

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

ⵝⵓⵏⵉⵏⵉ ⵏ ⵉⵏⵉⵙⵓⵏⵉ ⵏ ⵉⵏⵉⵙⵓⵏⵉ ⵏ ⵉⵏⵉⵙⵓⵏⵉ

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Sciences des Matériaux
en Génie Mécanique

Présenté par:

ZIANE Jugurtha

THEME

Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution
des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage AlCu4%
trempé dans l'eau

AlCu4%

Devant le jury composé de:

M ^r .	MOHELLEBI	Mouloud	M.A.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 ^{lle} .	MENDIL	Sabrina	M.A.B en Génie Mécanique	UMMTO	Examinatrice

Date de la soutenance : 21/09/2013

Année Universitaire: 2012/2013

Remerciements

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

Je remercie 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.

Je remercie les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger mon travail.

Enfin, Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont apporté leurs conseils ou leur contribution.

Sommaire

Introduction générale	
➤ Partie I : Recherche bibliographique	
Chapitre I.1 : Aluminium et ses alliages	
I.1) Historique.....	1
I.2) Fabrication d'aluminium	1
a- Production d'alumine	1
b-Production de l'aluminium	1
I.3) Principales propriétés de l'aluminium	2
a. Propriétés physiques.....	2
b. Propriétés mécanique.....	2
c. Propriétés chimiques.....	2
d. Propriétés de mise en forme.....	3
I.4) Alliages à base d'aluminium.....	3
➤ Alliage corroyés.....	3
➤ Alliage de moulage.....	3
➤ Alliage de frittage.....	3
.	
I.4)classification des alliages d'aluminium.....	3
a. Alliage corroyages.....	4
b. Alliages élaborés par frittage.....	4
C. Alliages de moulage.....	4
D. Alliage de fonderie.....	4
I.5) Désignation des alliages en aluminium.....	6
a)Désignation numérique (NF EN 573-1)	7
b)Désignation symbolique (NF EN 57362).....	7

b) Etats de livraison - Etats métallurgiques.....	10
I.6) Les alliages Aluminium / Cuivre.....	10
I.6.1) Diagramme d'équilibre AL-CU 4%	7
I.6.2) Morphologie de la précipitation.....	11
I.6.3) Diversité des alliages d'aluminium	12
I.5.3. Quelques alliages d'aluminium _ cuivre	13
• Alliage 2014.....	13
• Alliage 2117.....	13
• Alliage 2017.....	13
• Alliage 2024.....	13
• Alliage 2618.....	13
• Alliage 2030.....	14
• Alliage 2011.....	14

Chapitre I.2 : Élaboration des alliages AlCu 4%

Élaboration de l'aluminium.....	20
Composition chimique de l'alliage 2017A.....	22
Influence des éléments d'addition.....	22
Élaboration et préparation de l'alliage 2017A.....	22

Chapitre I.3 : Traitements thermiques

I.3.1) Introduction	24
I.3.2) Cycle thermique	24
I.3.3) Principaux type de traitements thermiques.....	26
a) Traitement d'homogénéisation.....	26
b) Traitement d'adoucissement.....	26
c) Traitement de trempe structural.....	26
I.3.3.1) Mise en solution	27
I.3.3.2) Trempe	27
I.3.3.3) Maturation (vieillessement naturel)	27
I.3.3.4) Revenu (vieillessement artificiel).....	27
I.3.3.5) Le recuit.....	28
I.3.4) Principe de durcissement structural	29

I.3.5)Microstructure.....	30
I.3.5.1) macrographie.....	30
I.3.5.2) La micrographie.....	30
1) observation par microscopie.....	31
a-Observationpar microscope optique.....	31
b-Microscopie électronique à balayage.....	31
2) Importance de la métallographie.....	31

Chapitre I.4. Essais mécaniques

I.4.1) Introduction	33
I.4.2) Essai de traction	33
1) Principe de l'essai	33
2) Éprouvette :.....	34
3) Forme et dimension :.....	34
4) Machine de traction :.....	35
5) courbe de traction :.....	36
6) Forme classique d'un diagramme de traction	37
7)Caractéristique mécanique de l'essai de traction	37
• Limite d'élasticité.....	37
• Résistance à la traction.....	37
• Allongement à la rupture.....	37
• Coefficient de striction.....	37
• Module d'élasticité longitudinale.....	37
• Allongement de striction.....	37
• Module d'Young E.....	38
I.4.3) Essai de dureté	38

1) Définition :	38
2) Principe de l'essai de pénétration	39
3) Type essais	39
I.4.4) Essai brinell	39
A) Conditions de l'essai	40
b) les avantages de l'essai	41
I.4.5) Essai Vickers	41
a) condition de l'essai	42
I.4.6) Essai Rockwell	42
1) Essai Rockwell (HRC).....	43
2) Essai Rockwell "B "(HRB)	43

Chapitre . I. 5. Défauts cristallins

I.5.1) Les défauts cristallins.....	44
I.5.2) Les défauts ponctue	44
1) Lacune	44
2) Atome auto interstitiel	44
3) Atome étranger en substitution	44
4) Atome étranger en insertion	45
I.5.2) Défauts à une dimension (défauts linéaires)	45
1) Dislocation coin	46
2) Dislocation vis	46
3) Dislocation mixte	47
4) Le vecteur de Burgers	47
I.5.3) Défauts à deux dimensions (défauts plans)	47
1) Les joints de grains	48

2) Joints de macles	48
I.5.4) Défauts trois dimensions (défauts volumiques)	48
1) Les pores	49
2) Les inclusions	49
3) Les précipités	49
➤ Les précipités cohérents.....	49
➤ Les précipités semi-cohérents	50
➤ Les précipités incohérents	50
I.5.5) La diffusion	50
1) Définition.....	50
2) Mécanismes de la diffusion	50
a- Autodiffusion	50
b- Diffusion d'atomes de soluté en insertion	51
3) Lois de la diffusion	51
3.1)Etat stationnaire (première loi de Fick).....	51
3.2)Etat non stationnaire (deuxième loi de Fick)	52

Partie II : Expérimentale

Chapitre. II.1 : Appareillage

II.1) Introduction.....	53
II.2) Appareillages	53
1)Le laminage.....	53
2) Scie mécanique.....	54
3)Le fraisage.....	55
4) Les traitements thermiques.....	56
4.1) Four de trempe.....	56
4.2) Four de revenu.....	57
5) Les essais mécaniques.....	58

5.1) Machine de traction.....	58
6) Microscopie.....	59
6.1) Les polisseuses.....	59
6.2) Duromètre et microduromètre.....	60
6.3)Microscope électronique à balayage (MEB)	61
6.4) Microscope électronique à balayage	61

Chapitre II. 2.Matériaux et modes opératoires

II.2.1) Matériau étudié.....	63
II.2.2) Elaboration du matériau étudié.....	63
a)L'électrolyse.....	63
b) Mélange.....	64
C)Le laminage.....	64
II.2.3) Usinage	64
a)Le découpage.....	64
b) Fraisage.....	64
c) Tournage.....	64
II.2.4) Traitements thermiques.....	64
II.2.5). Cycle thermique.....	65
II.2.6) Essais mécaniques.....	66
. a)Essais de traction.....	66
➤ Forme et dimension des éprouvettes.....	66
II.2.7) Essais de dureté et microdureté.....	66
II.2.8) Examen micrographique.....	67
a)Préparation des surfaces	67
➤ Dressage.....	67
➤ Dégrossissage.....	67
➤ Finissage.....	69

II.2.9) Microscope électronique à balayage (MEB)	69
II.2.10) Attaque chimique.....	69
II.2.11) Microscopie.....	69

❖ Partie .III. Résultats et interprétation

III .1) INTRODUCTION	69
III .2) Effet du module d'élaboration est des traitements thermique sur l'essai de traction	69
III.3) influence des traitements thermiques sur les caractéristiques de traction	70
III.4) caractéristiques de résistance.....	89
III.5) caractéristiques de ductilité.....	92
III.6) Effets des traitements thermiques sur les caractéristiques de dureté HB.....	96
III.7) Effets des traitements thermiques sur la micro dureté HV 0.1.....	98
III.8) Valeurs de coefficient de poisson de l'alliage AlCu4%	100
III.9) effets des traitements thermiques sur la microstructure de l'alliage alcu4%.....	102

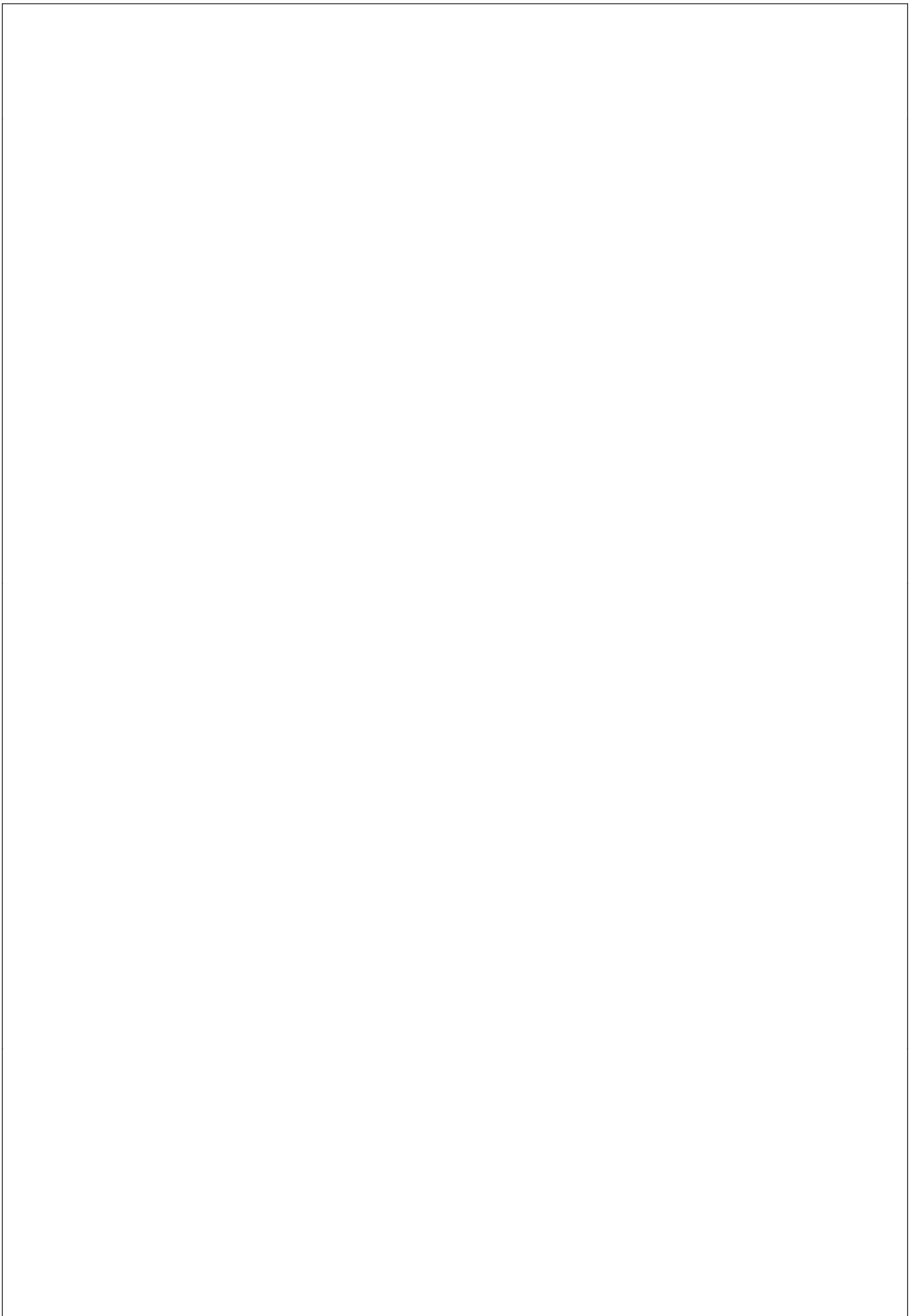
Liste des figures

Figure(I.1) : diagramme de phases du système binaire aluminium-cuivre	11
Figure(I.2) : microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu.....	12
Figure (I.3) : Étapes de production de l'aluminium	19
Figure (I.4) : schéma d'une électrolyse produit l'aluminium pur.....	21
Figure (I.5) : Principe de laminage.....	23
Figure (I.6) : Cycle thermique.....	24
Figure (I.7) : Cycle de traitement thermique des alliages d'aluminium	28
Figure (I.8) : Cycle thermique du durcissement structura	29
Figure (I.9) : Diagramme d'équilibre partiel Al-Cu	29
Figure (I.10) : Principe de l'essai	33
Figure (I.11) : l'éprouvette de traction	34
Figure (I.11) : Machine de traction	35
Figure (I.12) : comportement possible du matériau.....	36
Figure (I.13) : courbe de traction	36
Figure (I.14) : module de Young	38
Figure (I.15) : Essai de dureté brinell	39
Figure (I.16) : Principe de l'essai brinell	40
Figure (I.17) : Principe de l'essai Vickers	42
Figure (I.18) : Principe de l'essai Rockwell à bille	44
Figure (I.19) : Types de défauts ponctuels.....	46
Figure (I.20) : (a) Modèle d'un cristal parfait. (b) dislocation coin. (c) dislocation Vis	47
Figure (I.21) : Dislocation mixte	48
Figure (I.22) : Joints de grains	49
Figure (I.23) : Représentation schématique d'un pore	50

Figure (I.2.4) : Différents précipités	51
Figure (I.2.5) : mécanismes de diffusion à l'échelle atomique	52
Figure (II.2.6) : Schéma de principe d'élaboration par laminage	55
Figure (II.2.7) : Scie mécanique	55
Figure (II.2.8) : Fraiseuse	55
Figure (II.2.9) : Éprouvette de traction	56
Figure (II.3.0) : Four de trempe	57
Figure (II.3.1) : Étuve utilisée	58
Figure (II.3.2) : Machine de traction	59
Figure (II.3.3) : Éprouvettes subit un essai de traction	59
Figure (II.3.4) : Les Polisseuses	60
Figure (II.3.5) : duromètre	61
Figure (II.3.6) : Microduromètre	61
Figure (II.3.7) : Microscope optique	62
Figure (II.3.8) : Microscope électronique à balayage(MEB)	63
Figure (II.3.9) : Cycle Thermique	66
Figure (II.4.0) : Formes et dimensions d'éprouvette de traction	67
Figure (II.4.1) : échantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté	68
Figure (III.4.2) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état brut coulé	71
Figure (III.4.3) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état trempé	72
Figure (III.4.4) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 04 éprouvettes à l'état de E-Rv 150°C	73
Figure (III.4.5) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de E-Rv 160°C	74

Figure (III.46): Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de E-Rv 170°C.....	75
Figure (III.47) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de E-Rv 180°C.....	76
Figure (III.48) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de E-Rv 190°C.....	77
Figure (III.49) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de E-Rv 200°C.....	78
Figure (III.50) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de E-Rv 220°C.....	79
Figure (III.51) : Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes à l'état de E-Rv 240°C.....	80
Figures (III.52) : courbes réelles et moyennes de traction (contrainte – déformation) pour chaque séries de cinq éprouvette respectivement pour les états (E-F, E-T , E-Rv150 , E-Rv160 , E-Rv170 , E-Rv180 , E-Rv190 , E-Rv200 , E-Rv220 , E-Rv240)	84
Figure (III.53) : regroupement des Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) des 10 états.....	84
Figure (III.54) : compromis des traitements thermiques sur l'essai de tractionde l'alliage AlCu4%.....	85
Figure(III.55): Graphe, histogramme ($\langle E \rangle$ – Températures de revenu) et secteur des modules d'Young E moyens des dix états considérés.....	87
Figure (III.56): Graphe, histogramme ($\langle \sigma_e \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des contraintes élastiques moyennes des dix états.....	88
Figure(III.57): Graphe, histogramme ($\langle \sigma_m \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des contraintes maximales moyennes des dix états.....	89
Figure(III.58): Graphe, histogramme ($\langle \sigma_r \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des contraintes de rupture moyennes des dix états.....	90

Figure (III.59): Graphe, histogramme ($\langle \eta \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients d'érouissage moyens des dix états.....	91
Figure (III.60): Graphe et histogramme des contraintes $\sigma_e, \sigma_m, \sigma_r$ moyennes des dix états...	92
Figure(III.61): Graphe, histogramme ($\langle A\% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des allongements moyens des dix états.....	94
Figure (III.62): Graphe, histogramme ($\langle Z\% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de striction moyens des dix états.....	95
Figure(III.63): Graphe, histogramme ($\langle Zu\% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des allongements de striction moyens des dix états.....	96
Figure (III.64): Graphe et histogramme des caractéristiques de ductilité ($\langle A\% \rangle, \langle Z\% \rangle$ et $\langle Zu\% \rangle$ - Températures de revenu) des 10 états considérés.....	97
Figure (III.65): Graphe, histogramme ($\langle HB \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des duretés moyennes des dix états.....	98
Figure(III.66): Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la Zone noire.....	99
Figure (III.67): Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la Zone blanche.....	100
Figure (III.68): Graphe, histogramme ($\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) des microduretés moyennes des dix états de la Zone noire et la zone blanche.....	101
Figure (III.69): Graphe, histogramme ($\langle \nu \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de poisson moyens des dix états.....	102
Figure(III.70): Micrographie de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et à la température de revenu 160°C par microscope optique.....	103
Figure (III.71): Micrographie de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et à la température de revenu 160° par MEB.....	104
Figure(III.72): Micrographie des facies de rupture de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et a la température de revenu 160° par MEB.....	104



Liste des tableaux

Tableau I.1 : Familles d'alliages d'aluminium corroyés.	4
Tableau I.2 : Symboles chimiques et symboles AFNOR des éléments d'alliages	6
Tableau I.3 : Désignation des états métallurgiques	7
Tableau I-4 : Quelques groupes d'alliages d'aluminium	9
Tableau I-5 : Désignation des états métallurgiques de base.....	10
Tableau I-6 : Composition chimique de l'alliage 2017A	22
Tableau II.7 : Composition chimique de l'alliage étudié.....	64
Tableau III.8 : Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques de traction (σ_e , σ_m , σ_r , ϵ_m , ϵ_e , η) et du module d'Young de l'alliage AlCu4%.....	86
Tableau III.9 : suivant représente les valeurs moyennes des caractéristiques de ductilité de l'alliage AlCu4% pour les différents états.....	93
Tableau III.10 : valeurs moyennes de la dureté HB pour les dix états.....	98
Tableau III.11 : représente les Valeurs de la microdureté Hv0, 1de l'alliage Al Cu 4% pendant 20s pour les deux zone noire et blanche.....	99
Tableau III.12 : valeurs moyennes Valeurs de coefficient de poisson de l'alliage AlCu4% Pour les dix états.....	101

Introduction générale

La terre contient une quantité considérable d'aluminium, mais malheureusement on ne peut en utiliser qu'une partie minime pour l'exploitation industrielle. La bauxite est un produit de désagrégation des roches primitives sous l'action de conditions climatiques déterminées. Elle contient 50-65 % d'oxyde d'aluminium (alumine), le reste étant formé de ses oxydes de fer, de silice, d'oxyde de titane et d'oxyde de vanadium.

Les alliages d'aluminium sont très reconnus pour leurs bonnes résistances à la corrosion, une bonne tenue à chaud, leurs facilités de recyclages et compatibilités alimentaires.

L'industrie des cycles et les entreprises des transports aériens montrèrent un grand intérêt pour cette matière dont la résistance était celle de l'acier ordinaire, mais dont le poids était le tiers de celui de l'acier. Depuis, on a constamment développé et trouvé de nouveaux alliages ayant des propriétés différentes, avec ou sans traitement thermique. Leur emploi apporta un développement insoupçonné de la fabrication de l'aluminium.

Les avantages que l'industrie de l'aluminium offre actuellement et sur les grandes possibilités ouvertes au constructeur moderne par l'emploi de ce métal dans tous les domaines de la technique.

Les traitements thermiques qui engendrent des modifications microstructurales importantes, généralement durcissantes, mais parfois ils sont utilisés pour avoir des caractéristiques à usage spécial.

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-4%Cu, ainsi que leur influence sur ses caractéristiques mécaniques en particulier pour aboutir à un compromis.

Dans cette étude on s'est consacré à l'étude des caractéristiques mécaniques et microstructurales de l'alliage de corroyage Al-4%Cu 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'eau à température ambiante de (20 – 25)°C, d'une maturation de 16h 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 .

Notre étude est basée sur un plan de travail suivant : introduction générale, trois parties , finalisée 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%

Chapitre I.3 : traitements thermiques et la microstructure.

Chapitre I.4 : les essais mécaniques.

Chapitre I.5 : 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.

CHAPITRE I. 1 : ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I. ALUMINIUM :

I.1) Historique :

A l'état naturel, l'aluminium pur n'existe pas. Très abondant dans la nature, ce métal se présente surtout sous formes d'hydroxydes. Après sa découverte en 1808 par le physicien anglais **Humphrey DAVY** (1778-1829), l'aluminium fut isolé pour la première fois en 1825 par le chimiste danois Hans **OERSTED** lors d'une réaction chimique impliquant un amalgame du potassium. Le chimiste allemand **Friedrich WOHLER** améliora le procédé d'Oersted en utilisant le potassium métallique entre 1827 et 1845. L'aluminium a connu un développement spectaculaire en 1854 symbolisée par la Présentation à l'Académie des sciences, par le chimiste français Sainte-Claire Deville, d'un petit lingot réalisé par voie chimique. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le **premier métal non ferreux**; en tonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940, le zinc puis le cuivre dans les années 1950 [1]

I.2) Fabrication d'aluminium :

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (la composition moyenne est de 55% d' Al_2O_3 , 5% SiO_2 , 15% Fe_2O_3 et 25 % de perte au feu), constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

a- Production d'alumine :

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

b- Production de l'aluminium :

L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). L'aluminium de la première fusion contient le fer de 0.1%, qui est inférieur à la limite de la solubilité du fer en aluminium à la température ambiante. D'ailleurs peu de produits sont élaborés à partir de l'aluminium de la première

fusion, une grande quantité d'alliages de recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits, ceci augmente la teneur du fer en alliages d'aluminium. Les phases riches de fer représentent un site favorable pour les réactions cathodiques et de formation des piqûres. Le fer est plus noble que l'aluminium, sa présence dans une solution solide d'aluminium affecte la cinétique de la dissolution constitue un facteur significatif de la corrosion dans les alliages d'aluminium. Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite.

