Chapitre II.2 : Méthode expérimentale et élaboration

- La troisième partie: est consacrée à l'analyse des résultats obtenus, suivie de leur interprétation et discussion.

On a finalisé ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus

Chapitre I.1 : Aluminium et ses alliages

L'Aluminium est l'un des éléments les plus abondants sur notre planète, il présente 8% environ de la masse de l'écorce terrestre, il se place ainsi au 3^{ème} rang après l'oxygène 47% et le silicium 28%.

On le retrouve sous forme de silicates de faible teneur en aluminium ou sous forme de roches riches en alumine (45 à 60%), actuellement se sont les bauxites qui constituent la quasi exclusivité de l'aluminium. [1]

1.1 Aperçu historique

C'est en 1808, que **Humphrey Davy** obtient par action de l'arc électrique sur de l'alun, en présence de poudre de fer, un alliage métallique de fer et d'un métal mystérieux dont il soupçonne la présence dans l'alun et auquel il donne le nom d'**aluminium**. En 1825, **Hans Ørsted** réussit à isoler l'aluminium, mais imparfaitement, et ne peut en déterminer les caractéristiques. En 1827, **Friedrich Wöhler** obtient, par action directe du potassium sur le chlorure d'aluminium, suffisamment de métal pur pour en déterminer les propriétés physiques et chimiques. En 1845, le Français **Henri Sainte-Claire Deville** reprend, en la modifiant, la méthode de Wöhler : par action du sodium sur le chlorure double d'aluminium et de sodium, il produit les premiers kilogrammes de ce métal < aussi blanc que l'argent, malléable et ductile au plus haut point, et plus léger que le verre >.

C'est en 1886 qu'un nouveau procédé par électrolyse, imaginé par H. Sainte-Claire Deville, fut mis au point simultanément en France **Paul Héroult** et aux Etats-Unis par **Charles Martin Hall**, Le principe de la décomposition par électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue (fluorure double de sodium et d'aluminium), est celui qui est encore utilisé aujourd'hui.

I.2. Propriétés de l'aluminium :

1.2.1. Propriétés physiques :

L'aluminium est un élément du 3^{ème} groupe de la classification de Mendeleïev, dont le nombre atomique est 13 et la masse atomique $M=26.98$. Sa température de fusion est $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ et celle d'ébullition $2467\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ, il possède un réseau cubique à face centré (CFC) à équidistance $a = 4.0412\text{ \AA}$.

Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité 2.7 g/cm^3 à température ambiante.

Cette densité ne varie pas de façon sensible dans les alliages légers, elle reste toujours inférieure à 2 g/cm^3 . Sa conductibilité thermique est de $0.57\text{ cal/cm.s.}^{\circ}\text{C}$ et sa conductibilité électrique est élevée ($2.6548\text{ ohm. mm}^2/\text{m}$). [1.2.3]

1.2.2. Propriétés mécaniques :

Compte tenu de sa structure cristalline (CFC), l'aluminium pur est très déformable à froid ou à chaud, de ce fait il, est très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme, de ce fait il, est très malléable (allongement de rupture 30 à 40%), il est peu tenace. Résistance à la rupture par traction $\sigma_R=70\text{ à }100\text{ N/mm}^2$ et il est de faible dureté. [3.1]

> **Module d'élasticité** : il est à 66.6 GPa pour l'aluminium pur et augmentes-en Présence d'impuretés et d'additions. Pour les alliages, le module est compris entre 69 et 72 GPa et particulièrement sensible à la teneur en silicium 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium varie de 2 à 18%.

> **Module de torsion** (cisaillement) : il est égal à 25 GPa pour l'aluminium pur titré à 99.9% et 26 GPa pour l'aluminium commercial.

I.2.3. Propriétés chimiques :

L'aluminium se distingue par sa résistance élevée à la corrosion du fait de la formation à la surface d'une couche protectrice (Al_2O_3).

La pureté du métal améliore sa résistance à la corrosion par les solutions salines et l'eau de mer ainsi que le brouillard aussi pour l'industrie chimique et agroalimentaire qui emploie un aluminium titrant au moins 99.5%.

La plus parts des acides minéraux (chlorhydriques, sulfurique) qu'organiques (trichloracétique) ainsi que la soude et la potasse attaquent l'aluminium. [6.5]

I.2.4. Propriétés de mise en forme [4]

La température de fusion de l'aluminium est relativement basse 660 C° d'où une facilité de fusion qui représente un avantage pour les opérations de fonderie, il est très ductile, on peut facilement le mettre en forme à l'état solide par déformation plastique.

I.3. Alliages d'aluminium [3]

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques de l'aluminium non allié à caractéristiques très réduite, on procède souvent à l'addition d'autres éléments de nature différentes, ces éléments peuvent être en solution solide de substitution et peuvent également être présent sous forme de phases intermétalliques : cohérents, semi cohérents avec ou incohérents avec la matrice l'aluminium.

La composition de ces phases, leur finisse, répartition et cohérence avec la matrice d'aluminium, fragilité intrinsèque et stabilité thermique et mécanique sont également détermination pour les propriétés d'alliages l'aluminium.

I.4. Classification des alliages d'aluminium [3,1]

La classification des alliages d'aluminium se fait suivant leur mode de transformation. On trouve les alliages de moulages, les alliages de corroyages, et les alliages élaborés par frittage.

❖ Alliages moulage

Produit obtenus par des fonderies par coulée en sable (moule en sable) ou en coquille (moule en fonte ou en acier) ou encore par coulée sous pression.

❖ Alliages élaborés par frittage

Produit obtenus par la méthode de la métallurgie des poudres qui est une méthode révolutionnaire d'élaboration de pièces mécaniques.

❖ Alliages corroyés

Produit obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage et le forgeage.

On s'intéressera particulièrement aux alliages de corroyage dont on explique la désignation par la suite.

I.4.1 Alliages corroyés : [7]

a) Désignation de la composition :

a.1. Partie commune aux désignations numériques et symboliques :

-La désignation est composée successivement des éléments suivant :

- Le préfixe EN suivi d'un espace ;
- Le lettre À, qui représente l'aluminium;
- La lettre W, qui représente les produits moulés (caste) ;
- Un tiret

a.2.Désignation numérique (NF EN 573-1) : [4]

-La première partie de la désignation (EN AW) est suivie de quatre chiffres représentant la composition chimique et si nécessaire, une lettre identifiant une variante nationale attribuée par ordre alphabétique.

-La signification des quatre chiffres est la suivante :

- Le premier chiffre indique le groupe d'alliages selon le **tableau I-3** (les chiffres de 0 et 9 sont réservées à l'usinage privé des réducteurs).
- Pour le groupe 1 : les deux derniers chiffres indiquent le pourcentage minimal d'aluminium au-delà de 99,00%, et le deuxième chiffre indique des modifications dans les limites d'impuretés ou dans les éléments (zéro correspond à des limites d'impuretés naturelle).
- pour les groupes 2 à 8 : les deux derniers chiffres servent seulement à identifier l'alliage, tandis que le deuxième chiffre indique les modifications de l'alliage (zéro correspond à l'alliage originale).

Groupe	Aluminium ou alliage
1	Aluminium (teneur $\geq 99,00\%$)
2	Aluminium – cuivre
3	Aluminium- manganèse
4	Aluminium – silicium
5	Aluminium – magnésium
6	Aluminium - magnésium silicium
7	Aluminium – zinc
8	Autres alliages d'aluminium

Tableau I.1 : Quelques groupes d'alliages d'aluminium.

Exemple : EN AW -2024 est un alliage d'aluminium à 4% de cuivre et 1,5% de magnésium.

a.3.Désignation symbolique (NF EN 57362) : [7]

Elle est destinée à compléter la désignation numérique définie avant.

Elle utilise les symboles chimiques et est placée entre crochets après la désignation à quatre chiffres. Les désignations de l'aluminium non allié destiné au corroyage sont constituées du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales.

Exemple : EN AW-1199 [Al 99,99] ;

EN AW-1070 [Al 99,7] ;

Si un élément est ajouté en faible teneur à l'aluminium non allié, le symbole correspondant à cet élément sera ajouté sans espace après le pourcentage de pureté.

Exemple : EN AW-1100 [Al 99,00 Cu] ;

Pour les alliages d'aluminium corroyés, la désignation est constituée du symbole (Al) suivi d'un espace et des éléments d'addition principaux. Ces symboles sont en suite suivis par des nombres exprimant la teneur de ces éléments.

Ils sont ordonnées par teneur décroissantes (ou par ordre alphabétique en cas de teneurs identiques) et sont limités à quatre.

Exemple : EN AW-6061 [Al Mg 1 Si Cu] ;

EN AW-2011 [Al Cu 5 Pb Bi] ;

EN AW-2014 [Al Cu Si Mg] ;

EN AW-7050 [Al Zn 6 Cu mg Zr].

b) Etats de livraison - Etats métallurgiques : [4]

Ils ont conformes à la norme afnor NF EN 515 qui désigne :

- L'état métallurgique de base par une lettre F, O, H ou T voir (Tableau I. 2).
- Le moyen principal d'obtention par un ou plusieurs chiffres complémentaires voir (tableau I-3).

Désignation	Etat métallurgique
F	Etat brut de fabrication
O	Etat recuit
H	Etat écroui et éventuellement stabilisé
T	Etat durci par traitement thermique

Tableau I.2 : Désignation des états métallurgiques de base.

Eléments d'alliages	Famille
Aucun	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
Silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium et silicium	6000
Zinc et cuivre	7000

Tableau I.3 : Famille d'alliages d'aluminium corroyés.

I.5.Les alliages Aluminium / Cuivre**I. 5. 1. Généralités**

Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents. Certains alliages possèdent des caractéristiques mécaniques qui répondent très bien aux besoins du domaine aéronautique, comme par exemple l'alliage 2024 utilisé dans les structures des avions et le revêtement de leur fuselage. L'aéronautique est donc un grand « consommateur » d'alliages d'aluminium, comme cela apparaît dans le **(tableau I-4)**.

Appareils	Alliages Al	Alliages Ti	Composites org	Aciers	Autres
A310	67 %	5 %	10 %	13 %	5 %
A320	58 %	6 %	20 %	13 %	3 %
A330/A340	73 %	6,5 %	10 %	7,5 %	3 %
A380	75 %	7 %	8 %	7 %	3 %

Tableau I-4 : Répartition des matériaux constituant certains appareils d'Airbus industries (% en masse).

On peut remarquer tout d'abord que les alliages de titane ont pris au cours du temps un peu plus d'ampleur, tandis que les composites et l'acier sont en forte baisse. L'emploi des matériaux composites a diminué car ces matériaux, plus nobles que les alliages d'aluminium, semblent favoriser la corrosion de ces derniers par effet de pile [8-9]. Ainsi, le dernier né d'Airbus industries, l'A380, est composé au $\frac{3}{4}$ d'alliages d'aluminium. On comprend donc bien l'intérêt qu'a l'aéronautique de développer la recherche sur les alliages d'aluminium et notamment d'améliorer leur résistance à la corrosion.

Les différents alliages à base d'aluminium sont désignés par un nombre de quatre chiffres et sont classés en 8 séries en fonction des éléments d'alliages principaux (**Tableau I-1**).

Parmi ces huit classes, une autre distinction peut être faite entre les alliages non trempant et les alliages trempant. Les alliages non trempant correspondent aux séries 1000, 3000 et 5000 (alliages sans durcissement structural) et les alliages trempant à durcissement structural, aux séries 2000, 6000 et 7000. Selon la classe d'alliages envisagée, différentes méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques peuvent être adoptées.

En effet, en ce qui concerne les alliages non trempant, trois méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques existent : le durcissement de solution solide, le durcissement par les précipités et dispersoïdes ou le durcissement par écrouissage.

Pour les alliages trempant, d'un point de vue général, la principale méthode de durcissement correspond à un traitement thermique, appelé traitement de durcissement structural. Un matériau peut aussi être durci par traitement mécanique : on parle alors de durcissement par écrouissage. Le processus de durcissement structural permet d'améliorer nettement les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium en conduisant à la formation de précipités durcissant. Cette modification de la microstructure du matériau s'accompagne souvent d'une chute de la résistance à la corrosion ce qui amène à travailler, la plupart du temps, en termes de compromis entre bonnes propriétés mécaniques et résistance à la corrosion intéressante.

I. 5. 2. Microstructure des alliages de la série 2000

La plupart des alliages d'aluminium utilisés dans les structures aéronautiques sont des alliages à durcissement structural, comme ceux de la série 2xxx. Les caractéristiques mécaniques des alliages de la série 2000 sont accrues en raison de la fine précipitation d'une seconde phase. Ce type d'alliage est donc constitué d'une matrice, qui correspond à une solution solide de cuivre dans l'aluminium, de précipités durcissant, mais aussi de particules intermétalliques grossières et enfin de dispersoïdes.

Dans les alliages de la série 2000, on met souvent en évidence la présence de particules intermétalliques grossières [10]. Ces particules, qui se forment lors de la décomposition eutectique pendant la solidification, contiennent souvent du fer (Al_7Cu_2Fe et $(Fe, Mn) Al_6$), présent initialement dans le matériau sous forme d'impureté. Ces particules peuvent atteindre 30 μm et ne peuvent pas être remises en solution. Outre ces particules insolubles, la plupart des alliages d'aluminium contiennent aussi des particules intermétalliques grossières partiellement solubles, de même taille que les précédentes. Elles sont généralement composées de zinc, de magnésium ou de cuivre, combinés avec de l'aluminium.

Cu	Mn	Fe	Zn	Si	Ti	Cr	Mg	Ti + Zr	Al
3,8 / 4,9	0,3 / 0,9	< 0,5	< 0,25	< 0,5	< 0,15	< 0,1	< 1,2	< 0,2	Base

Tableau I-5 : Composition chimique de l'alliage 2024 (% massique).

Dans le cas particulier de l'alliage 2024 (**Tableau I-3**), sept types de particules sont distinguées. Il s'agit d' Al_2Cu (phase θ), Al_2CuMg (phase S), Mg_2Si , Al_6Mn , Al_3Fe , $\square\text{-Al}$ (Mn, Fe) Si et $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$.

Solubles ou insolubles, les particules intermétalliques grossières ont un effet néfaste vis-à-vis de la ténacité. En effet, elles peuvent se briser lors de traitements thermomécaniques, offrant ainsi des chemins préférentiels à la propagation des fissures. Mais, comme nous le verrons par la suite, leur présence est surtout néfaste en termes de résistance à la corrosion.

Les dispersoïdes se forment par précipitation à l'état solide. Ils sont généralement constitués d'éléments ajoutés comme le chrome ou le manganèse et cela dans le but d'éviter une recristallisation des produits travaillés à chaud. Une fois formée, ces précipités de 0,02 à 0,5 μm de longueur ne peuvent plus être complètement dissous. Leur fraction volumique, leur taille ainsi que leur distribution peuvent être néanmoins modifiées au cours de traitements thermomécaniques. En général, la ténacité d'un matériau peut être augmentée en augmentant la taille des dispersoïdes tout en diminuant leur nombre. Les dispersoïdes peuvent aussi influencer la tenue à la corrosion d'un matériau.

Enfin, comme cela a été dit précédemment, des observations en microscopie électronique en transmission des alliages de la série 2000 montrent la présence de précipités intra granulaires voire inter granulaires. En effet, le diagramme de phases du binaire Al-Cu (**Figure I-1**) montre que la solubilité du cuivre dans l'aluminium décroît de manière appréciable lorsque la température chute. Cette observation est à l'origine du traitement de durcissement structural.

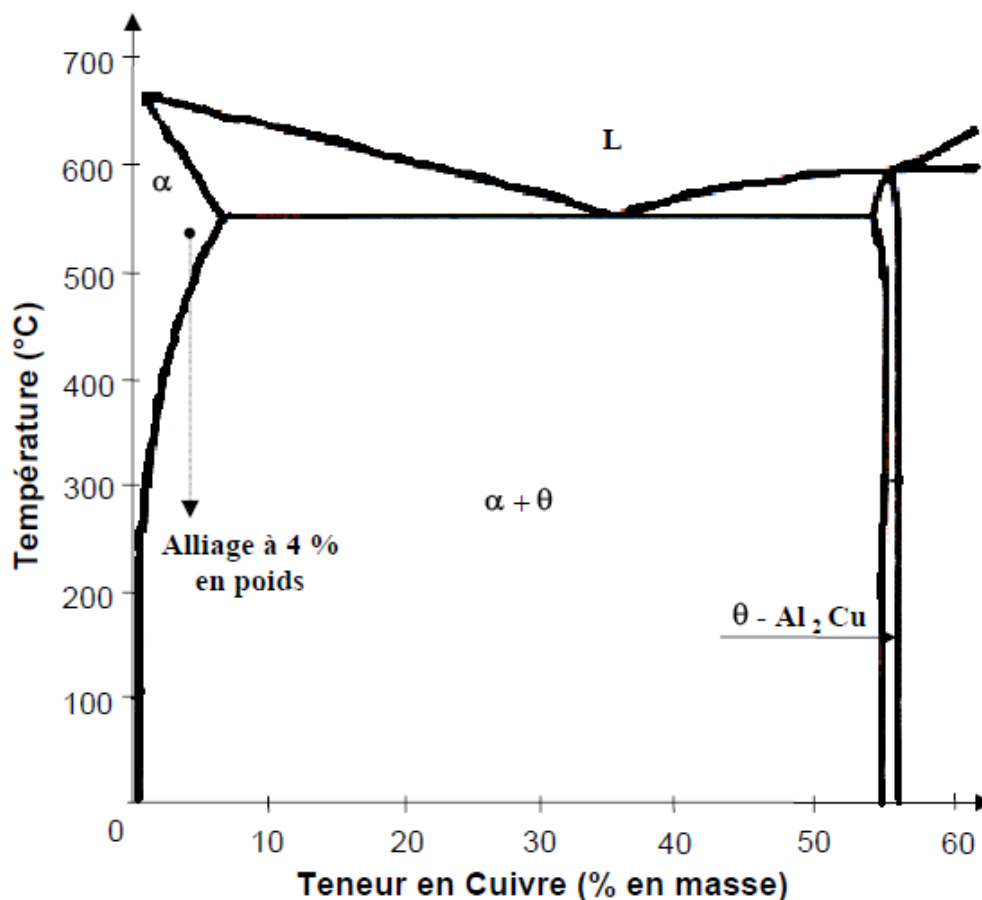


Figure.I.1 : Diagramme de phase Al-Cu entre 0 et 60 % massique d'élément cuivre.

Intéressons nous de nouveau plus particulièrement à l'alliage 2024. Le diagramme de phases du binaire Al-Cu nous indique qu'entre 500 et 580°C, l'alliage Al- 4 % masse Cu est monophasé : il s'agit d'une solution solide désordonnée d'aluminium dans laquelle le cuivre est en substitution (phase $\square$). En dessous de 500°C, l'alliage devient biphasé et les deux phases, α et $\square$ -Al₂Cu coexistent. Il y a donc précipitation de phase $\square$ dans la solution $\square$. Au fur et à mesure que l'alliage est refroidi (on considère un refroidissement lent pour être le plus proche possible des conditions d'équilibre), la proportion de $\square$ -Al₂Cu augmente. A la température ambiante, les pourcentages massiques d'équilibre sont de 93 % de phase α et de 7% d'Al₂Cu [11]. La solubilité de l'élément cuivre dans l'aluminium (phase $\square$) est d'environ 0, 02 % à température ambiante. La morphologie de la précipitation ainsi que les proportions respectives des différentes phases susceptibles d'être observées varient selon le mode de refroidissement de l'alliage.

Dans le cas d'un refroidissement lent, les précipités de phase $\square$ sont grossiers et très espacés.

Dans le cas d'un refroidissement rapide, ils sont fins et très rapprochés [11].

Ainsi, les microstructures obtenues à température ambiante dans un alliage Al- 4 % pds Cu par refroidissement lent à partir de 550°C (a) ou par refroidissement rapide à partir de 550°C (b) [4] varient de manière considérable comme le montre la **figure I-2**.

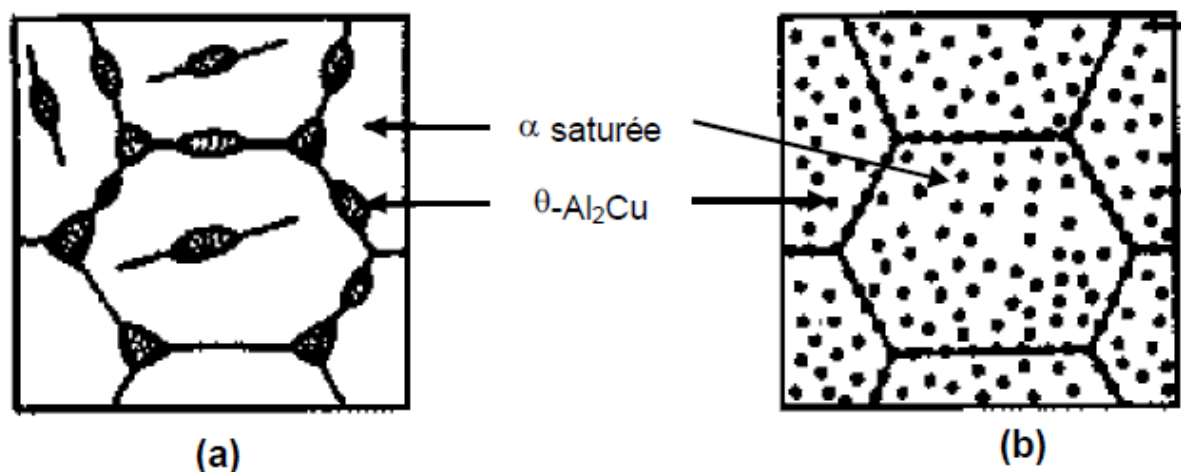


Figure.I.2 : Microstructure d'un alliage Al- 4 % pds Cu obtenue soit par refroidissement lent (a), soit par refroidissement rapide (b) [11].

Dans le cas d'un refroidissement lent, l'enthalpie libre de précipitation et le taux de germination sont faibles. Pour assurer la proportion d'équilibre en θ -Al₂Cu, les rares germes doivent croître en de gros précipités très distants les uns des autres. Les dislocations n'ont pas de mal à contourner ces précipités et l'alliage ainsi obtenu a de faibles caractéristiques mécaniques. Si au contraire, on refroidit l'alliage rapidement, la structure obtenue est beaucoup plus fine. Comme l'énergie motrice est élevée, le nombre de germes l'est aussi. Les précipités, quoique petits, sont très rapprochés. Les dislocations mobiles ont du mal à les franchir et l'alliage est ainsi plus dur. Si on refroidit trop rapidement, on n'a pas de précipitation du tout. Cependant, il est possible d'augmenter considérablement la dureté de l'alliage en lui faisant subir un vieillissement. Ce procédé, dit de durcissement structural, est donc basé sur un traitement thermique de l'alliage en trois étapes :

- Première étape : mise en solution à 550°C de manière à dissoudre totalement l'élément cuivre dans l'aluminium.
- Deuxième étape : trempe à l'eau ou à l'huile jusqu'à température ambiante. On obtient ainsi, à température ambiante, une solution solide fortement sursaturée.

- Troisième étape : traitement de revenu à des températures comprises entre 100 et 190°C pendant des durées variant classiquement de 1 à 100 jours.

Lors du revenu, il y a décomposition de la solution solide sursaturée α ; la séquence de précipitation des alliages binaires Al-Cu suit généralement le schéma suivant :

Solution solide sursaturée $\alpha \rightarrow$ Zones Guinier Preston $\rightarrow$ Phase $\theta'' \rightarrow$ Phase $\theta' \rightarrow$ Phase θ

A partir de la solution solide sursaturée α dans laquelle les atomes de cuivre sont en substitution et répartis au hasard [11], des zones de Guinier-Preston (GP) germent sous forme de disques. Les faces des disques (diamètre environ 10 nm) sont parfaitement cohérentes avec la matrice. Les côtés de ces disques (épaisseur environ 1 nm) sont aussi cohérents mais présentent une forte déformation [11].

Une nouvelle étape est atteinte lorsque certaines zones GP croissent pour former les précipités θ'' . Parallèlement à cela, d'autres zones GP se dissolvent et le cuivre ainsi libéré est incorporé par diffusion aux précipités θ'' qui grossissent [11]. La phase θ'' se présente aussi sous forme de disques dont les faces sont cohérentes avec la matrice (diamètre environ 100 nm, épaisseur environ 10 nm). Les côtés des disques le sont aussi mais l'écart paramétrique entre la phase θ'' et la matrice est tel que cette évolution métallique génère des contraintes élastiques de cohérence.

Par la suite, des précipités θ' germent sur les dislocations de la matrice. Les précipités θ'' se dissolvent alors et le cuivre libéré est incorporé à la phase θ' qui grossit [11]. Les faces des disques sont cohérentes avec la matrice mais les côtés de ces disques ne le sont plus (diamètre environ 1 μm).

La phase d'équilibre correspond aux précipités θ -Al₂Cu qui germent aux joints de grains et aux interfaces θ' /matrice [11]. Les précipités θ' se dissolvent et le cuivre est transféré vers la phase θ qui précipite. La phase θ -Al₂Cu est complètement incohérente avec la matrice. Ces précipités ne croissent plus sous forme de disques, mais sous forme de globules.

Le durcissement des alliages de la série 2000 et l'amélioration de leurs propriétés mécaniques sont essentiellement dus à la précipitation des zones GP ou des phases θ'' et θ' . En effet, le durcissement de l'alliage dépend de la taille, de la morphologie et de la distribution des précipités, ces différents paramètres influençant l'interaction précipités / dislocations. De la même façon, la taille, la distribution, mais surtout la composition chimique de ces précipités durcissant influence nettement les mécanismes de corrosion intergranulaire. Par ailleurs, l'addition de magnésium à ce système, avec une quantité de magnésium supérieure à 1 % en poids, modifie la séquence de précipitation de la manière suivante :

Solution solide sursaturée $\alpha \rightarrow$ Zones Guinier Preston $\rightarrow S' \rightarrow$ Phase S (Al₂CuMg)

En fait, il a été montré que, dans les alliages Al-Cu-Mg, la nature des précipités formés lors d'un vieillissement artificiel dépend du rapport Cu / Mg. [12] a montré que, pour un rapport Cu / Mg égal à 2,2, la phase d'équilibre est Al₂CuMg (S) et a observé la séquence de précipitation suivante :

Solution solide sursaturée $\rightarrow$ Zones GPB $\rightarrow S'' + S' \rightarrow S' + S \rightarrow S$

D'un point de vue général, et cela est vrai en particulier pour les alliages de la série 2000, les propriétés mécaniques d'un alliage dépendent fortement de sa microstructure.

I.5.3. Quelques alliages d'aluminium _ cuivre :[13]

De nombreux alliages certains étant commercialisés depuis longtemps entrent dans cette famille. Leur durcissement est obtenu essentiellement par la précipitation des formes transitoire des phases Al_2Cu et $Al_2Cu Mg$.

Ces alliages peuvent être classés en quatre familles :

Alliages pour mise en forme :

- **Alliage 2117**

Très faiblement chargé en cuivre et en magnésium, cet alliage a des caractéristiques modestes mais une aptitude à la mise en forme particulièrement grande ; aussi est – il particulièrement bien adapté pour exécuter les pièces embouties de carrosseries automobiles et ceci d'autant plus qu'il peut facilement être soudé électriquement par point sans traitement de surface préalable.

Alliages pour bonne résistance mécanique

- **Alliage 2017**

Cet alliage, durci la phase Al_2Cu et, mais à un degré moindre, par $Al_2Cu Mg$, est essentiellement utilisé à l'état T4 .Très connu sous la dénomination « Duralumin », il peut être considéré comme étant à l'origine de l'aluminium dans l'aviation et même à l'origine du développement de l'aviation elle-même.

- **Alliage 2024**

Cet alliage, plus performant que le précédent, est utilisé dans les deux états T4 et T6 (durcissement dû à $Al_2Cu Mg$ et, à un degré moindre, à Al_2Cu) .Il est utilisé dans le domaine du transport (structures d'ales et de fuselage, pales d'hélicoptère en aéronautique), de la mécanique (mâts, charpentes ...), de l'armement (engins de franchissement) et du sport (cannes pour la pêche, arcs, flèches...).

- **Alliage 2014**

Il a déjà fait l'objet, à l'état T6, de nombreuses applications aéronautiques (en France : pièces forgées et matricées pour les avions Jaguar, Airbus, d'hélicoptère SA 330, tôles épaisses pour structure intégrale des avions Mirage III et IV de Dassault), en armement (galet et moyeux pour chenilles de chars, corps de propulseur), en mécanique (poutrelles).

Alliages pour résistance mécanique à chaud

- **Alliage 2618**

Alliage dont le durcissement est obtenu par phase Al_2Cu Mg et qui présente, par ailleurs, une forte proportion de phases insolubles du type Al_9FeNi . Utilisé depuis de nombreuses années pour la fabrication des disques et aubes de compresseur en raison de sa bonne tenue à 200-250°C, cet alliage a été retenu pour la construction du concorde par suite de sa bonne résistance au fluage à 120-150°C et ceci pour des durées atteignant 30000 heures, de sa bonne tenue à la fatigue à 20°C et à 150°C, et de sa bonne résistance à la corrosion sous tension.

Alliages pour décolletage

L'addition d'éléments tels que le plomb, le bismuth ou le cadmium, permet d'éviter les copeaux longs lors de l'usinage et de favoriser leur fragmentation fine et régulière sur tours automatiques et à grande vitesse.

Deux alliages sont actuellement commercialisés :

- **Alliage 2030**

Cet alliage, dont la bonne aptitude au décolletage est obtenue par l'addition de plomb, est utilisé, particulièrement en France, depuis de nombreuses années : il présente des caractéristiques mécaniques relativement élevées à l'état T4 et également une bonne aptitude à l'anodisation, ce qui permet d'obtenir :

- ✓ une protection efficace pour les pièces soumises à des atmosphères corrosives,
- ✓ une dureté superficielle élevée qui confère une grande résistance à l'abrasion et de bonnes qualités de frottement,
- ✓ une couche autolubrifiante après imprégnation, ce qui est particulièrement efficace pour les pièces filetées, des possibilités de coloration.

- **Alliage 2011**

Cet alliage a également une bonne aptitude au décolletage grâce aux additions de plomb et de bismuth. Il présente, par rapport au 2030, l'avantage d'une meilleure aptitude à la déformation à chaud (filage à plus grande vitesse, possibilité d'obtention des pièces par matriçage), mais en contrepartie, l'inconvénient d'être plus corrodable : en atmosphère industrielle ou maritime, il ne doit pas être utilisé sans protection (l'anodisation constitue la meilleure protection) ; par ailleurs, sa sensibilité à la corrosion sous tension, notable à l'état T3, est peu accentuée à l'état T8.

Chapitre I.2 : ELLABORATION DES ALLIAGES AlCu

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, l'aluminium est peu à peu devenu l'un des principaux métaux industriels. Des produits de haute technologie aux canettes de boissons, il s'en consomme plus de 30 millions de tonnes par an dans le monde.

C'est à partir de la mine que commence la longue série de transformations de la bauxite en métal. Toute une filière est née en amont et aval de cette pièce maîtresse de l'industrie de l'aluminium qu'est l'usine d'électrolyse.

Le minerai de l'aluminium : La production au niveau industriel de l'aluminium commence à partir de la bauxite, celle-ci se présente sous forme de poudre, granules, roche ou d'argile, et peut être de couleur crème, rouge, brune, jaune ou grise. Elle contient entre 45 et 60% en poids d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) appelé alumine [1].

La teneur de la bauxite en oxyde de fer est relativement élevée, ce qui lui donne la couleur rouge. La bauxite blanche, est celle qui contient peu de fer, mais beaucoup de silice. Le plus souvent, on utilise les bauxites rouges pour l'élaboration de l'aluminium en raison de leur faible teneur en silice ($< 5\%$) [A]. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire, nécessaire à la fabrication de l'aluminium après une série de traitements. **La figure I.3.** illustre les principales étapes de production de l'aluminium [2].

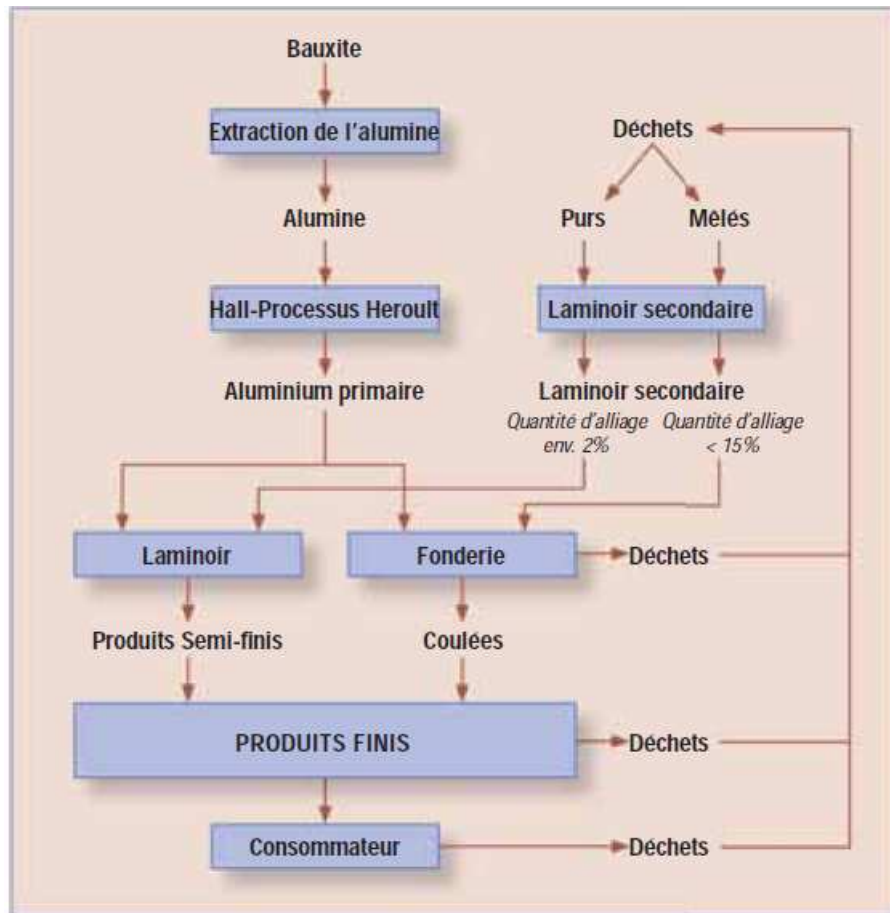


Figure I.3.: Etapes de production de l'aluminium.

Extraction de l'alumine pure (oxyde d'aluminium) à partir de la bauxite la récupération de l'alumine commence par un concassage et une trituration fine de la bauxite, puis de son chauffage sous pression à l'hydroxyde de sodium. Dans ce processus, un aluminat de sodium soluble dans l'eau est formé avec des résidus insolubles de fer, titane et silicium, appelés "boue rouge" qui sont séparés par sédimentation. A cette solution très diluée d'aluminat de sodium l'on rajoute des "germes cristallins" d'hydroxyde d'aluminium frais pour amorcer la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium pur ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Par le biais de la calcination à 1200°C , l'eau est éliminée de l'hydroxyde d'aluminium et il reste l'alumine anhydre pure (oxyde d'aluminium).

Le processus Hall-Héroult: transformer l'alumine en aluminium L'obtention de l'alumine pure nécessite un processus électrochimique qui Permettra d'extraire l'aluminium de son oxyde. Comme le point de fusion de l'oxyde d'aluminium est très élevé, 2050°C, il est mélangé à de la cryolite qui réduit le point de fusion à 950°C. De plus, la cryolite fait augmenter la conductivité et en conséquence, l'apport d'électricité.

L'électrolyse a lieu dans un grand conteneur en acier revêtu au carbone ou au graphite, contenant des tiges d'acier pour conduire l'électricité. Les parois et le fond clandés au carbone forment la cathode et la coulée d'oxyde-cryolite d'aluminium est l'électrolyte. Les plaquettes de carbone pendues sur un montage au-dessus de la coulée servent d'anodes. Lors de l'électrolyse, le carbone de l'anode réagit à l'oxygène de l'alumine, et lors d'une réaction secondaire, de l'aluminium métallique est produit avec la formation de dioxyde de carbone:



L'aluminium liquide a une densité plus élevée que la coulée d'électrolyte et se dépose au fond du pot. Il est coulé en gue Par le biais de ce processus, de l'aluminium d'une pureté de 99,0 – 99,9% est produit dont la plus grande partie est utilisée pour la production des alliages d'aluminium. Grâce à une électrolyse additionnelle, la pureté de l'aluminium peut être augmentée à 99,98% pour les produits semi-finis et à 99,99% pour les gueuses. Cet aluminium pur a une résistance très élevée à la corrosion et est particulièrement approprié pour l'anodisation. Il est utilisé pour briller des produits tels que les garnitures décoratives, les réflecteurs, les feuilles pour les condensateurs d'électrolyte et pour les tubes utilisés dans l'industrie chimique et alimentaire. Comme plus l'aluminium n'est pur, plus son coût n'augmente, la pureté d'un aluminium spécifique utilisé pour un produit est déterminée par les exigences de son application.

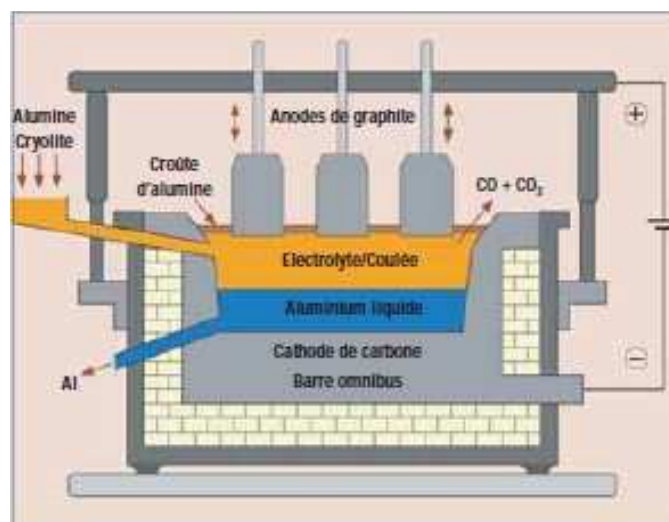


Figure I.4. : schéma d'une électrolyse produit l'aluminium pur.

L'aluminium pur présente certaines propriétés intéressantes, mais pour les améliorer ou pour lui donner des nouvelles, on lui ajoute des éléments d'alliages, ces alliages sont catégorisés comme alliages corroyés et alliages de moulage. Dans notre travail on va étudier comment

obtenir un alliage de corroyages de la série(2000) qui est l'alliage 2017A. Qui contient comme élément d'alliage principal le cuivre.

L'alliage 2017A :

Il considère comme l'un des alliages les plus anciennes, également très connu sous la dénomination *Duralumin*, peut être considéré comme étant à l'origine du développement de l'aluminium dans l'aviation et également du développement de l'aviation elle-même. Il est toujours très utilisé, à l'état T4, il est considéré comme un alliage à durcissement structural utilise dans les structures à résistance mécanique très élevée.

Composition chimique de l'alliage 2017A :

Alliage	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)
2017A	0,20 - 0,8	0,7	3,5 - 4,5	0,40 - 1,0	0,40 - 1,0	0,10

Tableau I-6 : Composition chimique de l'alliage 2017A

Influence des éléments d'adition :il sont classés dans le tableau suivant :

Eliment d'alliage	Son rôle
Cu	Résistance mécanique moyenne à l'état trempé mûri mais relativement élevée à l'état trempé revenu. Bonne tenue à chaud. Aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels. Résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive. relativement élevée à l'état trempé revenu
Si	coulabilité
Fe	Diminue les retassures internes
Mn	Aptitude a la déformation Resistance a la corrosion Aptitude ou brasage et soudage
Mg	Caractéristiques mécaniques élevés Resistance a la corrosion soudabilité
Cr	soudabilité et talle de grain moyenne

Tableau I-7: Influence des éléments d'adition

Elaboration et préparation de l'alliage 2017A :

Les alliages sont préparés après la sortie de l'aluminium pur des cuves on vide alors les poches de coulée dans des moules ou dans des fours ou l'aluminium en fusion est maintenu a une température de 650 680°C. En ajoutes les éléments d'alliages de notre alliage 2017A, qui son pré mélangés selon les rosettes et qui se présentent sous forme de petites lingots, sont ajoutes a l'aluminium pur. L'alliage est purifié en injectant des éléments de gaz dans le métal en fusion.et on enlève ensuite les impuretés qui Flottent a la surface. Le métal en fusion est finalement coulé dans des petits lingots.

Transformation de l'alliage d'aluminium :

Puisque notre alliage est un alliage de corroyage alors son élaboration pris en considération leur capacité à être mise en forme a l'état solide avec des déférentes types de mise en forme connu tel que le laminage, le tréfilage, le forgeage, l'extrusion etc.

Dans notre cas la transformation de notre alliage 2017A en va utiliser la mise en forme par laminage. On utilise comme produit départ un produit moulé dont la forme respect les contraintes de fabrication.se produit appelé lingots de laminage.

Principe de laminage :

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme du métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés, appelés *rouleaux*. Il existe aussi des opérations de laminage particulières utilisant plus de deux rouleaux.

Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau. Il permet également la production de barres profilées (produits longs).

Il existe de nombreux types de laminoirs :

- laminoir à produits plats
- laminoirs industriels pour les métaux
- laminoir à verre afin de produire les verres imprimés
- laminoir à produits longs
- laminoirs universels (métaux)
- laminoirs à fils
- laminoirs de bijoutiers

La figure suivante illustre le procédé de laminage où une tôle est engagée entre les deux cylindres tournant en sens inverse. La tôle d'épaisseur e_1 doit pouvoir s'engager entre les

cylindres où elle sera déformée en compression pour ressortir à une épaisseur e_2 correspondant à l'ajustement du jeu entre les cylindres.

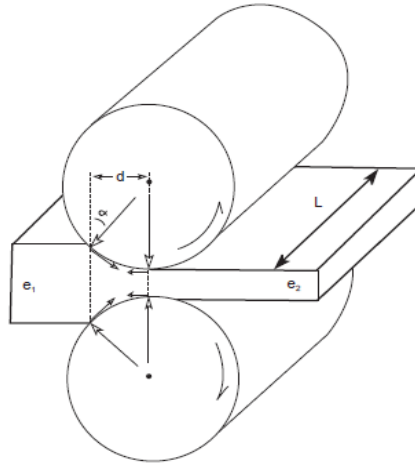


Figure. I.5. : Principe de laminage

Note :

Dans notre cas les barres d'aluminium sont de longueur très longues, elles sont de longueur 6m, en utilise alors le laminage à produits longs, ou laminage par coulée continue. Le schéma suivant illustre le procédé de laminage par coulée continue.

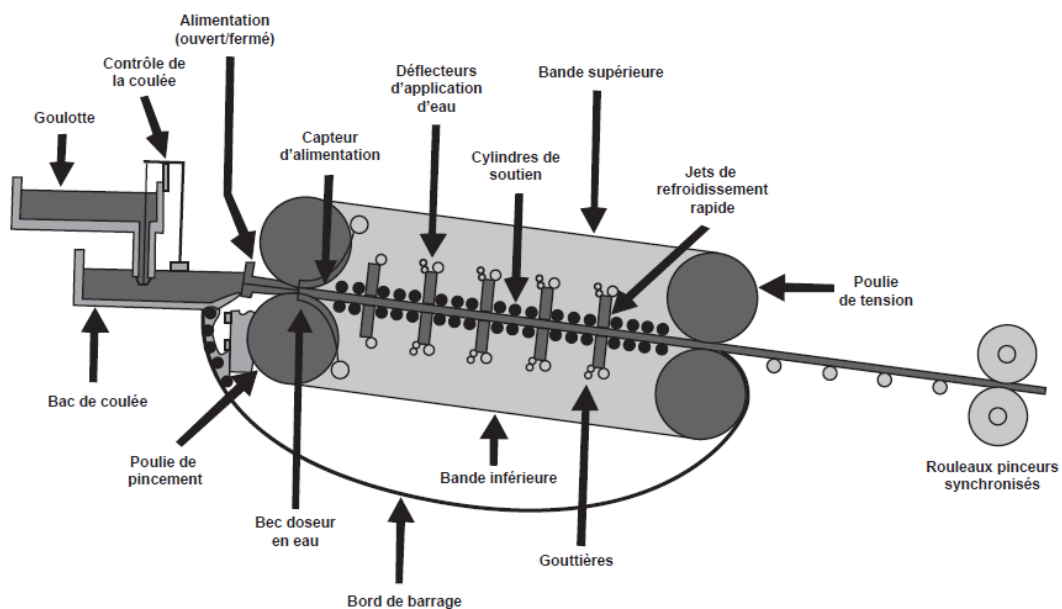


Figure.I.6. Exemple d'une Tôle d'aluminium produite par coulée continue.

Chapitre I. 3 : TRAITEMENTS THERMIQUES

I. Généralité

Un traitement thermique est une opération (ou une succession d'opération) au cours de laquelle la température tout en gardant le métal à l'état solide.

Cette opération s'accompagne d'un changement de la structure du matériau et de ses caractéristiques.

D'une façon générale, le traitement thermique ne modifie pas la composition chimique d'un alliage, mais peut modifier :

- La constitution
- L'état mécanique
- Les dimensions de la pièce : les gradients de la température et les changements de la structure provoquant des contraintes pouvant modifier la dimension de la pièce traitée.

II. Importance des traitements thermiques pour aluminium : [4]

L'aluminium et les alliages d'aluminium couvrent un domaine étendu de caractéristiques mécaniques puisqu'on trouve à chaque extrémité de ce domaine, d'une part, l'aluminium raffiné à l'état recuit avec une résistance à la rupture de l'ordre de 50 MPa et d'autre part, les alliages à haute résistance du type Al-Zn-Mg-Cu (7049 A) fortement chargés en élément d'addition et capables, à l'état trempé revenu, d'une résistance à la rupture de 65 à 750 MPa.

Une telle gamme de caractéristique mécanique est obtenue seulement en agissant sur la composition des alliages, mais aussi et pour une partie très importante, en effectuant des traitements thermiques qui permettent d'ailleurs d'agir dans deux sens, à savoir :

- ❖ Soit dans le sens d'une diminution de la résistance mécanique, diminution accompagnée généralement d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (ce sont les traitements d'adoucissement).
- ❖ Soit à la contrainte dans le sens d'une augmentation de la résistance mécanique (ce sont les traitements de durcissement).

Toutefois, les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs telles que l'aptitude à la transformation à chaud ou à froid, la résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage, l'aptitude à l'oxydation anodique, la conductivité électrique, la stabilité dimensionnelle, etc.

Aussi semble-t-il que de plus en plus, dans la métallurgie des alliages d'aluminium, la tendance soit de mettre au définir des traitements thermiques vraiment spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage déterminé.

II.1. Principaux type de traitements thermiques :

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classe en trois types principaux :

- Les traitements d'homogénéisation, généralement appliques sur les produits coulés avant leurs transformations ou également sur les produits déjà corroyés.
- Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration généralement appliqués en cours ou en fin de transformation.
- Les traitements de trempe structurale comportent :
 - Une mise en solution.
 - Une trempe.
 - Une maturation ou un revenu produisant le durcissement.

II.1.1. Traitement d'homogénéisation : [3]

Ce sont des traitements comportent un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits de fonderie ou corroyés, et destinés plus souvent à en faciliter la transformation à chaud au à froid (filage, forgeage, laminage...etc.). Il consiste en général en maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450°C à 610°C, qui ont pour but dissoudre les phases métalliques et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide. Les effets de l'homogénéisation peuvent être plus ou moins complexes suivant l'alliage auquel ils s'appliquent et également suivant les conditions de coulée de cet alliage. D'une façon générale, plusieurs types d'évolution aisément observables dans les alliages d'aluminium peuvent être retenus à savoir :

- La dissolution de phases intermétalliques en excès.
- Le nivellement des concentrations dans la solution solide.
- La précipitation de nouvelles phases intermétalliques.

II.1.2 Traitement d'adoucissement :

Ils ont pour but d'adoucir ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans le cas de l'écrouissage, ce sont des traitements de restauration et des recuit de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium.

Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

- Le traitement de restauration est effectué à 200 -300°C pendant 1 à 8 heures.

- Le traitement de recristallisation qui consiste à un chauffage entre 300 et 400 °C avec un temps de maintien de 0,5 à 3 heures.
- Dans la trempe structurale le traitement est un recuit de précipitation en ne peut pas durcir A-S13(44100).

II.1.3. Traitement de trempe structural :

Traitement thermique complète assurant un durcissement structural. Ce traitement comprend généralement :

- D'un refroidissement convenable (trempe) ;
- D'une maturation ou d'un revenu produisant un durcissement.

a). Mise en solution :

Opération consistant à maintenir pendant une durée et à une température suffisante, un alliage à l'état solide de façon que les éléments d'addition solubles soient dissous de quantité convenable dans l'aluminium.

Suivant les alliages, la mise en solution peut être effectuée par une opération spéciale (mise en solution séparée) ou s'accomplir spontanément au cours d'une transformation à chaud (refroidissement des pièces moulées).

b). Trempe :

Après sa mise en solution solide, l'alliage se refroidit assez rapidement pour que la solution solide reste sursaturée en éléments d'addition à la température ambiante, après cette opération l'alliage est en état de trempe fraîche avec des caractéristiques mécanique qui n'ont pas sensiblement augmentées par durcissement mais une bonne plasticité.

En effet, dans les alliages d'aluminium, pour que les caractéristiques mécaniques soient optimales, il faut que la concentration de la solution solide soit sensiblement la même qu'à la température de mise en solution, ce qui n'implique pas nécessairement que refroidissement soit très rapide .C'est là qu'intervient la notion de vitesse critique de trempe qui peut être considérée comme la vitesse minimale qui permette d'obtenir à la température ambiante la solution solide sursaturée.

c). Maturation (vieillissement naturel) : [5]

Après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante : c'est la maturation ou vieillissement naturel.(Evolution spontanée à la température ordinaire de la solution solide sursaturée).

Le comportement des alliages lors de la maturation est très variable d'une famille à l'autre. Après cette évolution, l'alliage est à l'état mûri.

d). Revenu (vieillissement artificiel) :

Le revenu est un traitement thermique effectué sur les pièces métalliques afin de leurs donner leurs caractéristiques mécanique et parfois de résistance à la corrosion d'usage. Ce traitement est effectué après la trempe.

- ✓ Réchauffage de la pièce jusqu'à une certaine couleur

✓ Refroidissement définitif.

Le but de revenu :

Le but de revenu est diminuer les effets de la trempe d'homogénéisation et stabiliser les propriétés mécaniques et d'atténuer ou de faire disparaître les tensions internes.

Le revenu s'effectue à une température inférieure à celle de la trempe ou de recuit. Pour les pièces en alliage d'aluminium, le traitement de revenu durcit l'œuvre par précipitation de composés intermétalliques dans la matrice aluminium.

2.3.5. Recuit :

Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement permettent de modifier les caractéristiques d'un métal. □ l'occasion d'un recuit, les grains (monocristaux) du métal se reforment. Ce procédé est utilisé pour éliminer les effets de phénomènes mécaniques ou thermiques considérés comme néfastes. Le recuit de cristallisation, après écrouissage, a pour but de confrère au métal une taille de grain optimal pour son utilisation future (pliage, emboutissage).

III. Traitements thermiques des alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium susceptible de durcissement structural, alors que le dernier traitement est très spécifique.

III.1.Cycle thermique : [14]

La variation de la température du métal en fonction du temps est appelée cycle thermique. Le cycle thermique comporte généralement trois étapes (Figure.I.7)

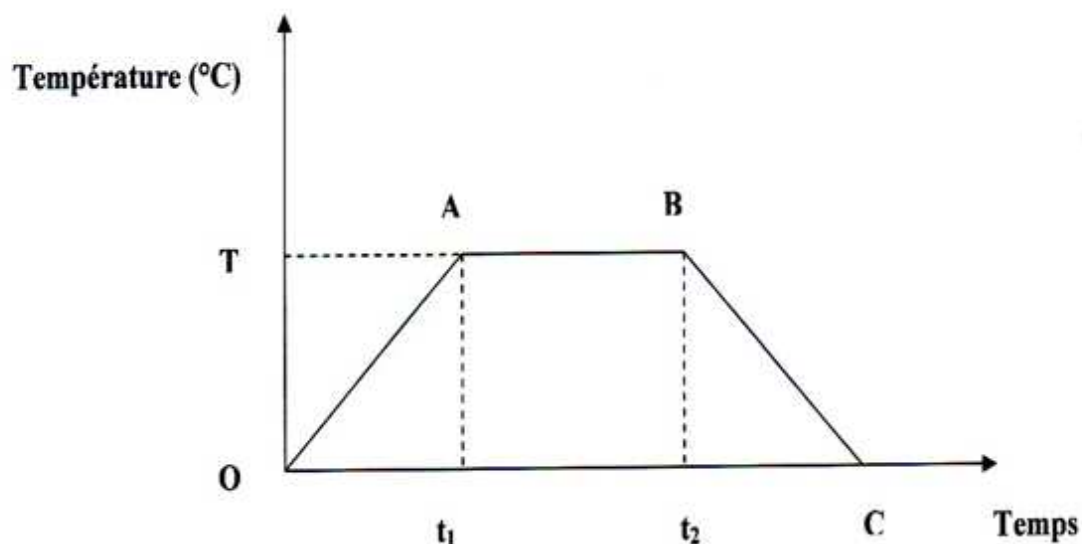


Figure.I.7: Cycle thermique.

➤ **Chauffage (courbe OA):**

Le chauffage (généralement assez lent) est effectué de la température ambiante jusqu'à une température T dite la température de traitement thermique.

➤ **Le maintien (droite AB) :**

La température est maintenue constante, de temps T_1 au T_2 . Cette durée dépend de la conductibilité thermique de l'alliage à traiter et de la cinétique des réactions qui se déroulent dans cet alliage à la température de traitement.

➤ **Refroidissement (courbe BC) :**

Durant cette opération la température du métal est ramenée à la température ambiante.

Le refroidissement peut être rapide ou lent, la vitesse de refroidissement dépend type de traitement et influe sur les caractéristiques finales du matériau traité.

Remarque :

-Durant le chauffage : La surface de la pièce s'échauffe plus vite que le cœur du métal .Il est donc évident qu'il faut maintenir la pièce à la température T pour égaliser les deux températures, ce gradient de température est d'autant plus élevé que la pièce est volumineuse ou que son matériau est mauvais conducteur de la chaleur.

-Au Refroidissement : La surface de la pièce se refroidit plus vite que le cœur, la vitesse de refroidissement au cœur de la pièce dépend du milieu de refroidissement.

Milieus de refroidissement :

- Faible vitesse : Au four, à l'air ;
- Vitesse moyennes : à l'air soufflé, dans l'huile ;
- Grandes vitesse : dans l'eau douce, dans l'eau salée.

III. Microstructure :

La microstructure décrit l'ensemble des grains ou des particules microscopiques qui caractérisent la structure d'un grand nombre de matériaux.

On peut caractériser la microstructure des matériaux à différentes échelles selon ce que l'on cherche à observer. Pour chaque échelle il faut faire appel à un outil de taille appropriée, de l'échelle macroscopique à l'observation de la microstructure et à la détermination de l'arrangement des atomes. Ces analyses mettent successivement en jeu le microscope optique (observation du mm au μm), le microscope électronique (observation 100 au nm) et la diffraction des rayons X dont la longueur d'onde est de l'ordre du dixième de nm, on étudie les structures cristallines [3,15].

III.1. La macrographie :

La macrographie consiste en un examen d'ensemble d'une structure métallique ou d'alliage qui s'effectue à l'œil nu, ou avec de faible grossissement (inférieur à 100).Cet examen peut aussi s'effectuer sur des sections prélevées sur des ébauches (lingots, pièces de forge...) que sur des produits finis. Il permet de déterminer l'allure de la constitution cristalline de grandes

surfaces qui doivent être soigneusement polies d'un papier émeri fin en évitant tout écrouissage au cours de travail. Puis cette surface soumise à une attaque par des réactifs appropriés. Ce réactif agit par une dissolution à vitesse inégale de la surface métallique et crée ainsi des différences de niveau permettant l'observation. La macrographie met en évidence :

- la grosseur et la forme des grains : de petits grains traduisent en général un refroidissement rapide alors que les gros grains supposent un refroidissement lent.
- les traitements mécaniques en observant la déformation des grains (déformation à froid, la différence de taille de grain (déformation à chaud)
- La répartition d'inclusion ou de cavités.

III.2. La micrographie:

La micrographie a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions métalliques, des microfissures et aussi de l'organisation de diverses phases présentes (leur taille, leur forme, leur distribution) donc sa microstructure. L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement effectué sur le produit à l'attaque micrographique.

III.2.1. observation par microscopie :

La micrographie à pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions métalliques, des microfissures et aussi de l'organisation de diverses phases présentes (leur taille, leur formes et leur distribution).

L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement effectuer sur le produit a l'attaque micrographique.

a- Observation par microscope optique :

Du fait de son pouvoir de résolution insuffisant, il n'est utiliser on pratique que pour la détermination de la structure et la texture granulaire des matériaux étudiés

b- Microscopie électronique à balayage : est utilisé afin d'observer plus finement l'état de surface des matériaux et rendre compte des précipités grossiers présents dans les divers matériaux. Le principe de l'imagerie **MEB** consiste à composer une image de surface à partir des électrons secondaires éjectés du matériau sous l'effet du faisceau primaire. L'énergie de ces électrons dépend directement de l'énergie des électrons primaires et du numéro atomique de l'élément qui interagit avec le faisceau primaire [3].

III.2.2 : Importance de la métallographie :

L'étude métallographique est un moyen de contrôle essentiel de la structure micrographique des matériaux métalliques.

Toute étude de matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs différentes caractéristiques mécaniques. Toutes les étapes de la vie d'un matériau sont concernées : Mise au point, utilisation, détérioration par corrosion

Grâce à de nombreux microscopes optiques et caméras vidéo, il est possible de visualiser tous types de surfaces avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 1000 fois. De ces nombreuses observations, et grâce à une bonne connaissance de la physique des solides et des diagrammes de phases des matériaux, une analyse précise peut être menée, et de nombreux paramètres tels que la vitesse de refroidissement ; la grosseur des grains ; l'homogénéité; la présence d'impuretés peuvent être visualisés, et on peut très rapidement avancer dans la compréhension des diagrammes d'équilibre.

CHAPITRE I.4. ESSAIS MECANQUES

I.1. Introduction :

L'ingénieur ne peut calculer une pièce ni déterminer les charges admissibles sans connaître les caractéristiques mécaniques du matériau, il doit savoir à partir de quelle charge la pièce commence à se déformer de façon irréversible, entraînant ainsi une modification de sa géométrie, et à partir de quelle charge il y a risque de rupture.

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et alliages : aptitude à la déformation par traction ou compression, résistance à la pénétration ... etc.

Les résultats obtenus dans ces différents essais qui mettent en œuvre des techniques particulières sont en relation directe avec la structure du métal et permettent de prévoir son comportement dans les conditions réelles de l'utilisation. [17]

I.2. Essai de traction :

I.2.1. Principe de l'essai :

L'essai de traction est l'un des essais mécaniques les plus fréquents. Il sert, comme nous le verrons, à déterminer avec certitude plusieurs propriétés mécaniques des matériaux.

On déforme graduellement une éprouvette, habituellement jusqu'à la rupture, en appliquant le long de son axe une force qui croît graduellement. La figure ci-dessous représente une éprouvette d'essai de traction (normalement la section transversale est circulaire mais on utilise aussi des éprouvettes à section transversale rectangulaire).

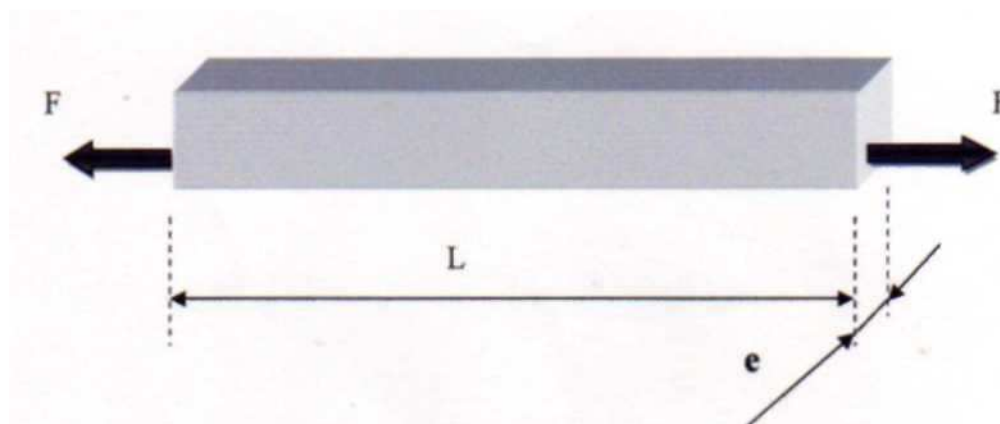


Figure. I.8: Traction

Pendant l'essai en relève un diagramme au sont enregistrés les allongements en fonction des charges.

Ensuite on peut calculer plusieurs caractéristiques mécaniques

- * La limite élastique
- * La limite à la rupture
- * Le module de Young
- * Le coefficient de poisson
- * La contrainte maximale de traction

I.2.2. Eprouvettes :

Les éprouvettes comportent généralement deux têtes d'amarrage et une partie calibrée soigneusement polie de section constante comportent deux repères distants d'une longueur L_0 .

La partie calibré est raccordée aux extrémités par des congés de rayon R , et les têtes d'amarrage sont adaptées aux mâchoires de la machine de traction.

La section droite de l'éprouvette peut être circulaire, carrée, rectangulaire ou hexagonale. La (Figure.I.9) représente le schéma de l'éprouvette de traction.

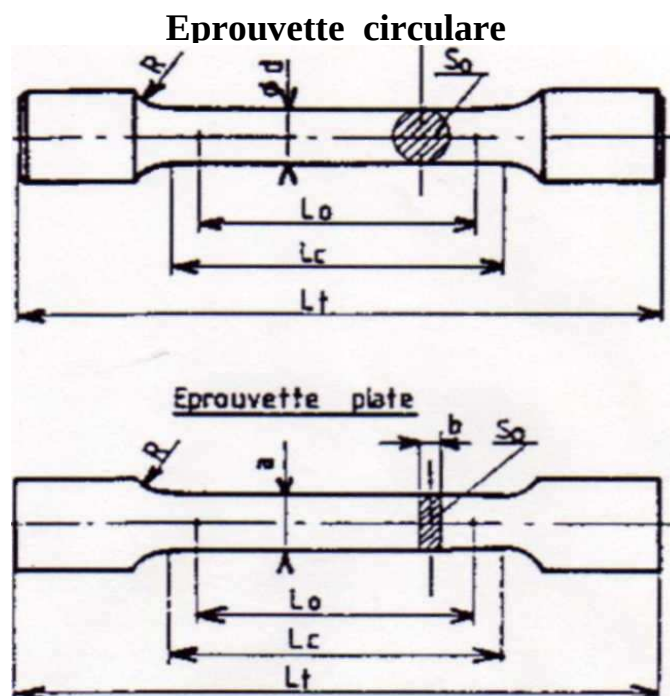


Figure.I.9:: Les éprouvettes de traction

Où

- a Epaisseur de l'éprouvette plate
- b Largeur de l'éprouvette plate
- S_0 Section initiale de l'éprouvette
- L_c Longueur de la partie calibrée
- L_t Longueur totale de l'éprouvette
- L_0 Longueur initiale entre repères : il s'agit de la longueur utilisée pour l'étude de l'allongement.

Les dimensions des éprouvettes sont fixées par des normes en fonction du type d'alliage (acier, fonte, aluminium ets...), de la forme (rond, plate, fil..) et des dimensions des sections.

Pour les d'aluminium de forme (d ou $b > 0,04\text{mm}$), la norme est NF A 03-251 et le dimensionnement normalisé est : $L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$

I.2.3. Courbes de traction :

La figure (**Figure.I.10**) représente trois comportements possibles des matériaux : fragile, ductile et élastique non linéaire. Mais en réalité la courbe de traction (Diagramme conventionnel) présente généralement un autre aspect (**Figure.I.10**).