I.3) Principales propriétés de l'aluminium :

a. Propriétés physiques :

L'aluminium est un élément du troisième groupe du tableau de Mendeleïev. Son nombre atomique $Z=13$, sa masse atomique $M=26,98$ sa température de fusion est 660°C et celle d'ébullition est 2500°C , son réseau est cubique à faces centrées de paramètre $a= 4,0412 \text{ \AA}$. L'aluminium a une bonne conductivité thermique et électrique, sa masse volumique est de 2699 kg/m^3 pour un titre de 99,95%, cette valeur est légèrement modifiée par d'autres éléments.

Sa caractéristique physique la plus importante est sa faible densité: $2,7\text{g/cm}^3$. **[1-3]**

b. Propriétés mécaniques :

L'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme, et cela grâce à structure CFC.

Les caractéristiques mécaniques de l'aluminium sont :

_ Pour L'aluminium pur, le module d'élasticité est de 66.6 Gpa , autant que des impuretés en présence cette valeur augmente et les éléments d'addition.

_ Le coefficient de poisson varie de $0,33\text{à}0,35$.

_ Le module de torsion est égale à 25Gpa pour l'aluminium pur tiré à 99.9%, et de 26Gpa pour l'aluminium commerciale. **[3-1]**

c. Propriétés chimiques :

L'aluminium est un métal éminemment oxydable, il se distingue par sa résistance à la corrosion élevée du fait de la formation, à la surface, d'une couche protectrice d'alumine (Al_2O_3). Lorsque il y a contact de

l'aluminium avec certain corps comme l'eau de mer et les solutions salines, cette couche d'alumine peut être altérée, l'oxydation de l'aluminium se poursuit alors très rapidement.

La plupart des acides minéraux attaquent l'aluminium surtout l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et les acides organiques. [4]

d. Propriétés de mise en forme :

La température de fusion de l'aluminium est relativement basse 660°C d'où une facilité de fusion qui représente un avantage pour l'opération de fonderie, il est très ductile, on peut facilement mettre en forme à l'état solide par déformation plastique. [4]

I.4) Alliages à base d'aluminium : [4]

A fin d'améliorer les mécaniques de l'aluminium non allié à caractéristiques très réduites, on procède souvent à l'addition d'autres éléments de nature différentes, ces éléments en solution solide peuvent également être présents sous forme de phase intermétallique. La composition des phases, leur finesse, répartition et cohérence avec la matrice d'aluminium, fragilité intrinsèque et stabilité thermique et mécanique sont également déterminantes pour les propriétés d'alliage d'aluminium.

On distingue trois grandes catégories d'alliages d'aluminium

- **Alliage corroyés :**

Produits obtenus par les procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage et le formage.

- **Alliage de moulage :**

Produits obtenus par fonderie par coulée en sable (moule en sable) ou en coquille (moule en fonte ou en acier) ou encore par coulée sous pression

- **Alliage de frittage :**

Produits obtenus par la méthode de la métallurgie de la poudre qui est une méthode révolutionnaire d'élaboration de pièces mécaniques

I.4) classification des alliages d'aluminium : [3,1]

Suivant le mode de transformation des alliages on distingue :

a. Alliage corroyages : [6]

Prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres, profilés, tubes) ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage forgeage et estampage. Suivant l'aptitude au durcissement par traitement thermique on distingue :

- Alliages durcis pas traitement thermique.
- Alliages non durcis pas traitement thermique.

Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristique mécaniques sont obtenus, on distingue les alliages à durcissement structural (trempant) et les alliages non susceptibles de durcissement structural (non trempant). Ces alliages se montrent avec des bonnes résistances mécaniques, une bonne ductilité, une résistance à la propagation des fissures, appréciable résistance à la fatigue, résistant aux corrosions et ayant une bonne conductibilité électrique. Le rayon des alliages varie après corroyage

1. Composition des alliages corroyés : [6]

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'**Aluminium Association**, est **numérique** à **quatre** chiffres dont le premier chiffres (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium

Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	<u>Cuivre</u> (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	<u>Manganèse</u> (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	<u>Silicium</u> (Si)	-
Série 5000	5XXX	<u>Magnésium</u> (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	<u>Magnésium</u> (Mg) et <u>Silicium</u> (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	<u>Zinc</u> (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	/	Non utilisé	-

Tableau (I-1) : Familles d'alliages d'aluminium corroyés.

Remarque:

La lettre A (ou B) peut suivre les quatre chiffres de la désignation numérique, par exemple 2017A. Il s'agit alors d'une composition légèrement différente et spécifique à un (ou plusieurs) pays ou à un producteur

b. Alliages élaborés par frittage :

Selon la méthode de la métallurgie des poudres, les alliages Al-Si, Al Mg et Al Cu, (Al Mg), de manganèse+nickel+chrome (Al Cu), constituent des alliages de fonderie qui possèdent aussi bien une coulabilité élevée.

Un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et porosité, de bonnes propriétés mécaniques et une résistance à la corrosion élevée.

Pour affiner le grain et améliorer les propriétés mécaniques, on introduit des inoculant (Ti, Zr, B, C1, V). Additionnés respectivement d'une faible quantité de cuivre + magnésium (AlSi), de silicium

C. Alliages de moulage :

Ils sont utilisés en fonderie pour la fabrication des pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules en sable (moulage en sable), ou des moules en acier ou en Fonte (moulage en coquille). Par ce procédé, on élabore des pièces aux formes plus aux moins complexes : poignés de portes, blocs moteur...etc.

-moulage en sable : Le métal se solidifie dans une cavité limitée par du sable comprimé ; les parties creuses sont obtenues des noyaux. Dans ce genre de moulage le refroidissement des pièces est lent.

-moulage en coquille : la coquille est un métallique ayant la forme exacte de la pièce désirée, le refroidissement des pièces dans ce genre de moulage est rapide.

D. Alliage de fonderie :

Les alliages prévus pour les moulages de forme doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques, une résistance à la corrosion élevée, etc. .

Les propriétés de fonderie d'un alliage sont élevées lorsque sa structure comporte un eutectique.

Un eutectique se forme dans nombreux alliages dont la teneur en éléments additionnés est supérieure à la solubilité limitée dans l'aluminium.

Le plus souvent on emploie les alliages Al Si, Al Cu, Al Mg, additionnés d'une faible quantité de cuivre et de magnésium (Al – mg), de silicium (Al – Si), de manganèse, de nickel ou de chrome.

Pour affiner le grain et, par suite, améliorer les propriétés mécaniques, on introduit les inoculant (Ti, Zr, B, Cl, V, etc.).

I.5) Désignation des alliages en aluminium :[5]

La désignation est composée successivement des éléments suivant :

I.5.1) Alliages moulés :

La désignation de ces alliages d'aluminium est décrite de façon symbolique et numérique dans la norme NF EN 1780-1 et -3. La correspondance des éléments avec l'ancienne désignation AFNOR apparaît dans le (tableau I.1).

Éléments d'alliages	Symboles chimiques	Symboles AFNOR	Éléments d'alliages	Symboles chimiques	Symboles AFNOR
Aluminium	Al	A	Nickel	Ni	N
Antimoine	Sb	R	Niobium	Nb	Nb
Azote	N	Az	Phosphore	P	P
Béryllium	Be	Be	Plomb	Pb	Pb
Bismuth	Bi	Bi	Sélénium	Se	Se
Bore	B	B	Silicium	Si	S
Cadium	Cd	Cd	Soufre	S	F
Chrome	Cr	C	Tantale	Ta	Ta
Cobalt	Co	K	Thorium	Th	Th
Cuivre	Cu	U	Titane	Ti	T
Etain	Sn	E	Tungstène	W	W
Fer	Fe	Fe	Vanadium	V	V
Magnésium	Mg	G	Zinc	Zn	Z
Manganèse	Mn	M	Zirconium	Zr	Z

Tableau (I.2) : Symboles chimiques et symboles AFNOR des éléments d'alliages

a) Désignation numérique :

La première partie de la désignation (EN AC-) est suivie de cinq (5) chiffres représentant la composition chimique : Les deux premiers chiffres indiquent le groupe d'alliages et les trois derniers indiquent la composition chimique.

Exemple : EN AC-42000 : est un alliage d'aluminium à 7% de silicium et des traces de magnésium.

La désignation est composée successivement des éléments suivant :

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

b) Désignation symbolique :

-La première partie de la désignation (EN AC -) est suivie des symboles chimiques des éléments d'addition (tableau I-1), successivement suivi de leurs teneurs massiques pris dans l'ordre décroissant.

Exemple : EN AC- $AlSi7Mg$

c) États métallurgiques : [5] Selon la norme NF EN 1706 les états métallurgiques sont maintenant désignés de la façon indiquée au (tableau I-2)

Etats métallurgiques	Désignation
Brut de fonderie.	F
Recuit	O
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement naturel (maturation).	T ₁
Traitement thermique de mise en solution et vieillissement naturel (maturation).	T ₄
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement artificiel (sur_revenu) de stabilisation	T ₅

Tableau (I.3) : Désignation des états métallurgiques.

I.5.2) Alliages corroyés : [6]**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) :

-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-5 (les chiffres de 0 et 9 sont réservés 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.4) : 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) : [6]

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 ordonnés 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) États de livraison - États 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-4).

Le moyen principal d'obtention par un ou plusieurs chiffres complémentaires voir (tableau I-5).

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.5) : Désignation des états métallurgiques de base.

I.6) Les alliages aluminium-cuivre (ALCU4 %) : [7.8]

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,

La série 2XXX contient des alliages avec le cuivre comme un élément de durcissement perfection. Souvent le magnésium est ajouté pour augmenter le maximum de résistance. Ces alliages obtiennent leur très haute résistance par la précipitation des phases $CuAl_2$ et/ou $CuMgAl_2$. Les alliages de ce groupe sont caractérisés par de haute résistance à la corrosion et très faible extrudabilité et soudabilité. Ils sont largement utilisés dans l'industrie de l'aviation et l'espace, mais également comme Pièces de machine, boulons et rivets.

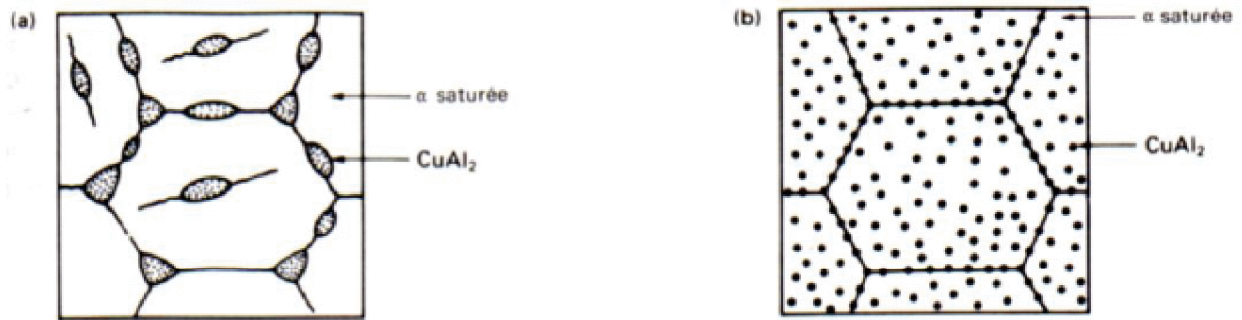


Figure (I.2) : microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement lent à partir de 500°C. b) par refroidissement rapide à partir de 500°C.

Quand on refroidit lentement, l'enthalpie libre de précipitation est faible et le taux de germination est faible aussi. Pour assurer la proportion d'équilibre en 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 les 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.

I.6.3) Diversité des alliages d'aluminium :

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisateurs envisagées. Tellement nombreux, les alliages d'aluminium sont regroupés conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe. Ainsi, le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal 2000 pour le Cuivre, 3000 pour le Manganèse, 4000 pour le Silicium, 5000 pour le Mg, 6000 pour le Mg et le Si et 7000 pour le Zinc. D'une famille à une autre les propriétés sont très variables : les alliages de la famille 5000 sont soudables et résistants à la corrosion tandis, que ceux de la famille 2000 ont des caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique. Les alliages de la série 3000 se caractérisent par une faible résistance mécanique mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de magnésium, en plus ils ont une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage, en plus d'une excellente résistance à la corrosion dans les conditions normales d'utilisation [11].

I.6.4) .Quelques alliages d'aluminium _ cuivre :[11]

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 alliages 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 :

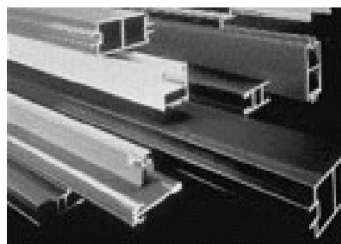
- ✓ une protection efficace pour les pièces soumises à des atmosphères corrosives,
- ✓ une dureté superficielle élevée qui confère une grande résistance à l'abrasion et de bonnes qualités de frottement,
- ✓ une couche autolubrifiante après imprégnation, ce qui est particulièrement efficace pour les pièces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

I.7) Utilisation des alliages d'Aluminium : [12]

L'aluminium est un excellent matériau d'emballage, en raison de son innocuité, de son imperméabilité et de son opacité aux rayons ultraviolets. Il est surtout utilisé dans la fabrication de profilés laminés : cornières, profils en U, en double T, tubes de sections ronde ou rectangulaire.



Une grande quantité d'alliages d'aluminium est dépensée à la fabrication de rivets et de boulons. Dans le bâtiment, l'aluminium présente de nombreux atouts en termes de développement durable :

- sa légèreté permet d'alléger les structures,
- la rigidité et sa facilité de mise en forme permettent des réalisations techniques performantes pour longtemps : profilés à coupure thermique, fenêtres ou menuiseries durablement étanches, garantissant une parfaite isolation thermique et acoustique, intégration aux façades de châssis de panneaux solaires pour la production d'électricité renouvelable, etc.
- sa résistance à la corrosion réduit les travaux de maintenance et étend la durée de vie des constructions,
- ininflammable, non toxique au contact, non émetteur de poussière ni de vapeur, l'aluminium dans le bâtiment est un matériau sain et sûr.

L'aluminium est 100% recyclable. Dans les secteurs du bâtiment et du transport, le taux d'aluminium récupéré et recyclé atteint 95%.

Du point de vue du développement durable, le recyclage de l'aluminium représente donc des avantages décisifs :

- il permet une importante économie de ressource,
- il n'utilise que 5% de l'énergie nécessaire à la production primaire,
- il émet 95% de gaz à effet de serre en moins.

I.8) Influence des éléments d'addition :[12]

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- les alliages sans durcissement structural (alliages non trempant)
- les alliages à durcissement structural (alliages trempant)

Cette différence entre alliages est due à l'élément d'addition principal, quelle que soit sa teneur. Il n'y a rarement qu'un seul élément ajouté (élément principal). Des additions d'autres éléments secondaires vont aussi influencer sur les caractéristiques de l'alliage. Il y a enfin des éléments présents dans l'alliage sans qu'ils

aient été ajoutés volontairement ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car leur influence peut être défavorable.

Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur plusieurs propriétés de l'alliage comme :

- les caractéristiques mécaniques (charge de rupture R_m , limite élastique $R_{p0.2}$, l'allongement à la rupture $A\%$, la dureté HB),
- la masse volumique,
- les conductivités électrique et thermique,
- la résistance à la corrosion,
- l'aptitude au soudage,
- l'usinabilité,
- l'aptitude à la déformation,
- l'aptitude à l'anodisation.

Chapitre(I.2) : ELABORATION DE L'ALLIAGE AlCu4%

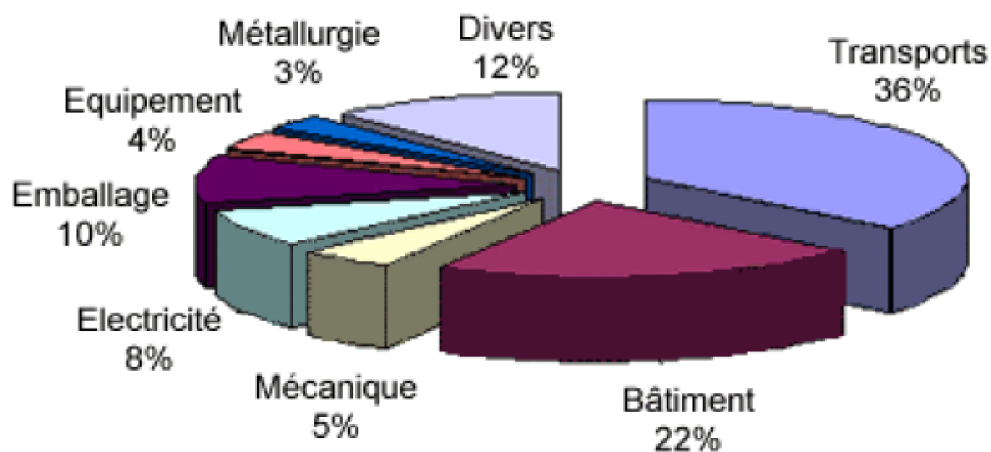
Dans ce chapitre nous étudierons cette séquence de précipitation dans le cas élémentaire d'un alliage Al- 4%Cu et ses compositions chimiques

L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre.

I.2.1) Les atouts de l'aluminium :[1]

- L'aluminium est le plus léger de tous les métaux usuels
- La conductivité électrique de l'aluminium est de l'ordre des 2/3 de celle du cuivre.
- L'aluminium non allié a une excellente conductivité thermique
- Sa résistance à la corrosion
- La protection qu'il procure
- L'aluminium, allié à d'autres métaux ou traité à froid, se révèle aussi résistant que l'acier.
- L'aluminium peut être recyclé de nombreuses fois sans être altéré.

I.2.1.1) Répartition de la consommation d'aluminium :



I.2.1.2) OBTENTION DE L'ALUMINIUM :**a) LA BAUXITE :**

La bauxite constitue le principal minerai contient de 40 à 60% d'alumine (oxyde d'aluminium). De la famille des Latérites, la Bauxite est une roche sédimentaire principalement composée d'hydroxydes d'aluminium (Gibbsite, Boehmite, Diaspore), associés à des oxydes de fer et des impuretés (Silice, Calcite). Elle ressemble à de l'argile dure mais qui ne fait pas de pâte avec l'eau.

Sa couleur varie du blanc-jaune au gris en passant par le rouge et le brun, en fonction de sa teneur en oxydes de fer et en impuretés.

b) L'ALUMINE :

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

c) L'ALUMINIUM :

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.

I.2.1.3) PRINCIPAUX STADES ET FLUX DANS LA FABRICATION DE L'ALUMINIUM :



Figure (I.3) : Étapes de production de l'aluminium.

I.2.2) ELABORATION DE L'ALUMINIUM :

L'Aluminium est fabriqué en deux temps :

- obtention de l'alumine à l'état pur,
- obtention de l'aluminium à partir de l'alumine.

Le minerai utilisé est la bauxite rouge (hydrate double d'aluminium, de fer, de silice et d'oxyde de titane). La bauxite est constituée d'environ 75 % d'alumine hydratée ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Le minerai est d'abord concassé et ensuite broyé.

Obtention de l'alumine : La bauxite calcinée et broyée est attaquée à la soude caustique (NaOH) dans des autoclaves où sous l'action de la pression (30atm) et de la température (200 à 240°C) l'alumine contenue dans la bauxite se transforme en une solution d'aluminate de sodium. Les autres composants (oxydes de fer et de silice) ou "boues rouges" sont retirés par décantation et filtration. Le fer précipite ainsi que le titanate de soude; la silice précipite également sous forme de silico-aluminate de soude. Il reste un liquide clair qui est composé d'une solution de soude contenant de l'aluminate de sodium.

La solution d'aluminate de sodium obtenue est ensuite pompée dans des décomposeurs de 25 à 30 m de haut dans lesquels on ajoute du trihydrate d'alumine pur très fin, qui sert à amorcer la réaction. Sous l'effet de l'agitation et du refroidissement graduels, le trihydrate d'alumine en solution précipite et forme d'autres cristaux. Ceux-ci sont ensuite séparés de la solution de soude caustique par sédimentation et filtration. La solution de soude caustique est renvoyée aux autoclaves pour être réutilisée.

L'alumine Al_2O_3 est déshydratée par chauffage à 1100°C en vue d'éliminer l'eau combinée chimiquement (dans un four rotatif) et devient une poudre blanche qui titre à 99%.

Obtention de l'aluminium : Le procédé le plus utilisé est le procédé "Hall-Héroult", Il consiste à dissoudre l'alumine calcinée dans de la cryolite (Na_3AlF_6 , qui est un sel fondu, alumine fluorure de sodium). Le courant de l'électrolyse sert à la fusion du mélange entre 900 et 1000°C. L'alumine ne fondrait qu'au dessus de 2000°C si elle n'était pas en présence de cryolithe et de fluorure de calcium. Le four servant à l'électrolyse est un four en acier revêtu de briques réfractaires dont la cuve est en charbon aggloméré constituant la cathode sur laquelle se dépose l'aluminium fondu et il y a un dégagement d'oxygène sur l'anode en coke de pétrole +brai qui est oxydée. Il faut compter l'équivalent de huit tonnes de charbon pour produire une tonne d'aluminium. Les cuves sont entièrement capotées afin de capter les gaz qui s'échappent du bain lors de l'électrolyse (ces gaz contiennent notamment du fluor) et de les envoyer vers un dispositif d'épuration où le fluor est récupéré par fixation sur de l'alumine.