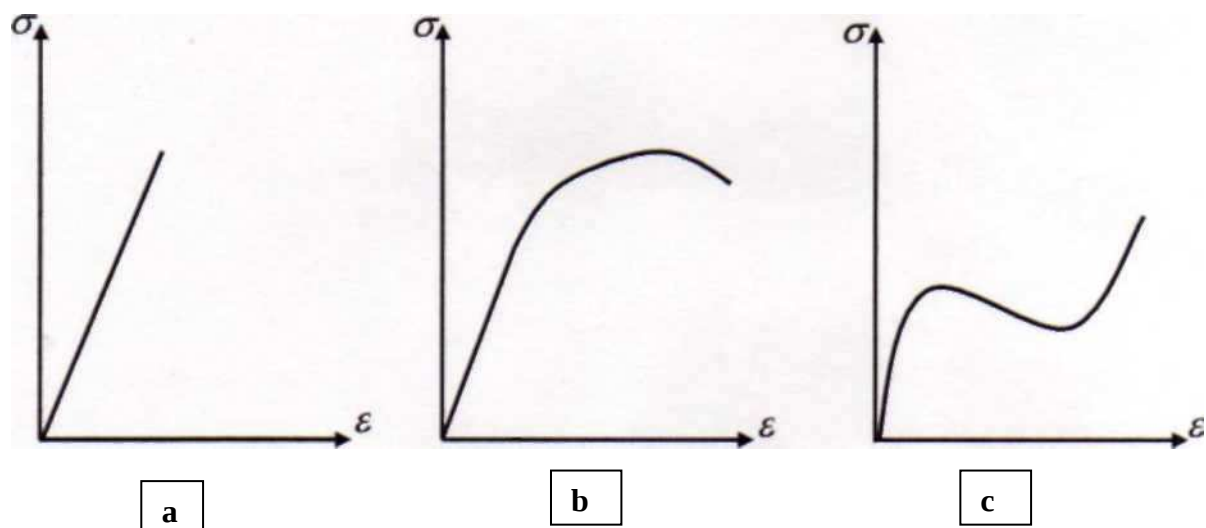


Figure.I.10: Comportement possible du matériau.

I.2.4. Diagramme conventionné :

Le diagramme de traction est dit conventionnel lorsque l'on rapporte respectivement les mesures de résistance unitaire et d'allongement unitaire aux valeurs initiales S_0 et L_0 de l'éprouvette.

I.2.5. Courbe de traction :

En réalité, la courbe de traction présente généralement un autre aspect **Figure.I.11**. car les matériaux ne sont jamais parfaits.

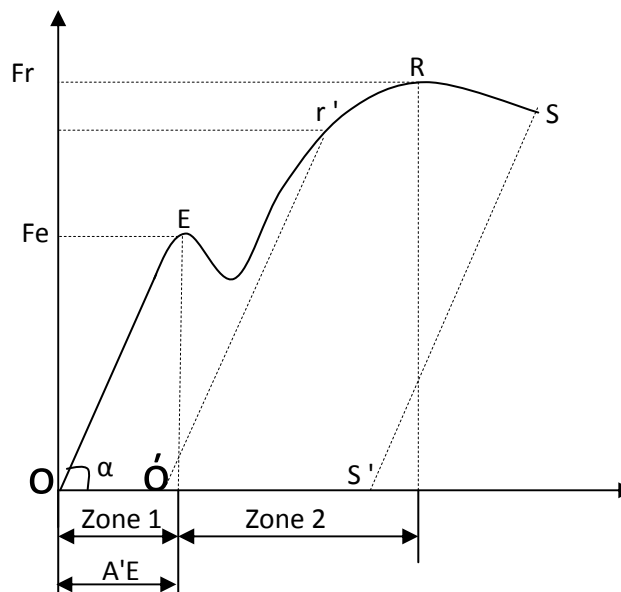


Figure.I.11.Courbe de traction.

I.2.5.1. Lecture et interprétation de la courbe de traction :

L'éprouvette est mise en place, la charge est appliquée progressivement. Trois domaines sont mis en évidence par le diagramme.

❖ Domaine OE :

Domaine élastique ou la déformation est réversible une fois la charge supprimée. Le point E correspond à la limite R_e . Dans le domaine OE la charge est proportionnelle à l'allongement. La loi de variation de la charge en fonction de l'allongement ϵ est connue sous le nom de la loi de **HOOKE** donnée par :

$$R = E \epsilon$$

❖ Domaine ER :

Domaine de déformation permanente ou déformation plastique, le matériau subit une déformation homogène dite plastique qui est permanente après suspension de la charge.

Avec R : point de charge maximale R_m appelée charge de rupture ou début de striction.

❖ Domaine RS :

Domaine de striction ou la section de l'éprouvette subit une réduction jusqu'à la rupture au point S. La variation de cette réduction du diamètre tout au long de l'essai, nettement visible est appelé Coefficient de Striction. [16]

a).Forme classique d'un diagramme de traction :

Le diagramme de traction représente l'évolution de la charge unitaire

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ (MPa)} \quad \text{En fonction du taux d'allongement } \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}.$$

b).Caractéristique mécanique de l'essai de traction :

- **Limite d'élasticité :** $R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ (MPa)}.$

F_e : charge à la limite apparent d'élasticité en Newton.

S_0 : section initiale apparent d'élasticité en newton.

- **Résistance à la traction :** $R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (MPa)}.$

F_m : charge maximale.

- **Allongement à la rupture :** $A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100.$

L_u : longueur de l'éprouvette reconstituée après la rupture.

L_0 : longueur de l'éprouvette initiale.

- **Coefficient de striction** $Z\% = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100.$

- **Allongement de striction** $Z_u\% = \frac{S_0 - S_u}{S_u} \times 100.$

S_u : section minimale de l'éprouvette après longitudinale.la rupture.

- **Module d'élasticité longitudinal** $E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} \text{ (daN/mm}^2\text{)}$

- **Module d'Young E :**

Est la pente de la partie linéaire **OA** (**Figure.I.12.**) représente le module d'Young **E** ou module l'élasticité, exprimée en (MPa ou GPa).

On appelle **loi de HOOK** la relation :

$$\sigma_{\text{élastique}} = E \varepsilon_{\text{élastique}}$$

Avec σ : Est la contrainte

E : Est le module de Young

ε : Est la déformation

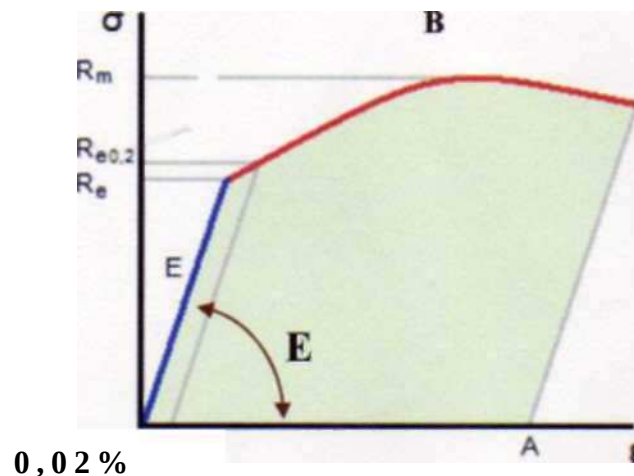


Figure.I.12.Module d'Young.

I.2.6. Diagramme rationnel : [3]

Le diagramme rationnel donne la courbe de traction représentée dans les coordonnées

Contrainte vraie σ en fonction de la **déformation rationnelles ε** .

- ❖ **Contrainte vraie :**

La section de l'éprouvette varie au cours de l'essai de traction c'est pourquoi il est plus rationnel de considérer la contrainte comme le rapport de la charge F à la section instantanée S . On obtient alors la contrainte vraie qui est :

$$\sigma = F/S$$

En admettant que le volume de la partie calibrée de l'éprouvette reste constant au cours de l'essai, On peut écrire :

$$S_0 L_0 = S L = S (L_0 + \Delta L)$$

$$D'où \quad S = \frac{S_0}{1 + \Delta L/L_0} = \frac{S_0}{1 + e}$$

On déduit donc : $\sigma = F/S = F/S_0 (1 + e) = R (1 + e)$

❖ **Déformation rationnelle ε [3] :**

Pour calculer la vraie déformation on considère l'allongement infiniment petit dL , la vraie déformation sera égale à la somme des rapports $\frac{dL}{L}$ pour une modification de la longueur de L_0 à L . On écrit :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L dL/L = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + e)$$

La différence entre e et ε devient importante au de la de 20 % c'est pourquoi la courbe rationnelle n'est pas très différente de la courbe conventionnelle dans le domaine élastique mais présente une nette différence dans le domaine plastique.

La Figure.I.13.montre l'allure de la courbe rationnelle.

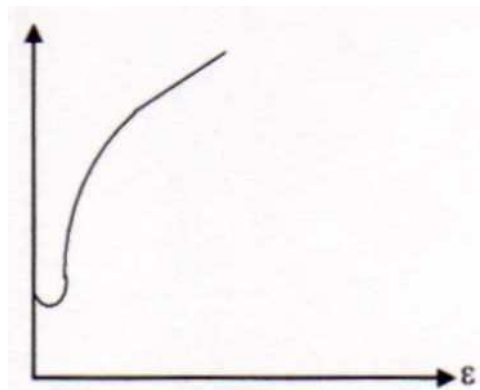


Figure.I.13.Courbe rationnelle de traction

❖ **Coefficient d'écrouissage n : [3]**

La courbe rationnelle peut être mise sous forme analytique dont l'équation la plus utilisée est :

$$\sigma = K \varepsilon^n$$

Avec :

K: constante

n: coefficient d'écrouissage.

Le coefficient n représente la pente de la courbe considérée dans la coordonnée logarithmique ($\ln \sigma = f(\ln \varepsilon)$).

❖ **Ductilité:**

La ductilité du matériau est appréciée à partir de la valeur du coefficient de striction Z :

- Z est grand ($Z > 0.5$), le matériau est ductile
- Z est faible ($Z < 0.5$), le matériau est semi fragile
- Pour le matériau fragile la rupture a lieu dans le domaine élastique (absence de striction).

❖ Ténacité : [2]

Elle se définit comme le travail absorbé par unité de volume pour provoquer la rupture du matériau.

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\varepsilon_r} \sigma \cdot d\varepsilon$$

La ténacité représente donc la surface sous tendue par la courbe rationnelle comme le montre la figure suivante:

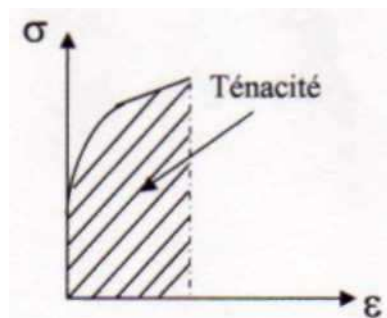


Figure.I.14.Air sous -tendue par la courbe rationnelle (ténacité).

I. 2.7. Conditions d'essai :

Les caractéristiques mécaniques dépendent de la température du matériau et de la vitesse de déformation.

La norme prévoit des vitesses classiques en fonction du type de matériau. Par exemple :

- Aciers : $\dot{\varepsilon} \leq 0,15 L_0$ (mm.mn⁻¹)
- Aluminium : $\dot{\varepsilon} < 0,009 L_0$ (mm.mn⁻¹)
- Cuivre : $\dot{\varepsilon} < 0,006 L_0$ (mm.mn⁻¹)

L'essai de traction est généralement réalisé à la température ambiante avec une faible vitesse de déformation.

Le paramètre température est considéré dans le cas où l'échantillon est chauffé et tiré en même temps.

I. 3. Essai de dureté : [3]

1.3.1. Définition :

La dureté est une autre caractéristique mécanique des solides. Elle peut s'exprimer par la résistance mécanique des qu'un corps oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur.

L'essai de dureté très simple et très rapide ne demande pas d'outillage important. Il a l'avantage de pouvoir être exécuté sur la pièce même, et non sur une éprouvette.

1.3.2. Principe de l'essai de pénétration :

Il consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. L'empreinte est d'autant plus que le métal est moins dur.

1.3.3. Type essais :

Les essais les plus classiques sont les essais : BRINELL, VICKER et ROCKWELL.

1.3.3.1 Essai brinell :

Il consiste à enfoncer un pénétrateur dans la pièce à essayer une bille en acier trempé de diamètre D sous une charge F et à mesure le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge F (**Figure.I.15**).

La dureté Brinell HB est le quotient de la charge F en par l'aire de l'empreinte considérée comme une calotte sphérique, exprimée en

$$HB = \frac{0,102.2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- F : est la force appliquée en kilogramme-force (kgf) ; Si F est Newton, il faut multiplier F par 0,102
- D : le diamètre de la bille en millimètre (mm).
- d : le diamètre de l'empreinte laissée par la bille en millimètre (mm).
- h : profondeur en millimètre (mm)

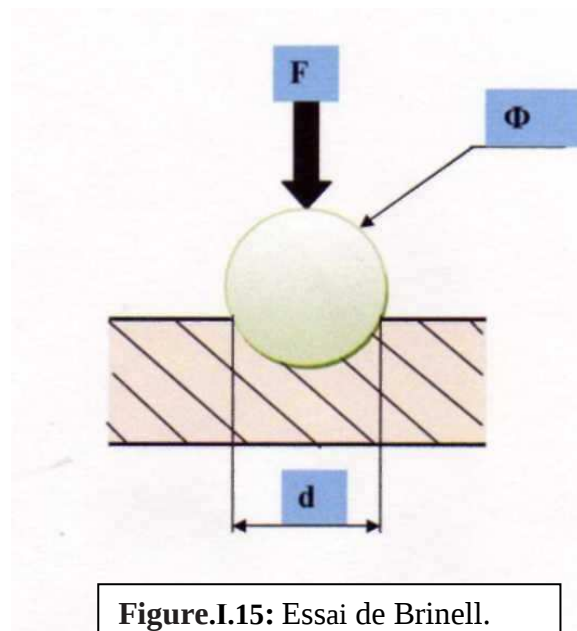


Figure.I.15: Essai de Brinell.

1.3.3.2 : Essai Vickers :

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer, sous une charge F , à l'aide d'un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, angle au sommet 136° , et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface, après enlèvement de la charge (Figure.I.16). La dureté Vickers HV est le quotient de la charge d'essai par l'aire de l'empreint.

$$HV = 0.12 \times [(2F \sin^{136^\circ}/2) / d^2] = 1.854 \times (F/d^2)$$

Avec :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

- H_v : La dureté Vickers.
- d : diamètre de l'empreinte en millimètre (deux diagonales du carré de l'empreinte).
- F : charge d'essai(N).

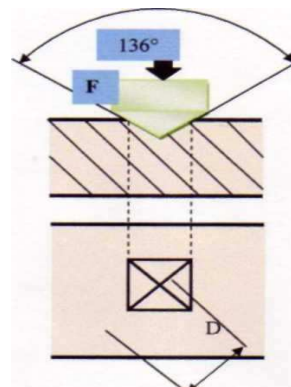


Figure. I.16: Essai de Vickers

1.3.3. 3: Essai Rockwell :

Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement rémanent h de la profondeur de la pénétration.

Exécution de l'essai :

- Le pénétrateur étant perpendiculaire à la surface à essayer, il est soumis sans chocs à une charge initiale de pénétration F_0 . Cette charge entraîne une pénétration a du pénétrateur, qui sert d'origine de mesure de la dureté.
- On applique au pénétrateur, progressivement et sans chocs (en 2 à 8 secondes), une surcharge F_1 qui entraîne un accroissement de pénétration b de pénétrateur.
- On enlève la surcharge F_1 pour revenir à la charge initiale F_0 . La pénétration du pénétrateur est alors c .
- On mesure alors l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration h , c'est-à-dire la différence entre la pénétration c sous charge F_0 à la fin de l'essai et la pénétration a sous charge F_0 au début de l'essai.

❖ . Essai Rockwell C(HRC) :

Le pénétrateur est un cône de diamant d'angle au sommet 120° . L'accroissement e se mesure en unités égales à $0,002\text{mm}$. La charge utilisée est 150 kg dont 10 kg de recharge. Cet essai est utilisé pour qualifier la dureté de l'acier dur, acier trempés.

$$F_0 = 10\text{Kg};$$

$$F_0 + F_1 = 150\text{kg};$$

$$\text{HRC} = 100 - e;$$

$$e = 0,12 / 0,002.$$

❖ Essai Rockwell B (HRB) :

Le pénétrateur est une bille d'acier de diamant $1,59\text{mm}$ l'accroissement se mesure également en unités égales à $0,002\text{mm}$. La charge utilisée est 100Kg dont 10Kg de recharge. Cet essai est utilisé pour les aciers doux, non trempés et les métaux et alliages non ferreux. (Figure.I.17). $\text{HRB} = 130 - r$

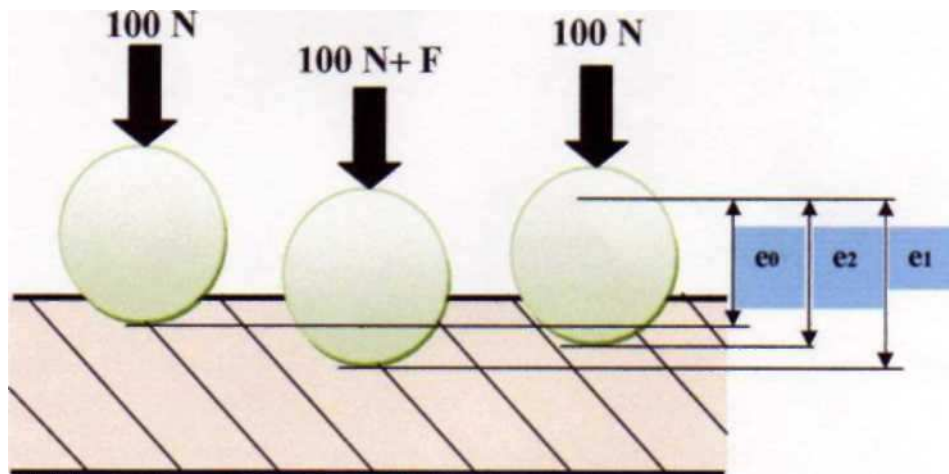


Figure.I.17: Essai de dureté Rockwell HRB

I.3.4. Autres essai de dureté : [13]

- **La dureté de mohs :**

Basée sur la résistance à l'abrasion, elle est constituée de dix matériaux de référence (talc, gypse, calcite, fluorite, apatite, feldspath, quartz, saphir, diamant).

- **La dureté Shore :(1907)**

Mesure l'élasticité par la profondeur de pénétration, utilisée dans le domaine des élastomères.

- **La dureté Meyer :**

Mesure la plasticité. On utilise un duromètre brinell. Soit D (mm), le diamètre de l'empreinte laissée par une charge $F(N)$: $HM = 4F / \pi D^2$.

- **La dureté Barcol :**

Pénétration d'une pointe en acier, utilisé pour les plastiques durs, résines composites (évier, baignoires....), échelle graduée de 0 à 100.

- **La dureté Buchholz :**

Domaine des revêtements organique (vernis et peintures), longueur de l'empreinte laissée par une roue biseautée sous une charge de 500 g.

I.4. Essais de résilience :

La connaissance des caractéristiques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des rupture peuvent être obtenues pour des contraintes inférieures à la limite

d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent les matériaux fragiles, ces conditions ont un facteur commun qui est une concentration de contrainte liée à la présence d'un défaut et elles varient fortement en fonction de la température, de la vitesse de déformation et des dimensions des pièces sollicitées. Un des moyens les plus classiques et les plus anciens pour caractériser la fragilisation d'un matériau sous l'action d'un choc est l'essai de résilience. Il est fréquemment appelé essai de résilience Charpy ou même essai Charpy.

Et ce dernier permet d'évaluer les risques de rupture fragile d'un matériau donné. C'est un paramètre important pour la classification des matériaux, si on considère que parmi les modes de ruine d'une construction ou d'une pièce mécanique, c'est celui qui peut être considéré comme le plus dangereux.

I.4.1. L'éprouvette :

L'éprouvette est constituée d'un barreau entaillé par usinage en son milieu. La forme de l'entaille la plus fréquente est la forme en V (type A dans la norme ASTM) d'une profondeur de 2mm. Il existe également une éprouvette avec une entaille en U (type C dans la norme ASTM).

Les dimensions générales des éprouvettes sont les suivantes :

Dimension en mm	Eprouvette en V	Eprouvette en U
Longueur	55	55
Hauteur	10	10
Largeur	10	10
Hauteur d'éprouvette à fond d'entaille	8	5
Rayon à fond d'entaille	0.25	1
Angle de l'entaille	45°	Bords parallèles

Tableau I-8: Les dimensions des éprouvettes de résiliences.

I.4.2. Machine de résilience :

L'appareil d'essai utilisé est un mouton pendulaire (**mouton de Charpy**)

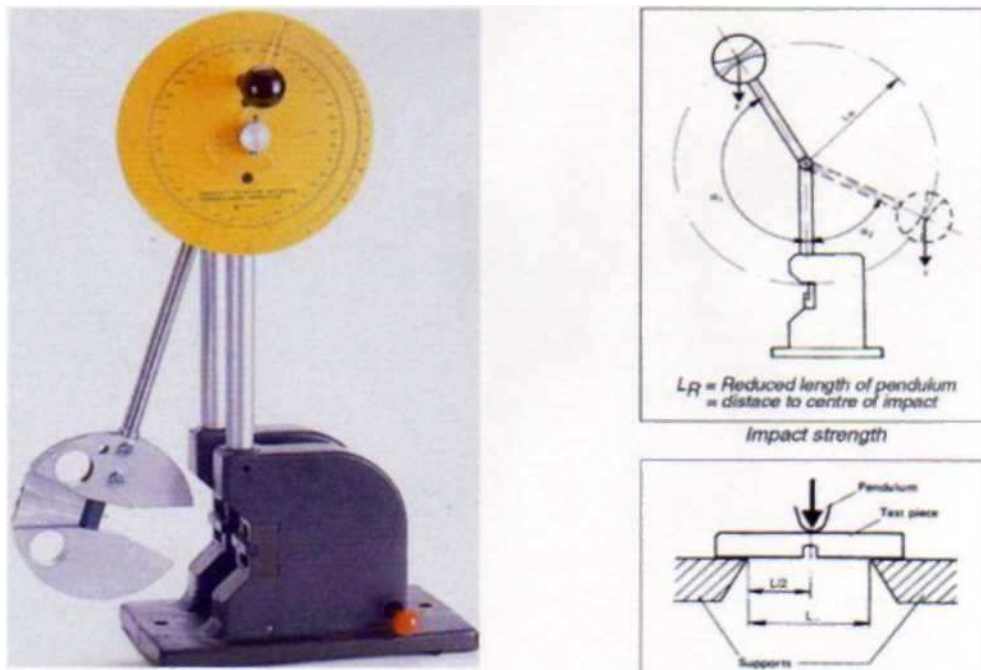


Figure.I.18 : Essai CHARPY

La mesure instantanée de l'effort étant pratiquement impossible, on lui substitue la mesure du travail dépensé pour rompre une éprouvette constituée du matériau à étudié.

La masse frappante constitue un pendule articulé en O sur le bâti. L'éprouvette est placée sur 2 appuis en partie basse de façon à ce que le plan d'oscillation du pendule coïncide avec le plan médian de l'entaille pratiquée sur l'éprouvette.

Un crochet maintient le pendule en position haute.

Le crochet relevé, le pendule de poids P lâché d'une hauteur de H_0 vient briser brutalement l'éprouvette et continuant sur sa lancée remonte jusqu'à la hauteur H_1 , en fonction de l'énergie encore disponible. Il oscille et s'immobilise en partie basse. L'aiguille entraînée pendant la descente donne l'angle maximum de déplacement.

Le travail de rupture de l'éprouvette est : $W = P (H_0 - H_1)$

Ou **W**: est en **joule**,

P : Poids du mouton-pendule,

H₀ : Hauteur du mouton-pendule à sa position de départ,

H₁ : Hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée.

On appelle résistance aux chocs ou résilience **K**:

$$K = \frac{W}{S_{\min}} \quad [K]: J/cm^2$$

Avec : $S_{\min}$: Section minimale (cm^2).

La graduation de la machine permet généralement d'obtenir directement une valeur en joule.

I.5. La fatigue : [16]

L'essai de fatigue donne le comportement d'un matériau à des contraintes périodique, cet essai permet de déterminer une limite d'endurance, c'est-à-dire la contrainte (ou la déformation) maximale sous la quelle la durée de vie de la pièce, serait maximale.

Parmi les différentes sollicitations possibles, on peut envisager un essai de fatigue en traction -compression alternes ou encore en flexion. On distingue en fonction de R les différents types de cycles qui sont :

❖ Alternée symétrique

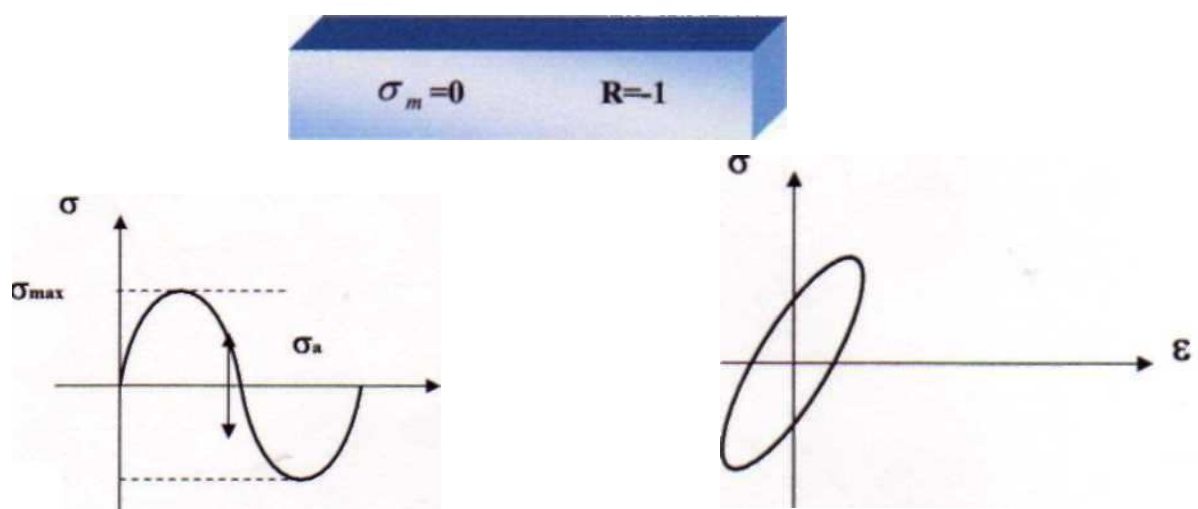


Figure.I.19 : cycle symétrique

❖ Alternée dissymétrique:

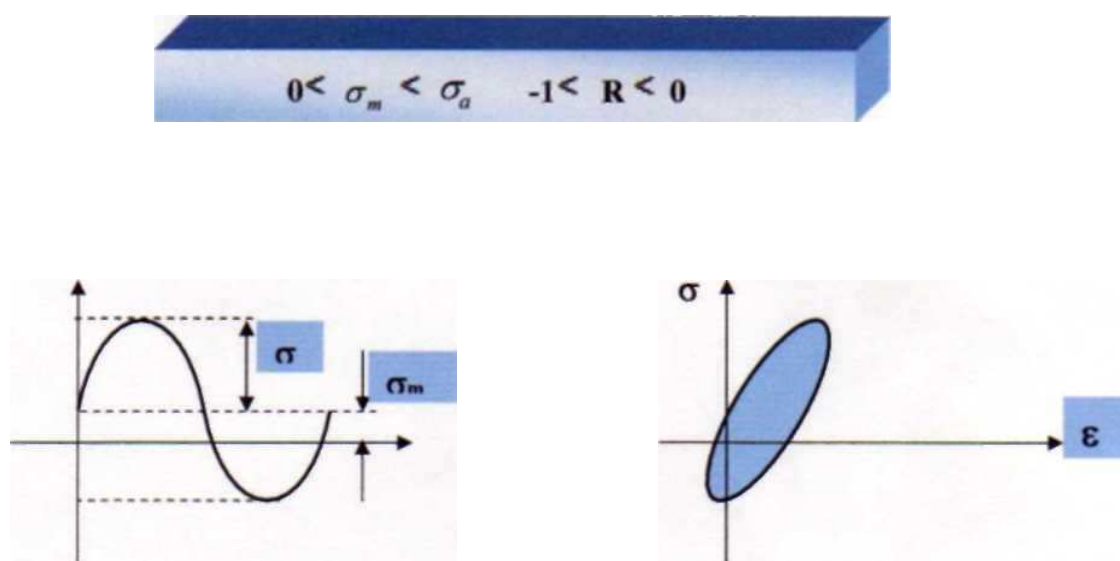


Figure.I.20 : cycle asymétrique

❖ Répétée:

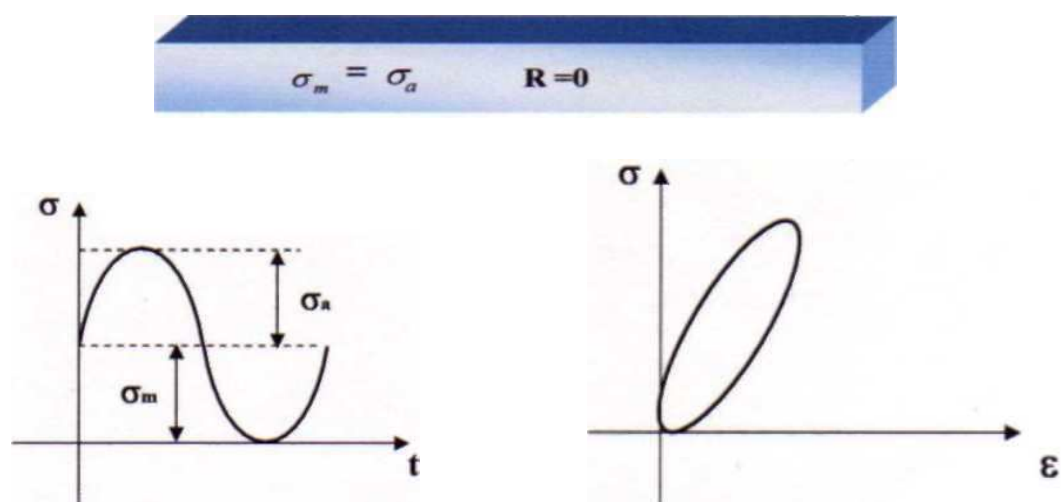
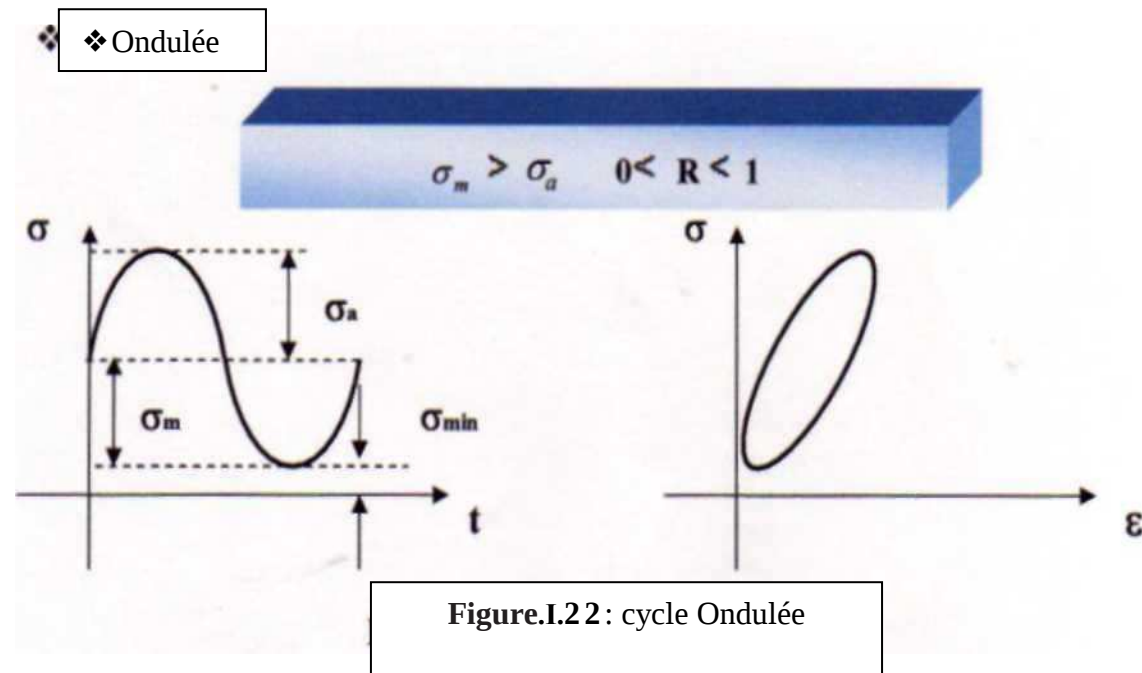


Figure.I.21 : cycle répéter



On peut considérer un cycle comme la superposition d'une contrainte constante σ_m et une contrainte variable σ_a .

I.5.1. Les caractéristiques d'un cycle :

- Le coefficient d'un cycle : $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ ou $R = \epsilon_{min} / \epsilon_{max}$
- Amplitude de la contrainte : $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2$
- La contrainte moyenne : $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2$

I.5.2. Limite d'endurance :

C'est la contrainte maximale peut supporter une pièce sans se rompre théoriquement.

I.5.3. Diagramme d'endurance (courbe de Wöhler) :

Ce diagramme nous permet d'évaluer la durée de vie d'un matériau soumis à des charges cycliques, c'est-à-dire on peut déterminer le nombre de cycles au bout duquel le matériau ou l'éprouvette se rompt. et déterminer même la limite d'endurance.

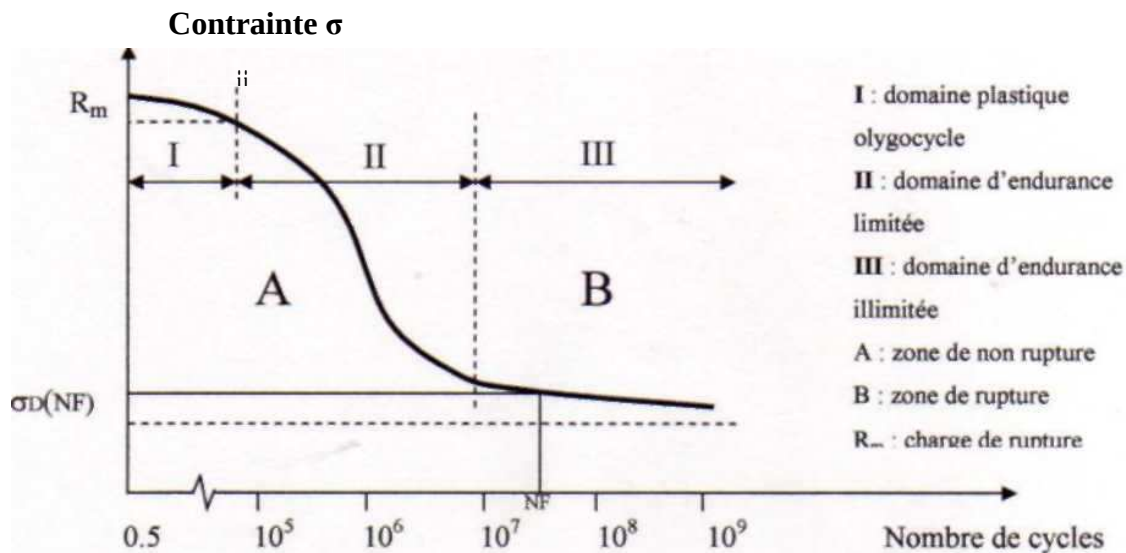


Figure.I.23 : diagramme d'endurance

Sur cette courbe, connue sous les noms de courbe de Wöhler et courbe S-N (stress-number of cycles), on peut distinguer trois domaines :

□ Zone I : de fatigue plastique oligocyclique sous forte contrainte, la rupture survient après un très petit nombre d'alternances et est précédée d'une déformation plastique notable.

❖ Zone II : de fatigue ou d'endurance limitée, ou la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles, nombre qui croît quand la contrainte décroît.

❖ Zone III : d'endurance illimitée ou zone de sécurité, sous faible contrainte, Pour laquelle la rupture ne se produit pas avant un nombre N_r donnée des cycles : 10^7 , $3 \cdot 10^7$ et même 10^8 , supérieur à la durée de vie envisagée pour la pièce.

Dans de nombreux cas, on peut tracer une branche asymptotique à la courbe de Wöhler (l'asymptote étant la limite d'endurance ou la limite de fatigue C_0). Par contre, dans certains cas, il ne semble pas qu'il y ait d'asymptote horizontale, ce qui se produit lorsqu'il y a simultanément fatigue et corrosion.

Chapitre I.5 : Défauts cristallins

I. Introduction : [20]

Les cristaux ne sont jamais parfaits. Il y a toujours des erreurs dans les empilements qui peuvent être décrites comme des défauts ponctuels, linéaires, surfaciques et volumiques. On distingue quatre types de défauts :

- Les défauts ponctuels, de dimension 0 : ils concernent un nœud unique, et ne perturbent que les quelques nœuds voisins, par exemple les atomes interstitiels.
- Les défauts linéaires ; Les dislocations, dimension 1 : il ne concerne que les nœuds situés sur une courbe, et ne perturbent que quelques nœuds voisins.
- Les défauts plans, de dimension 2 : surfaces, joints de grains, joints de macles.
- les défauts en volume, de dimension 3 : des précipités, des inclusions (les saletés) des pores.

II. Les défauts ponctuels (Figure.I.24) [19]

En cristallographie, les défauts ponctuels sont des défauts qui existent au niveau des dimensions atomiques, et peuvent être créés par agitation thermique, écrouissage,...

Ils influent sur certaines propriétés physiques tels que la conductibilité électrique, les propriétés magnétiques,...

Ces défauts correspondent à 4 situations :

II.1. Lacune

La lacune caractérise l'absence d'un atome d'un site normal du réseau cristallin (1).

II.2. Atome auto interstitiel

Lorsqu'un atome constitutif du cristal est placé en insertion, on a affaire à auto- interstitiel (2)

II.3. Atome étranger en substitution

Un atome étranger occupe un nœud du réseau. Chimiquement, il s'agit d'une impureté, mais on dit ici qu'il s'agit d'un élément d'alliage car cet atome étranger est dissous dans le métal de base (solution solide de substitution). La présence d'un tel atome étranger provoque de légers déplacements des atomes environnants (3).

II.4. Atome étranger en insertion

Lorsqu'un atome étranger de petite taille s'insère dans les espaces vides du réseau cristallin(4).

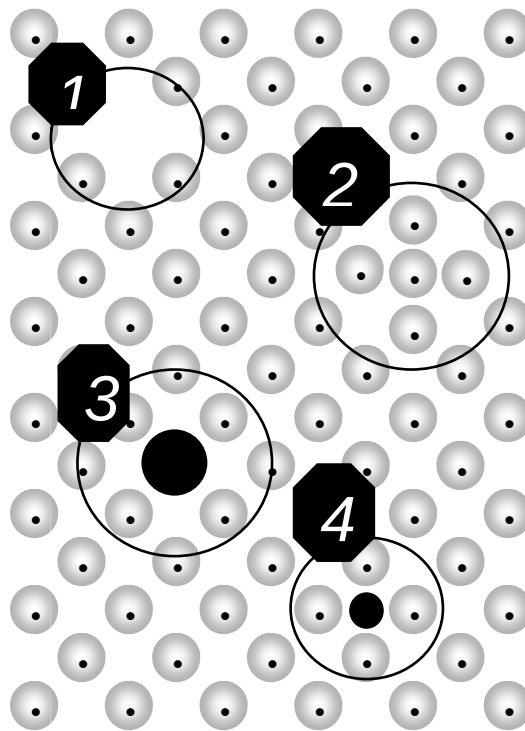


Figure.I.24 : Types de défauts ponctuels

III. Défauts linéaires :

Les défauts linéaires concernent une rangée d'atomes qui occupe un volume fini, mais ce volume est très faible devant le volume total du cristal, il peut donc être considéré comme une ligne de dimension un.

Ces défauts, appelés dislocations, sont à l'origine de tous les processus liés à la déformation plastique. Toute ligne de dislocation peut se ramener à trois types :

Dislocation-coin, la dislocation-vis et dislocation mixte.

III.1. Dislocation Coin :

Cette dislocation correspond à l'introduction d'un demi-plan supplémentaire dans le réseau cristallin, qui donne l'image d'un coin.

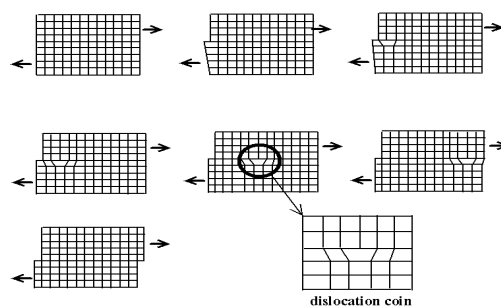


Figure.I.25 : Dislocation coin

III.2. Dislocation Vis :

Cette dislocation ne présente pas de demi-plan supplémentaire. Elle doit son nom au fait que le cristal est constitué par une rampe hélicoïdale autour de la ligne de dislocation.

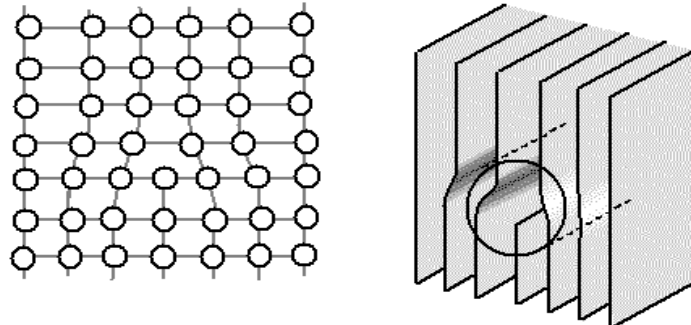


Figure.I.26 : Dislocation Vis.

III.3. Dislocation mixte : [18]

Elle est le résultat de l'existence des deux dislocations linéaires vis et coin.

Dislocation mixte : La ligne de la dislocation est une courbe, la dislocation est ici vis à l'extrémité gauche et à l'extrémité droite.

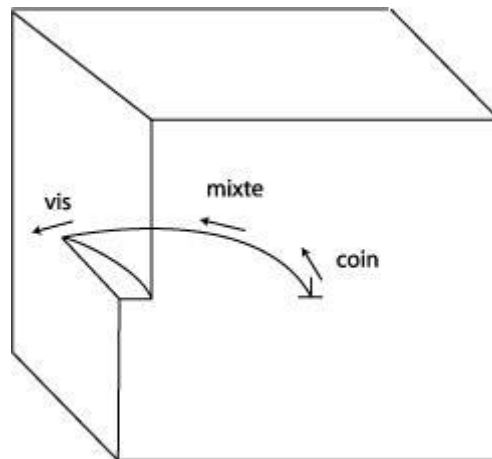


Figure.I.27 : Types de défauts ponctuels

IV. Défauts surfacique :

IV.1. Surface libre : [18]

Les défauts linéaires concernent une séparation entre deux milieux. A l'échelle des atomes, la notion de séparation est assez floue, ne serait-ce que parce que les atomes ne sont pas exactement localisés. On pourrait voir une interface comme un volume de transition entre deux milieux. Cependant, ce volume est tellement mince devant le volume de matière que l'on peut considérer que c'est un plan de dimension deux.

IV.2.Énergie d'interface : [18]

Un atome (ou ion, mais pour simplifier, on n'en parlera que d'atomes par la suite) au sein du cristal a Z voisins, Z étant la << coordinence >>, qui varie entre 4 (carbone diamant) et 8 (fer α ,

Cubique centré) ; $Z=6$ dans un empilement compact (par exemple hexagonal compact ou cubique à faces centrées). Un atome situé à la surface a moins de voisins.

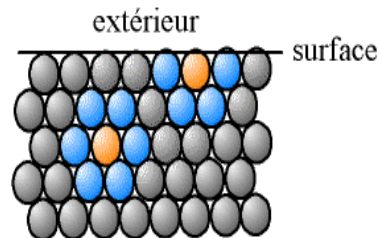


Figure.I.28 : Atome voisins d'un atome à l'intérieur et d'un atome sur la surface

Or, si ces atomes forment un cristal, c'est que c'est la forme la plus stable, donc qui a le moins d'énergie, donc qu'un atome entouré de Z autres atomes a une énergie plus faible qu'un atome moins entouré. Donc, les atomes sur la surface libre ont une énergie plus élevée que les atomes dans la matière.

Si l'on considère le problème sous la forme de possibilités de liaison, un atome a Z possibilités de liaison, et lorsqu'il est à la surface, toutes ne sont pas utilisées. Ceci va permettre à d'autres atomes, ions ou molécules de se fixer (phénomène

IV.3. Défauts à deux dimensions (défauts plans) [18]

Ce sont par exemple les surfaces libres telles que les perturbations du voisinage des atomes de surface qui ont perdu certains de leurs voisins, et les interfaces entre grains, ou entre phases différentes. Nous citerons aussi les joints de grains et les joints de macles.

IV.3.1. Les joints de grains

Les matériaux cristallins utilisés couramment sont rarement constitués d'un seul cristal (à l'exception de certains cas : les semi-conducteurs, diodes et transistors) : ils sont formés d'un ensemble de petits cristaux ; des grains qui forment un milieu continu. Les surfaces d'accolement des grains adjacents sont des joints de grains ; ils assurent la cohésion entre des cristaux d'orientation différente. L'épaisseur d'un tel joint est de deux ou trois distances interatomiques.

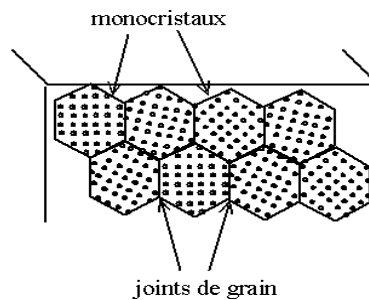


Figure.I.29 : Joints de grains

IV.3.2. Joints de macles

C'est un plan dans lequel les nœuds restent correctement ordonnés selon le système cristallin du métal et duquel les réseaux des deux cristaux sont symétriques et non pas alignés comme se serait le cas dans un cristal unique. Les macles apparaissent fréquemment au cours de la déformation plastique des métaux CFC.

IV.4. Défauts trois dimensions (défauts volumiques)

Les défauts volumiques sont essentiellement des cavités, des phases non désirées, des inclusions (morceaux de matière étrangère, provenant de l'élaboration, par exemple particules venant d'un creuset). Ils proviennent notamment de l'élaboration du matériau (frittage des céramiques, métallurgie des poudres ou capillaires de fluide pour les cavités) ou de l'endommagement de celui-ci lors de son utilisation.

IV.4.1. Les pores (Figure.I.30)

Ce sont des cavités à l'intérieur du cristal remplies de gaz. On a deux types de pores : les pores inter granulaires ou les intra granulaires qui se disposent respectivement le long des joints de grains ou à l'intérieur des grains, ils possèdent deux caractéristiques importantes qui sont :

- La taille ;
- La morphologie.

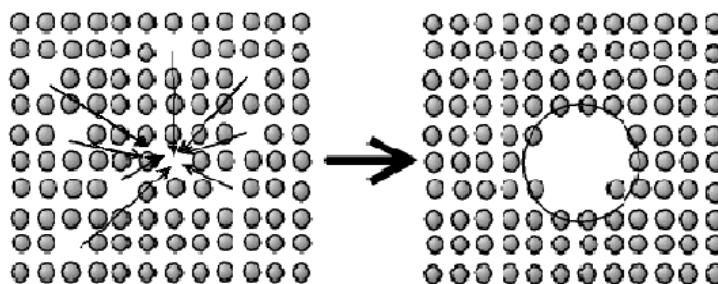


Figure.I.30 : Représentation schématique d'un pore.

IV.4.2. Les inclusions

Sont des saletés qui proviennent de l'élaboration du métal à l'état liquide, ce sont le plus souvent des oxydes, des sulfures ou des silicates. Ces inclusions sont des particules étrangères solides, liquides ou gazeuses.

IV.4.3. Les précipités

Sont des particules de seconde phase, de composition chimique différente de la matrice et se forment par réactions entre métal de base et un ou plusieurs de ses éléments d'alliage où entre ses éléments d'alliage eux même. Les précipités peuvent être classés en trois types selon le degré de cohérence cristallographique qu'ils présentent avec la matrice dont laquelle ils sont inclus.

➤ Les précipités cohérents

Présentent une continuité cristallographique avec la matrice, les réseaux cristallins de la matrice et du précipité sont semblables, seul diffère légèrement les paramètres des deux réseaux. Ceci génère des distorsions élastiques à l'interface précipité-matrice.

➤ Les précipités semi-cohérents

Présentent une continuité cristallographique avec la matrice seulement selon certains plans et il n'y a aucune continuité selon les autres plans ; la semi-cohérence est parfois obtenues grâce à la présence de dislocations coin le long de l'interface.

➤ Les précipités incohérents

Ont un réseau cristallin trop différent de celui de la matrice. Pour qu'il existe une continuité entre les deux réseaux l'interface matrice-précipité est semblable à un joint de grain quelconque. La (Figure.I.31) montre ces trois types de précipités.

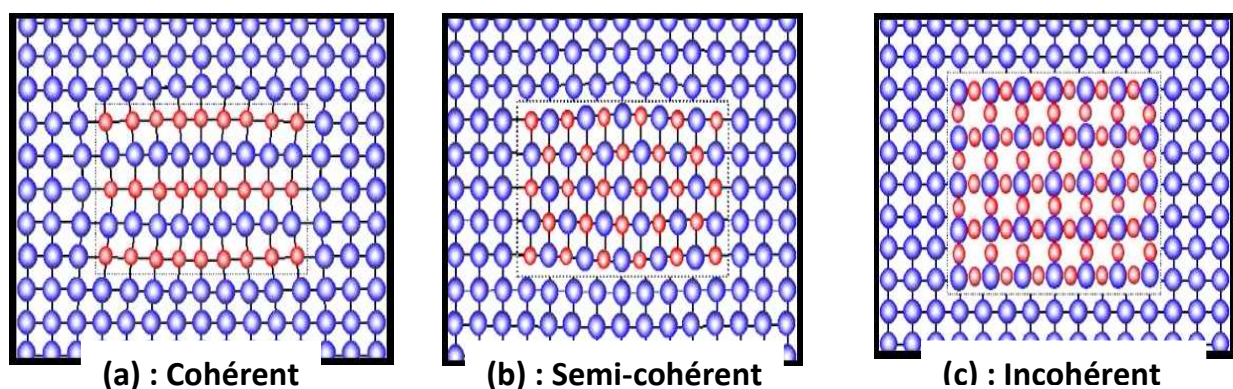


Figure.I.31 : Différents précipités

V. La diffusion

V.1. Définition

Une diffusion est un déplacement d'atomes dans un solide à des distances supérieures au paramètre de maille. La force motrice phénomène peut être la température, le gradient de concentration etc....

Lorsque l'atome diffuse dans son propre réseau on dit qu'il y a autodiffusion. Par contre quand des atomes diffusent dans un autre réseau, il y a hétéro-diffusion.

V.2. Mécanismes de la diffusion :

a- Autodiffusion :

Pour qu'un atome que ce soit un atome du réseau ou un atome étranger en substitution dans ce réseau puisse diffusé vers la lacune voisine, il faut qu'il y ait énergie cinétique d'activation de diffusion des atomes due à l'agitation thermique suffisamment élevé pour écarter les atomes voisins et ainsi atteindre la lacune ; le phénomène de diffusion s'effectue donc grâce à la présence des lacunes en équilibre dans le cristal.

Plus la température est élevée plus sera grande la fraction d'atomes ayant une énergie cinétique minimale requise pour occuper une lacune voisine. Ce qui montre que la diffusion est un phénomène activé thermiquement. **Figure.I.3 2**

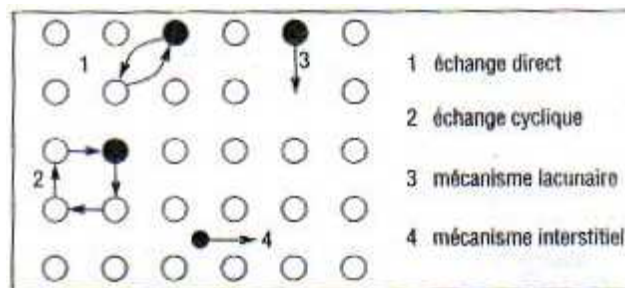


Figure.I.3 2: mécanismes de diffusion à l'échelle atomique

b- Diffusion d'atomes de soluté en insertion :

Lorsqu'un atome étranger est en solution solide d'insertion occupant un site formé par les atomes de la matrice, il possède une énergie cinétique minimale qui lui permet de s'insérer dans la matrice et occuper un site semblable voisin. (Figure)

V.3. Lois de la diffusion

Les lois de la diffusion permettent de déterminer la concentration en élément diffusant dans le solide. Deux cas sont possibles :

- Etat stationnaire : lorsque le gradient de concentration est constant
- Etat non stationnaire : lorsque le gradient de concentration varie dans le temps.

V.3.1. Etat stationnaire (première loi de Fick)

La première loi de Fick (1855) est purement phénoménologique et s'apparente aux célèbres lois de Fourier. En effet après de nombreuses expériences, Fick a remarqué que le flux de matière est proportionnel au gradient de la concentration.

Le flux est donné par la loi suivante :

$$j = -D \cdot \text{grad}C$$

C est la concentration de l'espèce diffusante.

D est le coefficient de diffusion en m^2/s et dépend fortement de la température. En effet $D = D_0 \cdot \exp(-Q_0/RT)$ où D_0 est une constante, R la constante des gaz parfaits, T la température en K et Q_0 une énergie d'activation de la diffusion.

Grad C est le gradient de la concentration et le signe (-) indique que le flux va des endroits les plus concentrés vers les moins concentrés.

V.3.2. Etat non stationnaire (deuxième loi de Fick)

Lorsque le gradient est variation dans le temps et change en fonction de la distance x , il est défini par une fonction à deux variables. On détermine alors la concentration comme la solution d'une équation différentielle du second ordre.

Pour un problème à une dimension la seconde loi de Fick est donnée par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right)$$

Avec **C** la concentration de l'espèce, **D** le coefficient de diffusion et **x** la distance.

La solution est $C = f(x, t)$.

Lors de la diffusion les atomes sautent d'une position d'équilibre à une autre et parfois à des distances plus grandes que le paramètre. Ce saut n'est alors possible que si l'atome est dans un état énergétique lui permettant de passer la barrière de potentiel opposée par d'autres atomes. Ce déplacement exige un apport d'énergie extérieure (la chaleur par exemple).

On distingue généralement 4 types de mécanismes de diffusion des atomes .

Chapitre II.1 : APPAREILLAGE**Introduction :**

Cette partie est consacrée à la présentation des différentes méthodes, appareils et techniques expérimentales utilisées.

- L'alliage **AlCu4%** est fourni gracieusement par le hall de technologie en barre de 6 m de diamètre de 55mm.
- L'usinage ainsi que les différents essais : de traction, de dureté, de microdureté et les examens micrographique et microscopique ont été réalisé respectivement au niveau du hall de technologie et des différents laboratoires de l'université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou
-

I. Appareillages

Les différents dispositifs utilisés dans notre étude sont :

I.1.Le laminage :

Le laminage s'effectue à partir de billettes (blooms, brames ou larget), il permet d'obtenir des produits finis de formes marchandes.

* Des produits laminés à chaud :

- Produits plats comme des plaques d'une épaisseur entre 5 à 25 mm, des bobines de tôle d'une épaisseur entre 1 à 5 mm, elles sont débitées des feuilles ou feuillards.
- Produits longs comme des barres, rails, poutrelles, profilés divers, ...

* Les produits laminés à froid sont repris après un laminage à chaud pour obtenir des bobines de tôle d'une épaisseur entre 0,1 à 3 mm, elles sont débitées par la suite en feuilles ou feuillards.

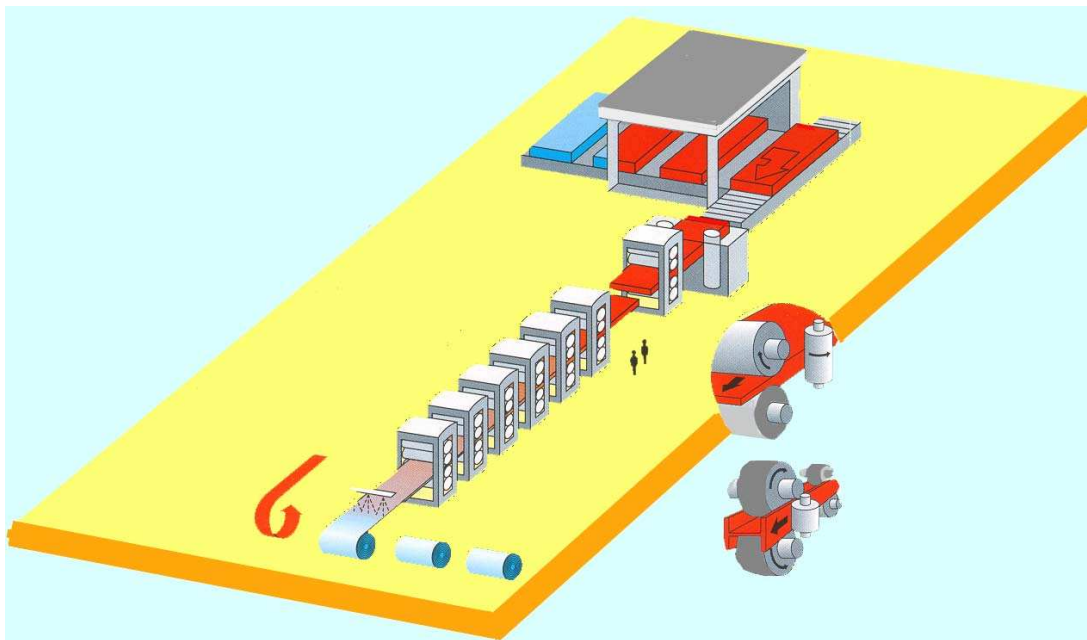


Figure.II.1 : Schéma de principe d'élaboration par laminage.

I.2.Le découpage :

Alors que pour le découpage des échantillons pour la dureté et la microstructure, on a utilisé une scie mécanique (**Figure.II.2**) avec les propriétés suivantes :

Tension $T=380V$,

Puissance $P=1,5Kw$,

Poids = 600Kg.



Figure.II.2 : Scie mécanique

I.3.Le fraisage:

Figure. II.3. Fraiseuse

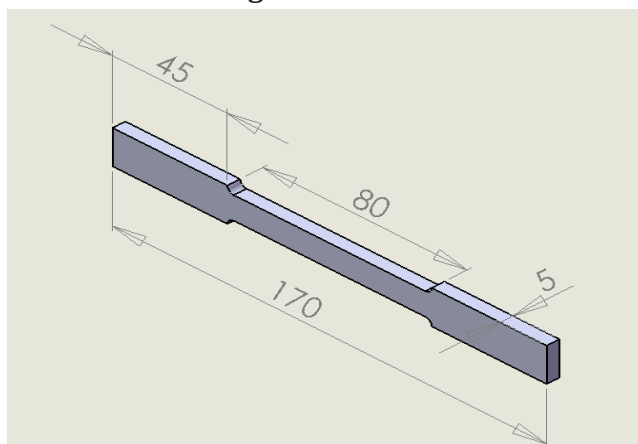


Figure.II.4: Epreuve finie.

I.4. Les traitements thermiques :**I.4.1. Four de trempe :**

C'est un four à résistance électrique, construit en tôle et profilés robustes. Il est isolé avec de la laine d'alumine pour l'isolation thermique et la rendre plus légère. Un contact électrique coupe le circuit de résistances de l'ouverture de la porte pour éviter au manipulateur toute décharge électrique. (Figure.II.5).

Le four de trempe possède les caractéristiques suivantes :

- ♦ Tension $T=380V$
- ♦ Puissance $P=11Kw$
- ♦ La température peut allée jusqu'à $1200^{\circ}C$.



Figure.II.5 : Four de trempe

I.4.2. Four de revenu (Figure.II.6).

❖ **Principe de l'étuve :** Nos traitements de vieillissement ont été réalisés dans une étuve de type MEMMERT alimentée par un courant de 380Volts. Elle est composée essentiellement de :

- ✓ 1-Afficheur du temps (maintien).
- ✓ 2-Indicateur du mode de fonctionnement.
- ✓ 3-Indicateur de température de consigne (recommandée).
- ✓ 4-Indicateur de régime de la ventilation.
- ✓ 5- Indicateur de la température d'intervention du dispositif de sécurité.

L'étuve est dotée d'une ventilation naturelle par convection à thermosiphon. Le brassage d'air s'effectue par une turbine installée à l'intérieur, sur la paroi du fond de l'appareil.



Figure II.6: Etuve utilisée.

I.5. Les essais mécaniques :

I.5.1. Machine de traction :(Figure II.7).

Pour réaliser l'essai de traction nous avons utilisé une machine de traction de type S.K.F, alimentée sous une tension de 220V, ayant une charge maximale de 400KN.



Figure II.7: Machine de traction

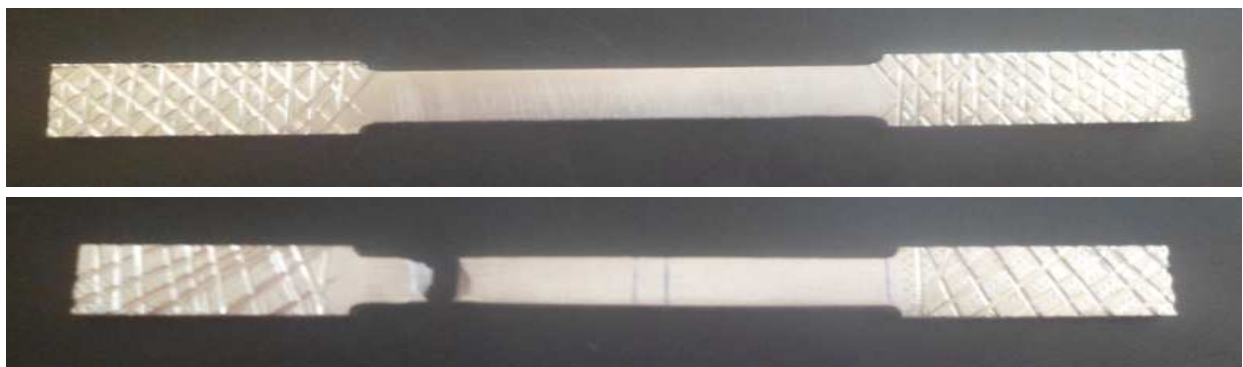


Figure II.8: Eprouvettes subit un essai de traction

I.6. Microscopie :**I.6.1. Les polisseuses :(Figure II.9)**

Polisseuse à deux disques de type « Struer » alimentée sous une tension de 220 V et munie d'un dispositif d'arrosage.

Polisseuses à un disque de type « Struer » alimentée sous une tension de 220 V.

La vitesse de rotation du disque est (150 tr/mn et 300tr/mn).



Figure II.9: Les Polisseuses

I.6.2. Duromètre et microduromètre : (Figure II. 10 et II.11)

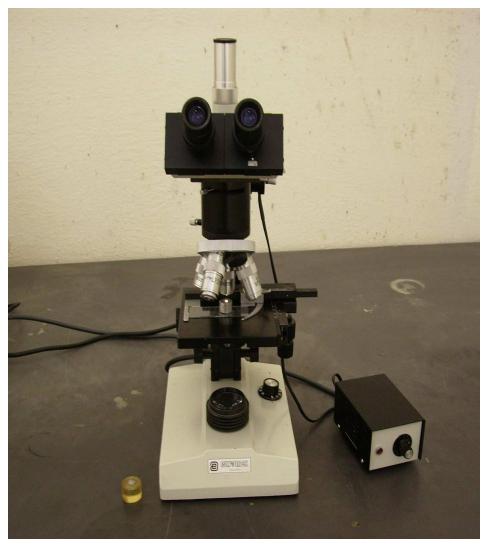
➤ L'essai de dureté a été réalisé grâce un duromètre, ce dernier est muni d'une bille de diamètre 2,5 d'un sélectionneur de charge de 15 kgf, une table sur laquelle on pose l'éprouvette et d'un cadran permettant la mesure du diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur. Il possède les caractéristiques suivantes : Tension $T=220V$, Fréquence $f=50\text{ Hz}$.