La combustion du carbone oblige à remplacer régulièrement les anodes.

À intervalles réguliers, l'aluminium en fusion est siphonné dans des poches de coulée ou creusets et transféré dans des fours d'attente à la fonderie. L'aluminium obtenu est pur à 99% et doit être raffiné pour éliminer les impuretés (fer, silicium, zinc, titane, cuivre,...). On emploie pour cela un procédé électrolytique proposé par Bettes.

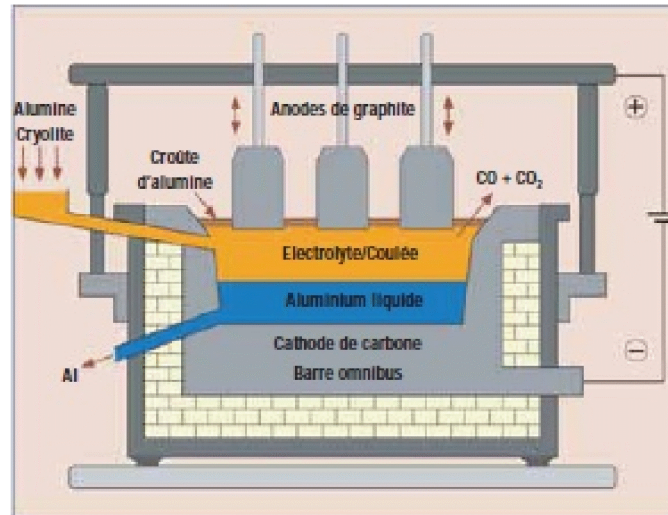


Figure (I.4) : schéma d'une électrolyse produit l'aluminium pur.

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 utilisé dans les structures à résistance mécanique très élevée.

I.2.2.1) 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**I.2.3) Influence des éléments d'addition :**

L'aluminium non allié ayant des propriétés très réduites, il est possible d'améliorer ses propriétés en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure.

Les atomes des éléments d'addition peuvent :

- être en solution solide de substitution : il prend la place des atomes d'aluminium dans le réseau. Leur taille est plus petite ou plus grande que l'atome d'aluminium ce qui perturbe le réseau qui devient plus difficile à déformer.

- former des précipités hors solution solide : cohérents, semi-cohérents, ou incohérents avec la matrice d'aluminium. L'effet provoqué est le même sur la difficulté de déformation du réseau.

Le durcissement de l'aluminium sera ainsi d'autant plus conséquent que le nombre et l'importance de ces perturbations seront plus grands : la nature, la teneur, la répartition de ces éléments d'addition sont primordiales à cet égard.

Les éléments d'addition sont peu nombreux : cuivre, silicium, magnésium, manganèse, titane et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium, zinc+ magnésium + cuivre.

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 ajoutés 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 de l'aluminium est un procédé de transformation par passage du métal entre deux cylindres lisses ou cannelés, tournant en sens inverse. En raison de ce mouvement de rotation et de la compression générée par les cylindres, il se produit une réduction en continu de l'épaisseur initiale par déformation plastique du métal.

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.

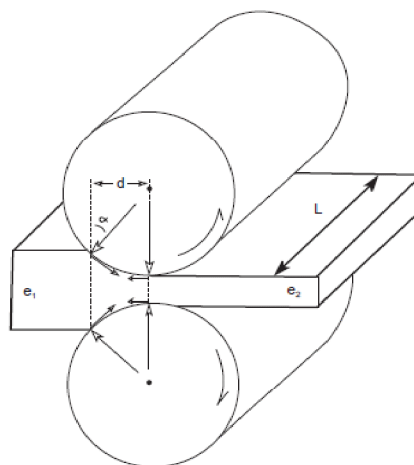


Figure (I.5) : Principe de laminage

Chapitre I.3 : TRAITEMENTS THERMIQUES

I.3.1) Introduction : [4]

La notion de traitement thermique recouvre un ensemble d'opération ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de températures convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières afin d'en améliorer les caractéristiques mécaniques : ductilité, dureté, limite d'élasticité... etc.

Ces traitements thermiques peuvent agir dans deux sens à savoir :

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

I.3.2) Cycle thermique : [4]

La variation de la température du métal en fonction du temps est appelée cycle thermique.

Le cycle thermique comporte généralement trois étapes (**figure I.6**)

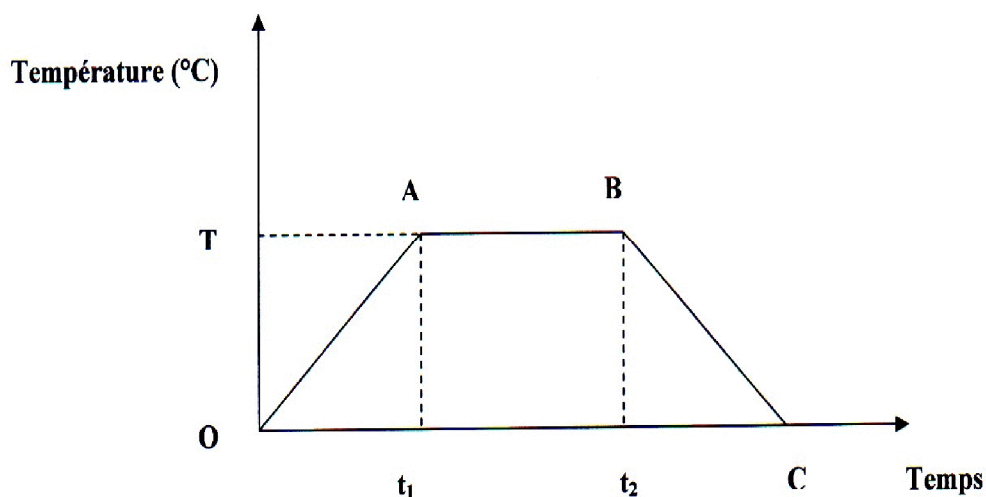


Fig (I.6): Cycle thermique

➤ **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

I.3.3) Principaux types de traitements thermiques :[3]

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

- Les traitements d'homogénéisation, généralement appliqués 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.

a) Les traitements d'homogénéisation :

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.).

Ils consistent en générale en maintiens de 6h à 48h 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.

b) Les traitements d'adoucissement :

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans le cas de l'écrouissage, ce sont des traitements de Restauration et des recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium. Seules les températures 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 est effectué à 300-400°C pendant 0,5 à 3 heures.

c) Les traitements de trempe structurale :

Traitement thermique complet assurant un durcissement structural.

Ce traitement comprend généralement :

Une mise en solution suivie immédiatement :

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

I.3.3.1) 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).

I.3.3.2) 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.

I.3.3.3) Maturation (vieillessement naturel) : [13]

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).

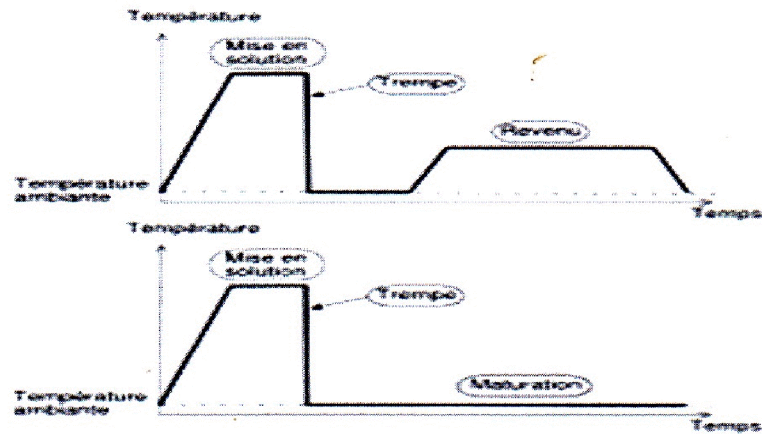
Le comportement des alliages lors de la maturation est très variable d'une famille à l'autre.

Après cette évolution, l'alliage est à l'état **mûri**.

I.3.3.4) Revenu (vieillessement artificiel) :

Le revenu (maturation artificielle) se pratique après la trempe, par chauffage on adopte les plus souvent 4 heures à $160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ou $155^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. La température et la durée de revenu influent beaucoup sur les caractéristiques mécaniques. Il permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées en diminuant la dureté et les contraintes thermiques internes obtenues lors de la trempe. Lorsque la température du revenu monte, la charge de rupture, la limite élastique et la dureté augmentent, mais l'allongement diminue.

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



Fig(I.7): Cycle de traitement thermique des alliages d'aluminium.

En vue d'obtenir une augmentation des caractéristiques mécaniques par durcissement structural.

I.3.3.5) Le recuit : [14]

Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement permettant de modifier les caractéristiques d'un métal. A 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 est également utilisé pour changer les propriétés magnétiques d'une pièce. Le recuit de cristallisation, après écrouissage, a pour but de conférer au métal une taille de grain optimale pour son utilisation future (pliage, emboutissage).

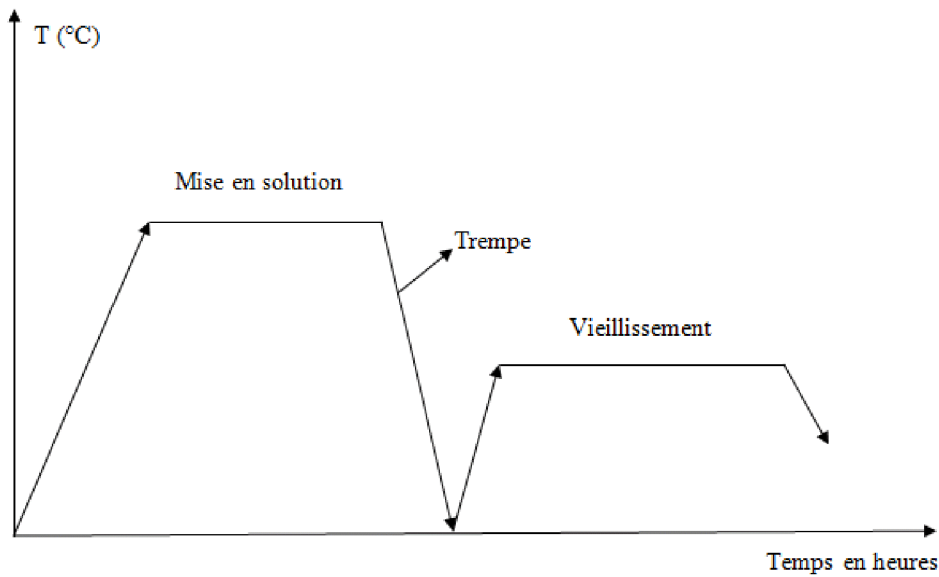


Figure (I.8) : Cycle thermique du durcissement structural

I.3.4) Principe de durcissement structural :

Au cours du durcissement structural et pendant le vieillissement, la décomposition de la solution solide sursaturée se produit en plusieurs stades, en fonction de la température et la durée de vieillissement. Ce phénomène est très complexe, pour mieux comprendre le processus de durcissement structural on prend l'exemple de l'alliage Al-4 %Cu (Fig. II.2), qui serve de base pour l'étude des phénomènes de précipitation.

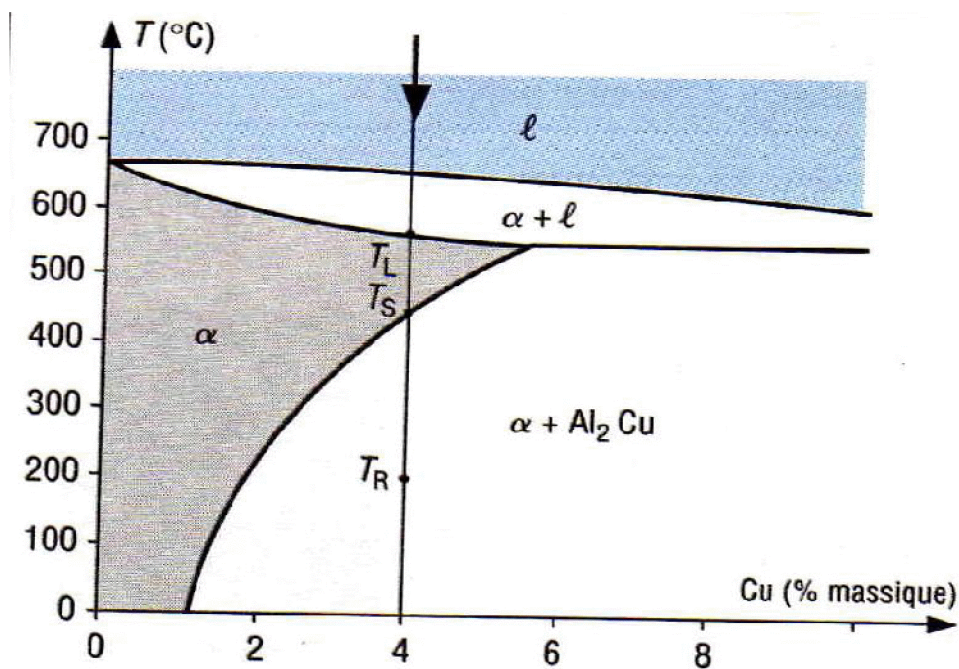


Figure (I.9) : Diagramme d'équilibre partiel Al-Cu [4].

D'après le diagramme Al - Cu (Fig. II.2), la solution solide α possède une grande étendue qui croît avec la température. Pour des températures inférieures à 548°C ou plus exactement entre la température T_L et T_s (mise en solution), l'alliage Al-4%Cu est constitué d'une solution solide homogène α où les atomes de cuivre sont répartis au hasard dans le réseau cristallin

I.3.5) 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 [3.14].

I.3.5.1) 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.

I.3.5.2) 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.

1) observation par microscopie :

a- Observation par microscope optique :

Du fait de son pouvoir de résolution insuffisant, il n'est utilisé 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 de l'élément qui interagit avec le faisceau primaire [3].

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 MECANIKES

I.4.1) Introduction :

L'ingénieur ne peut calculer une pièce ni déterminer les charges 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 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 d'une pièce soumise à un effort constant.... etc.

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

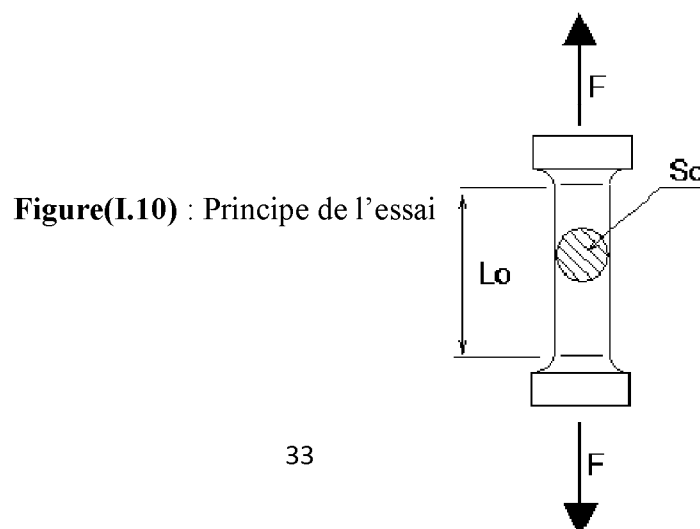
I.4.2) Essai de traction :

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

1) Principe de l'essai :

L'éprouvette, de section rectangulaire, est soumise à des forces égales et opposées appliquées suivant son axe.

Sous l'action de ces forces qui croissent progressivement, l'éprouvette s'allonge jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.



2) Éprouvette :

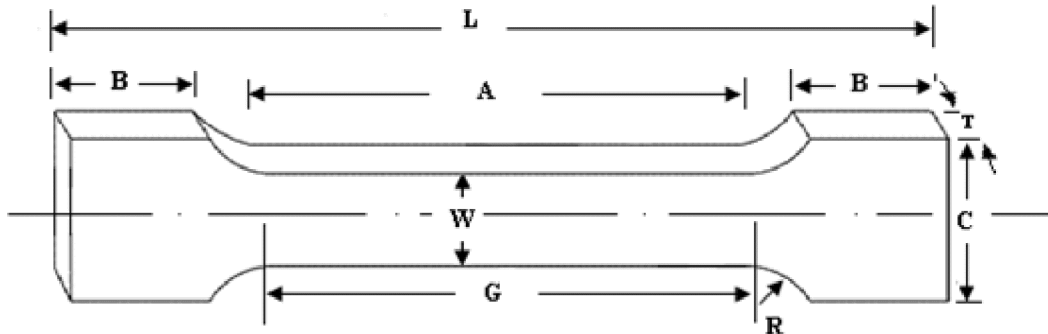


Figure (I.11) : l'éprouvette de traction

3) Forme et dimension :

L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moule.

Ce produit de section constante dans notre cas possède une forme de barre, peuvent être soumis à l'essai sans être usinés. La section droite des éprouvettes rectangulaire, elle comporte une partie calibrée de longueur G qui est raccordée par un congé de raccordement aux têtes d'amarrage dans le cas d'éprouvettes usinées.

L : 76 mm longueur total de l'éprouvette, en (mm).

A : 32 mm la longueur de référence

T : 1 mm épaisseur de l'éprouvette plate, en (mm).

B : 20 mm longueur de tête d'amarrage

G : 25mm la longueur de la partie calibrée de l'éprouvette, en (mm).

C : 21 mm la largeur dans la zone d'épaulement

W : 14.14 mm la largeur dans la zone de longueur de référence

4) Machine de traction :

Essentiellement deux mâchoires dans lesquelles sont maintenues les têtes d'amarrage de l'éprouvette

Sous l'action du mécanisme (machine de traction mécanique) ou sous l'effet de la pression de l'huile (machines de traction à piston) ces mâchoires s'écartent exerçant ainsi les forces de traction suivant l'axe de l'éprouvette.

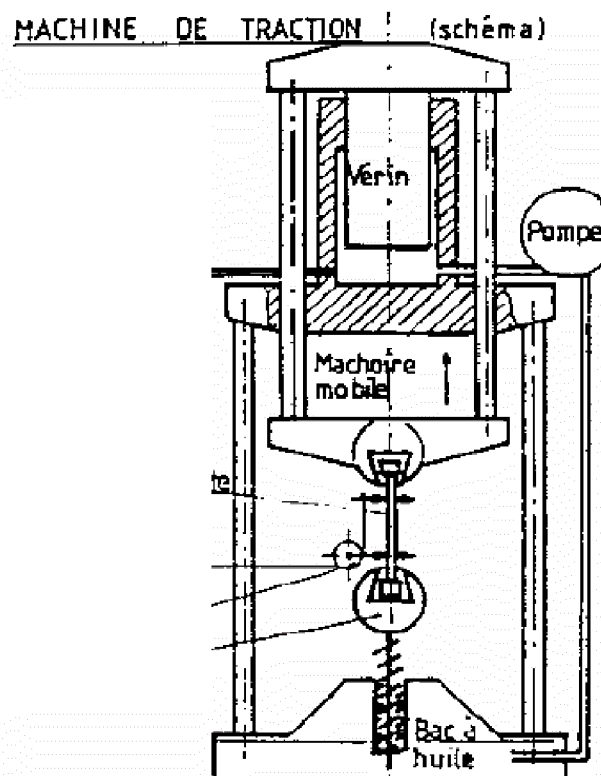


Figure (I.11) : Machine de traction

5) courbe de traction :

La figure(IV.5) représente trois types de courbes qui correspondent à trois comportements possibles des matériaux : fragile, ductile, et élastique non linéaire.

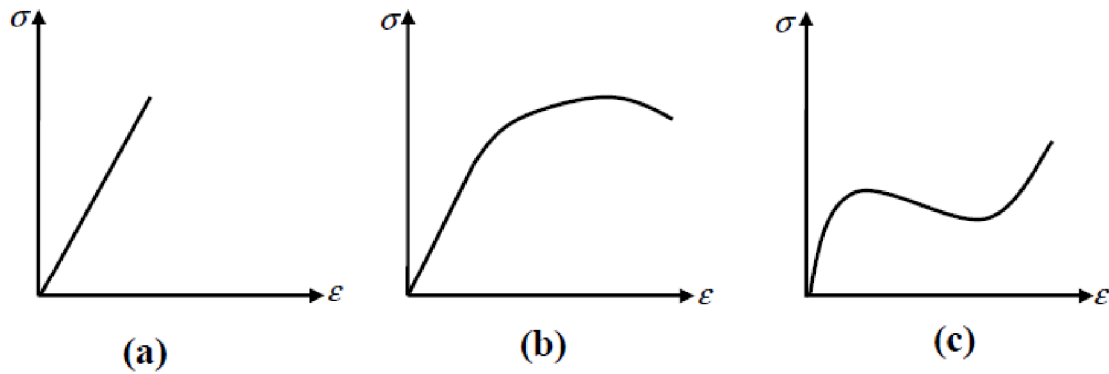
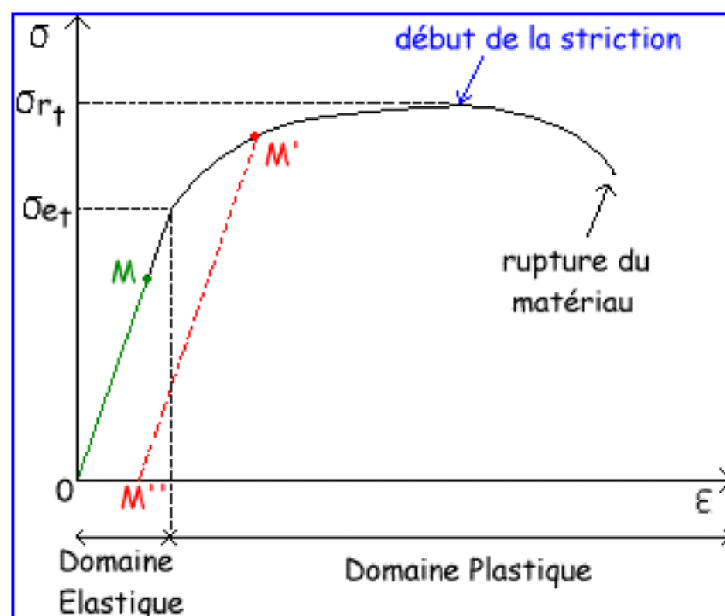


Figure (I.12) : comportement possible du matériau

(a) : fragile , (b) : ductile , (c) : élastique non linéaire



Figure(I.13) : courbe de traction

Limite élastique : Effort de traction tel que tout dépassement de cet effort de traction a pour effet de provoquer des déformations résiduelles irréversibles dans la matière qui la subi

Rp0.2(ou R0.002) : limite conventionnelle d'élasticité, lorsque Re est difficile à déterminer, on prend une valeur conventionnelle correspondant à un allongement de $e=0.2\%$

Résistance à la rupture : Effort de traction à partir duquel la matière se brise en deux parties

Allongement après rupture en % : C'est le pourcentage d'allongement après rupture par rapport à la longueur initiale

6) Forme classique d'un diagramme de traction :

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

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

7) 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.