➤ L'essai de microdureté a été réalisé grâce un microduromètre, ce dernier est muni d'un diamant en forme pyramidale d'angle au sommet de 136° d'un sélectionneur de charge de 10 g, une table sur laquelle on pose l'éprouvette. Ce dernier affiche automatiquement le diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur ainsi que sa microdureté correspondante. Il possède les caractéristiques suivantes : Tension $T=220V$, Fréquence $f=50\text{ Hz}$.

**Figure II.10:**duromètre**Figure II.11:** Microduromètre**I.6.3. Microscope optique : (Figure II.12)**

Pour procéder à l'observation des différentes structures de surfaces, après le polissage et l'attaque chimique, des échantillons de l'alliage étudié, on s'en est suivi d'un microscope optique qui a les caractéristiques suivantes :

On a utilisé un microscope optique universel de type ZEISS, alimenté sous une tension de 220V avec une fréquence de 50 Hz et une puissance de 100W. Muni d'un appareil-photo automatique, ayant un pouvoir de résolution allant de 50 à 1000 fois.

**Figure II.12:** Microscope optique**I.6.4. Microscope électronique à balayage (MEB)****❖ Principe et performances**

Le microscope électronique à balayage est une technique microscopie électronique basée sur le principe des interactions électrons-matière permet d'obtenir des images de surfaces ; pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en transmission (x500.000 ou plus). Ces images frappent en premier par le rendu très parlant du relief et la grande profondeur de champ.

Le MEB conventionnel fonctionne dans un vide ordinaire (10^{-5} à 10^{-6} mbar); Les échantillons peuvent être massifs, de dimension allant de quelques mm (particules) à une dizaine de cm de diamètre, ils doivent supporter le vide sans le polluer et être conducteurs. La préparation est en général simple.

Le MEB à pression contrôlée (dit environnemental ou low vacuum) permet l'observation dans un vide allant jusqu'à 30 mbar, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons humides ou gras d'isolants sans métallisation préalable (céramiques, métaux corrodés), voire en présence de liquide. Equipé de détecteurs appropriés, le MEB permet de faire entre autres de la microanalyse X, analyse élémentaire locale.



Figure. II.13: Microscope électronique à balayage(MEB)

Chapitre .II.2. Matériaux et modes opératoires

Dans ce qui suit, nous vous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser le matériau étudié soumis aux traitements thermiques en faisant varier les températures de revenu aux différents états à savoir :

- Brut de coulée noté : BC ou F
- Etat trempé noté : T
- Températures de revenu notées TRv (150, 160, 170, 180, 190, 200, 220 et 240) °C.

I. Matériau étudié :

Le matériau étudié est fourni par le hall de technologie. Il s'agit d'un alliage à base d'aluminium contenant respectivement 4% de cuivre en pourcentage massique et quelques traces d'impuretés, obtenu par laminage.

Sa composition chimique est donnée par le tableau ci après :

Alliage	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)
2017A	0,20 - 0,8	0,7	3,5 - 4,5	0,40 - 1,0	0,40 - 1,0	0,10

Tableau II.9 : Composition chimique de l'alliage étudié.

Analyse chimique sur éprouvette :

Cu(%) = 4,38 , Mg(%) = 1,06 , Si(%) < 0,1

I.1. Elaboration du matériau étudié :

- ✓ **L'électrolyse** : Grâce à une électrolyse additionnelle, la pureté de l'aluminium peut être augmentée à 99,98% pour les produits semi-finis et à 99,99% pour les gueuses.
- ✓ **Mélange** : L'aluminium pur présente certaines propriétés intéressantes, mais pour les améliorer ou pour lui donner des nouvelles, on lui ajoute des éléments d'alliages, ces alliages sont catégorisés comme alliages corroyés ou alliages de moulage.
- ✓ **Le laminage** : Ce mode est obtenu par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés, appelés *rouleaux*.

I.2. Usinage : Nous avons usinée 50 éprouvettes plates.

- ✓ **Le découpage** : pour le découpage des différents échantillons, on a utilisé une scie mécanique.
- ✓ **Fraisage** : Alors que pour le fraisage des éprouvettes de traction on a utilisé une fraiseuse.

- ✓ **Tournage** : le dressage des échantillons de microstructure et de Microscope électronique à balayage, on a utilisé l'opération de dressage au tour.

I.3.Traitements thermiques :

Avant de commencer le traitement, on prélève 5 éprouvettes usinée sans traitement thermique (désignées par BC ou F). Les autres éprouvettes vont subir les traitements thermiques suivants :

Traitements d'homogénéisation, ils se font dans un four de trempe à de température(500) °C et un maintien de 8h, suivi immédiatement d'une trempe à l'huile à température ambiante de(20 – 25)°C, d'une maturation de 16h à l'air ambiant, d'un revenu à des températures respectivement de (150,160,170,180,190,200,220, et240)°C pendant 20h dans un four de revenu et d'un refroidissement au four libre pour les états considérés.

Après traitement on a :

Brut de coulée : 05 éprouvettes;

Température d'homogénéisation à 500C° ou trempé à 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 150 : 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 160 : 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 170 : 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 180 : 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 190 : 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 200 : 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 220 : 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à 500C°et de revenu à 240 : 05 éprouvette ;

I.4. Cycle thermique :

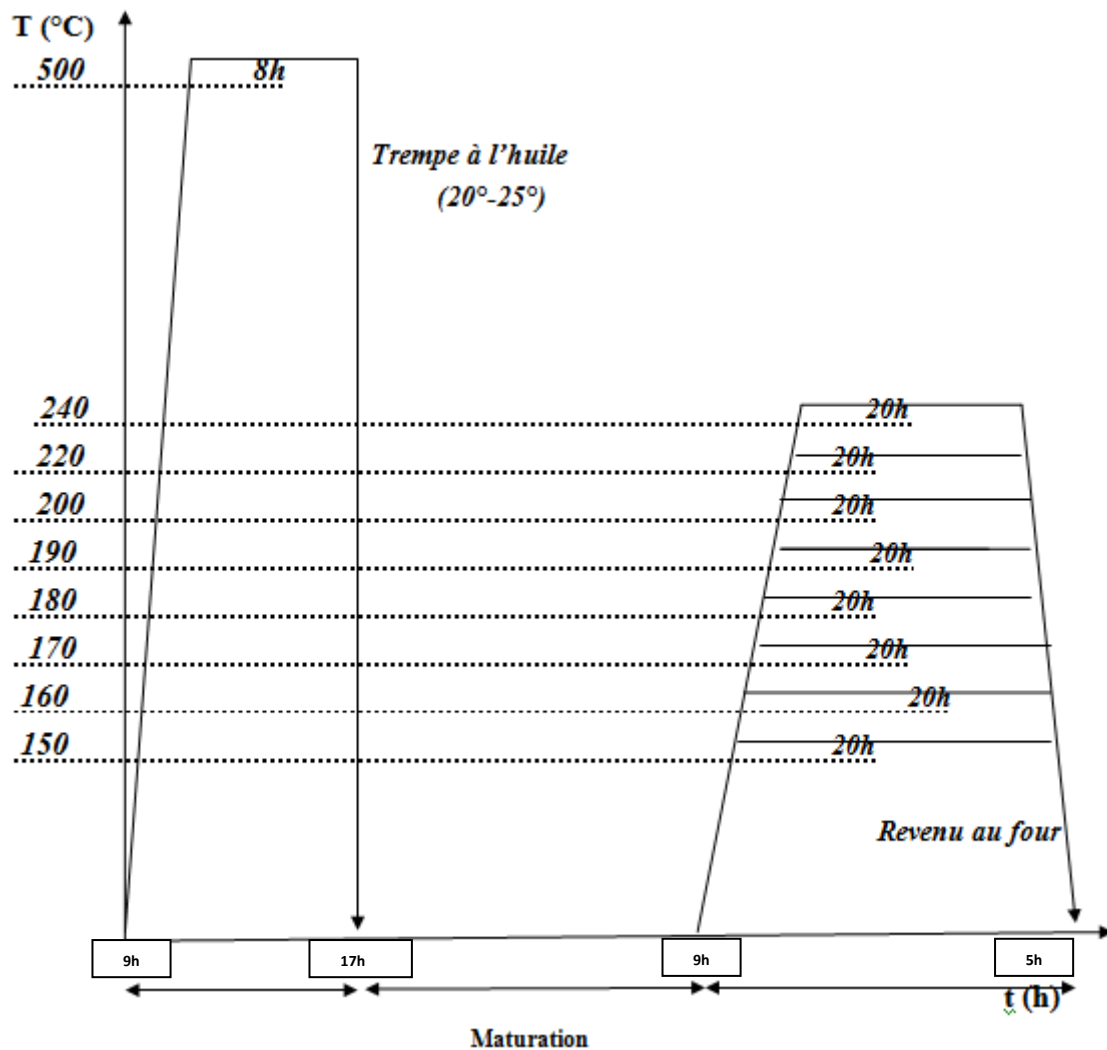


Figure. II.14: Cycle Thermique

I.5. Essais mécaniques:

Nous avons effectué deux essais mécaniques ; la dureté et la traction.

I.5.1. Essais de traction :

Les éprouvettes sont solidement maintenues par leurs têtes à l'aide de deux mâchoires (mors) de la machine de traction, dont l'une est fixe, l'autre libre en translation. Ces mâchoires en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette. Des appareils, adaptés à la mâchoire, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et la déformation correspondante.

➤ Forme et dimension des éprouvettes :

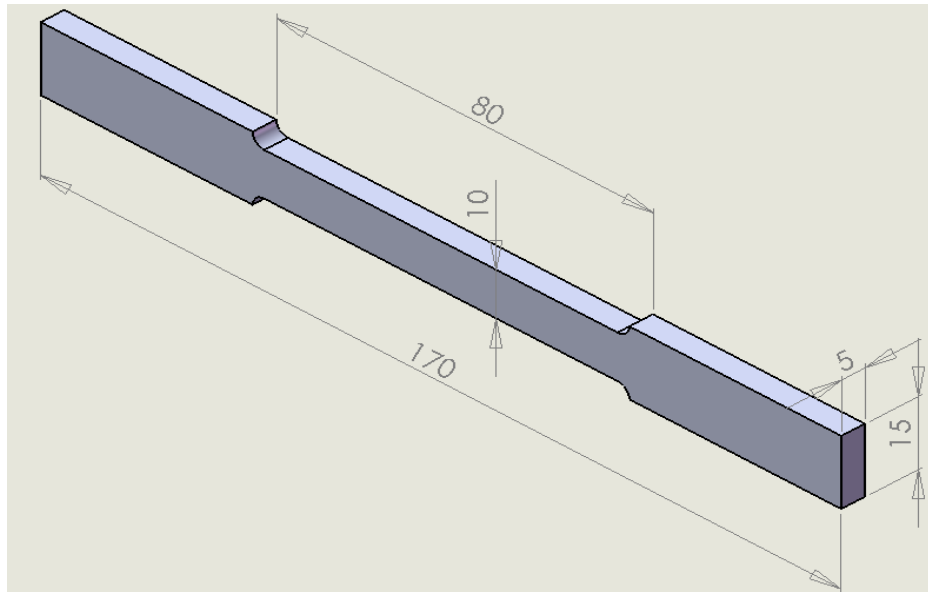


Figure. II.15: Formes et dimensions de l'éprouvette de traction.

I.5.2. Essais de dureté et microdureté :

Dans ce travail on a choisi l'essai Brinell. Le diamètre de la bille égal à 2,5mm, sous une charge de 15 kgf pour l'essai Brinell. Après quelques minutes on mesure le diamètre de l'empreinte grâce à une règle, puis on détermine la valeur de la dureté correspondante au diamètre.

La forme des échantillons utilisés lors des essais est présentée par la **figure. II.16**

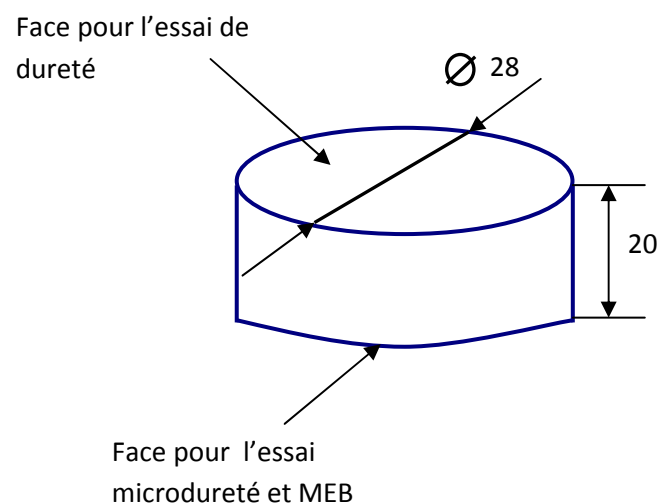


Figure. II.16: échantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté

I.5.3. Examen micrographique :**I.5.4. Préparation des surfaces :**

Les échantillons sont découpés des éprouvettes de traction, à la scie mécanique. Ces échantillons sont polis mécaniquement afin de rendre les deux faces de l'échantillon planes et brillantes de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur. Le polissage comporte trois phases.

➤ **Dressage**

Le dressage a pour but de créer une surface plate d'examen. Elle est faite sur papier EMERI de granulométries P120, P240, et P400, sur une polisseuse avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement.

➤ **Dégrossissage**

Cette phase, qui est la plus délicate, permet d'arriver à une surface lisse ne contenant que des très fines rayures invisibles à l'œil nu qui disparaîtront dans la dernière phase. Les granulométries des papiers utilisés sont P600, P800, P1200.

➤ **Finissage**

Son objectif est d'obtenir une surface comparable à celle d'un miroir permettant ainsi de réfléchir la lumière. Les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est le plus souvent de l'alumine.

I.5.5. Microscope électronique à balayage (MEB) : Les surfaces préparées sont ensuite observées au microscope électronique à balayage. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons. Pour chaque échantillon observé on a pris des photos de différentes échelles.

I.5.6. Attaque chimique :

Pour faire apparaître les joints de grains, on utilise une solution d'attaque au chlorure de zinc préparé comme suit :

On pèse 5 gramme de NaOH dans une fiole, on ajoute un gramme de $ZnCl_2$ puis on ajoute 100 ml d'eau. Après agitation la solution d'attaque est fin prête pour l'utilisation.

I.5.7. Microscopie :

Les surfaces préparées sont ensuite observées au microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des différents échantillons. Pour chaque échantillon observé on a pris des photos de différentes échelles.

❖ Partie .III. Résultats et interprétation

L'étude de notre alliage AlCu, nous a menée à effectuer des essais de traction, de la dureté HB, de la micro dureté Hv0,01 et la microstructure en faisant varier la température de revenu selon 10 états notés : BC ou F,T et Rv (150 -160-170-180-190-200-220 et 240)°C afin de mieux illustrer les caractéristiques de cet alliage , d'interpréter les différents résultats et de choisir le compromis affichant de grandes caractéristiques de résistances ou de ductilité selon le domaine d'emploi de l'alliage binaire de désignation numérique 2017A qui régit notre étude.

I. INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DE TRACTION :

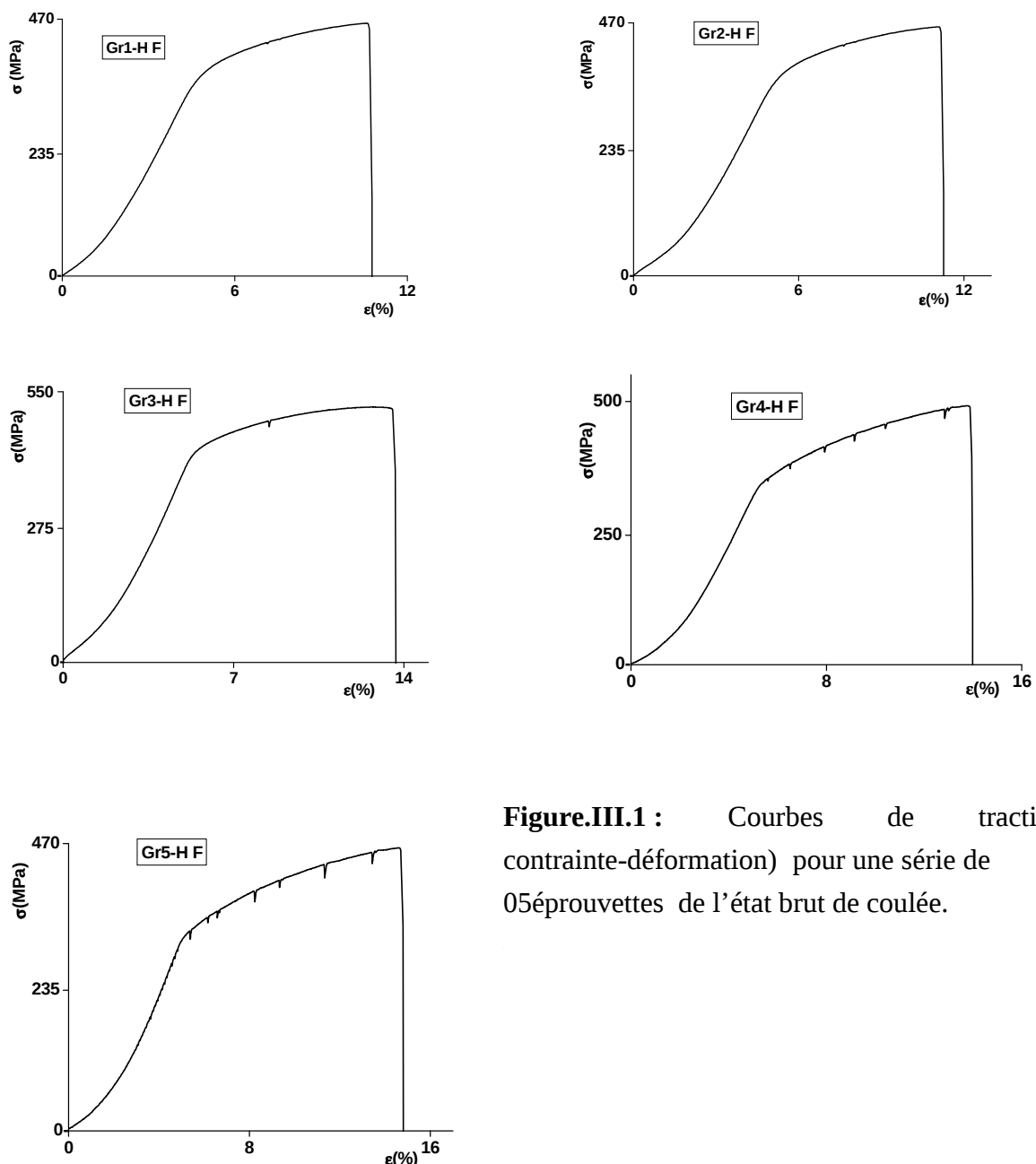


Figure.III.1 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état brut de coulée.

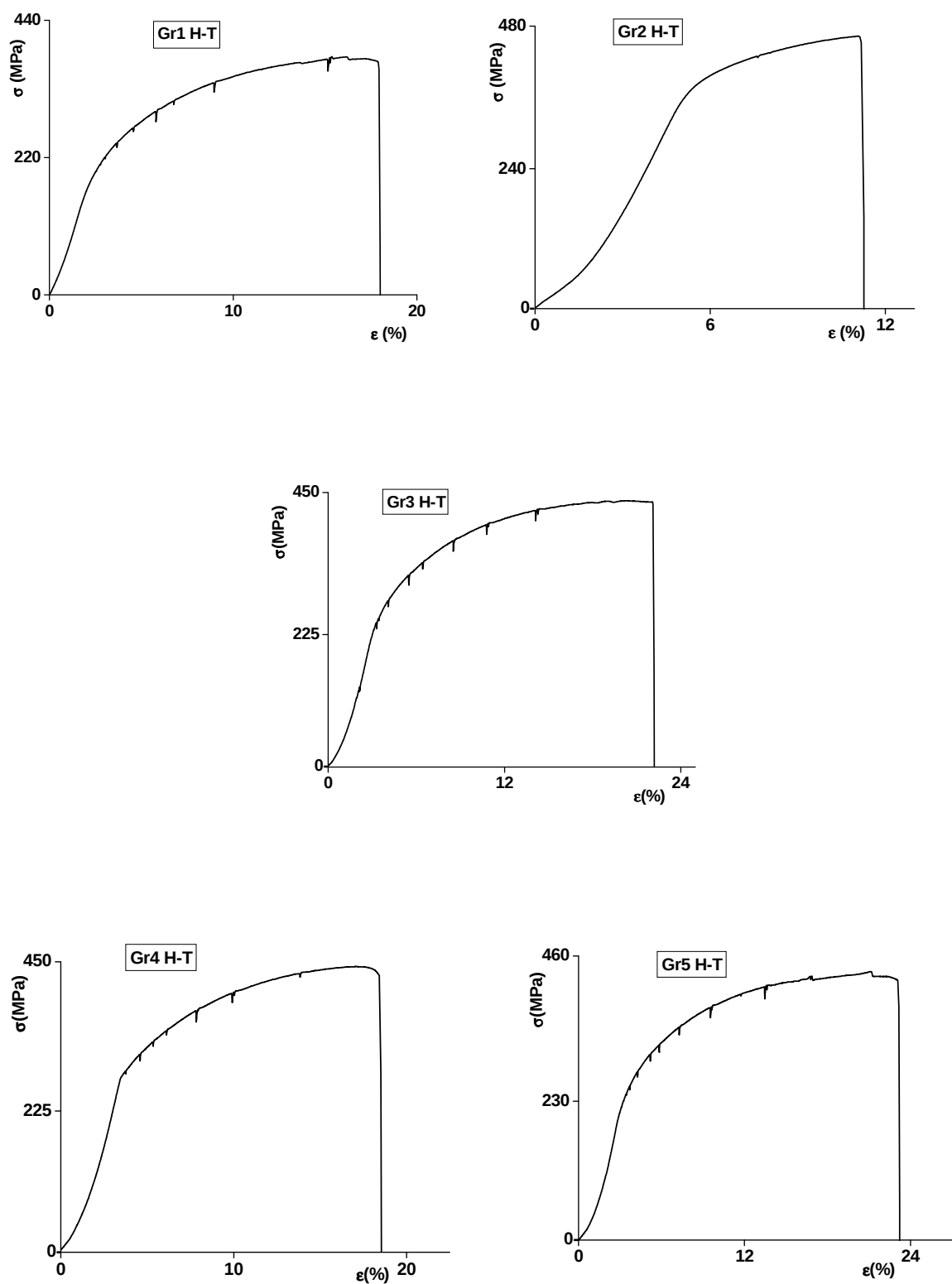


Figure . III.2 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état trempé.

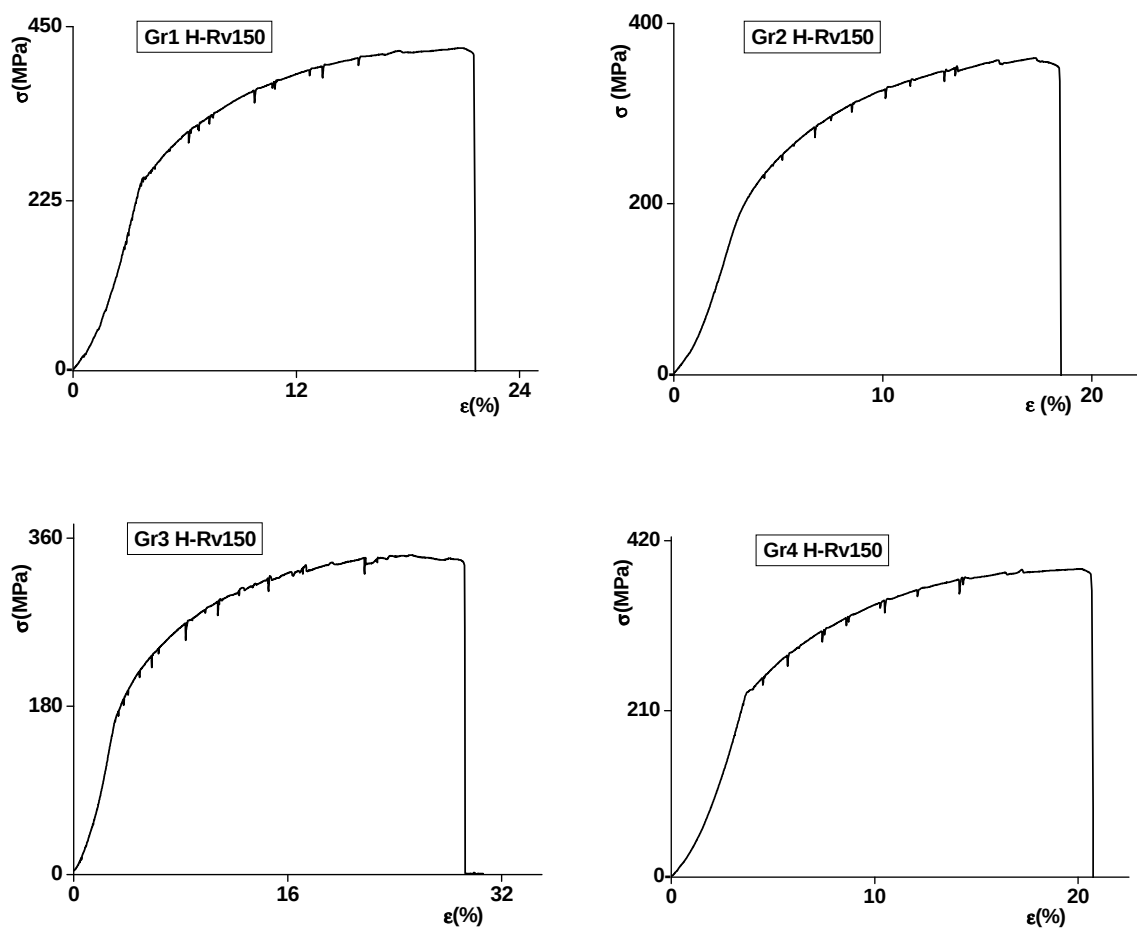


Figure. III.3 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 04 éprouvettes de l'état H-Rv 150°C.

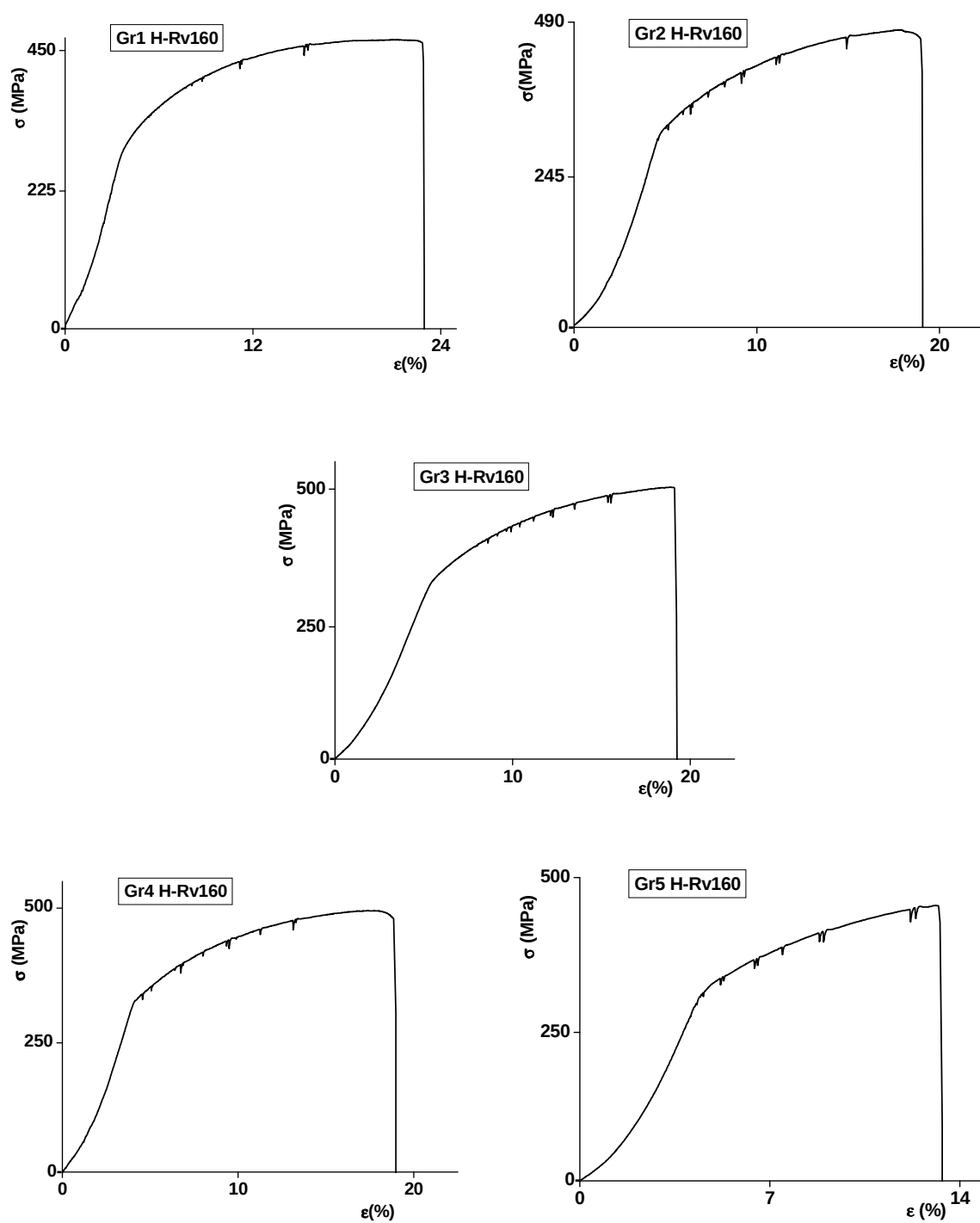


Figure. III.4 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état H-Rv 160°C.

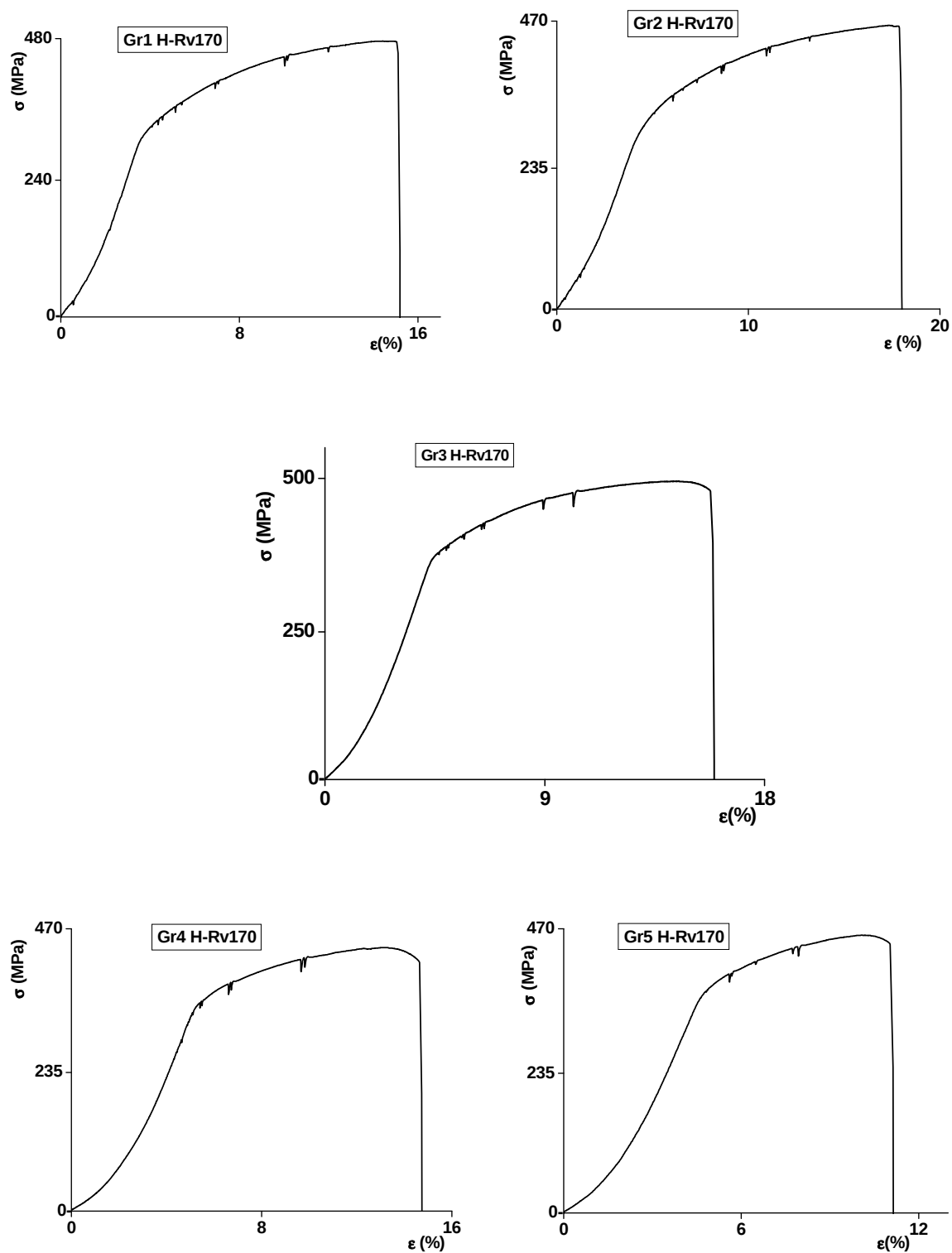


Figure. III.5 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état H-Rv 170°C.