- **Le module de Young :**

La pente de la partie linéaire OE représente le module de Young E (en MPa ou GPa) ou module d'élasticité

On appelle **loi de Hook** la relation suivante :

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

σ : Est la contrainte

E : Est le module de young

ε : Est la déformation

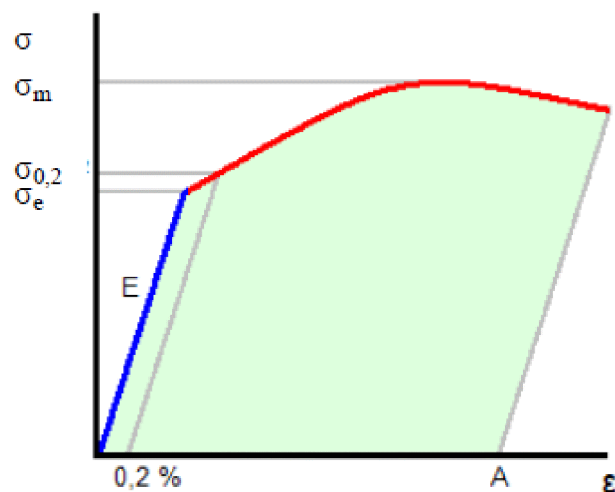


Figure (I.14) : module de young

I.4.3) Essai de dureté :**1) Définition :**

La dureté est une caractéristique mécanique des solides. Elle peut s'exprimer par la résistance mécanique qu'un corps oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur. L'essai de dureté est très simple et très rapide, ne demande pas d'outillage important

2) Principe de l'essai de pénétration :

Il consiste à enfoncer une pénétration dans le métal à essayer. La charge est constant et on mesure la dimension de l'empreinte est d'autant plus grande que le métal est moins dur.

La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte :

$$H = \frac{F}{S}$$

Avec H : symbole de dureté, en MPa

F : charge d'essai, en N

S : surface de l'empreinte, en mm²

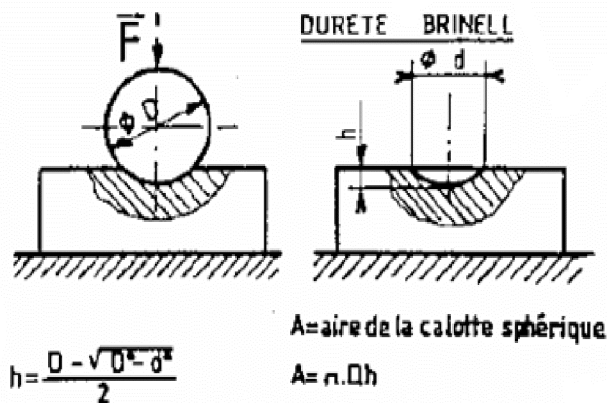
3) Type essais :

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

I.4.4) 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

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



Fig(I.15) : Essai de dureté brinell

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec :

F : charge d'essai en Newton

D : Diamètre de la bille en millimètres

d : Diamètre de l'empreinte en millimètres

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

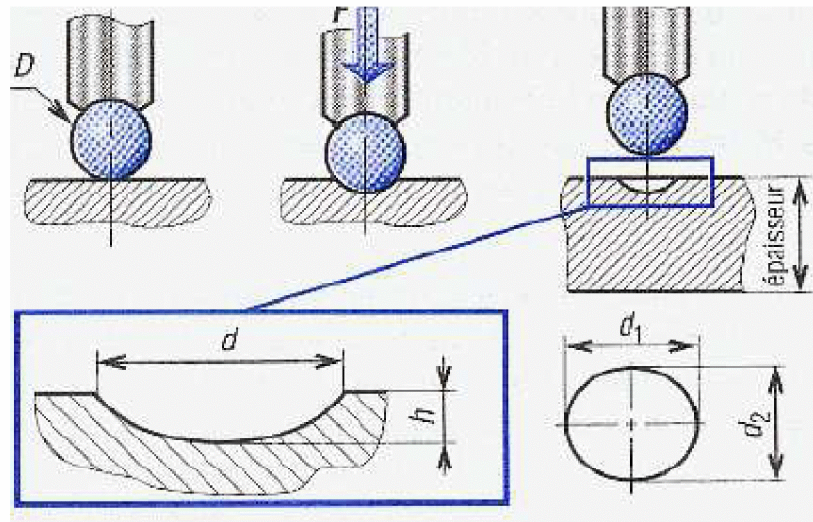


Figure (I.16) : Principe de l'essai brinell

A) Conditions de l'essai :

- ✓ L'essai s'effectue à température ambiante
- ✓ La charge est appliquée progressivement, sans chocs ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 seconde

- ✓ L'épaisseur minimale de l'éprouvette est fonction du diamètre de l'empreinte, pour l'aluminium et ses alliages l'épaisseur de l'éprouvette doit être au moins dix fois la profondeur de l'empreinte
- ✓ L'espacement des empreintes pour des essais successifs doit être :
 - $a \geq 3d$; $b \geq 6d$ pour l'aluminium et ses alliages.
 - $a \geq 2.5 d$; $b \geq 4b$ pour les aciers.

b) les avantages de l'essai :

- ✓ Facilite de mesurer l'empreinte
- ✓ La dureté brinell est le procédé le plus précis pour le contrôle de la dureté

C) les inconvénients :

- ✓ La lecture de la valeur de dureté ne se fait pas de façon directe
- ✓ La procédé n'est pas utilisable pour les petites pièces (charge trop grande)

I.4.5) Essai Vickers :

La mesure de dureté Vickers se fait 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

La dureté Vickers HV est le quotient de la charge d'essai par l'aire de l'empreinte laissée sur la pièce.

$$H_v = 1.8544 \times P / d^2 \quad (\text{daN/mm}^2)$$

Hv: Dureté Vickers

P: charge d'essai en daN

d : Diamètre de l'empreinte laissé sur la surface

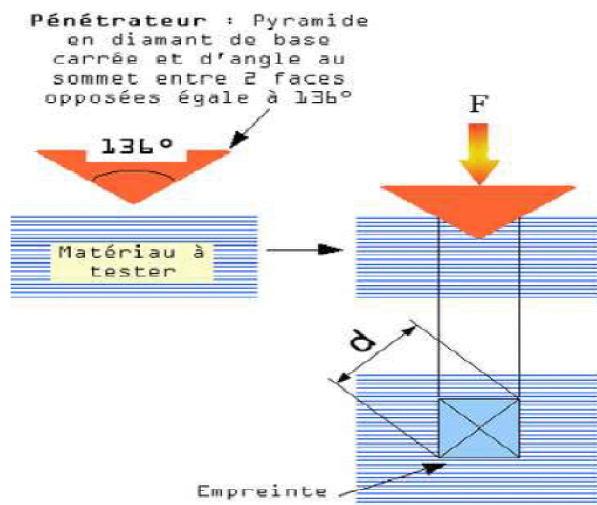


Fig (I.17) : Principe de l'essai Vickers

a) condition de l'essai :

- ✓ L'essai s'effectue à température ambiante
- ✓ Les charges doivent être appliquées sans chocs ni vibrations, et maintenues à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes
- ✓ Une préparation de la surface pour éviter toute altération
- ✓ L'épaisseur de la pièce doit être $\geq 1.5 d$
- ✓ L'espacement des empreintes pour des essais successifs doit être :
 - $a \geq 3d$; $b \geq 6d$ pour l'aluminium et ses alliages.
 - $a \geq 2.5 d$; $b \geq 4b$ pour les aciers.

La charge de l'essai doit être :

- $49N \leq F \leq 1180N$ pour l'aluminium et ses alliages et le cuivre et ses alliages
- $49N \leq F \leq 981N$ pour les aciers

I.4.6) 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 de la surcharge F_1 pour revenir à la charge initiale F_0 . La pénétration du pénétrateur est alors à 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

1) Essai Rockwell (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 s acier dur, acier trempés.

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

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

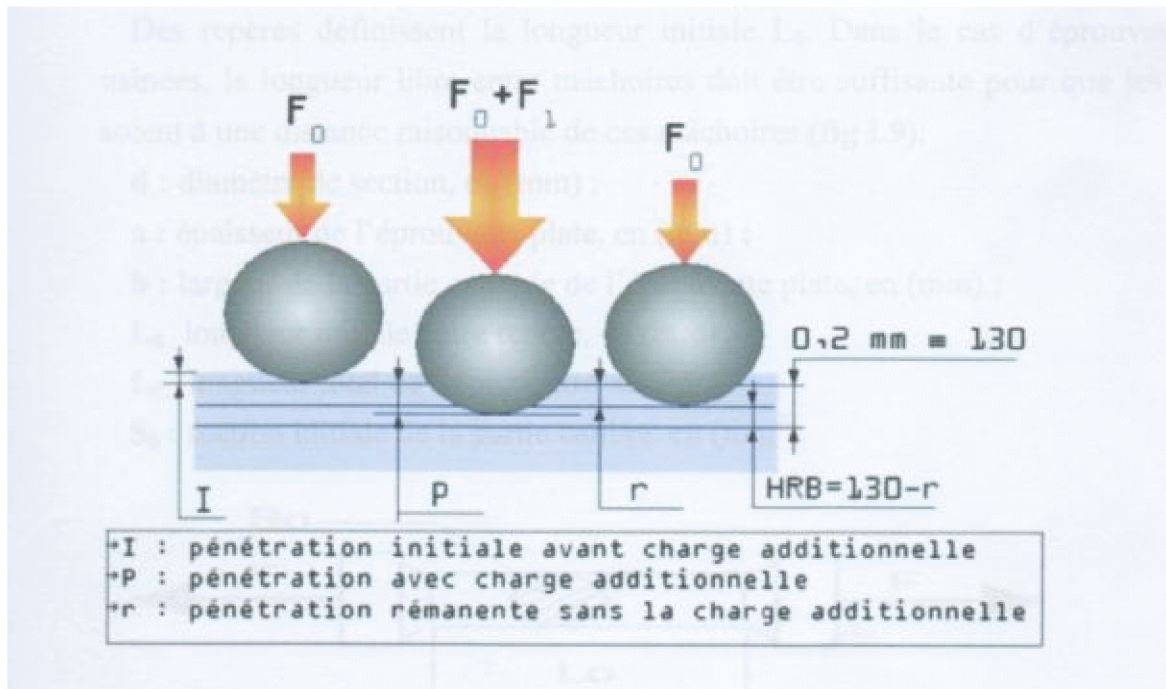
$$\text{HRC}=100-e;$$

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

2) Essai Rockwell "B" (HRB) :

Le pénétrateur est une bille d'acier de diamètre $1,59\text{mm}$ l'accroissement se mesure également en unités égales à $0,002\text{mm}$. LA charge utilisée est 100Kg dont 10Kg de perchage. Cet essai est utilisé pour les acier doux, non trempés et les métaux et alliages non ferreux.

$$\text{HRB}=130-r$$



Fig(I.18) : Principe de l'essai Rockwell à bille.

Chapitre (I.5) : DEFAUTS CRISTALLINS ET DIFFUSION**I.5.1) Les défauts cristallins :[16]**

Les métaux utilisés dans l'industrie ne sont pas constitués de cristaux parfaits (dans lesquels tous les nœuds seraient bien à leurs places), ils ne sont généralement pas purs et souvent, même, ils sont utilisés sous forme d'alliage c'est-à-dire qu'ils contiennent des atomes étrangers ajoutés volontairement.

Cette situation va engendrer la présence dans le métal de base d'un certains nombres d'anomalies que l'on peut répertorier sous le titre de défauts cristallins.

On distingue quatre types de défauts :

- Les défauts ponctuels, de dimension 0 : ils concernent un nœud unique, et ne perturbe 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 précipites, des inclusions (les saletés) des pores.

I.5.2) Les défauts ponctuels :[17]

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 :

1) Lacune :

La lacune caractérise l'absence d'un atome d'un site normale du réseau cristallin 1.

2) Atome auto interstitiel :

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

3) Atome étranger en substitution : (3)

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

4) Atome étranger en insertion : (4)

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

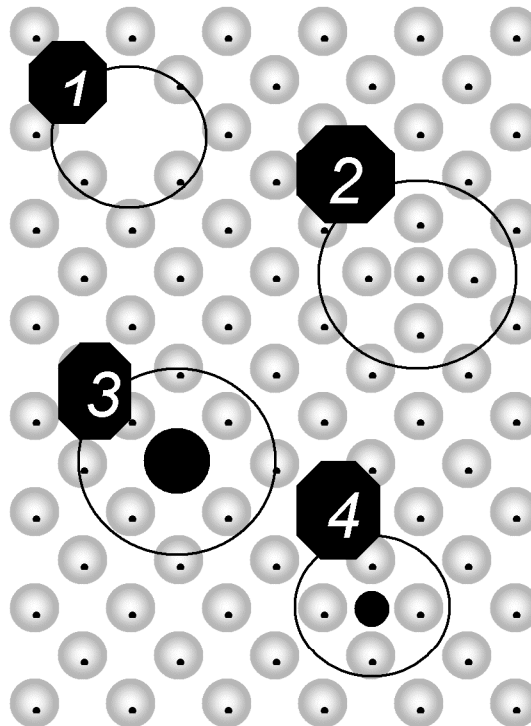


Fig (I.19) : Types de défauts ponctuels

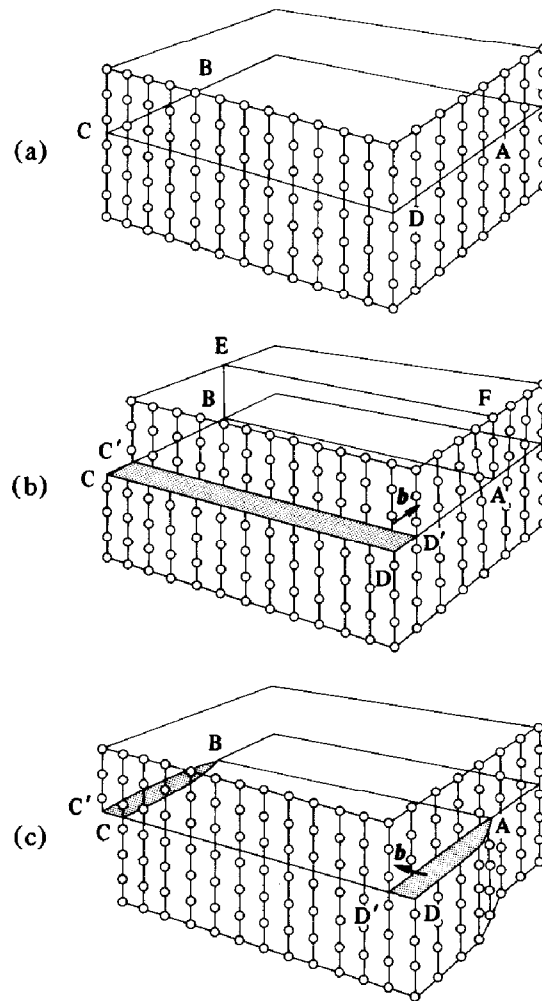
I.5.2) Défauts à une dimension (défauts linéaires) :

Une façon d'expliquer le glissement consiste à imaginer que les mouvements atomiques plan sur plan se font de manière rigide, c'est-à-dire que tous les atomes se déplacent en même temps. Une autre façon plus économique en énergie de produire un glissement est de faire « glisser » certaines parties du cristal avant d'autres. C'est le concept de glissement localisé.

A un instant donné, on peut définir une frontière entre la partie du plan qui a déjà glissé et la partie du plan qui est encore « intacte ». Cette frontière correspond à un défaut linéaire appelé dislocation. Il faut essentiellement distinguer deux types de dislocation :

Les dislocations vis et dislocation coin (Fig. I.19).

Pour caractériser une dislocation on utilise le concept de vecteur et de circuit de Burgers.



Fig(I.20) : (a) Modèle d'un cristal parfait. (b) dislocation coin. (c) dislocation Vis.

1) Dislocation coin :

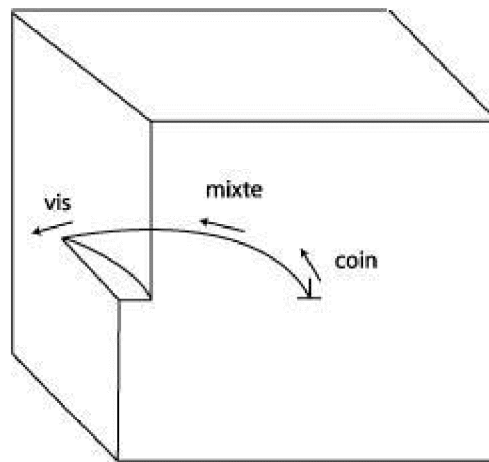
Elle est le défaut linéaire résultant de l'absence d'un demi-plan atomique. La dislocation coin peut être représentée par un plan cristallographique qui se termine à l'intérieur du réseau cristallin. Au voisinage de la dislocation le cristal est déformé entraînant des contraintes de compression d'un côté et de traction de l'autre côté.

2) Dislocation vis :

Les dislocations vis peuvent être comprises comme la ligne de séparation entre le réseau cristallin non perturbé et une zone de décalage partiel du réseau cristallin par rapport à la région avoisinante du réseau, ce genre de dislocation peut changer facilement de plan de glissement, car le champ de contrainte a une symétrie radiale. Et on désigne par une dislocation mixte la combinaison des deux types suscités:

3) Dislocation mixte : (Fig. I.21)

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



Fig(I.21): Dislocation mixte

4) Le vecteur de Burgers :

Le vecteur de Burgers se définit comme étant le vecteur nécessaire à boucler un circuit initialement fermé dans le cristal parfait et qui se trouve ouvert lorsqu'il enlace la ligne de dislocation. Ce vecteur n'est pas quelconque dans un cristal mais représente une translation du réseau. Par exemple dans l'aluminium cubique faces centrées, le vecteur de Burgers traditionnellement rencontré est $b = a/2 [110]$, de norme $|b| = 0.29 \text{ nm}$. En termes plus mathématiques, il s'agit de l'intégrale du déplacement sur un circuit fermé enlaçant la ligne de dislocation u : $b = \int u$. Physiquement, le vecteur de Burgers représente l'amplitude de la déformation transportée par une dislocation. Comme les dislocations sont des objets flexibles, deux dislocations peuvent interagir pour former une troisième dislocation si et seulement si la quantité de déformation est conservée : on parle de jonction attractive. Il s'ensuit qu'à un nœud entre plusieurs dislocations, la somme des vecteurs de Burgers est nulle (analogue de la loi de Kirchhoff).

I.5.3) 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.

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 inter atomiques.

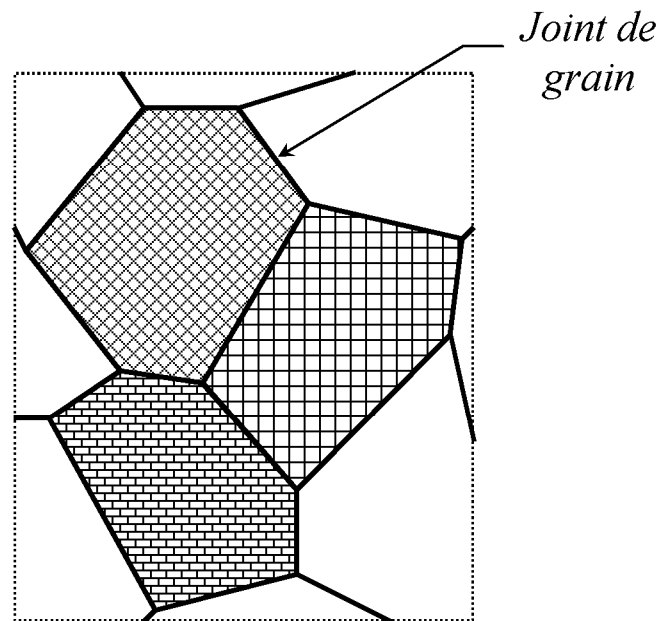


Fig (I.22) : Joints de grains

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.

I.5.4) 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.

1) Les pores : (Fig. I.23)

Ce sont des cavités à l'intérieur du cristal remplit 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.

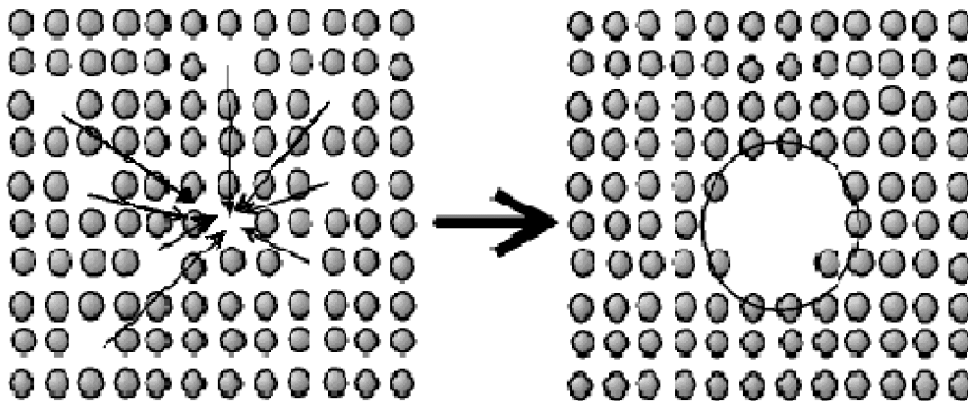


Fig (I.23) : Représentation schématique d'un pore.

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.

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.20) montre ces trois types de précipités.

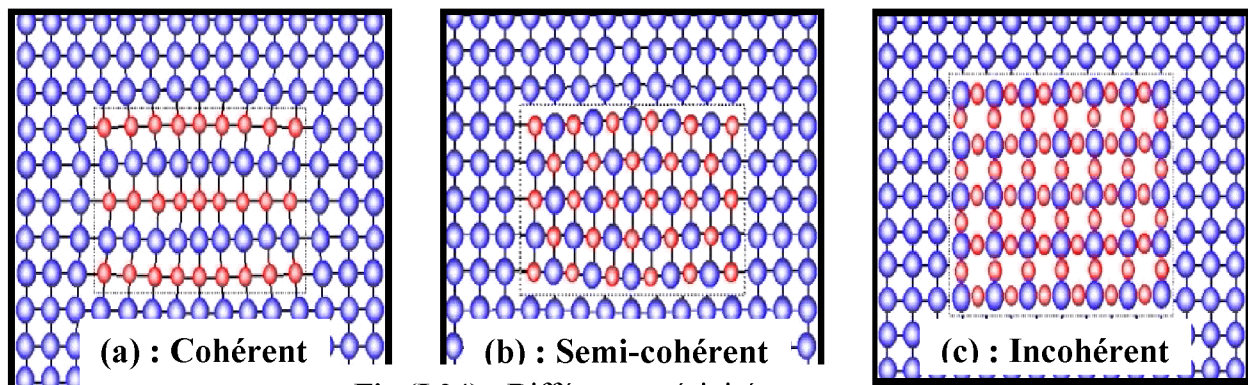


Fig (I.24) : Différents précipités

I.5.5) La diffusion :

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....

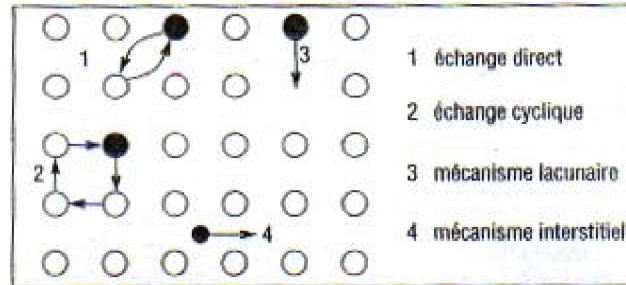
Lorsque l'atome diffuse dans son propre réseau on dit qu'il y a autodiffusion. Par contre quand des atomes diffusent dans un autre réseau, il y a hétéro-diffusion.

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.21)



Fig(I.25): 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)

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.

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.

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 figure (I.25) .

Chapitre II.1 : APPAREILLAGE

II.1) Introduction :

Ce chapitre est consacré à présenter les différents types d'appareils utilisés au cours de notre étude expérimentale en premier lieu, et pour ce qui concerne la deuxième étape explique les différents modes opératoires après avoir réalisé les essais mécaniques.

Les traitements thermiques pour l'alliage Al4%Cu, et les essais mécaniques de la dureté Brinell **HB** et de microdureté **HV0.1** ainsi que l'examen micrographique ont été réalisés au niveau de laboratoire des Sciences Des Matériaux (SDM) de Génie Mécanique, et l'analyse du microscope électronique à balayage (**MEB**) a été faite au sein du laboratoire de Hasnoua.

II.2) Appareillages :

Les différents dispositifs utilisés dans notre étude sont :

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.

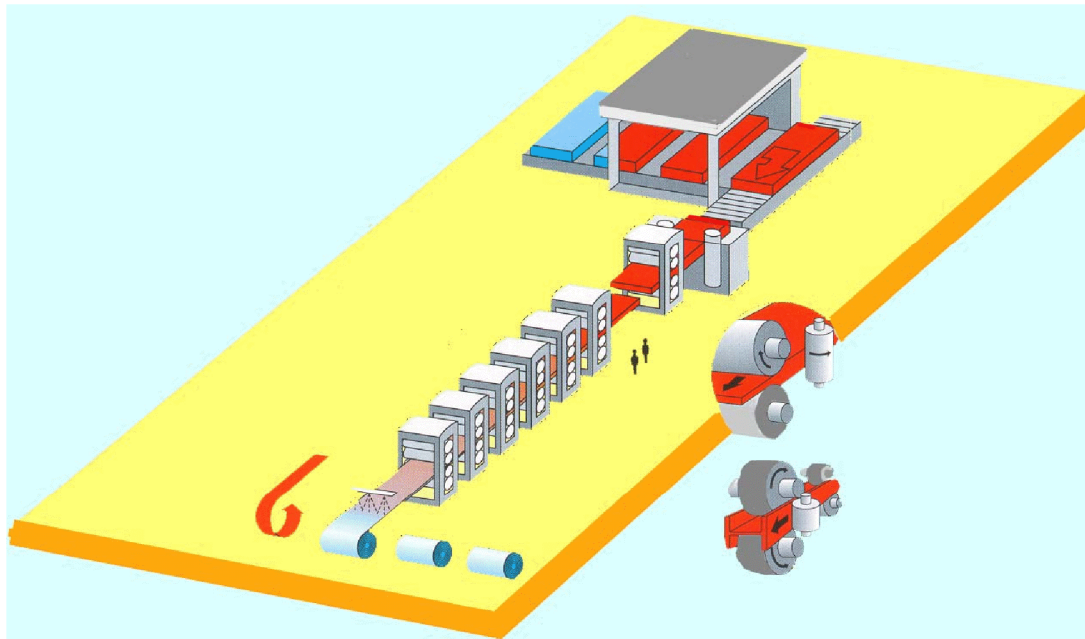


Figure (II.26) : Schéma de principe d'élaboration par laminage.

2) Scie mécanique :

Le découpage des échantillons pour la dureté et la microstructure, on a utilisé une scie mécanique (Figure II.1) avec les propriétés suivantes :

Tension $T=380V$,

Puissance $P=1,5Kw$,

Poids = 600Kg



Fig(II.27) : Scie mécanique

3)Le fraisage:



Figure(II.28) : Fraiseuse

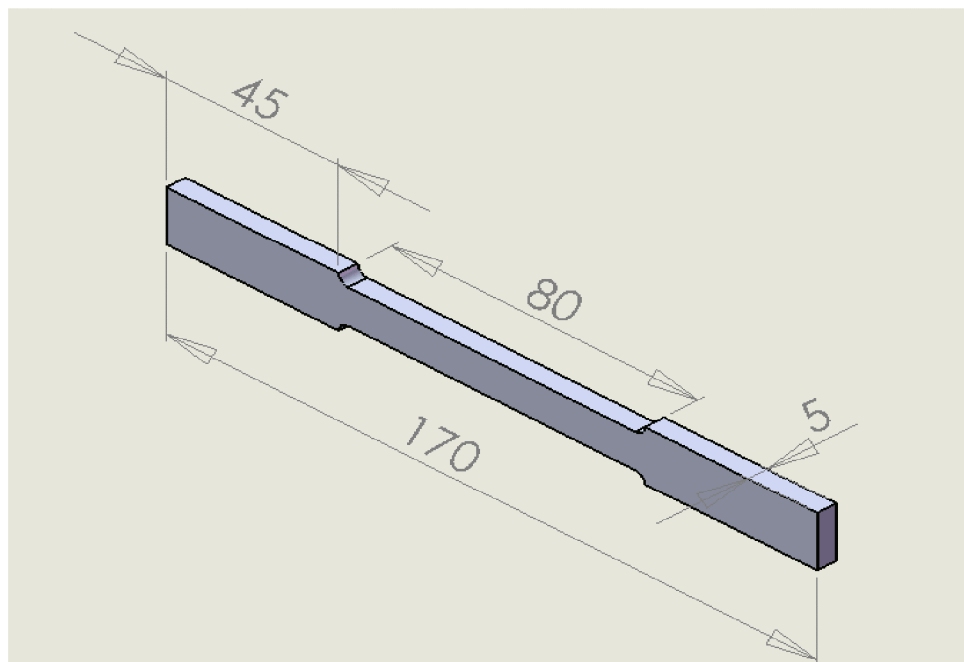


Figure (II.29) : Épreuve de traction

4) Les traitements thermiques :

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 dès l'ouverture de la porte pour éviter au manipulateur toute décharge électrique.

Le four de trempe possède les caractéristiques suivantes :

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



Fig(II.30) : Four de trempe

4.2) Four de revenu :

- ❖ **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'effectué par une turbine installée à l'intérieur, sur la paroi du fond de l'appareil.



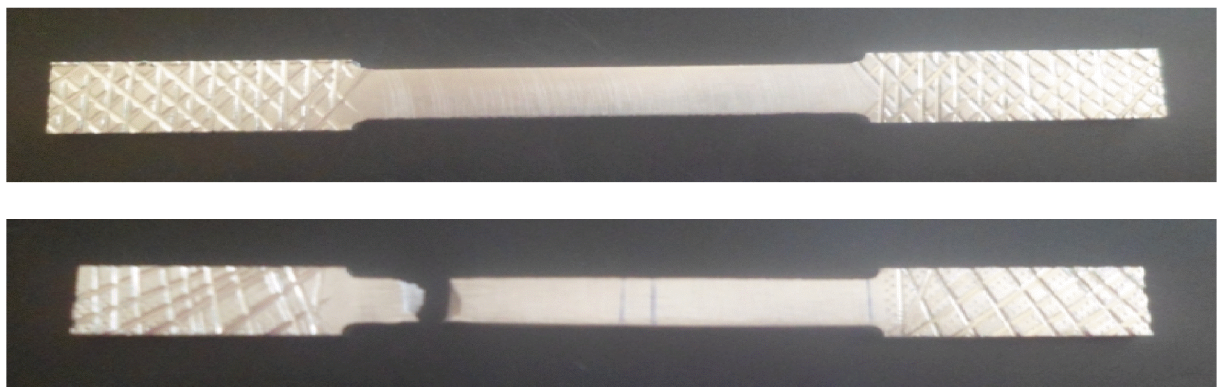
Fig(II.31) : Etuve utilisée.

5) Les essais mécaniques :**5.1) Machine de traction :**

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.



Fig (II.32): Machine de traction



Figure(II.33): Éprouvettes subit un essai de traction

6) Microscopie :**6.1) Les polisseuses :**

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

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

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



Fig(II.34) : Les Polisseuses

6.2) Duromètre et microduromètre :

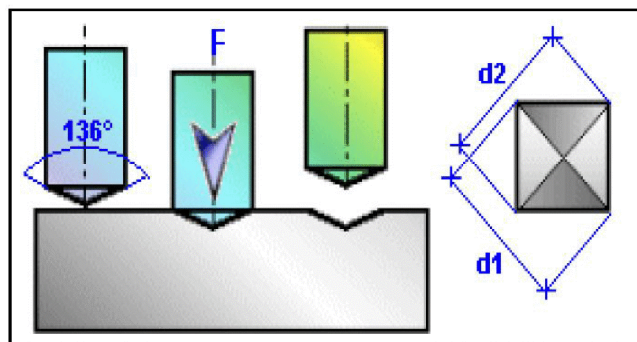
- L'essai de dureté a été réalisé grâce un duromètre, ce dernier est muni d'une bille de diamètre 2,5, d'un sélecteur de charge de 15 kgf, une table sur laquelle on pose l'éprouvette et d'un cadran permettant la mesure du diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur. Il possède les caractéristiques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



Fig(II.35): Duromètre



Fig(II.36) : Microduromètre



Dimensions de l'empreinte selon l'essai de la dureté Vickers.

6.3) Microscope optique :

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.

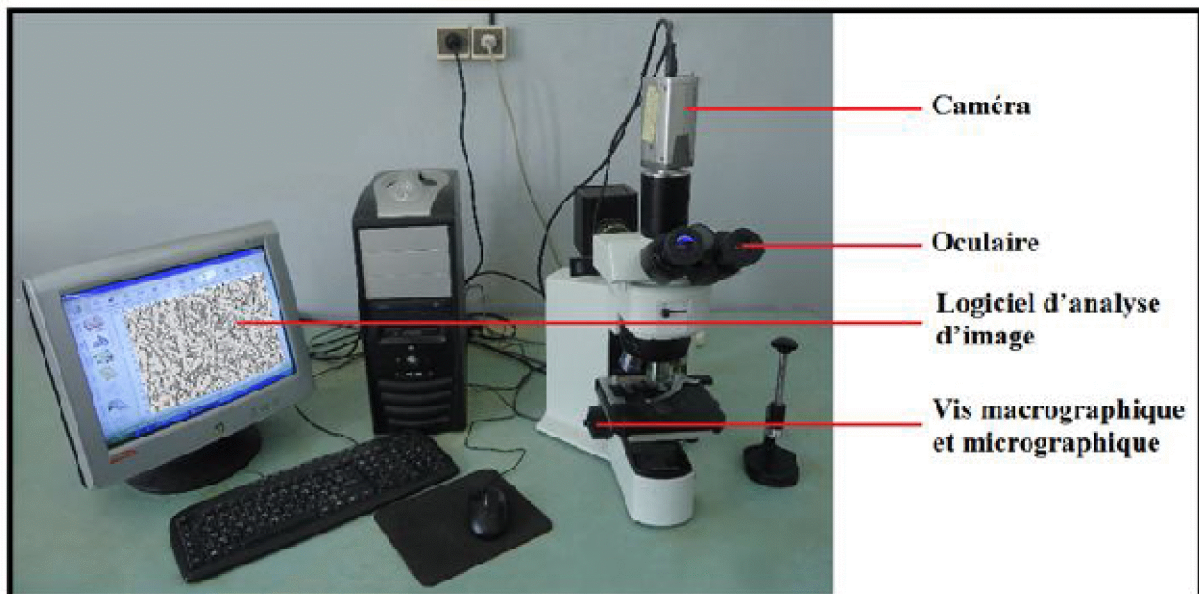


Figure (II. 37) : Microscope optique

6.4) Microscope électronique à balayage :

Le microscope électronique à balayage est un appareil d'observation d'état de surface ainsi que les précipités présents dans les matériaux plus finement. Le principe de l'imagerie (MEB) consiste à composer une image de surface grâce à 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.



Figure (II.38) : Microscope électronique à balayage.

Chapitre (II.2) : Matériaux et modes opératoires

Dans ce que suit, nous étudierons cette séquence de précipitation dans le cas élémentaire d'un alliage d'aluminium ou duralumins qui contiennent environ 4% de cuivre (Al-4%Cu) 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.

II.2.1) Matériau étudié :

Le matériau étudié est fourni par le hall de technologie (oued-aissi). Il s'agit d'un alliage d'aluminium de diamètre $\phi = 55 \text{ cm}$ qui contiennent environ 4% de cuivre en pourcentage massique et quelques traces d'impuretés, obtenu par laminage.

Désignation numérique 2017A la série 2000 (Al-Cu) Sa composition chimique est donnée par le tableau suivant : selon la norme AFNOR

Alliage	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)
2017A	0,20 - 0,8	0,7	3,5 - 4,5	0,40 - 1,0	0,40 - 1,09	0,10

Tableau(II.7) : Composition chimique de l'alliage étudié.

Après avoir fait une analyse chimique sur notre éprouvette on a aboutir a des résultats suivants :

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

II.2.2) Élaboration du matériau étudié :

a) **L'électrolyse :** L'aluminium obtenu est pur à 99% et doit être raffiné pour éliminer les impuretés (fer, silicium, zinc, titane,...). On emploie pour cela un procédé électrolytique dans le but d'augmentée la pureté de l'aluminium à 99,98% pour les produits semi-finis et à 99,99% pour les gueuses.

b) Mélange : L'aluminium pur présente certaines propriétés intéressantes, mais pour les améliorer on lui ajoute du cuivre pour se présenter sous forme d'alliages légers. Ce alliage se catégorisé comme alliage corroyé.

C) Le laminage : Ce mode est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés, appelés rouleaux.

II.2.3) Usinage : dans notre étude nous avons usinée 50 éprouvette plates

a)Le découpage : pour découpe les échantillons, on a utilisé une scie mécanique de tension $T=380v$ et de puissance $P=1.5kw$ avec un poids de 600kg environs

b) Fraisage : pour avoir des dimensions des pièces souhaité pour les essais (traction, dureté, microdureté, ...etc.), en a utilise donc la fraiseuse.

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

II.2.4) Traitements thermiques :

Après l'élaboration des éprouvettes, on procède aux traitements thermiques, tout d'abord on prélève cinq éprouvettes usinées à l'état brut de coulée prisées comme références. Les autres éprouvettes vont subir les traitements thermiques suivants :

Un traitement thermique de l'alliage en trois étapes :

Première étape : mise en solution à $500^{\circ}C$ de manière à dissoudre totalement l'élément cuivre dans l'aluminium. Il se fait dans un four de trempe et un maintien de 8h

Deuxième étape: trempe à l'eau jusqu'à température ambiante de $(20-25)^{\circ}C$. On obtient ainsi, à température ambiante, une solution solide fortement sursaturée, d'une maturation de 16h à l'air ambiant.

Troisième étape : traitement de revenu à des températures respectivement de $(150, 160, 170, 180, 190, 200, 220, \text{ et } 240)^{\circ}$ pendant une durées de 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 $500C^{\circ}$ et trempé à 05 éprouvette ;

Température d'homogénéisation à $500C^{\circ}$ 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 ;

II.2.5) Cycle thermique :

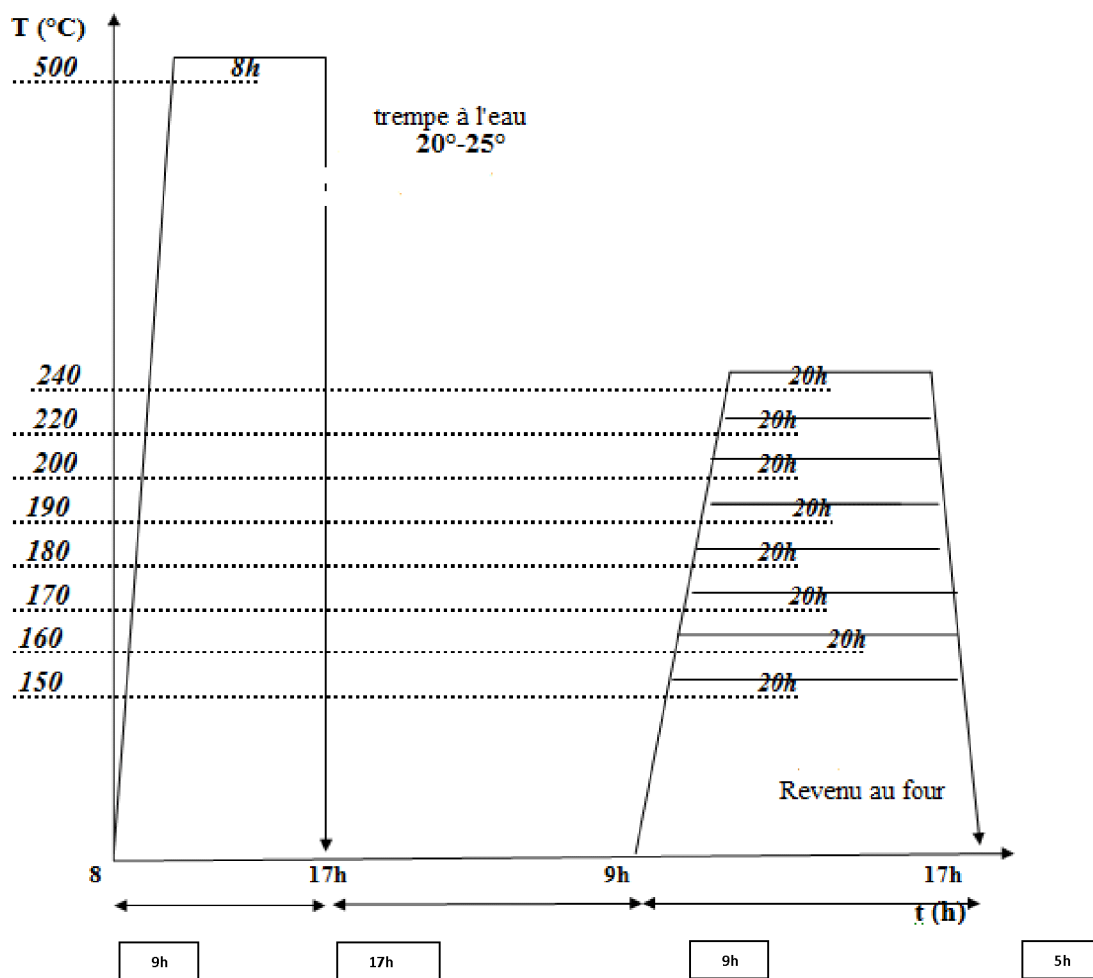


Figure (II.39): Cycle Thermique

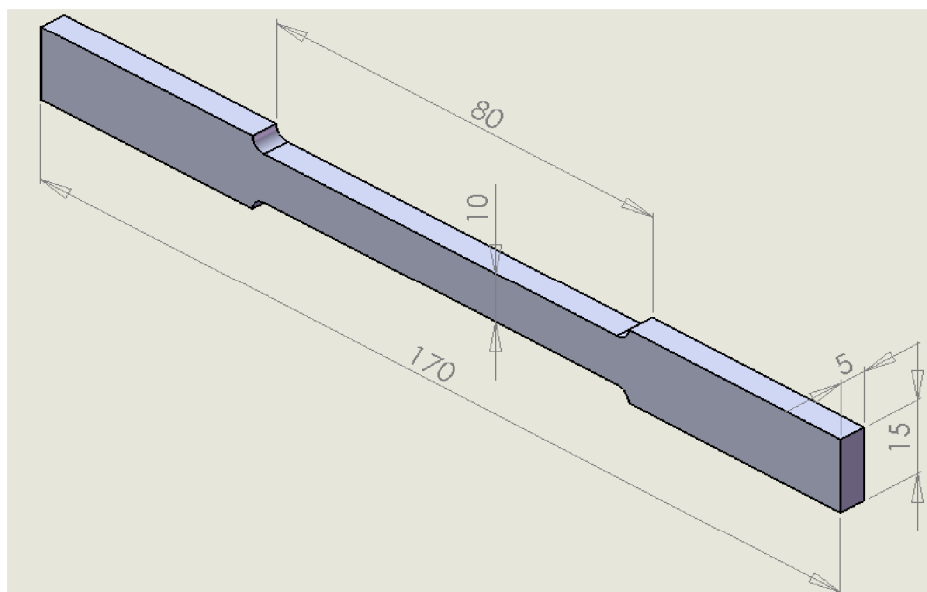
II.2.6) Essais mécaniques:

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

a) Essais de traction :

À l'aide des mors de traction on fixe l'une des éprouvettes par leurs têtes, 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.40) : Formes et dimensions de l'éprouvette de traction.