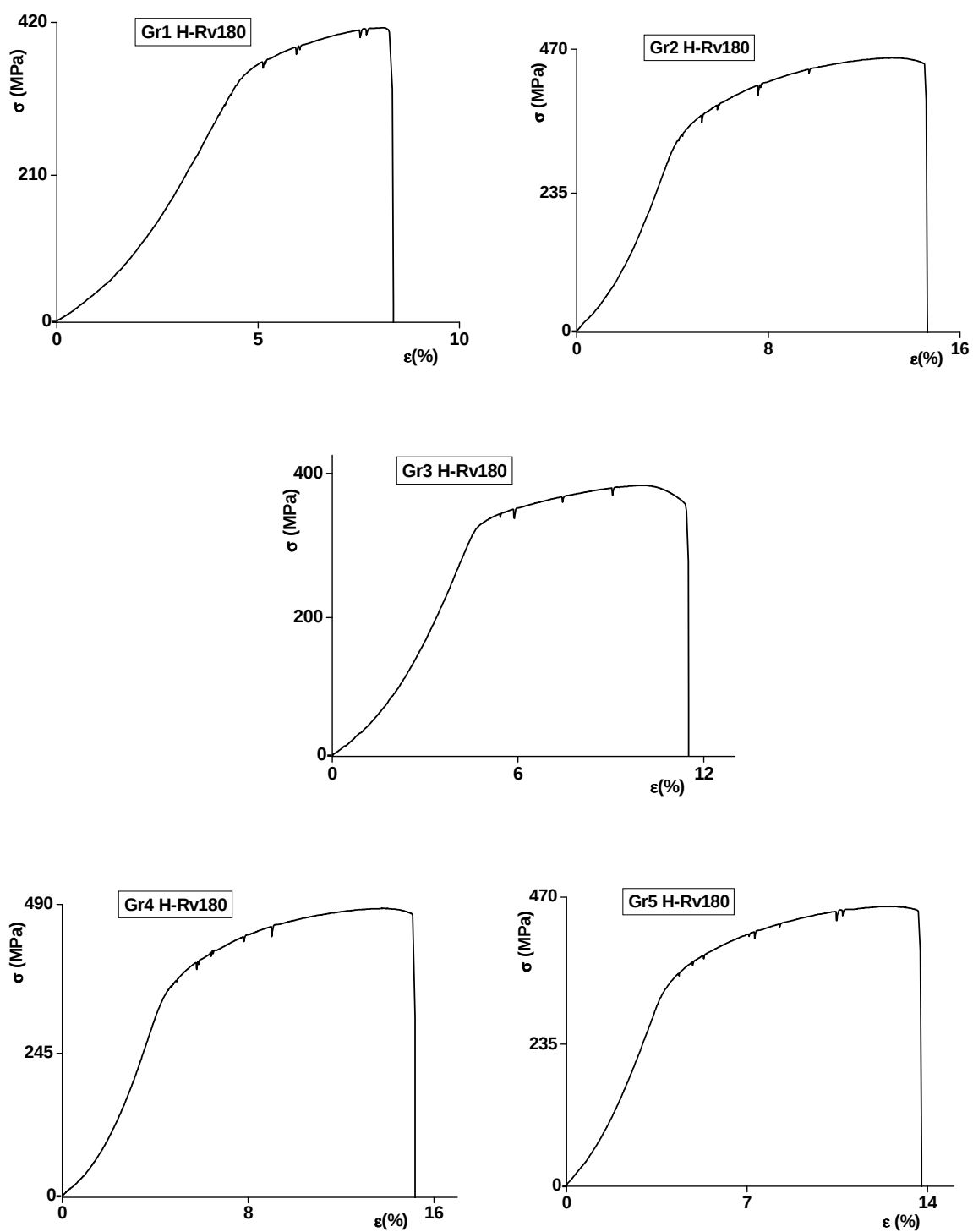


Figure. III.6 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état H-Rv 180°C.

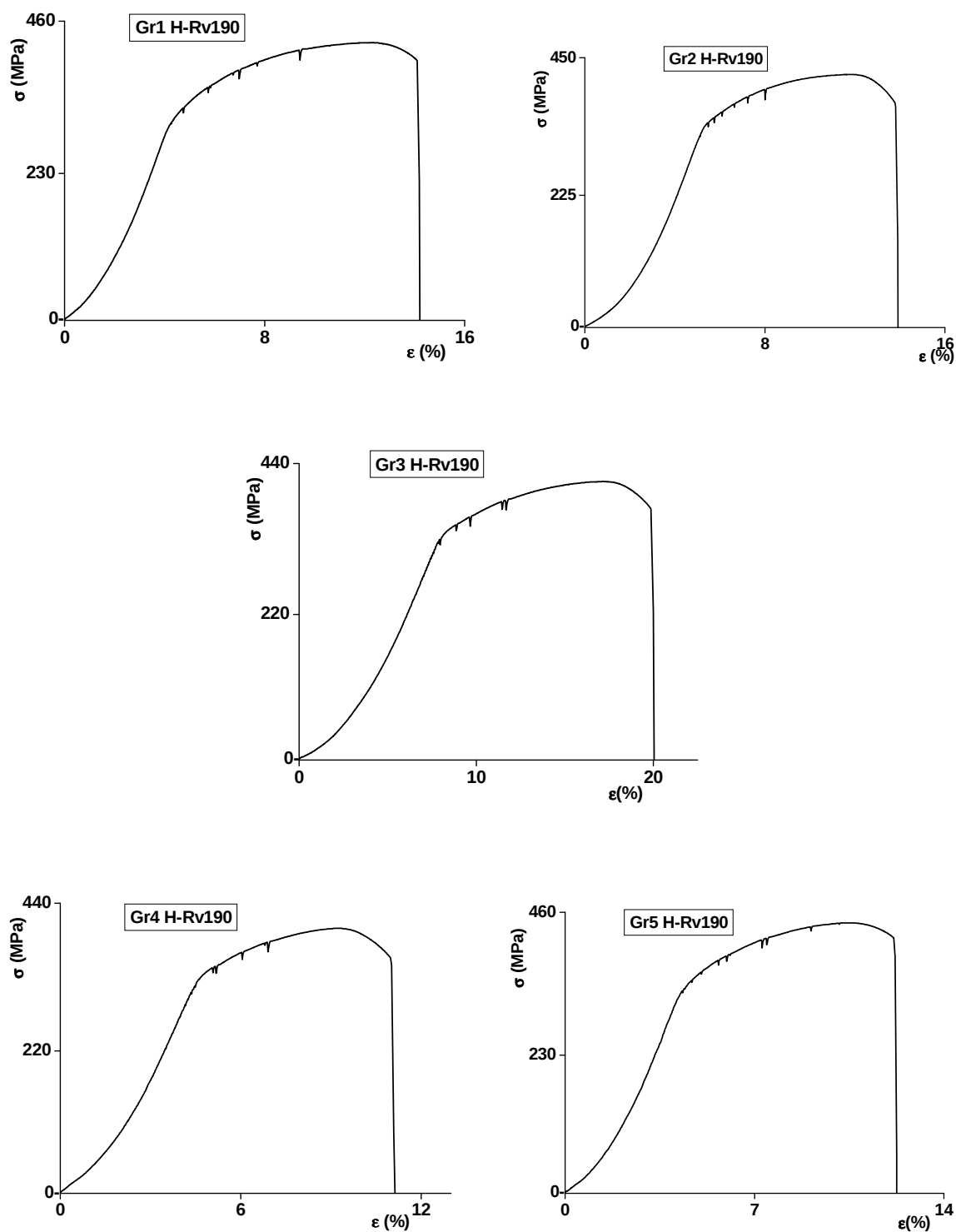


Figure. III.7 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état H-Rv 190°C.

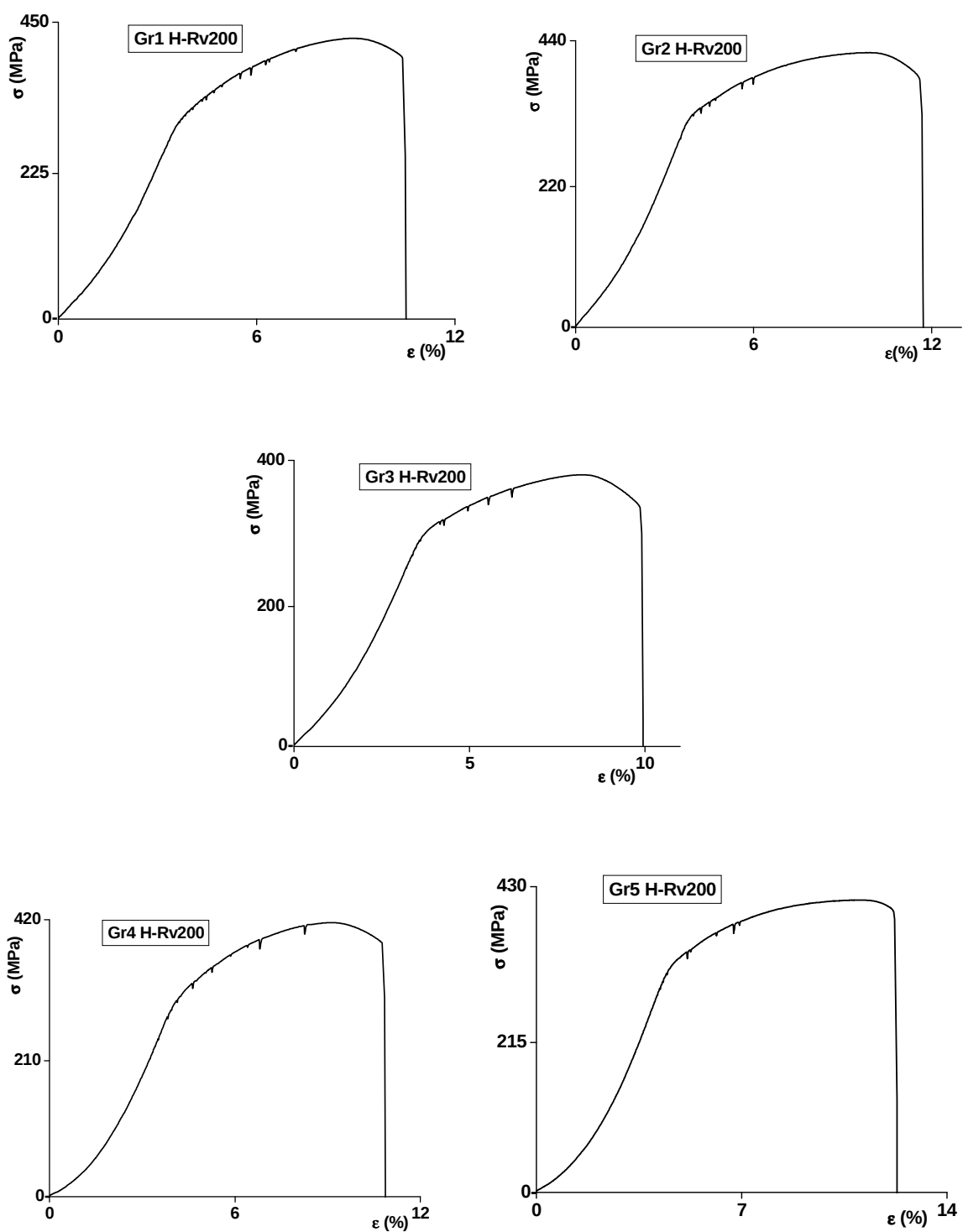


Figure. III.8 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état H-Rv 200°C.

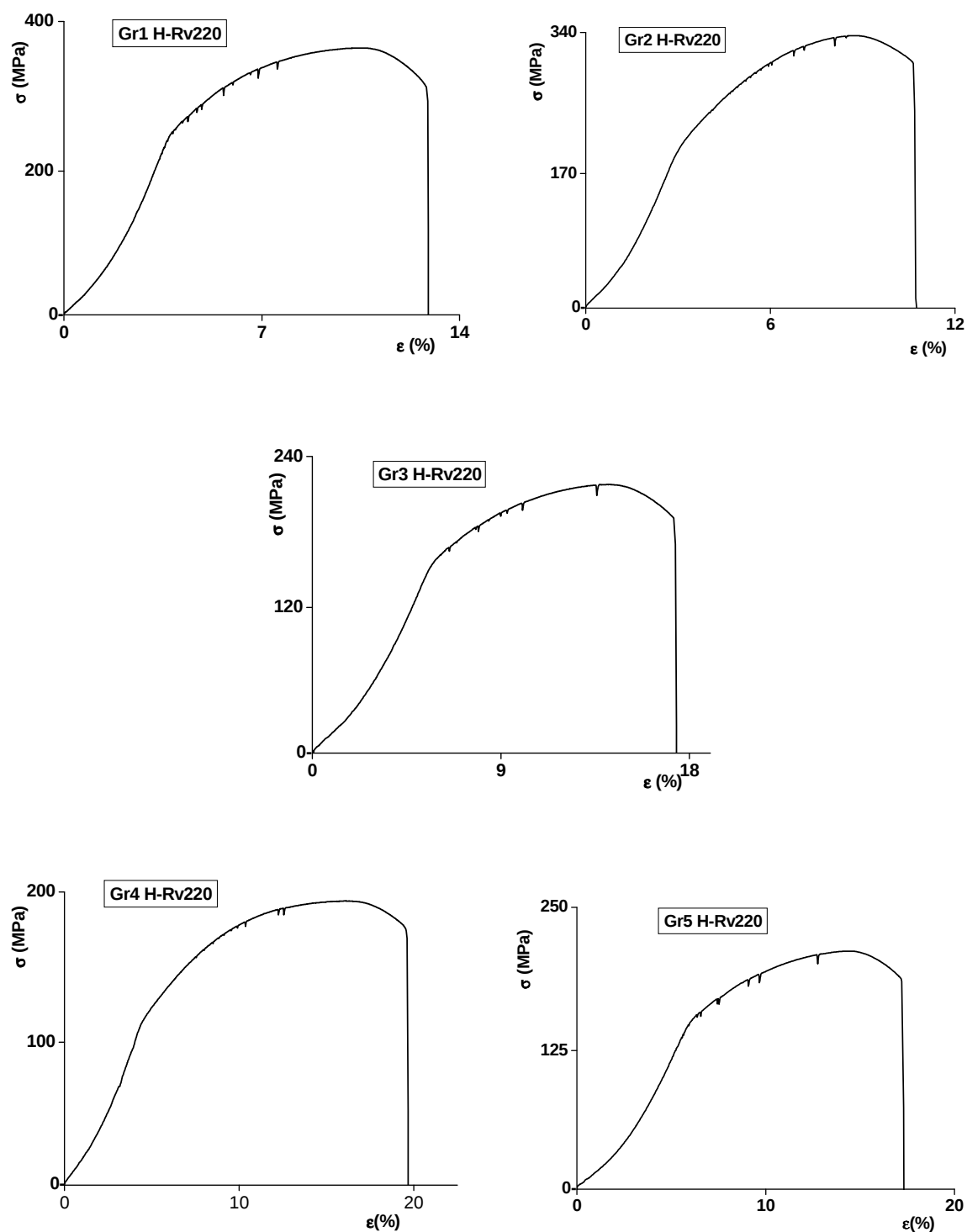


Figure. III.9 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état H-Rv 220°C.

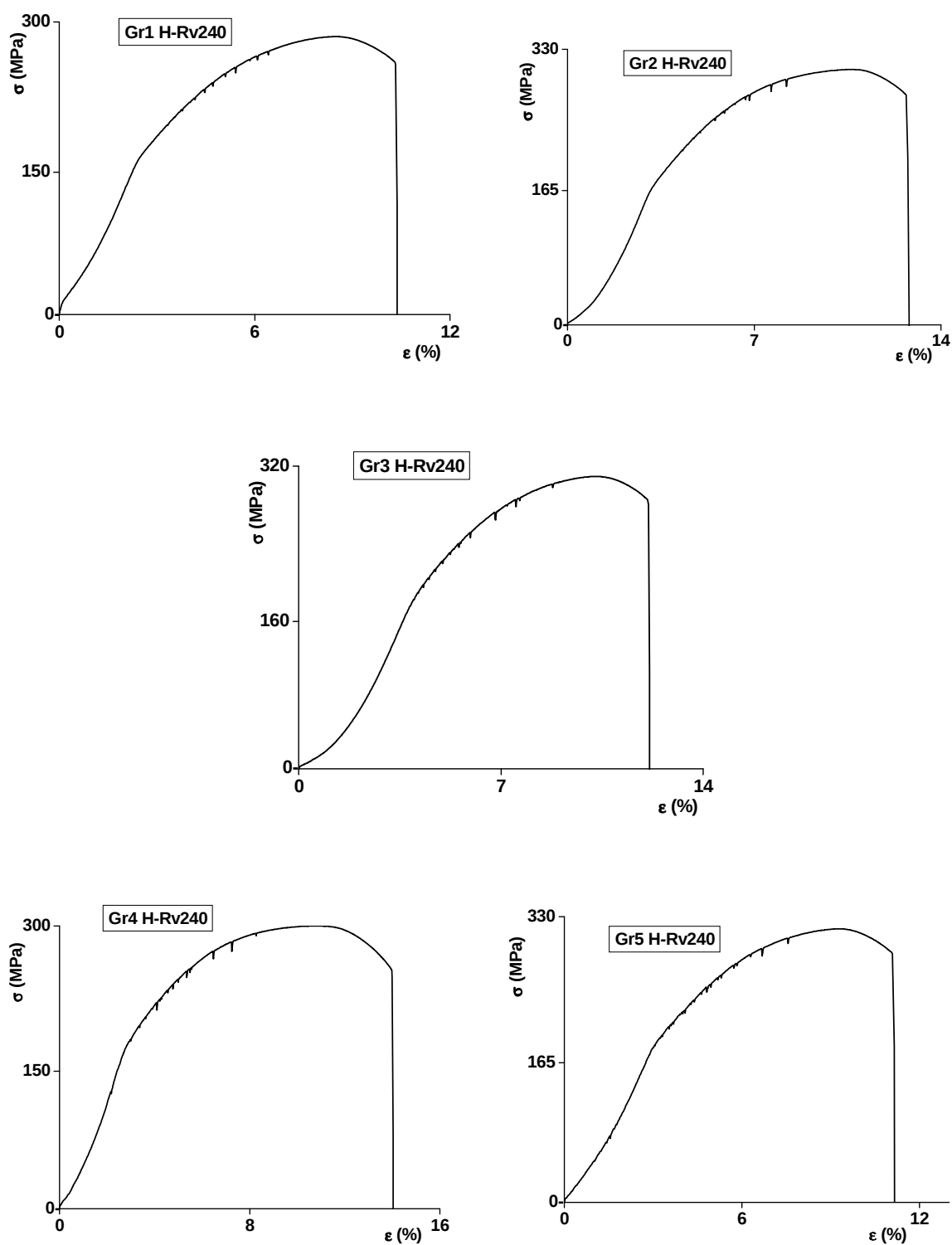
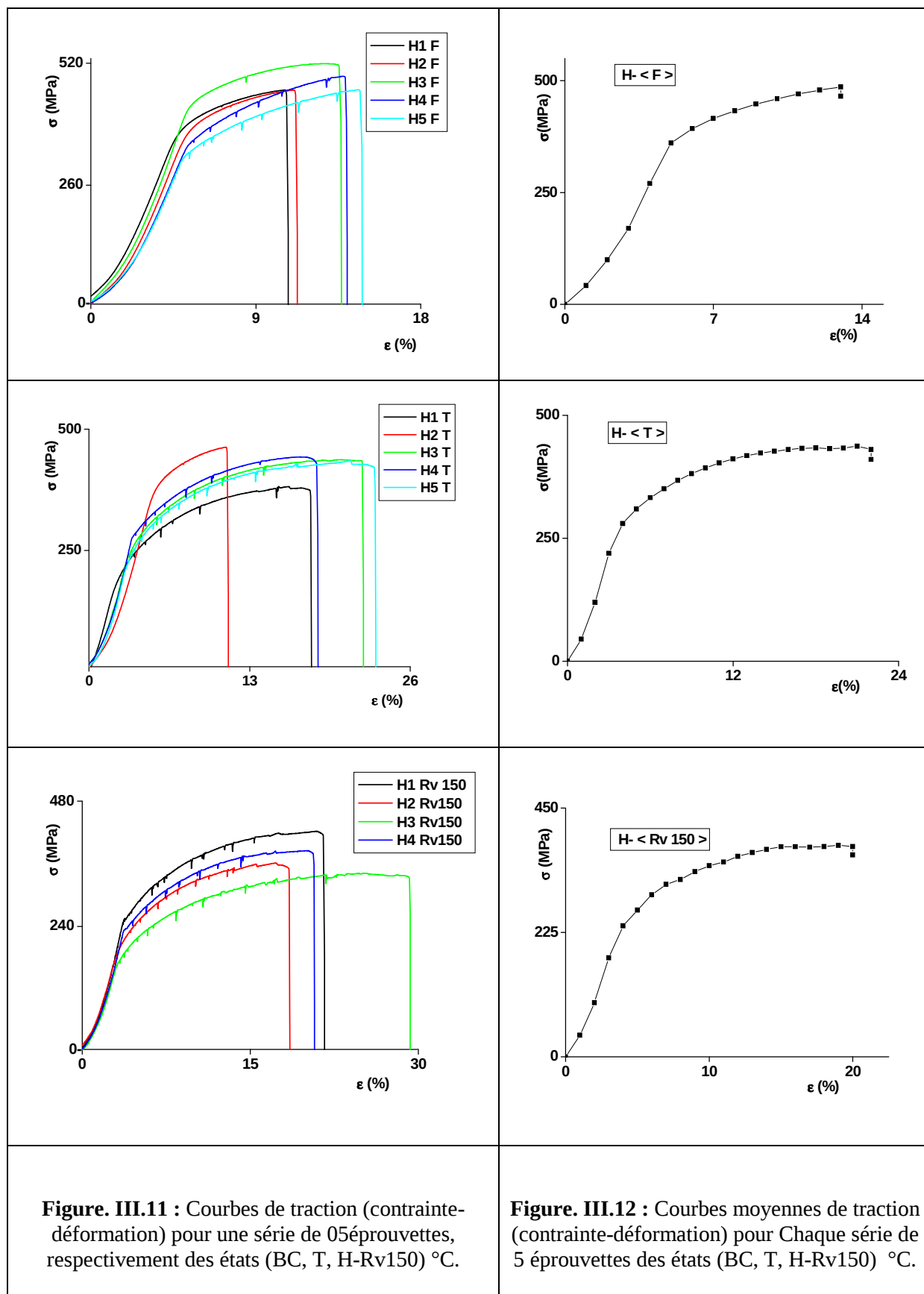


Figure. III.10 : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes de l'état H-Rv 240°C.



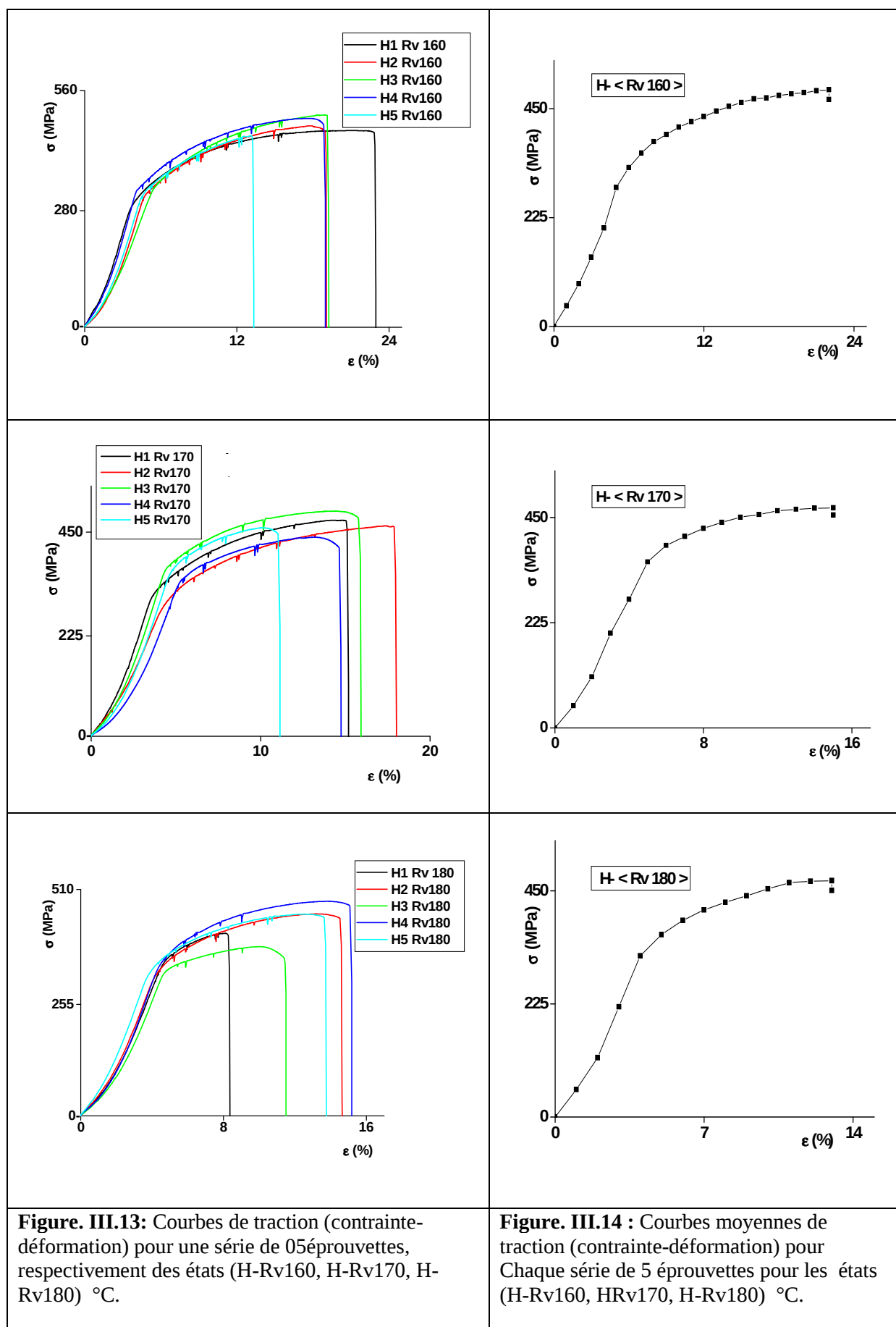
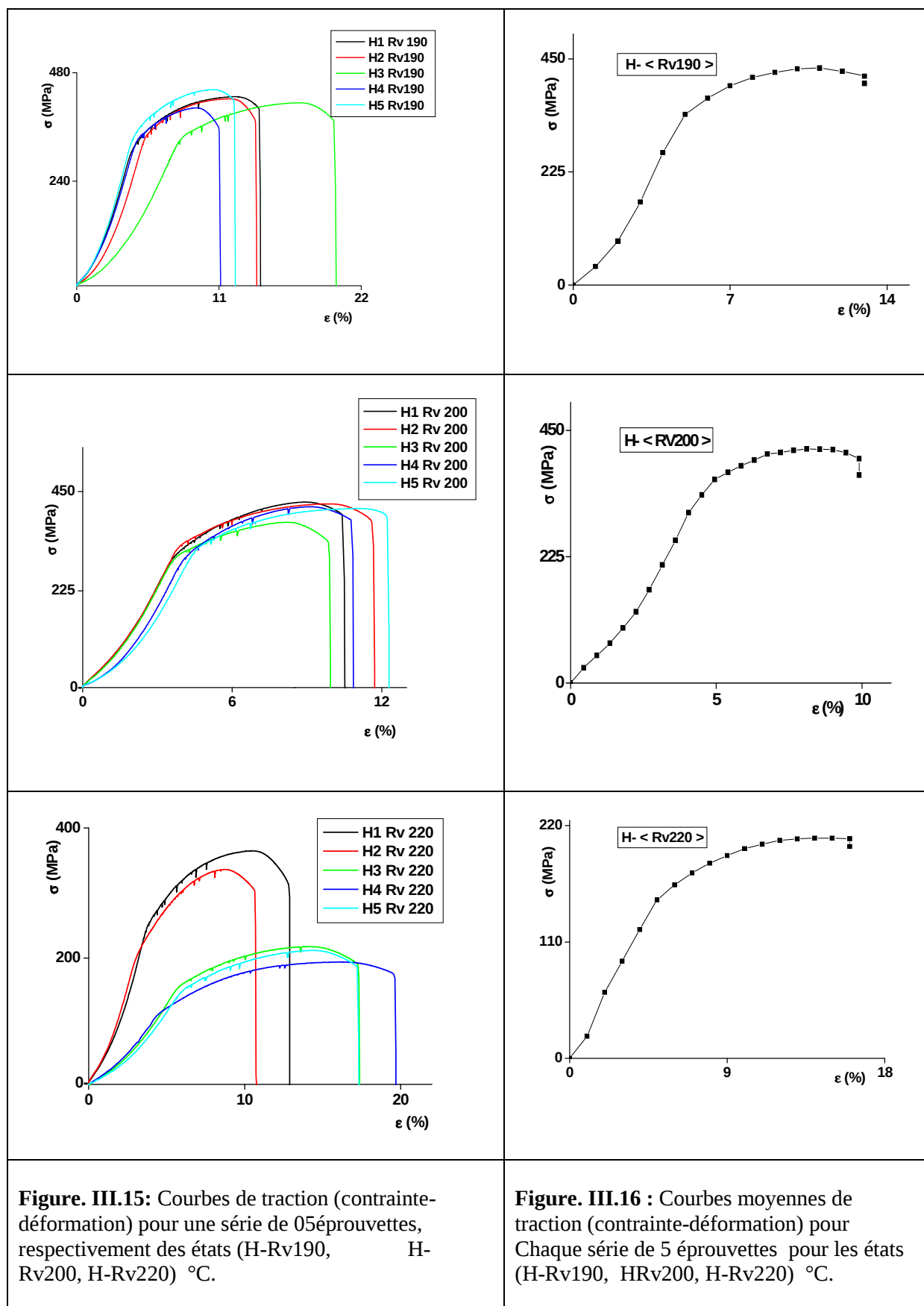


Figure. III.13: Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes, respectivement des états (H-Rv160, H-Rv170, H-Rv180) °C.

Figure. III.14 : Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (H-Rv160, HRv170, H-Rv180) °C.



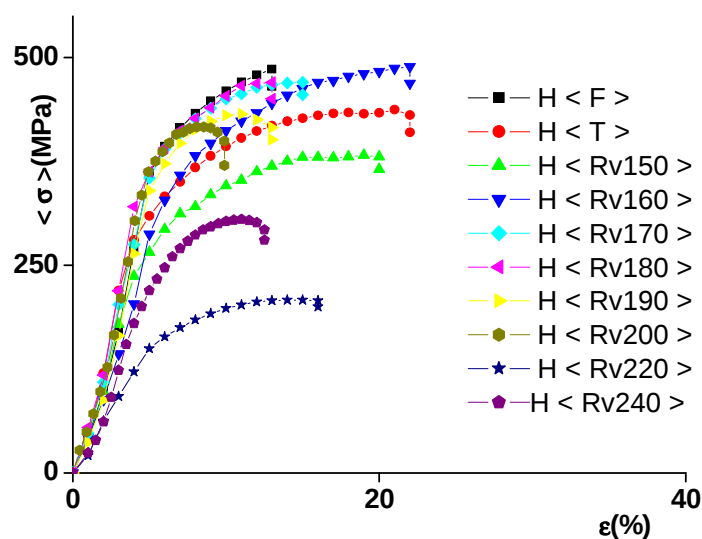
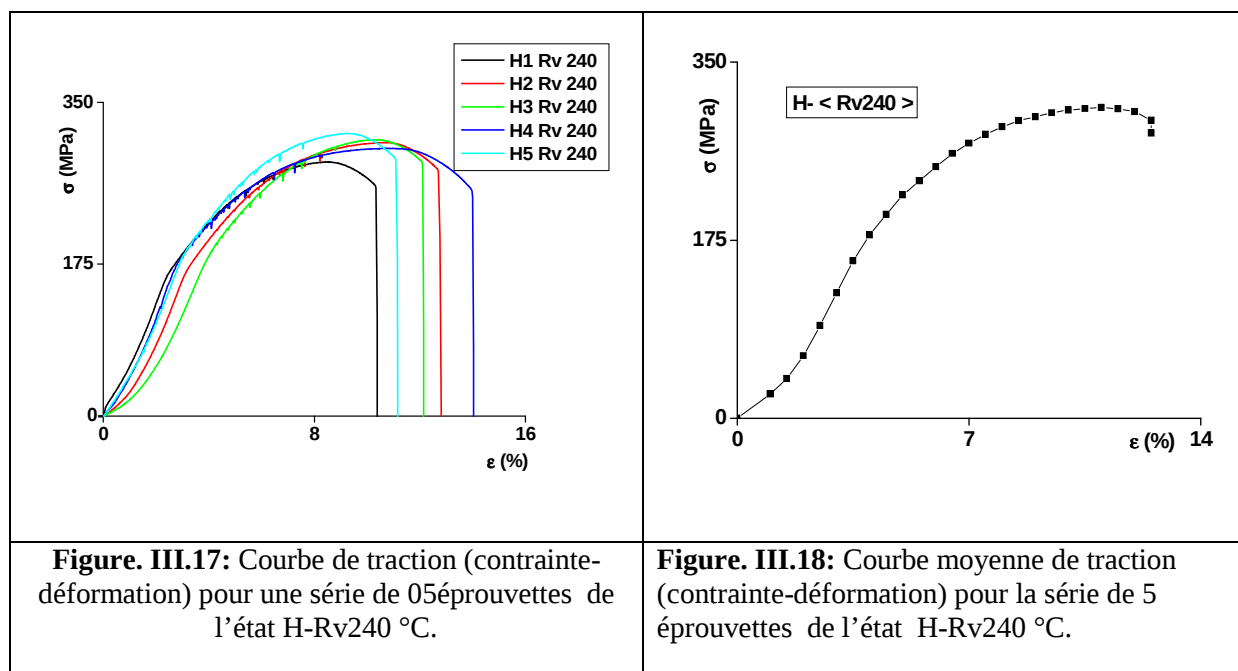


Figure. III.19: regroupement des Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) des 10 états.

Les figures (III.1) à (III.10) représentent les courbes de contrainte-déformation de cinq éprouvettes pour chaque état des dix considérés : brut de coulée, trempée (H-Rv150, HRv160, H-Rv170, H-Rv180, H-Rv190, H-Rv200, H-Rv220, H-Rv240) °C.

Sur les figures (III.11) à (III.18) on a regroupé à chaque fois les cinq éprouvettes de chaque état dans un même graphe afin de comparer les résultats auxquels on ajoute la courbe moyenne de chaque état de traitements thermiques.

La figure (III.19) représente le regroupement des moyennes de chaque état pour comparer les résultats des différents états.

L'étude des courbes précédemment citées nous a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'alliage AlCu4% pour le mode corroyé qui sont données dans le tableau suivant :

I.1 CARACTERISTIQUES DE RESISTANCE :

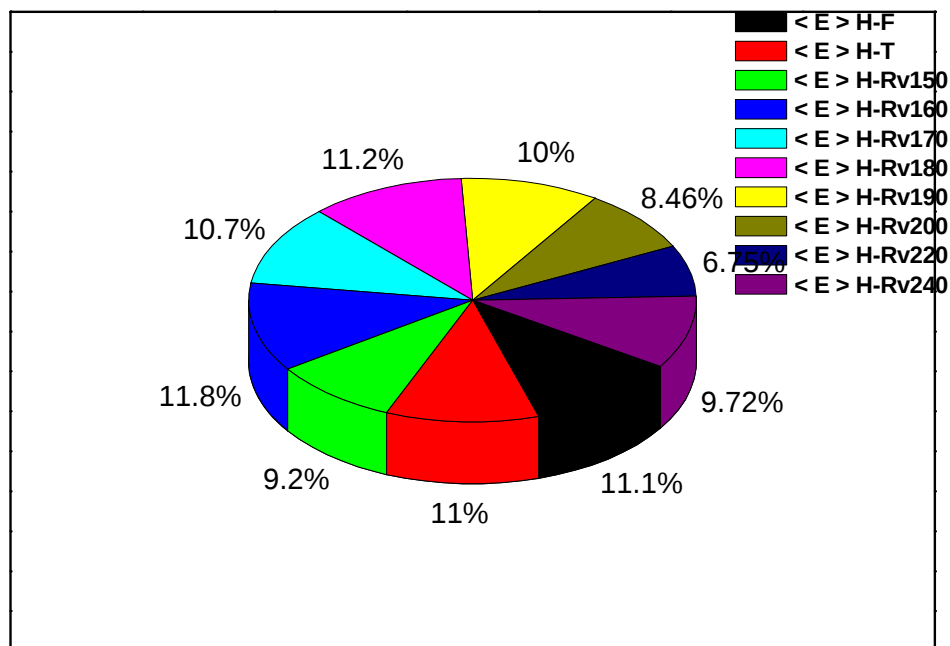
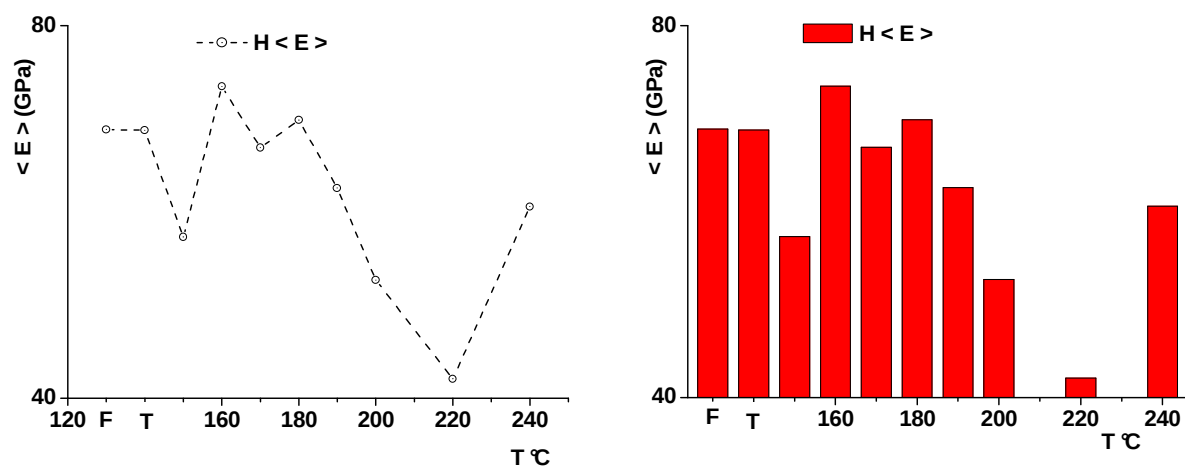


Figure. III.20: Graphe, histogramme ($\langle E \rangle$ – Températures de revenu) et secteur des modules d'Young E moyens des dix états considérés.

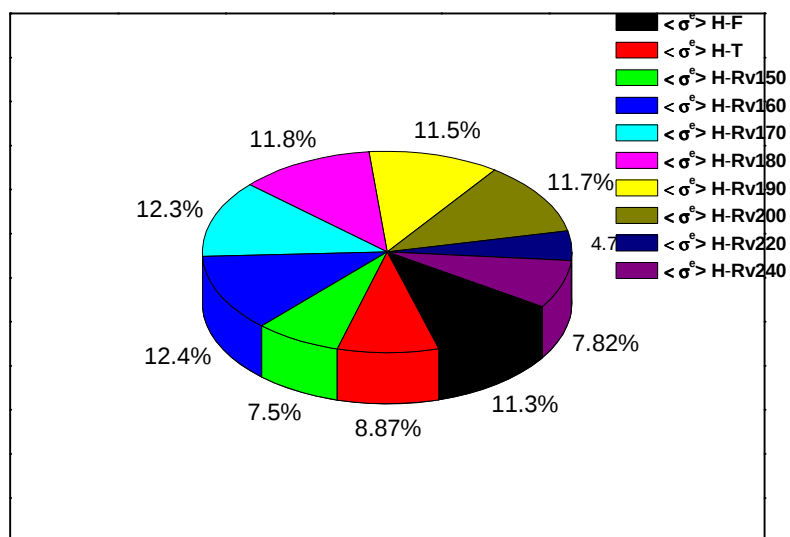
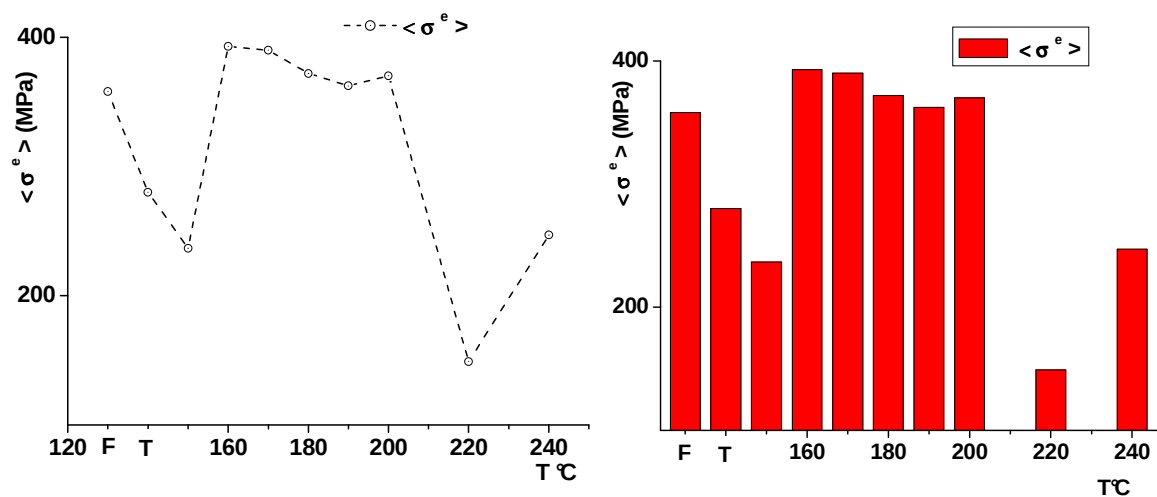


Figure. III.21: Graphe, histogramme ($\langle \sigma_e \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des contraintes élastiques moyennes des dix états.

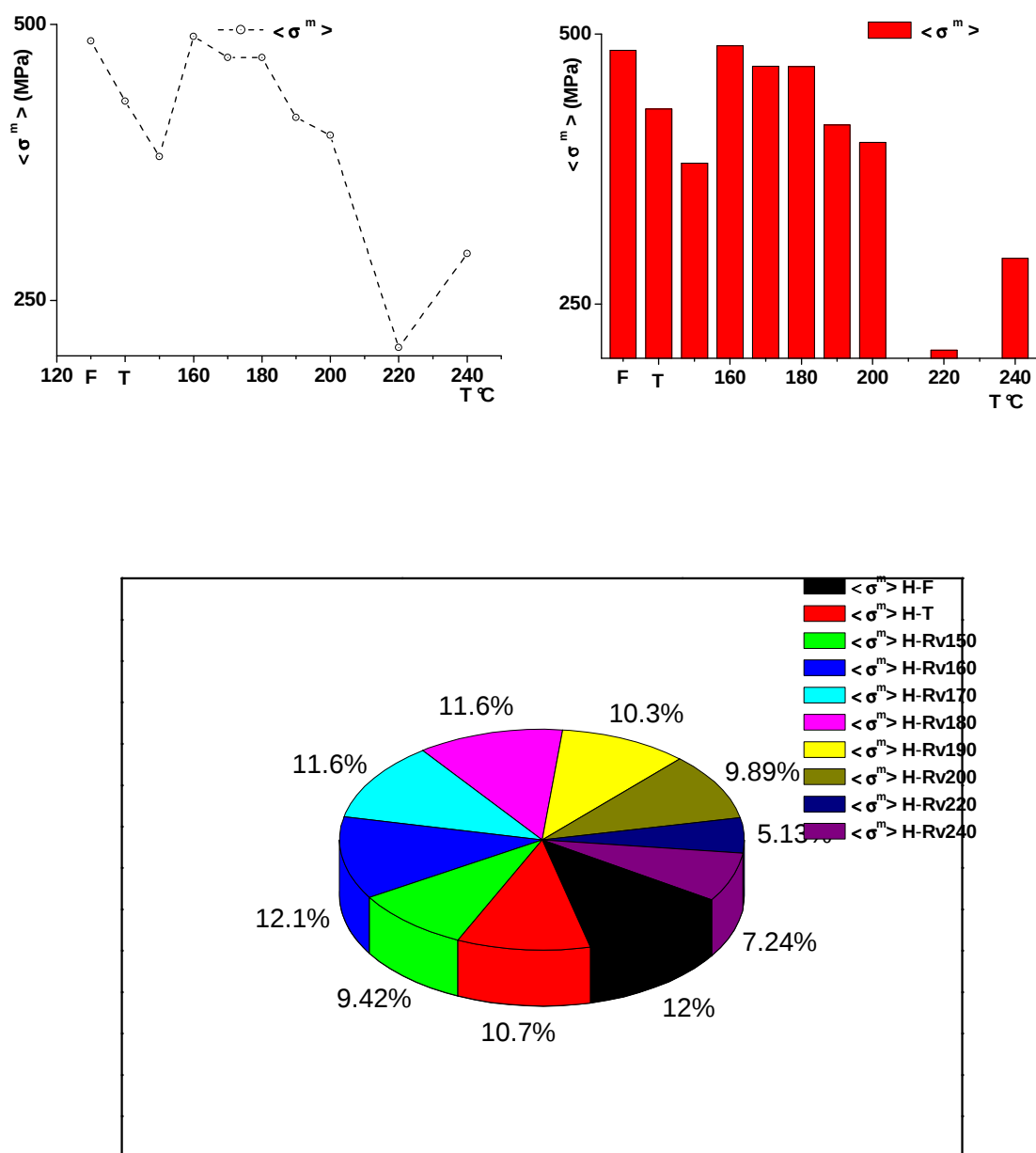


Figure. III.22: Graphe, histogramme ($\langle \sigma_m \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des contraintes maximales moyennes des dix états.

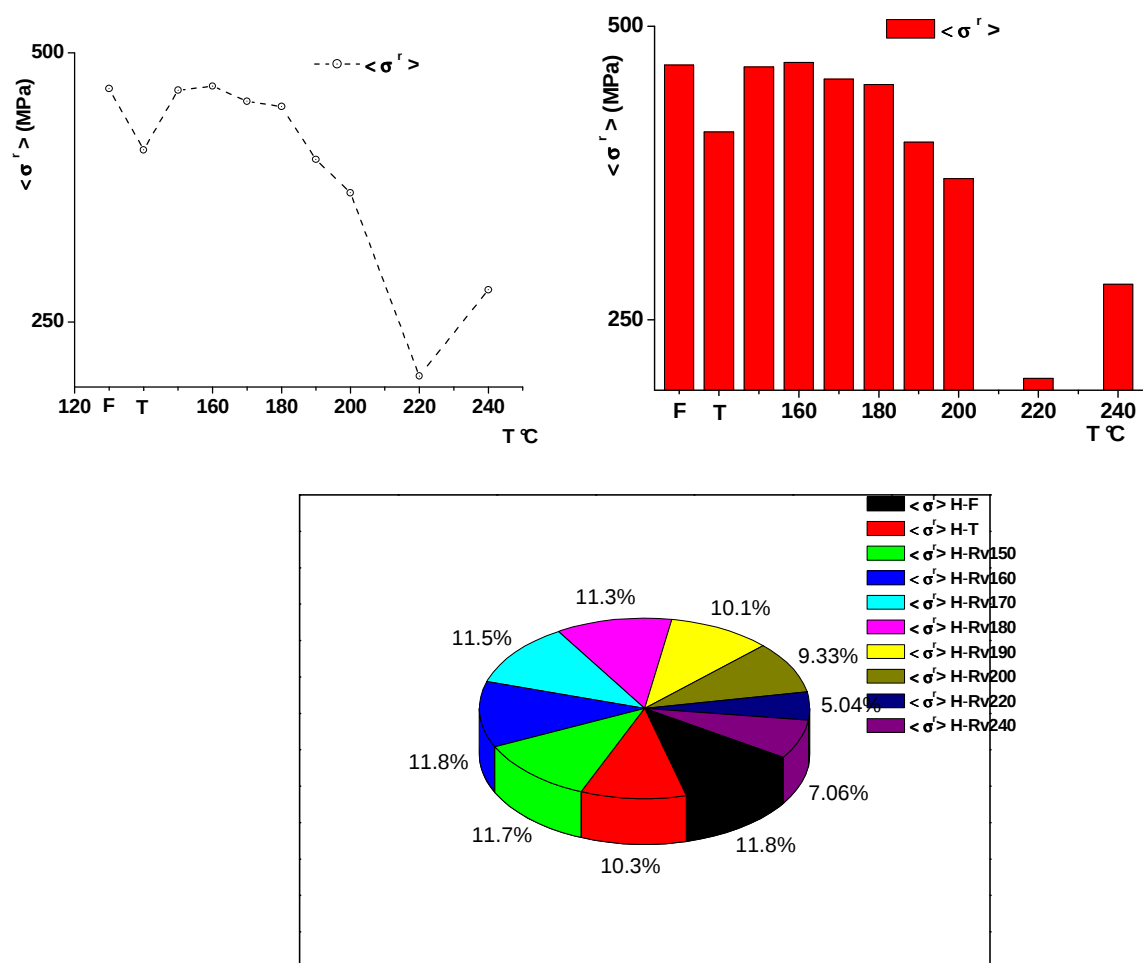


Figure. III.23: Graphe, histogramme ($\langle \sigma_r \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des contraintes de rupture moyennes des dix états.

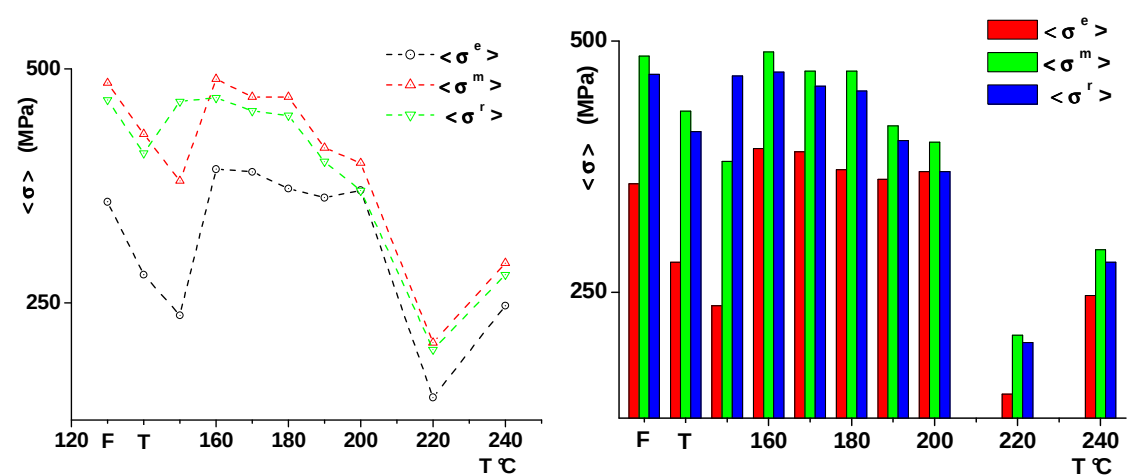


Figure. III.24: Graphe et histogramme des contraintes σ_e , σ_m , σ_r moyennes des dix états

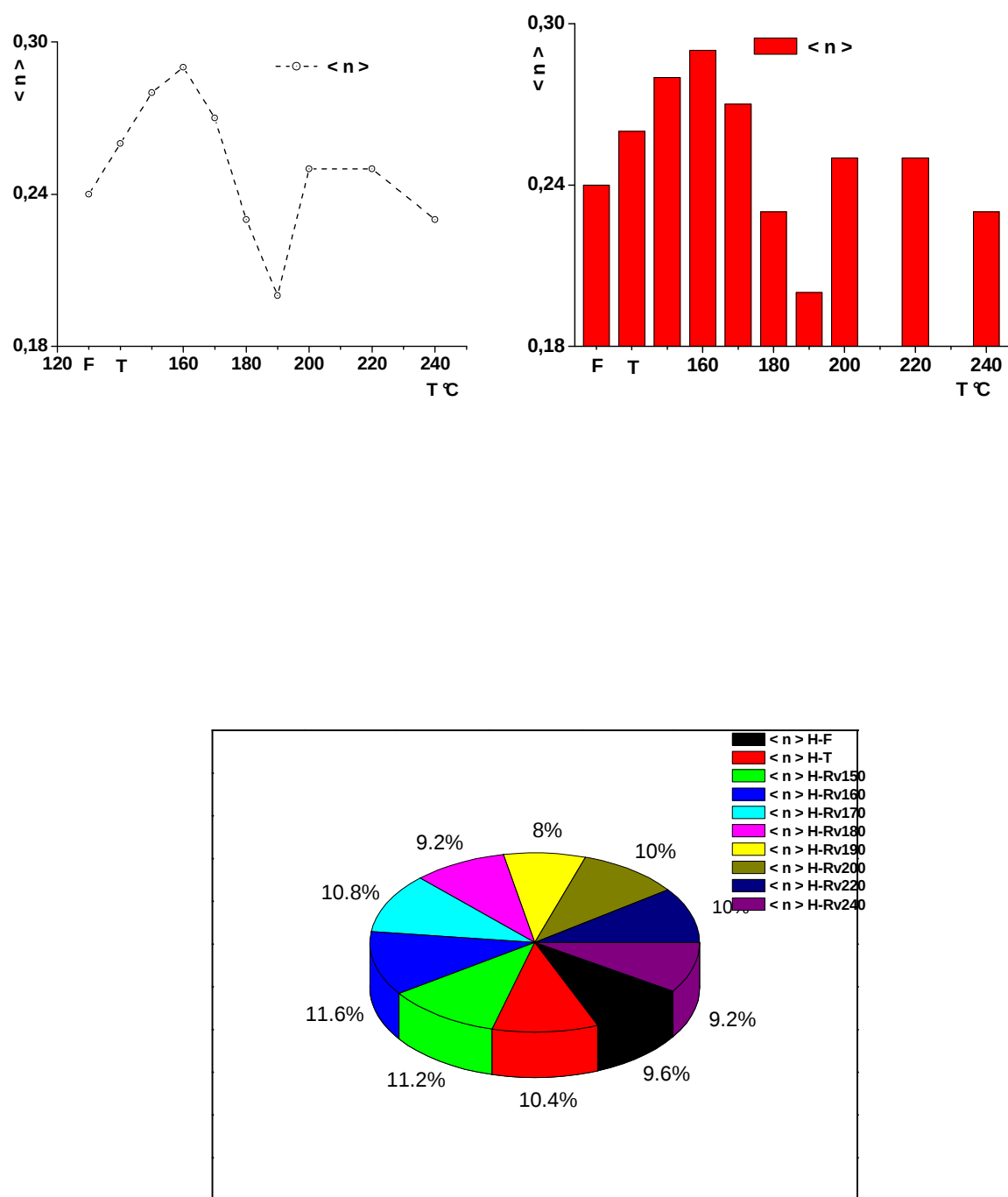


Figure. III.25: Graphe, histogramme ($\langle n \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients d'écrouissage moyens des dix états

Les valeurs (III.20) et (III.25) représentent respectivement les valeurs du module d'Young et des contraintes σ_e , σ_m , σ_r , n pour les dix états.

II. Effets des traitements thermiques sur les caractéristiques de dureté HB et la microdureté HV0,01:

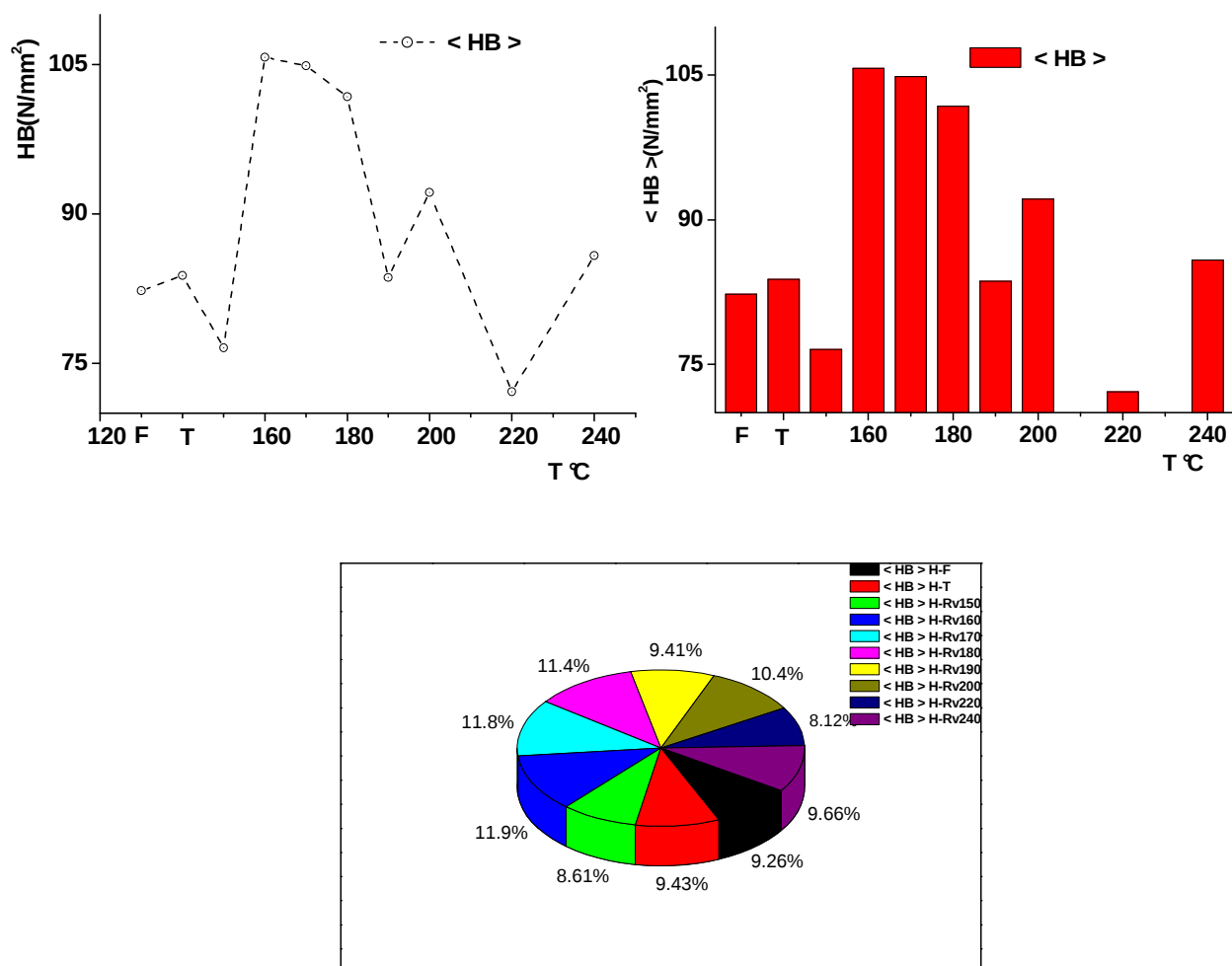


Figure. III.26: Graphe, histogramme ($\langle HB \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des duretés moyennes des dix états.

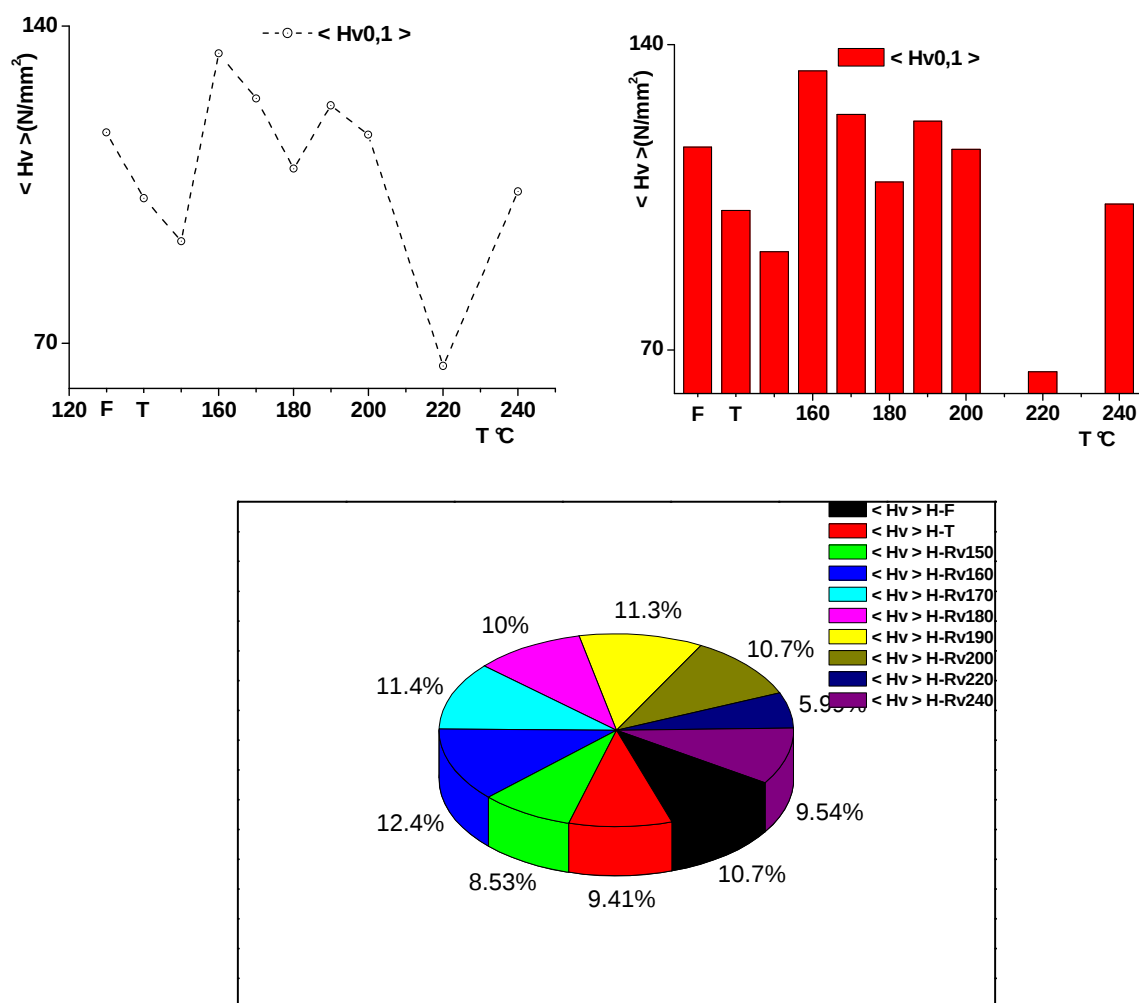
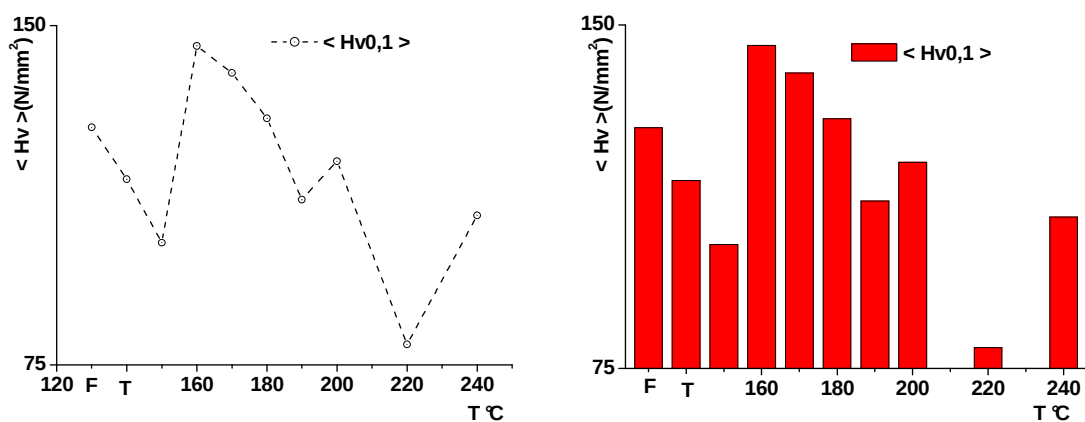


Figure. III.27: Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la Zone blanche.