II.2.7) 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 L .

La forme des échantillons utilisés lors des essais est présentée par la **figure (II.41)**

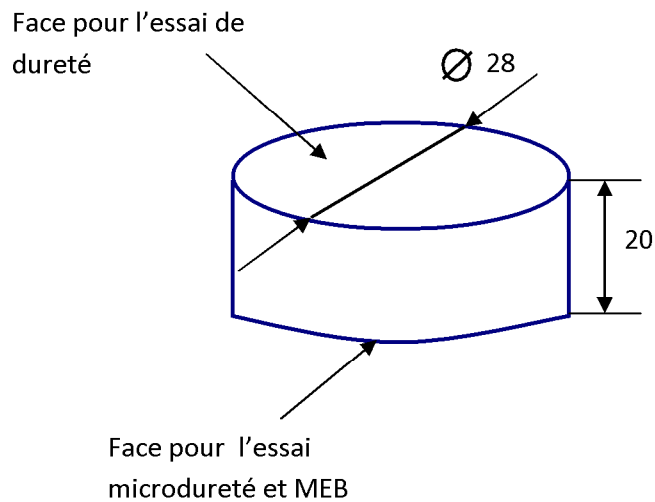


Figure (II.41) : échantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté

II.2.8) Examen micrographique :

a) 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.

II.2.9) 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.

II.2.10) 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.

II.2.11) 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.

RESULATATS ET INTERPRETATION

III .1) INTRODUCTION :

En raison de nombreux avantages qu'ils présentent, les alliages d'aluminium ont fait l'objet de plusieurs études approfondies concernant leurs propriétés physique, chimique en générale et mécanique en particulier .parmi ces alliages ceux de la famille Al-cu4%. L'étude de notre alliage AlCu4%, nous a menée à effectuer des essais de traction, de la dureté HB, de da microdureté Hv0,1 et la microstructure en faisant varier la température de revenu selon 10 états notés : BC OU F et T et Rv (150,160,170,180,190,200,220 , 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 2000 qui régit notre étude

III .2) Effet du module d'élaboration est des traitements thermique sur l'essai de traction :

Les figures (III.42) à (III.51) représentent respectivement les courbes contraintes – déformation de 05 éprouvettes de l'alliage Al-Cu 4% pour chaque qui sont : brut de coulée, trompé, et des traitement de revenu à 150C°, 160C°, 170C° ,180C°, 190C°, 200C°, 220C°, 240C° .

On regroupe à chaque fois chaque cinq éprouvette de chaque état dans un même graphe afin de voir si les résultats sont proches et en suit on fait un courbe de moyenne de chaque état

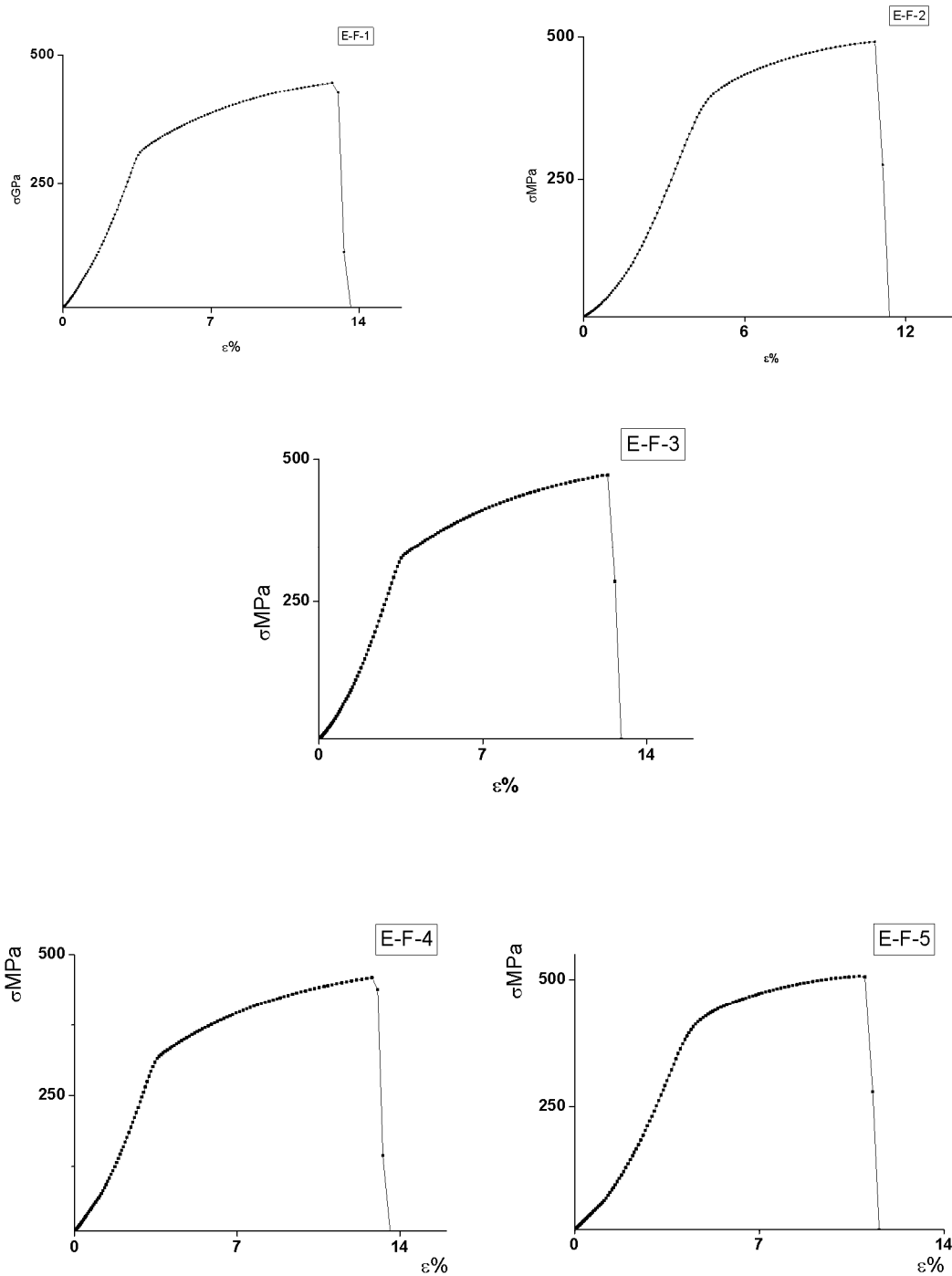
Les figures (III.52) représentent le regroupement des courbes de cinq éprouvettes du même état dans un même graphe et leurs courbes moyennes pour chaque état

La figure (III.53) représente le regroupement des courbes moyennes des différents états

III.3) INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DE TRACTION :

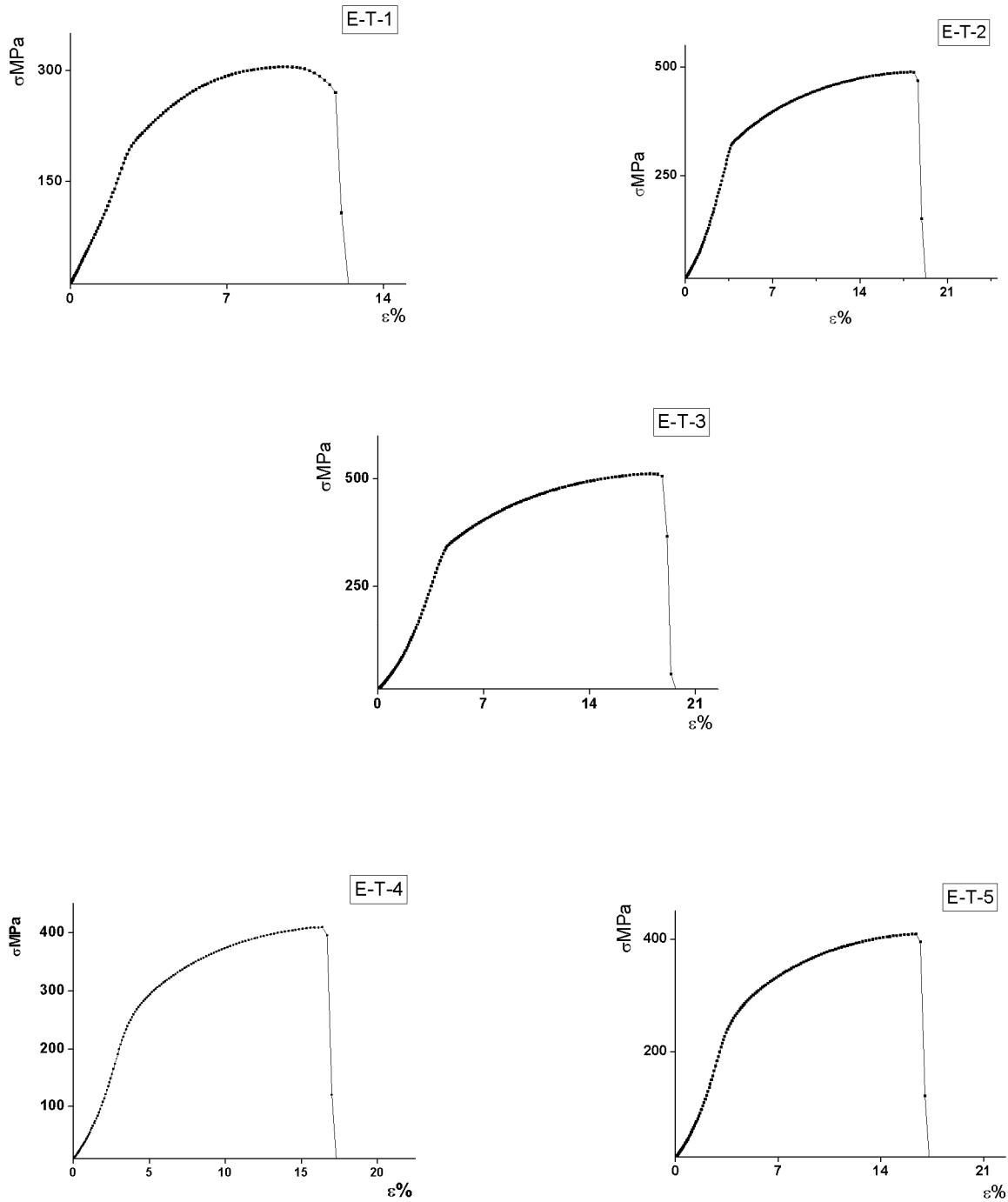
❖ **Courbes de traction :**

a)Etat brut de coulée (E-F) :



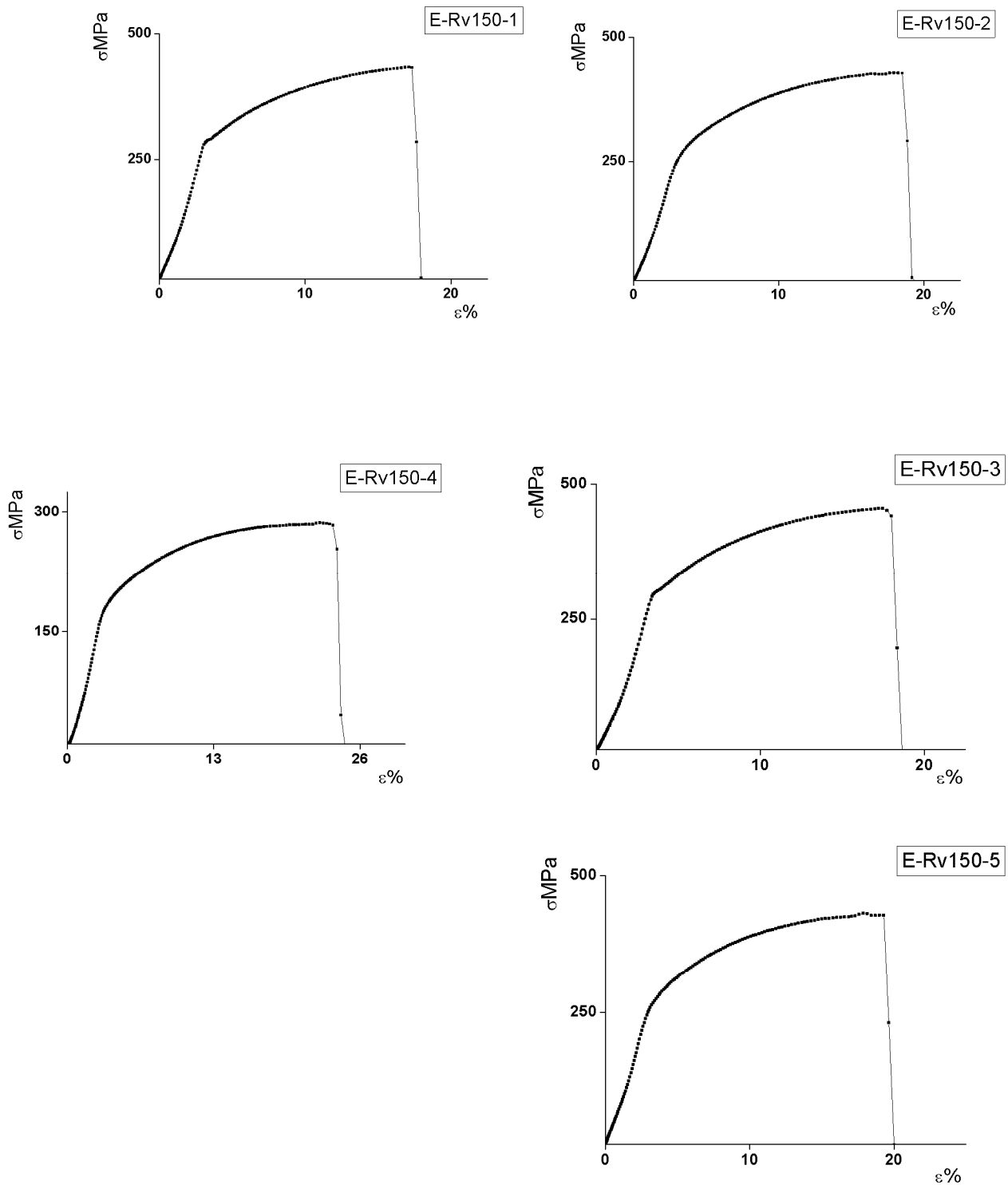
Figure(III.42): courbes de traction (contrainte-déformation) pour 05 éprouvettes de l'état brut de Coulée.

b) Etat trempé (E-T) :



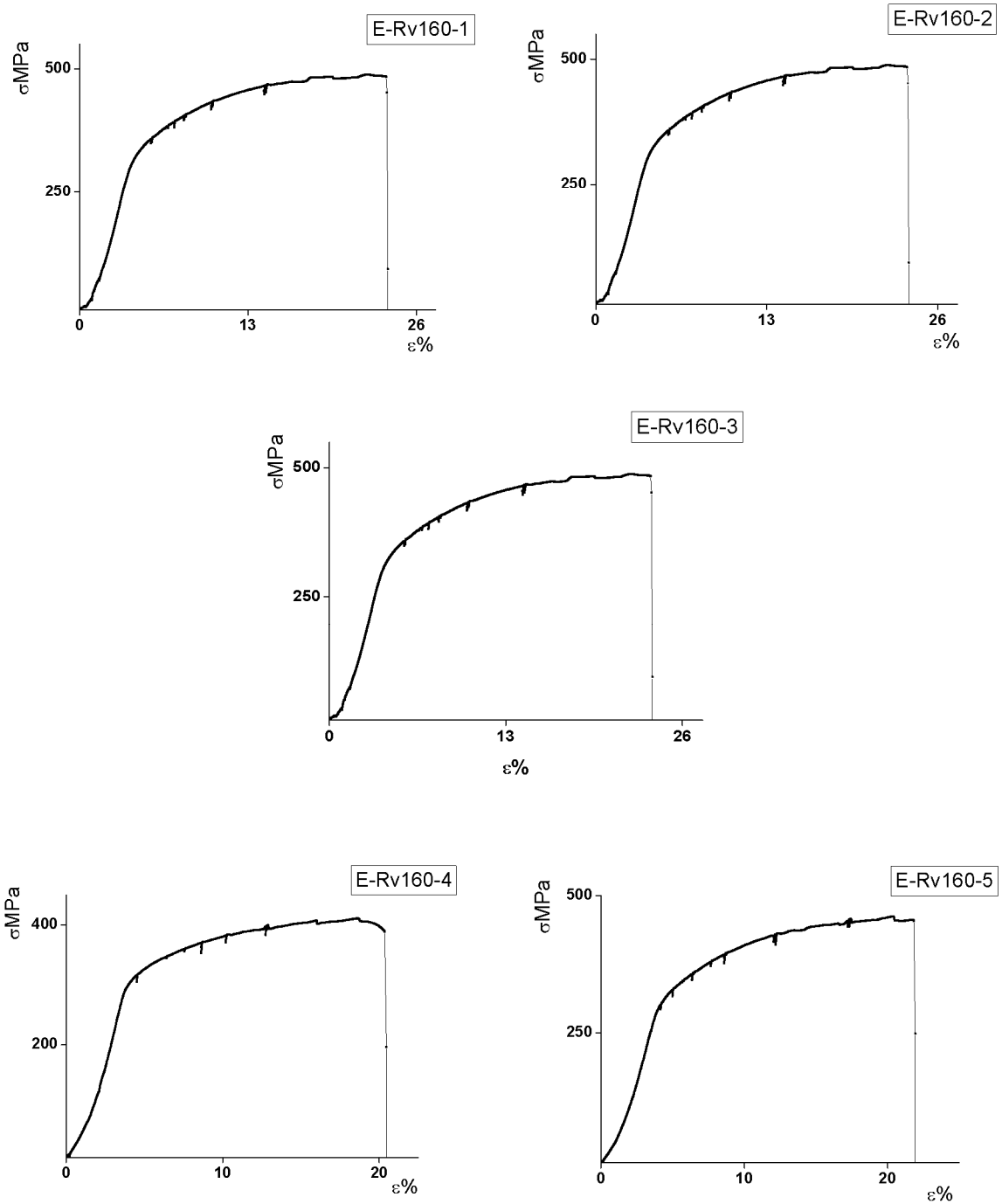
Figure(III.43): courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05éprouvettes de l'état trempé.

c) Etat de revenu a 150°C (E-Rv150 °C) :



Figure(III.44) : courbes de traction (contrainte - déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de revenu à 150 °C

d) Etat de revenu a 160°C (E-Rv160 °C) :



Figure(III.45) : courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de revenu à 160°C

E) Etat de revenu à 170°C (E-Rv170 °C) :

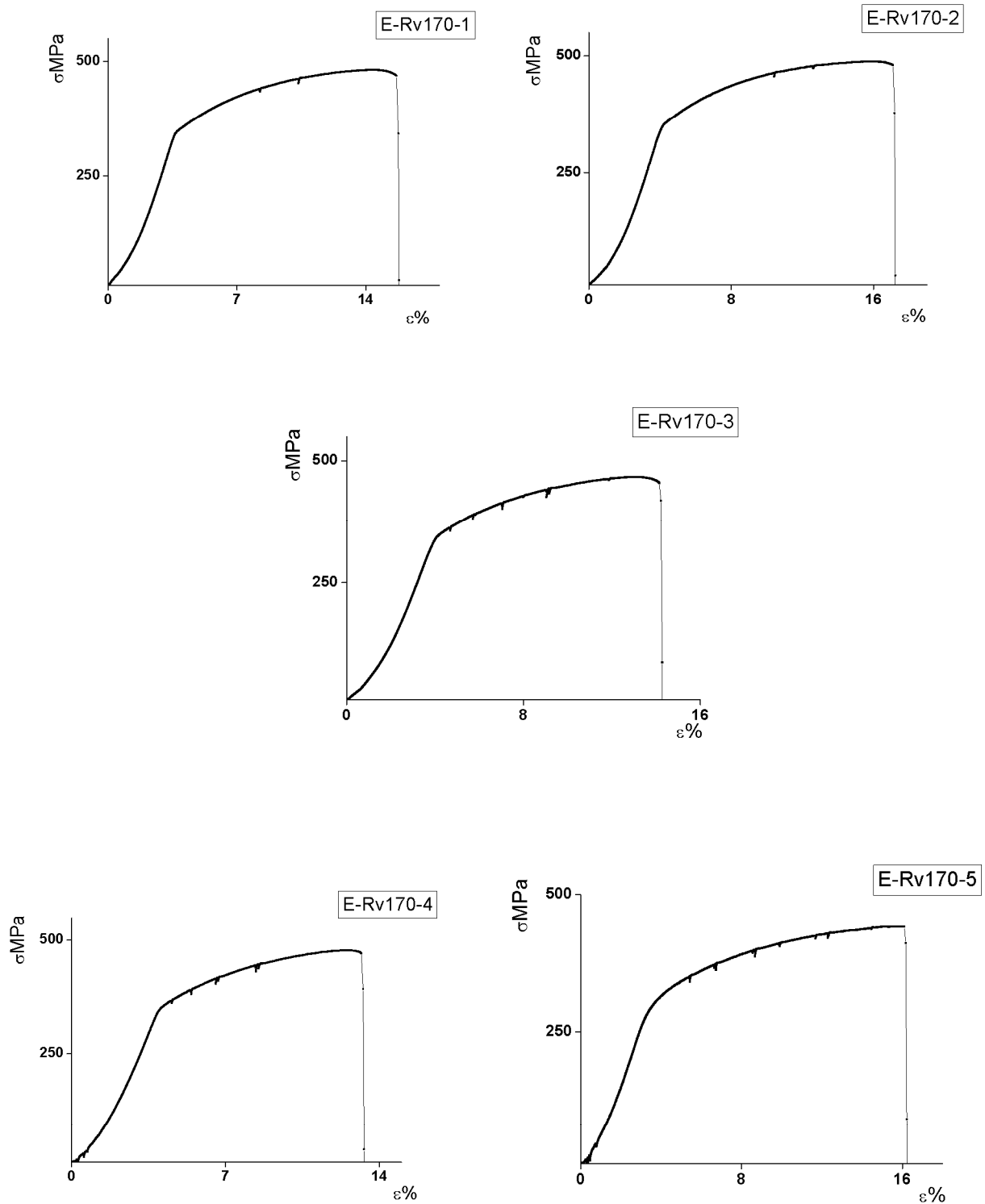
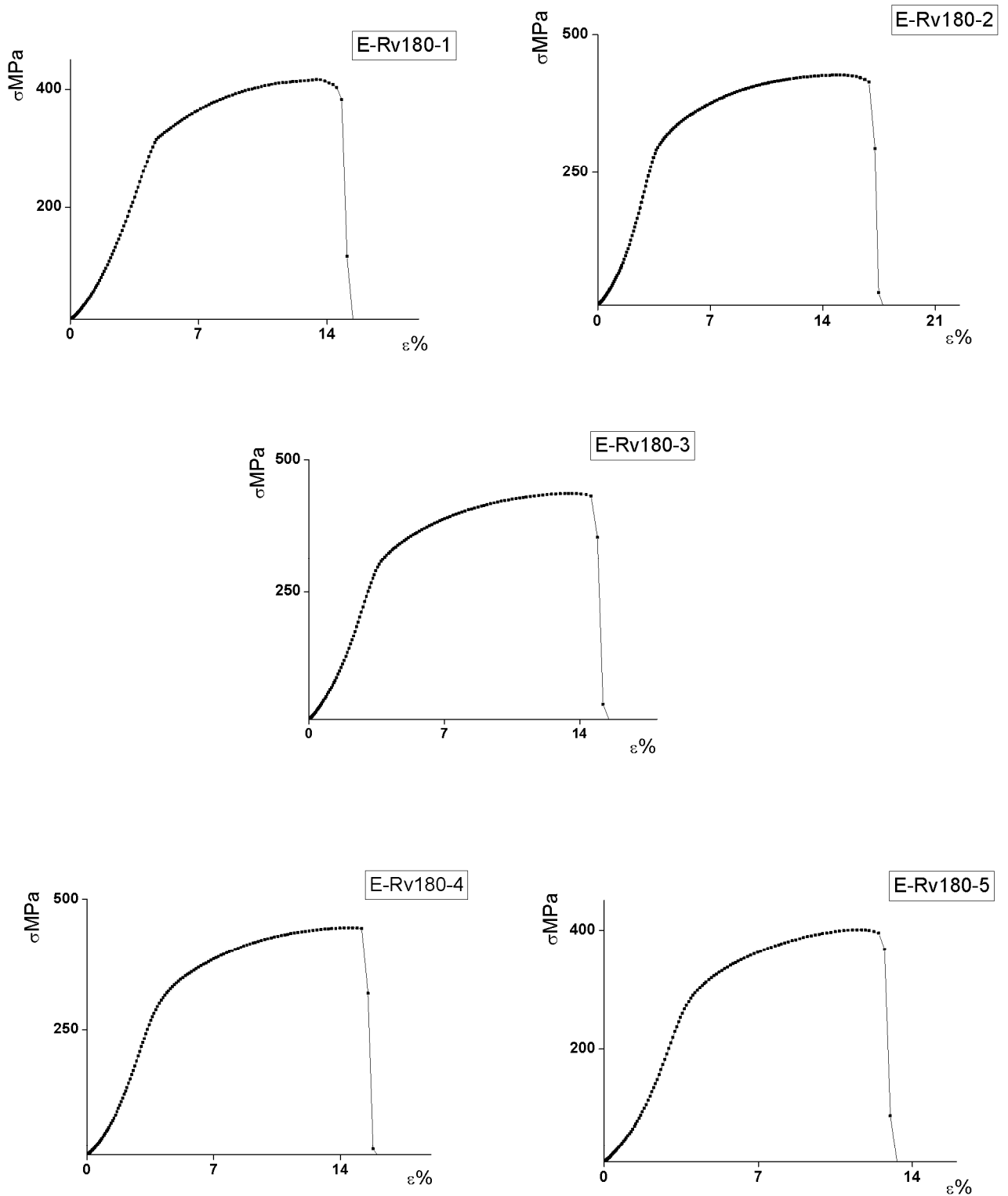


Figure (III.46) : courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de revenu à 170 °C

F) Etat de revenu à 180°C (E-Rv180 °C) :



Figure(III.47) : courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05 éprouvette à l'état de revenu à 180° C

G) Etat de revenu à 190°C (E-Rv190 °C) :

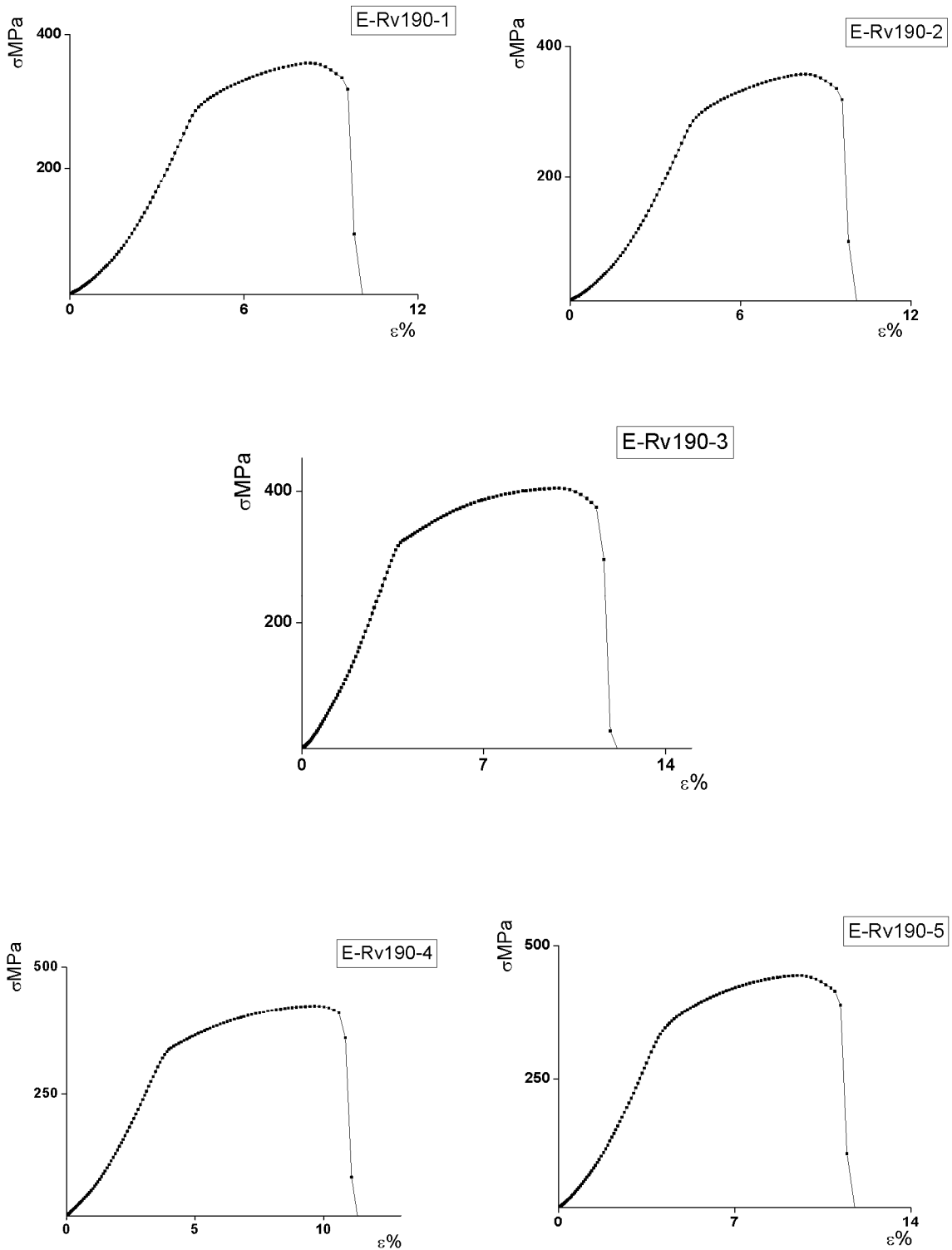


Figure (III.48) : courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de revenu à 190 °C

H) Etat de revenu à 200°C (E-Rv200 °C) :

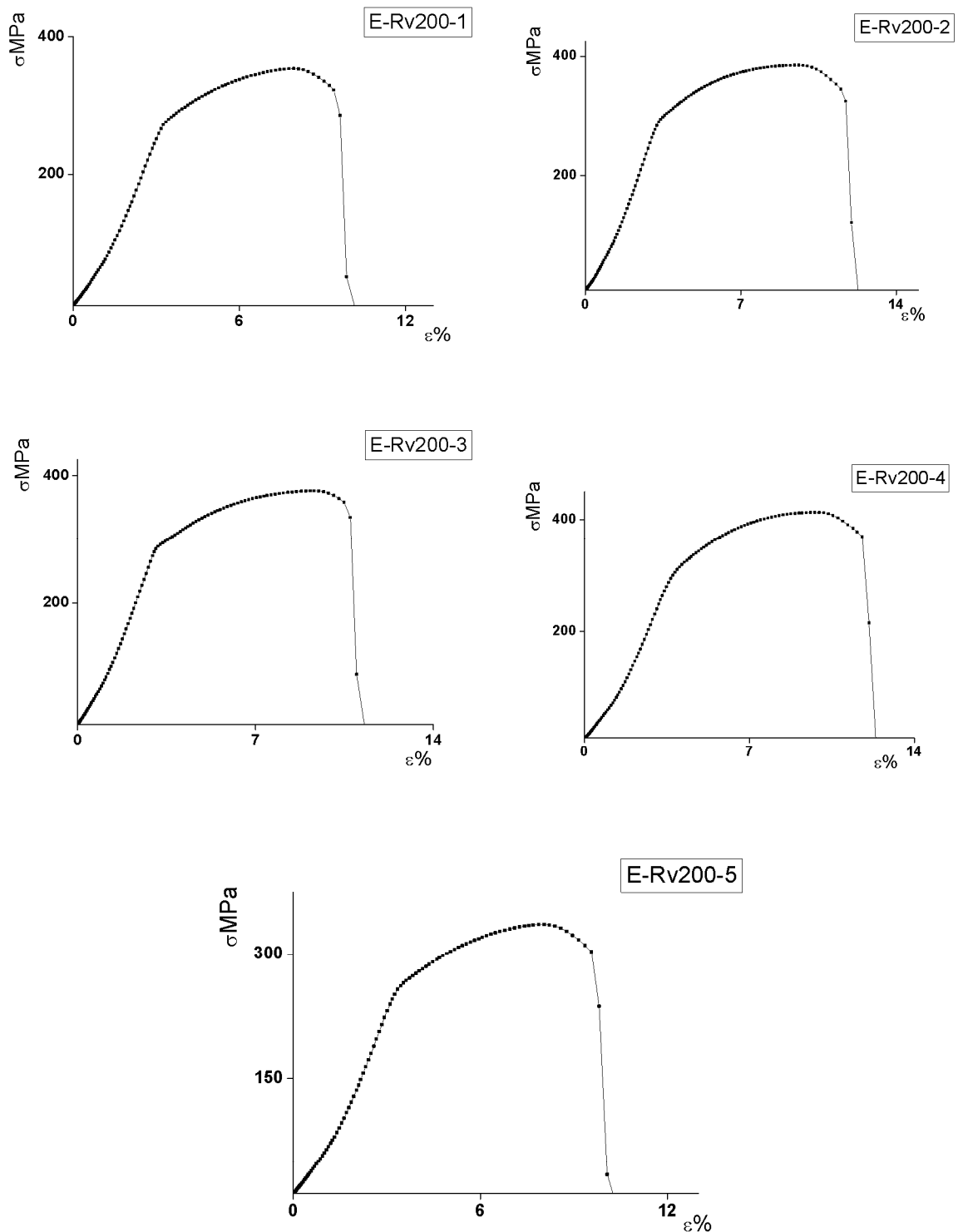
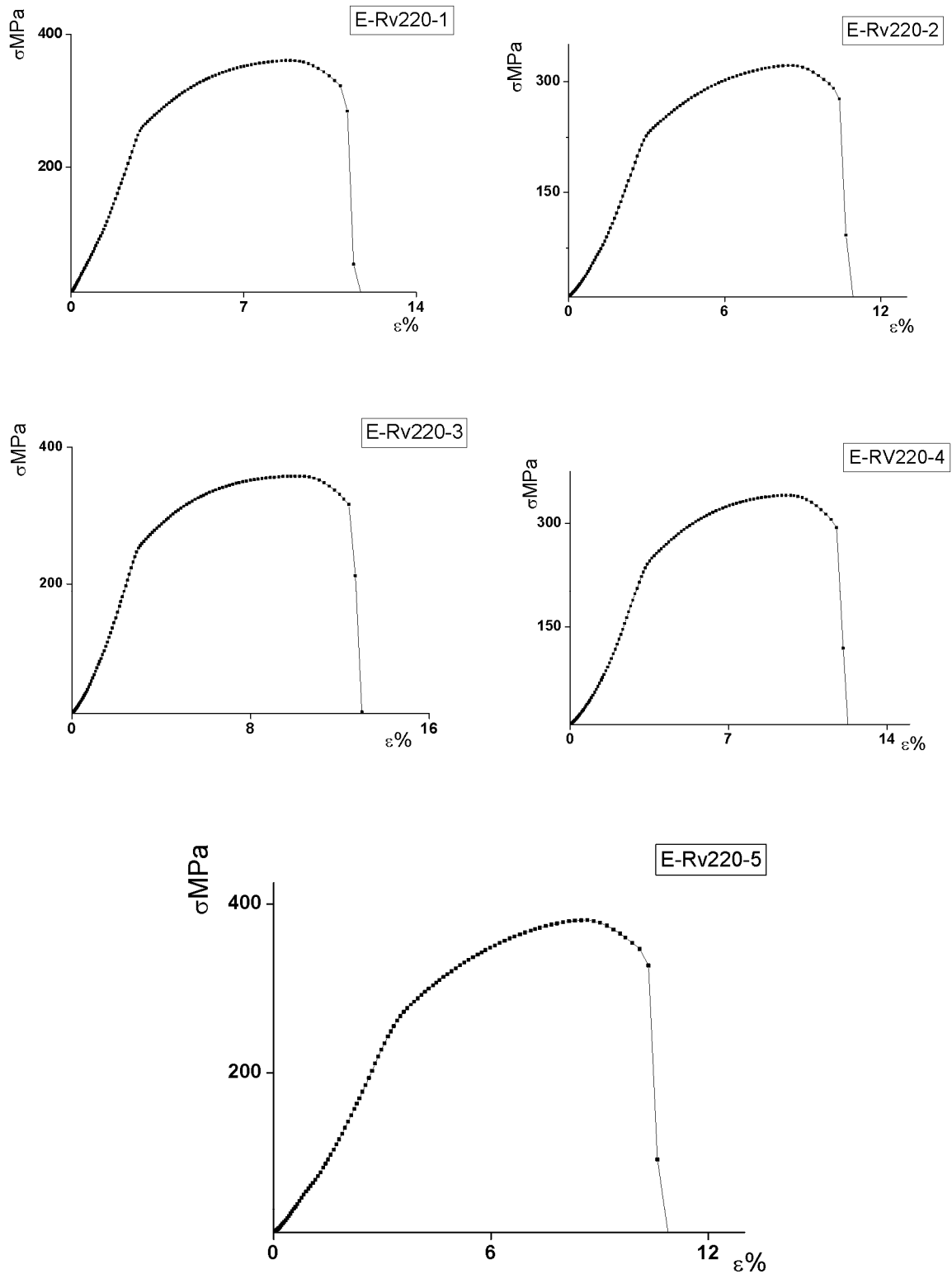


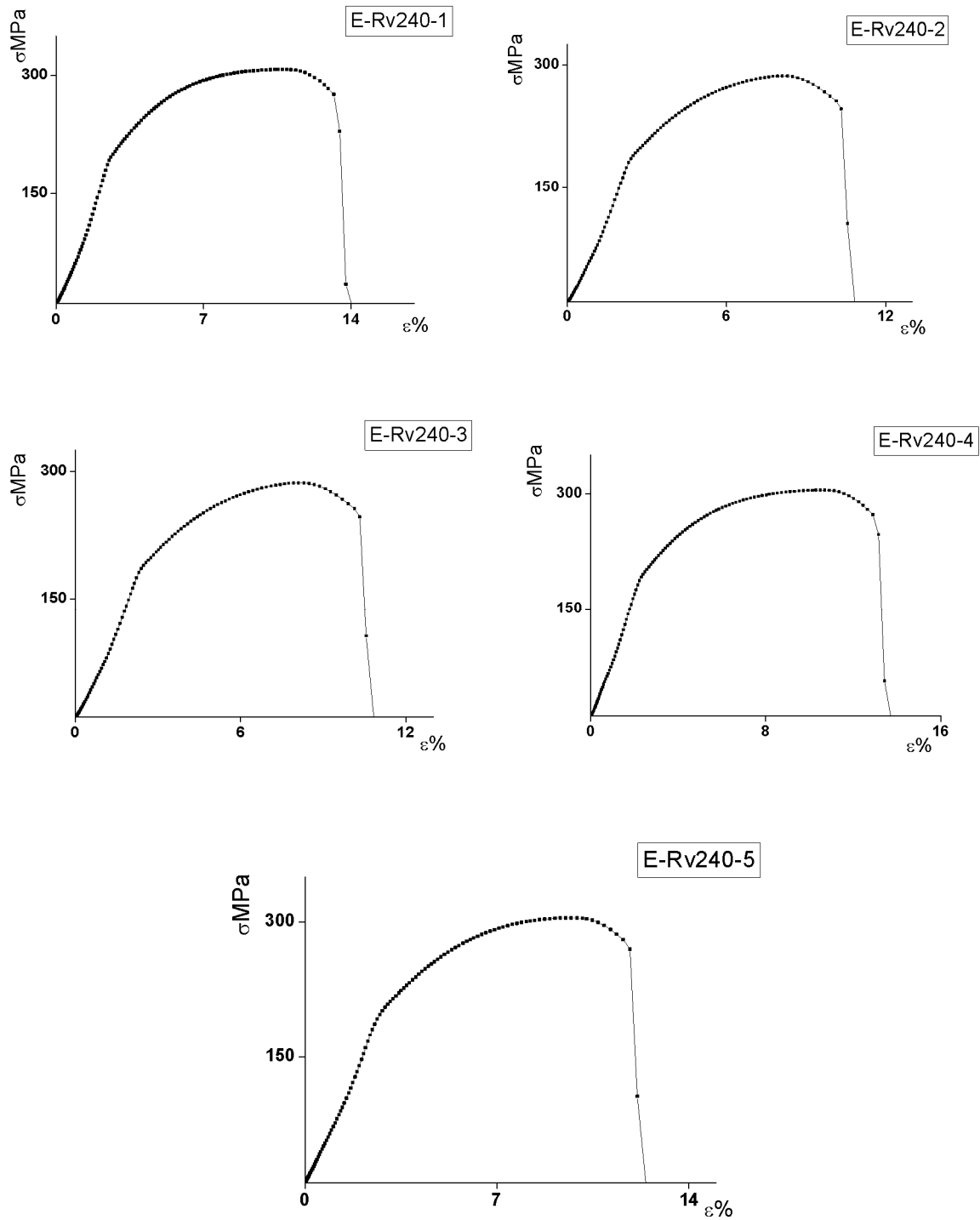
Figure (III.49) : courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de revenu à 200 °C

I) Etat de revenu à 220°C (E-Rv220° C) :