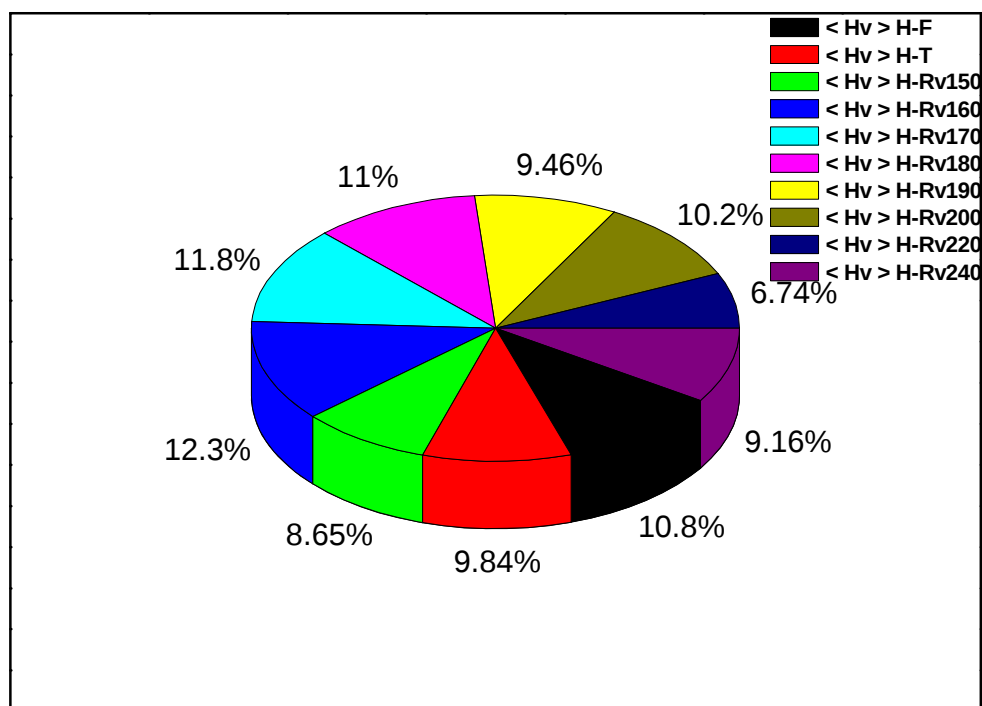


Figure. III.28: Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la Zone noire.

II.1.CARACTERISTIQUES DE DUCTILITE :

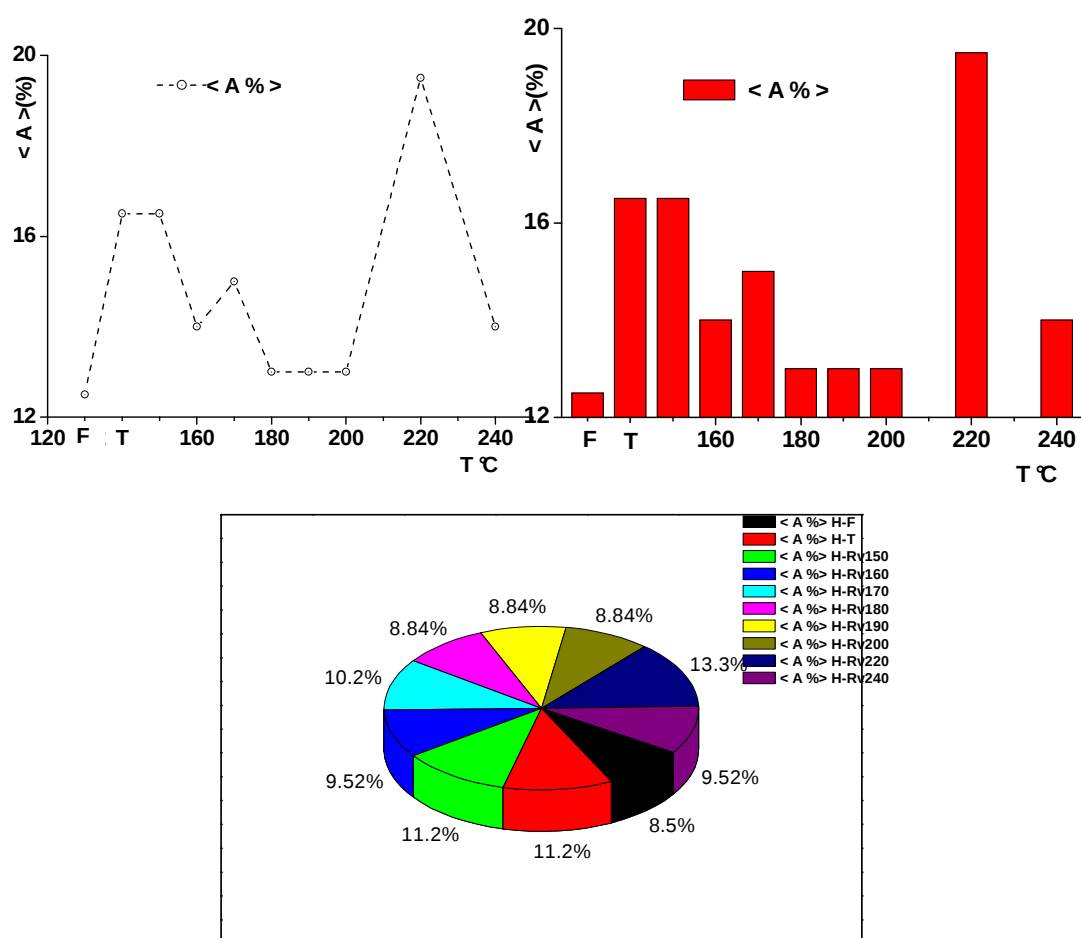
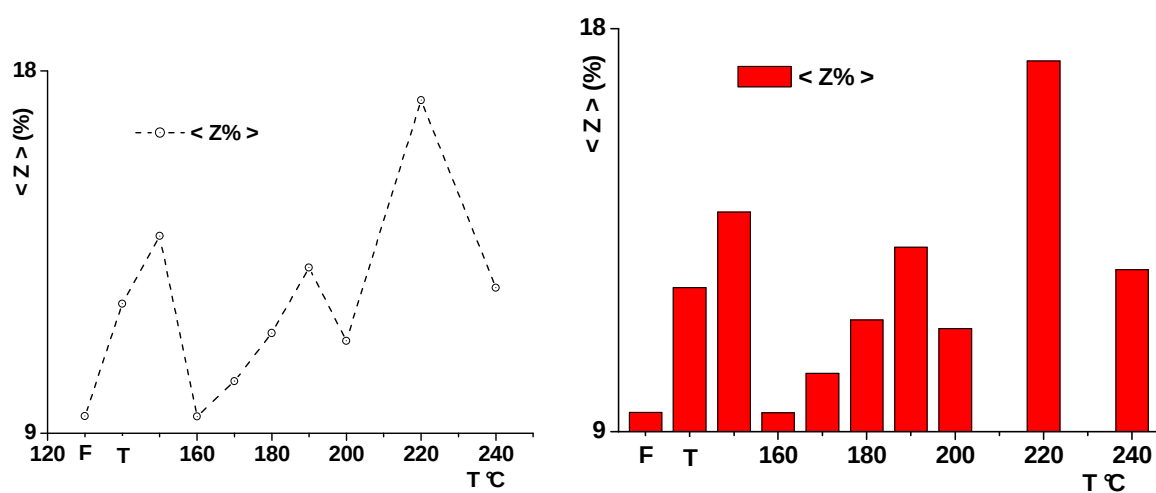


Figure. III.29: Graphe, histogramme ($\langle A \% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des allongements moyens des dix états.



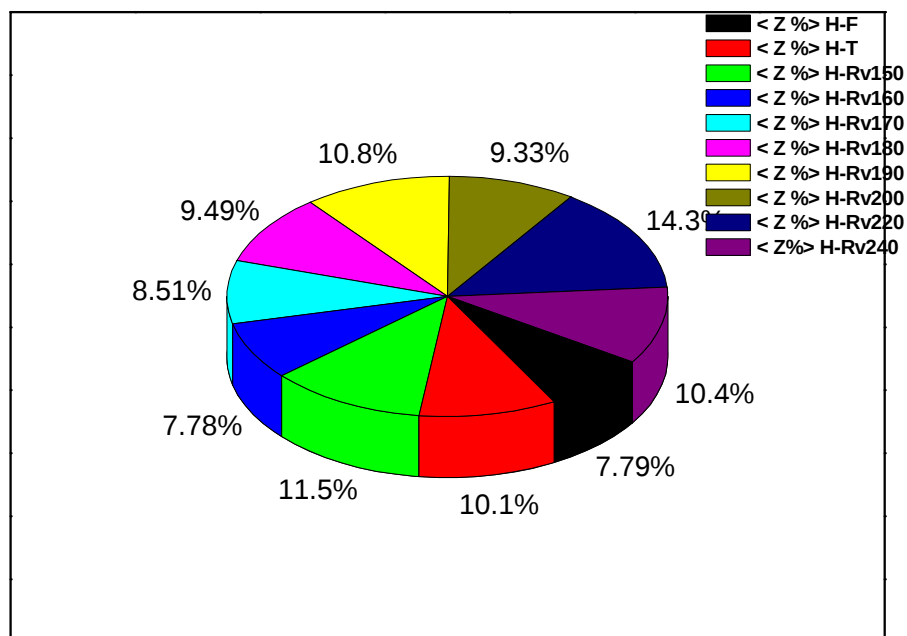
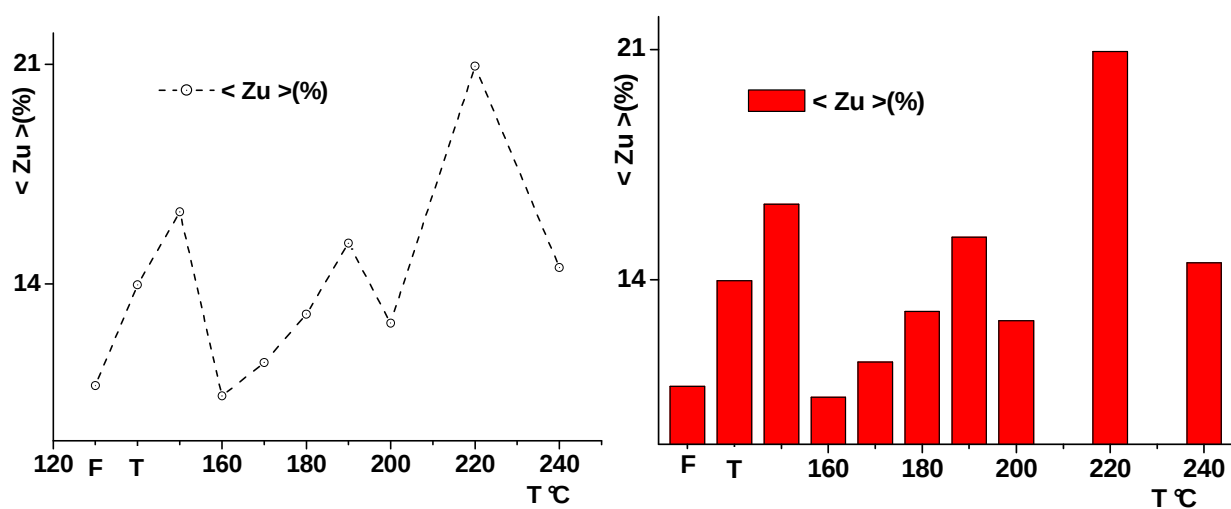


Figure. III.30: Graphe, histogramme ($\langle Z \% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de striction moyens des dix états.



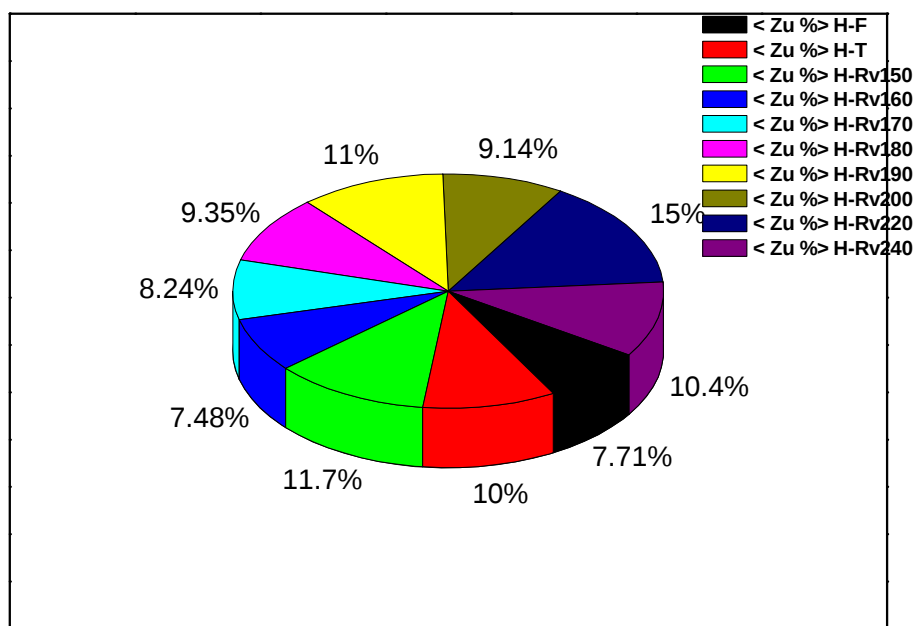


Figure. III.31: Graphe, histogramme ($\langle \text{Zu} \% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des allongements de striction moyens des dix états.

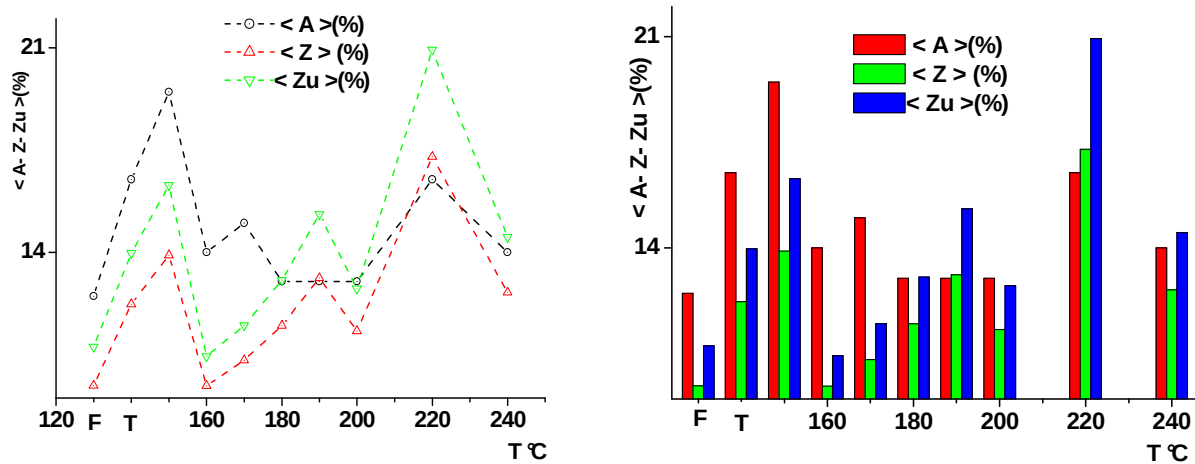


Figure. III.32: Graphe et histogramme des caractéristiques de ductilité ($\langle A \% \rangle$, $\langle Z \% \rangle$ et $\langle \text{Zu} \% \rangle$ - Températures de revenu) des 10 états considérés.

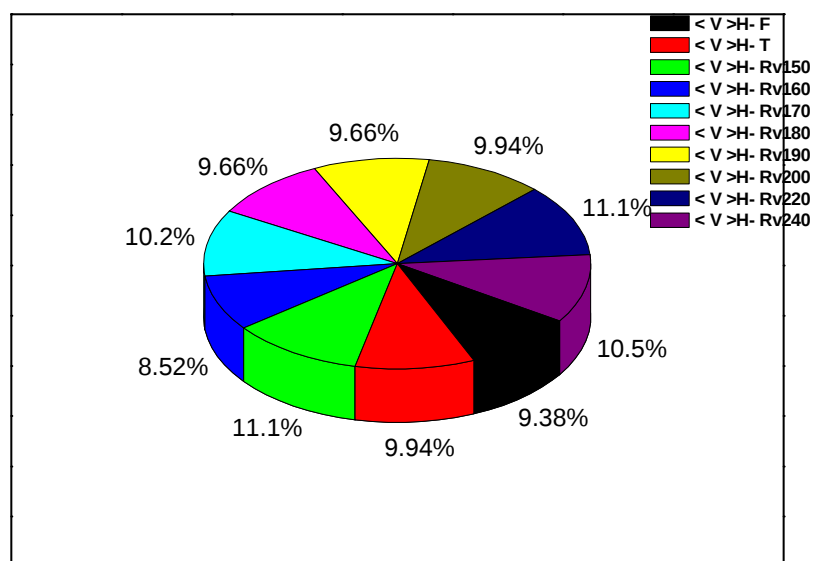
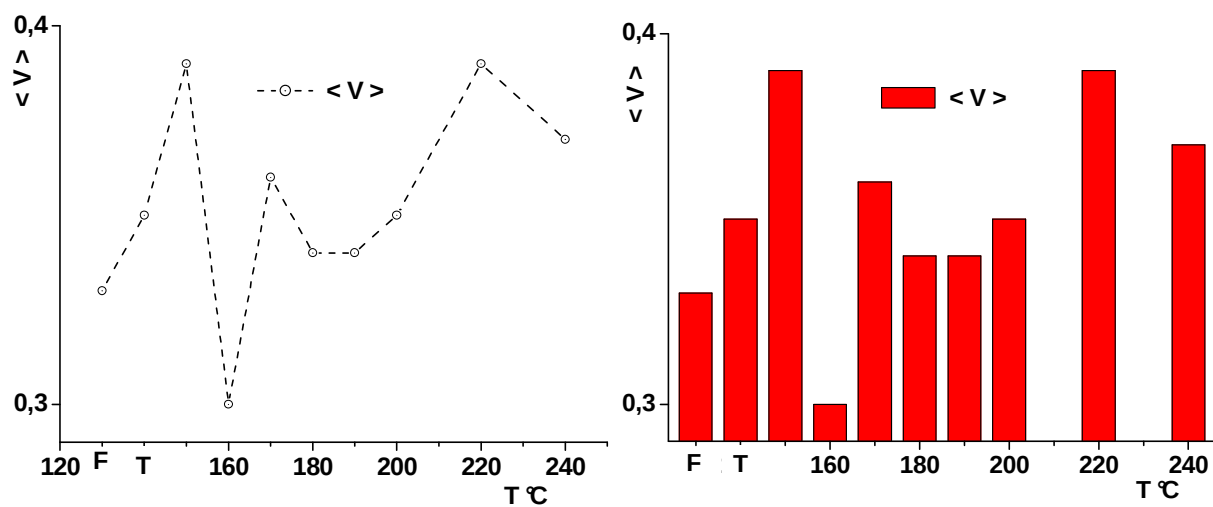


Figure. III. 33: Graphe, histogramme ($\langle v \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de poisson moyens des dix états.

Les résultats illustrés dans les différentes figures montrent que les caractéristiques mécaniques de résistance correspondantes aux différents états et se rapprochent avec une légère supériorité pour l'état brut de coulée, trempée et les états de températures revenu (150, 160, 170, 180, 190, 200, 220 et 240)°C par rapport à celles des Sept autre états, or leurs caractéristiques de déformation tels que A%, Z%, Zu% sont minimales.

III. EFFETS DU MODE D'ELABORATION ET DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LA MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE AlCu4% :

L'étude métallographique est un moyen essentiel pour connaître la structure micrographique des matériaux métalliques ; ces constituants micrographiques procurent aux métaux leurs différentes propriétés mécaniques.

Les métallographies obtenues sont prélevées à l'aide d'un microscope optique pour déterminer la structure et la texture granulaire du matériau étudié.

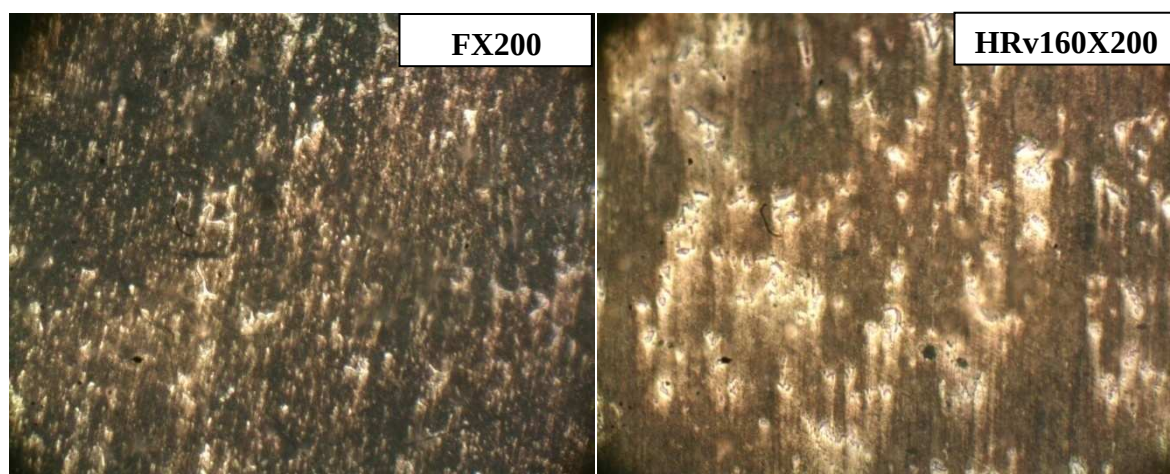


Figure. III.34: Micrographie de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et à la température de revenu 160°C par microscope optique.

A partir des figures précédentes, on observe des grains sombres de la solution solide AlCu4% à l'intérieur desquels sont logés des pores noirs de petite taille, ces grains forment la matrice de l'alliage étudié et on distingue des précipités claires sur les joints de grains. On remarque aussi que le mode d'élaboration influe sur la quantité des pores. d'un autre côté le traitement thermique affine les joints de grains. La trempe homogénéise la microstructure, en d'autres termes, la concentration de l'élément soluté tend à s'uniformiser à l'intérieur des différents grains. Par contre la température d'homogénéisation stabilise la microstructure, d'ailleurs on

constate un changement de la morphologie et la réparation des précipités après la température d'homogénéisation.

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques de l'alliage binaire 2017 A obtenues à l'état brut de coulée, on le soumet d'une part à un traitement thermique spécifique de durcissement structural, d'autre part pour le rendre sensible à ce traitement thermique l'addition du magnésium (0,40- 1,0)% est nécessaire.

Ce traitement thermique s'effectue en quatre étapes: température d'homogénéisation, trempe, maturation et Variation des températures de revenu.

Il est connu que le traitement d'homogénéisation s'effectue à une température constante au-dessous de celle de l'eutectique pendant un temps bien déterminé. Cette température présente une grande influence sur les caractéristiques obtenues, pour accroître la résistance de l'alliage, on pourrait être tenté d'augmenter la température mais il faut éviter d'atteindre la température de brûlure à laquelle l'alliage commence à fondre localement et plus spécialement aux joints des grains. Cette fusion partielle se traduit par une décohésion fragilisant et l'émersion dans le milieu de trempe peut entraîner la naissance de criques aux joints de grain, d'où la nécessité du choix de cette température.

Les résultats obtenus dans ce présent travail peuvent être résumés comme suit :

- Température de chauffage et de mise en solution avec homogénéisation à de TH(500) ° C

Pour maintenir à la température ambiante la structure homogénéisée existante à des températures plus élevées, le traitement de trempe à huile est effectué à (20 -25) ° C.

- La trempe provoque à l'intérieur de l'alliage un champ de contraintes résiduelles constituées d'un système équilibré de compression en surfaces et de tension au cœur (augmentation de la dureté).

– Pour une répartition homogène de ce champ et l'uniformisation de la structure du matériau on a procédé aux vieillissements, la température et le temps de ces derniers sont choisis expérimentalement.

– Les vieillissements considérés provoquent d'une part la migration des éléments d'additions Cu et Mg vers les dislocations, d'autre part la formation des précipités Al_2Cu dans la matrice mère de l'alliage étudié, Ces deux phénomènes conduisent à l'augmentation des caractéristiques mécaniques pour le mode d'élaboration.

– Les propriétés mécaniques de l'alliage élaboré à l'état 160°C sont meilleures par rapport aux autres états. Cela est dû probablement au fait suivant : après refroidissement, lors de la trempe et des différents vieillissements, on obtient une précipitation maximale.

Résultats de l'étude de l'alliage **AlCu 4%** selon :

Influence des traitements thermiques :

Pour cela, les contraintes de résistances sont maximales au détriment de la ductilité quels que soient les états considérés :

- à la température revenu notée : **H Rv 160°C**

➤ De même la courbe (contrainte-déformation) à la température revenu notée : **H Rv 160°C** sont au dessus des autres états étudiés.

Conclusion:

✚ Finalement, nous recommandons la coulée avec la température d'homogénéisation notée : **TH500°C** suivie d'une maturation de 16h et d'un revenu à 160°C pendant 20h pour des pièces de résistances de grandes séries.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette présente étude nous nous sommes intéressés à l'influence de l'ajout de (0,40 - 1,0)% Mg qui est le principal agent d'amélioration des caractéristiques mécaniques associé au procédé industriel de l'alliage de corroyage conjugués à ceux des traitements thermiques de durcissement structural par précipitation sur l'évolution des propriétés mécaniques et structurales de l'alliage polycristallin AlCu4Mg utilisé dans diverses réalisations.

Le but de ce travail est d'étudier l'aptitude au durcissement structural de l'alliage de corroyage en considérant dix états: F : brut de coulée : pris comme état de référence. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques obtenues à l'état brut de coulée on est amené à un traitement thermique de durcissement structural, l'addition de magnésium est nécessaire pour rendre l'alliage sensible à ce traitement thermique qui s'effectue en quatre étapes :

Traitement de mise en solution suivi d'une homogénéisation qui se fait dans un four de trempe à une température(500) °C et d'un maintien de 8h, suivi immédiatement d'une trempe à l'huile à température ambiante de(20 – 25)°C, d'une maturation de 17h à l'air ambiante et de différent revenus à des températures respectivement de (150,160,170,180,190,200,220 et 240)°C pendant 20h dans un four de revenu et d'un refroidissement dans le four .

L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus nous montrent :

- Les recuits considérés provoquent la mise en solution et l'homogénéisation permet une diffusion rapide des éléments de soluté Si et Mg dans la matrice mère. Ce phénomène conduit à l'élévation des caractéristiques de résistances de ce mode d'élaboration,
- La trempe provoque à l'intérieur de l'alliage un champ de contraintes résiduelles constituées d'un système équilibré de compression en surfaces et de tension au cœur (augmentation de la dureté) avec une précipitation moyenne de Al_2Cu ,
- La maturation et le revenu provoquent respectivement la précipitation optimale des éléments d'addition Cu dans la matrice de l'aluminium formant ainsi des précipités grossiers et fins ce qui peut expliquer l'augmentation des caractéristiques mécaniques de ce mode d'élaboration,
- Les propriétés mécaniques de l'alliage par refroidissement rapide sont meilleures par rapport à celles de l'alliage par refroidissement lent ; cela est dû au fait qu'après solidification lors de refroidissement rapide la structure de l'alliage est plus fine à celle obtenue par refroidissement lent,
- **Résultats du compromis obtenu :** Pour les pièces de résistances mécaniques élevées, nos recommandations sont les suivantes selon :
 - **Les traitements thermiques effectués**, quels que soient les états considérés, on recommande l'état HRv160°C.
 - Toutes les caractéristiques de résistances du mode de corroyage au compromis de température de revenu de 160°C sont supérieures à celles des autres états au détriment des caractéristiques de ductilité.

Bibliographies

[1] Jean BAILON et J.M.DORLOT

Des matériaux

3^{ème} édition, école polytechnique de Montréal, 2000.

[2] g.FANCY et POMPIDOU

Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation ;

AFNOR 2^{ème} édition 1992.

[3]Jean BARRALIS et Gérard MEADER

Pièces – métallurgie élaboration , structure; propriété, normalisation,

AFNOR NATHAN paris 2001.

[4]Michel COLOMDIE et COLL

Matériaux industriels : matériaux métalliques

Edition DUNOD ?paris 2000.

[5]I.LAKHTINE

Métallographie et traitements thermiques des métaux,

4^{ème} édition, MIR. MOSCOU 1986.

[6]Jean PHILIBER, Alain VIGNES, Yves BRECHET

Métallurgie du mènèrai aux matériaux

Edition MOSSON, paris 1998.

[7]Melle AKLIL DALILA MESSAOUDENE ALDJIA

Effet de mode d'élaboration et des traitements sur la caractéristique mécanique et la microstructure d'un alliage de fonderie AlSi10Mg et AlSi 12Cu.

[8]. J.M.Cuntz, Aéronautique / Prévention et lutte contre la corrosion (Théma-Cor 2002)

Tome III, V 2, p . 1-20, (Oct 2002) Anglet.

[9]. J.M.Cuntz, Aéronautique / Prévention et lutte contre la corrosion (Théma-Cor 2002)

Tome III, V 2, p. 7, (Oct 2002) Anglet.

[10]. C.Blanc, Etude comparative de la sensibilité à la germination et à la propagation des piqures des alliages d'aluminium 2024 et 6056, (1997) INPToulouse.

[11]. MF.ASHBY and DRH.JONES, Matériaux, 2 Microstructure et mise en œuvre, DUNOD, p. 94-96, (1991).

[12]. Y.A.Bagaryatskii, Dolk. Akad. Nauk. S.S.S.R., 87, 559, (1952).

[13].Christian VARGEL ,*Le comportement de l'aluminium et de ses alliages*,BORDAS,Paris 1979 .

[14] A HAKEM *Microstructure et propriété mécaniques de l'alliage hypoeutectique Al Si7 Mg*
U.M.M.T.O (2005) .

[15]Polycopie de M^r Hakem.

[16]C. CHAUSSIN , G.HYLLY

Métallurgie : alliages métalliques tome 1.

8^{eme} édition, DUNOD ? paris

[17]Brunos DUBOS, Pierre SAIN FORT

Technique de l'ingénieur, durcissement par précipitation des alliages d'aluminium.

[18]J P Poirier, *plasticité à haute température des solide cristallin* paris (1976).

[19] Lakhtine *Metallographique et traitements thermiques des métaux* 4 eme édition Moscou (1986).

[20] M . Dupeux, *Aide-mémoire science des matériaux*, Dunod, (Paris 2004), pp.105-148.

Nomenclature des symboles utilisés

M : Masse atomique ;

L_0 : longueur initiale (mm) ;

S_0 : section initiale (mm²) ;

F : Effort de traction(N) ;

R_m : Resistance à la rupture ;

R_e : Resistance à la limite d'élasticité ;

$A\%$: Allongement à la rupture ;

L_u : est la longueur de l'éprouvette à la rupture en U ;

$Z\%$: Coefficient de striction ;

$Z_u\%$: Allongement de striction ;

σ : Contrainte ;

E : Module de Young ;

ε : Déformation ;

K : Constante ;

HB : Dureté brinell ;

HV : Dureté Vickers ;

D : Diamètre de la bille en millimètres ;

d : Diamètre de l'empreinte en millimètre ;

HR : Dureté Rockwell ;

HRB : Dureté Rockwell à bille;

HRC : Dureté Rockwell cône diamante ;

T : La température en K ;