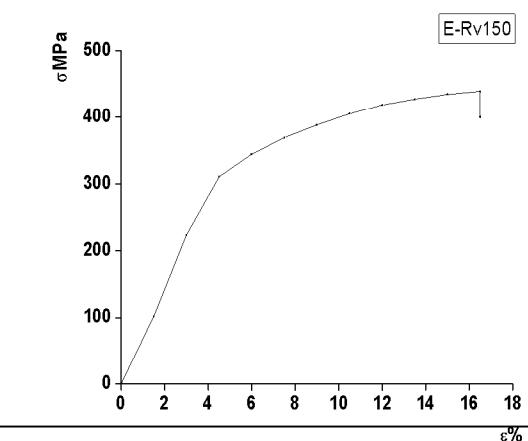
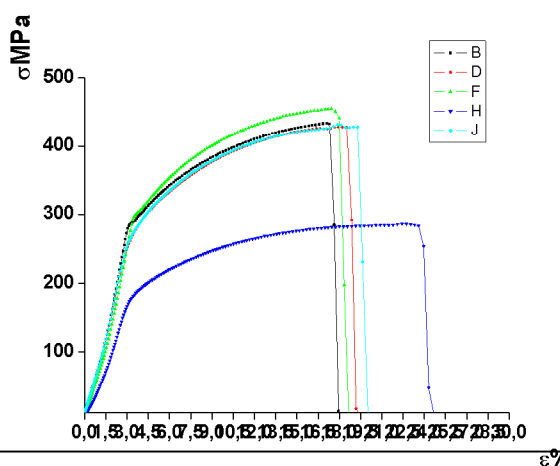
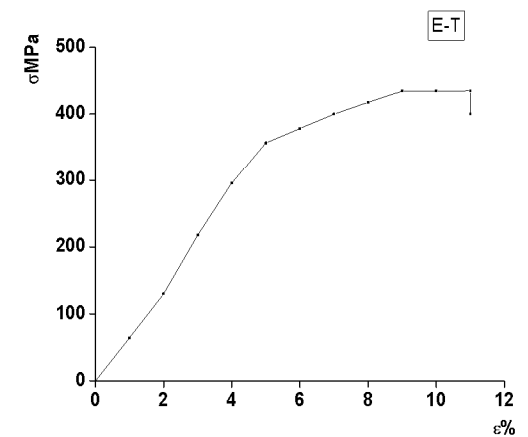
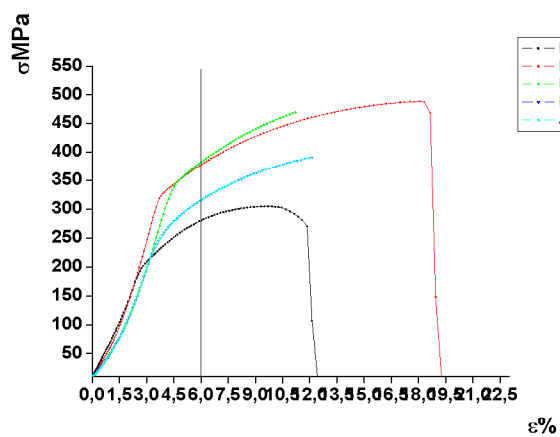
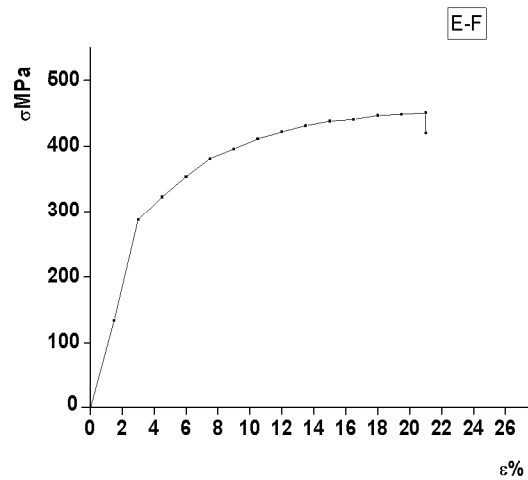
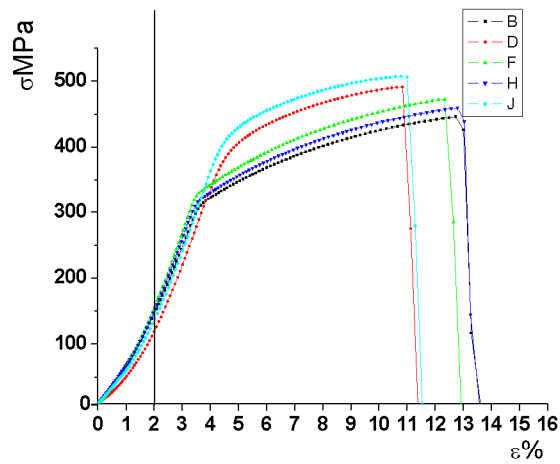


Figure(III.50) : courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de revenu à 220°C

j) Etat de revenu à 240°C (E-Rv240°C) :

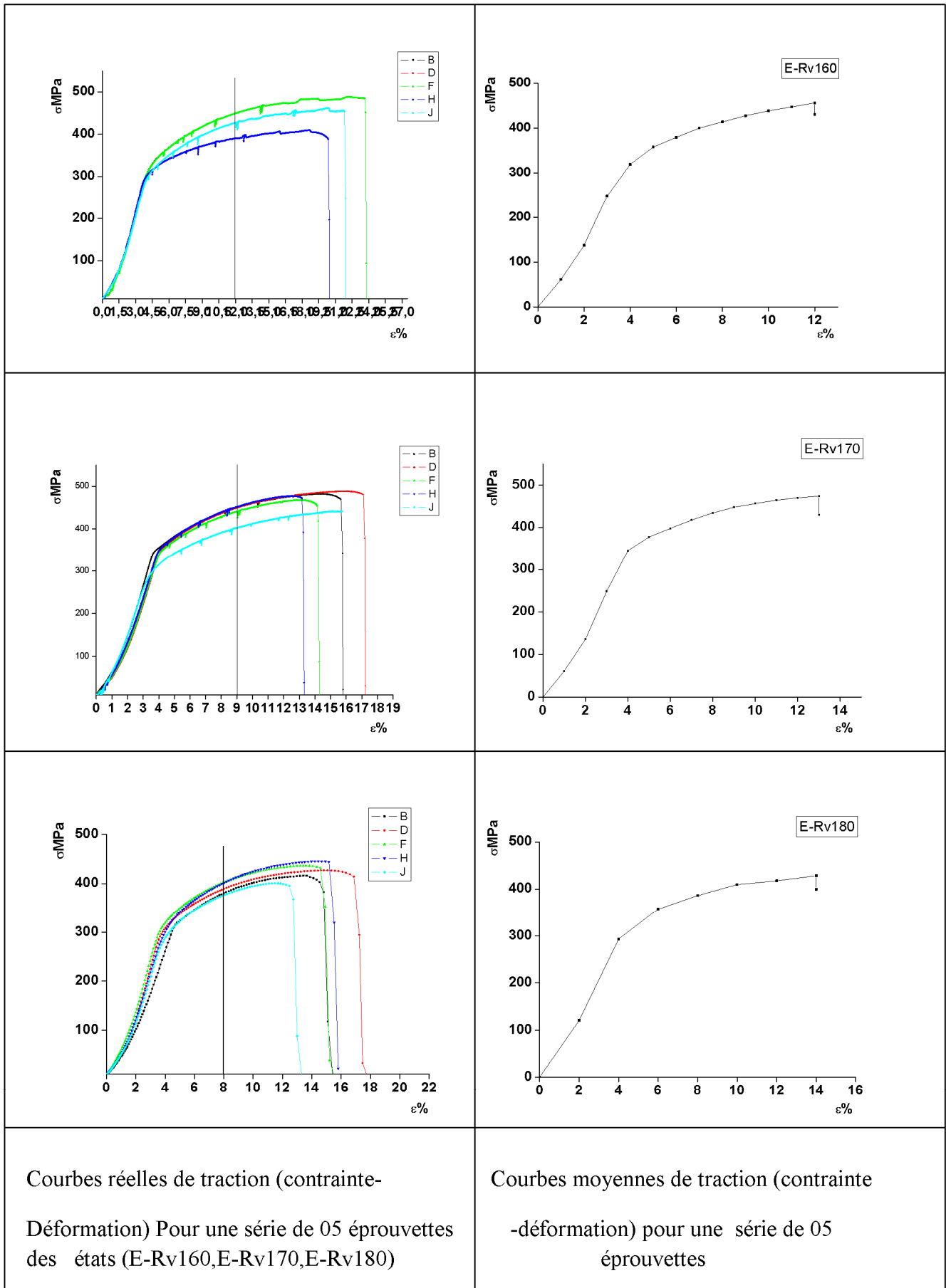


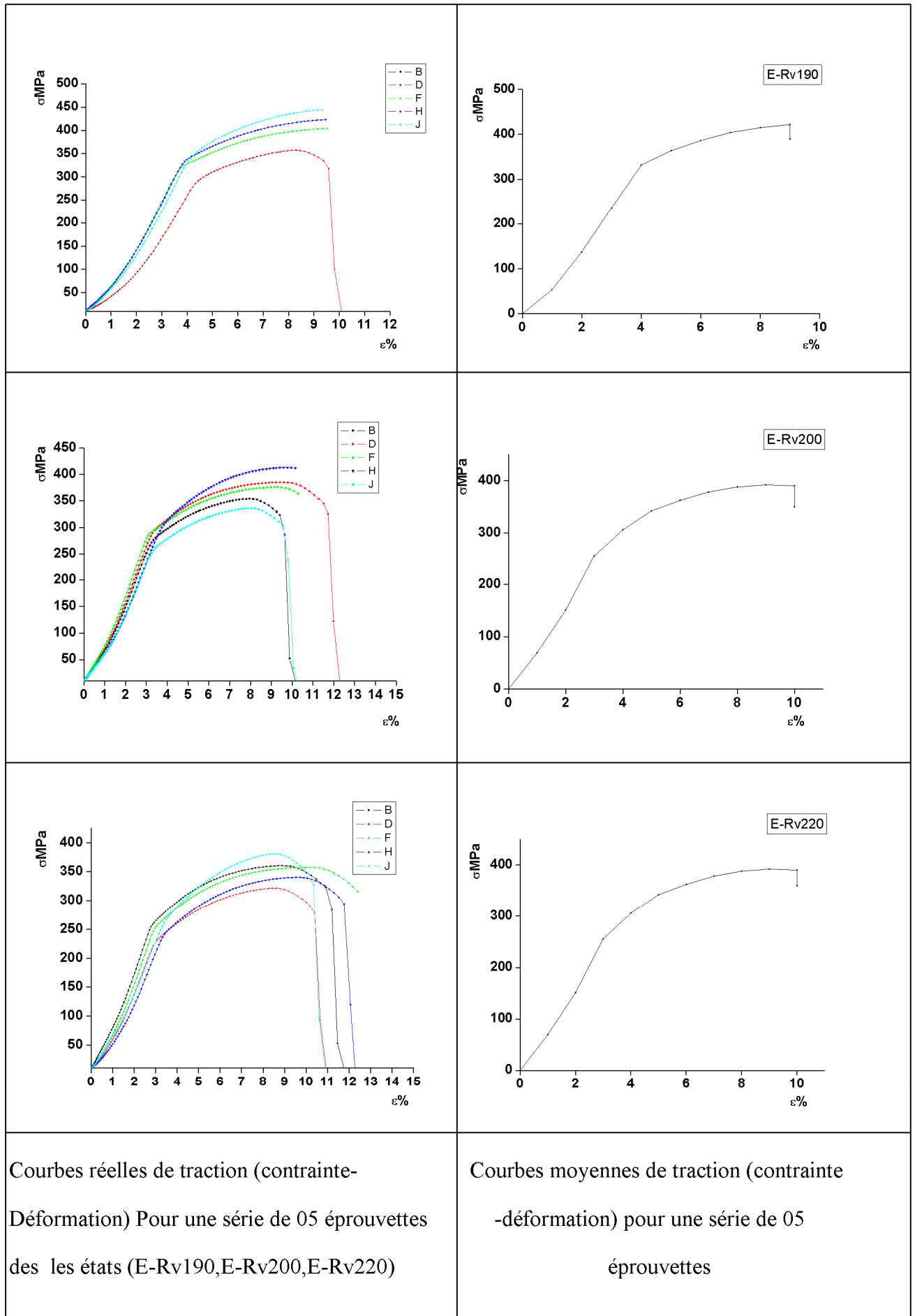
Figure(III.51) : courbes de traction (contrainte – déformation) pour une série de 05 éprouvettes à l'état de revenu à 240 °C

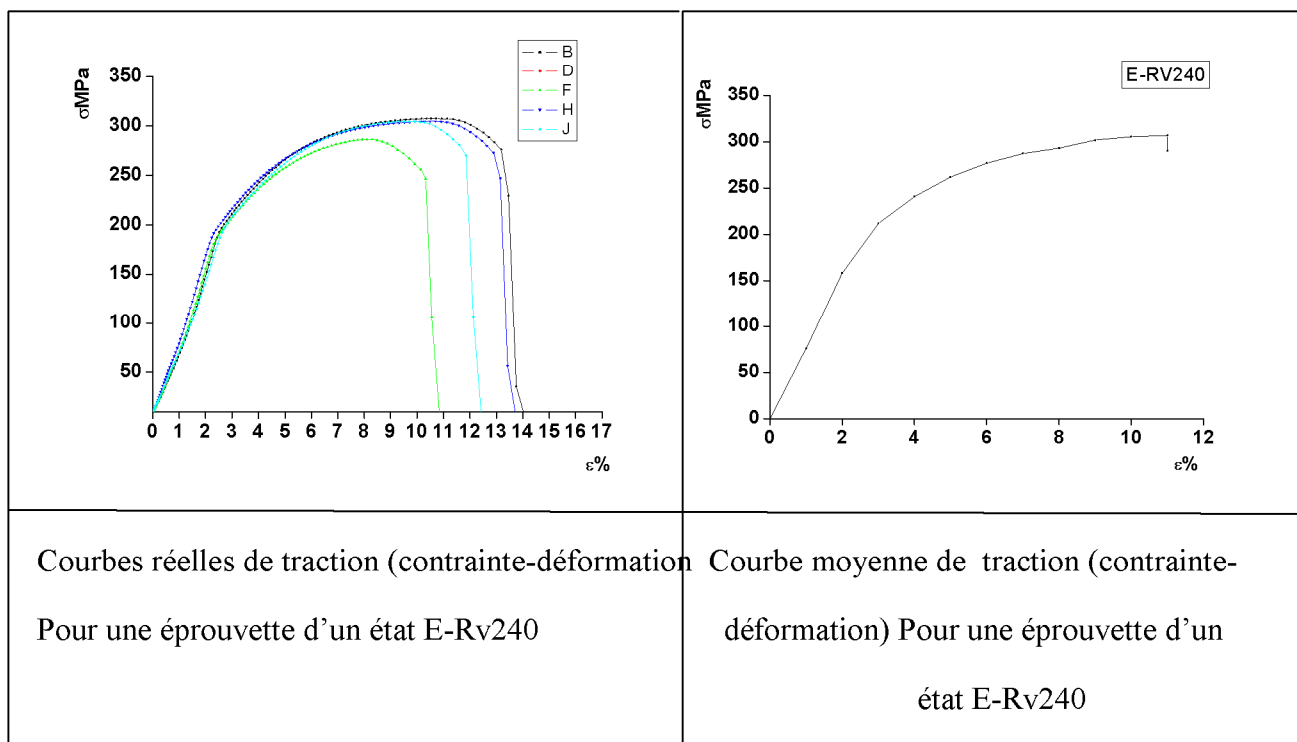


Courbes réelles de traction (contrainte - déformation) Pour une série de 05 éprouvettes des états (E-F, E-T, E-Rv150)

Courbes moyennes de traction (contraint -déformation) pour une série de 05 Pour les éprouvette







Figures (III.52) : courbes réelles et moyennes de traction (contrainte – déformation) pour chaque série de cinq éprouvette respectivement pour les états (E-F, E-T ,E-Rv150 ,E-Rv160 , E-Rv170 , E-Rv180 , E-Rv190 , E-Rv200 , E-Rv220 , E-Rv240) .

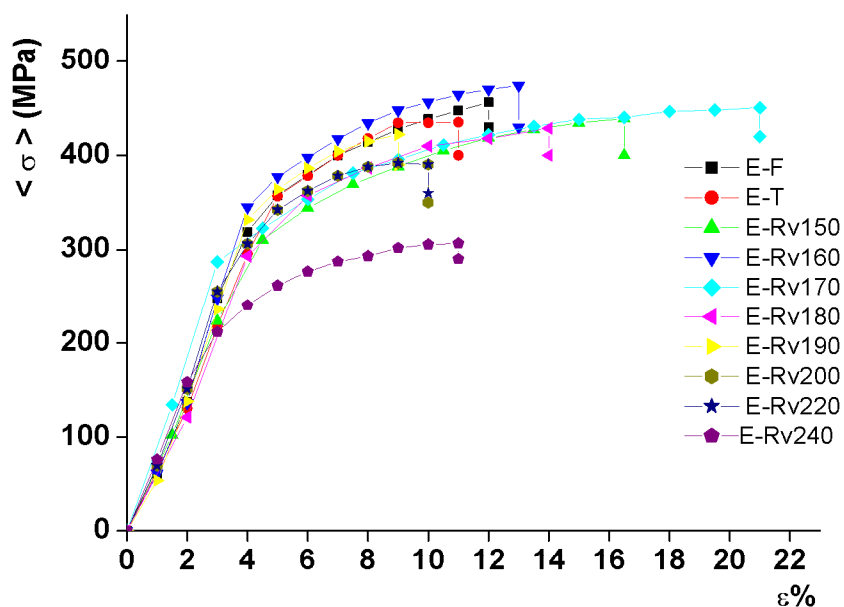


Figure (III.53) : regroupement des Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) des 10 états.

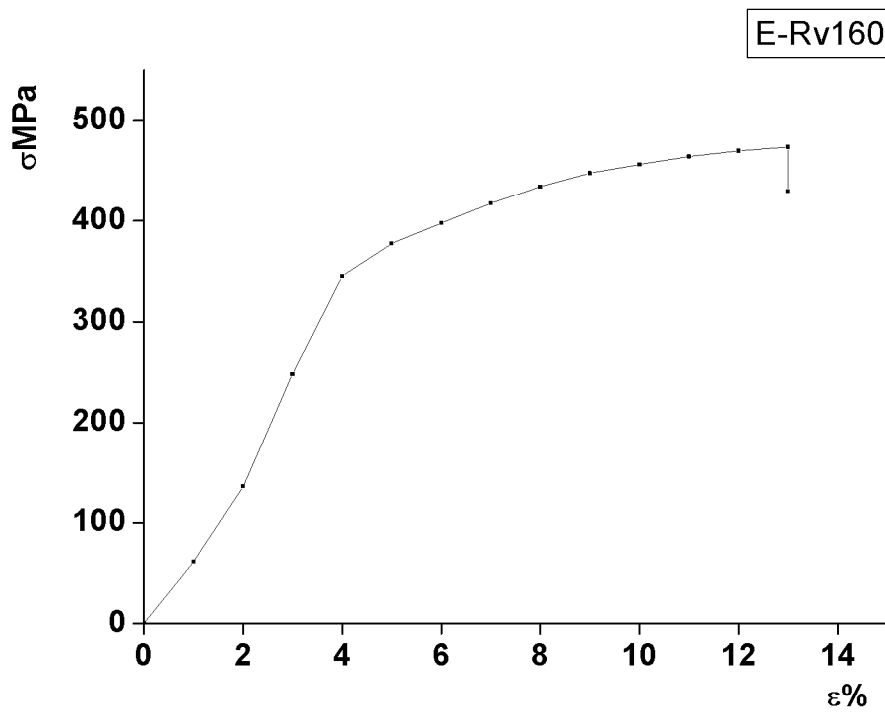
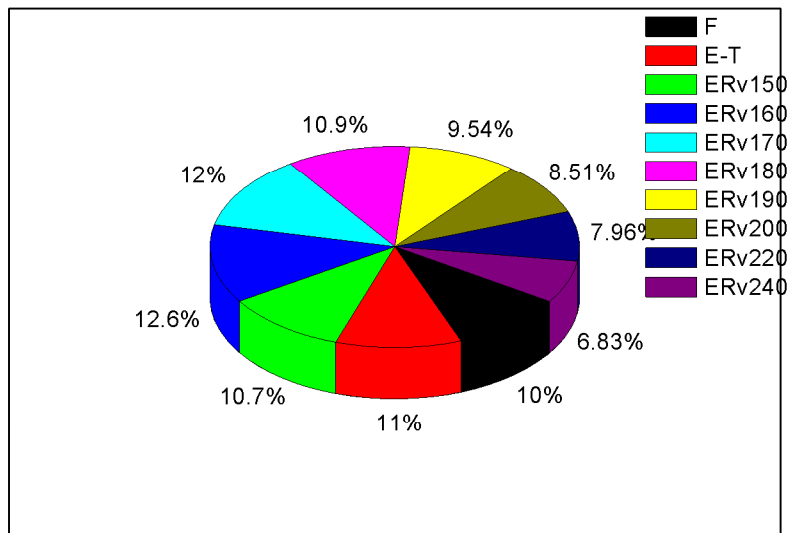
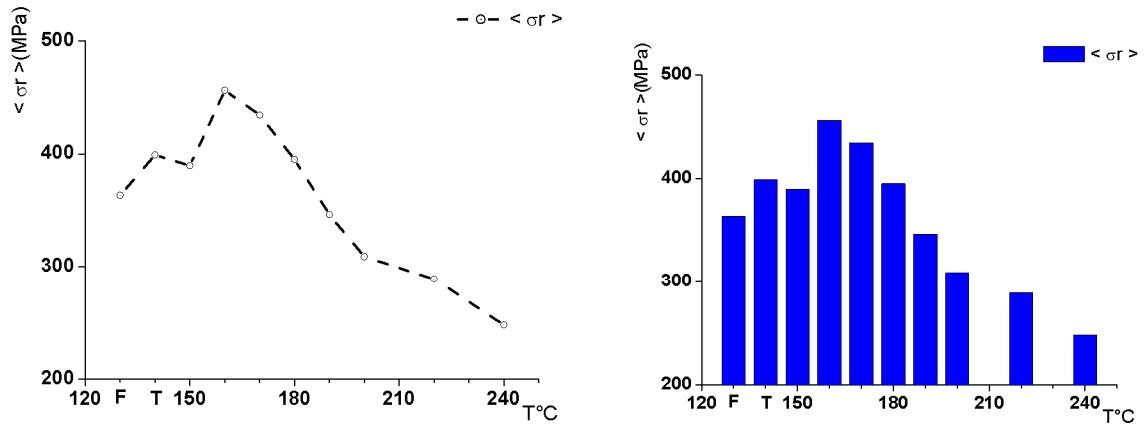


Figure (III.54) : compromis des traitements thermiques sur l'essai de traction de l'alliage AlCu4%



Figure(III.58): Graphe, histogramme ($\langle \sigma_r \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des contraintes de rupture moyennes des dix états.

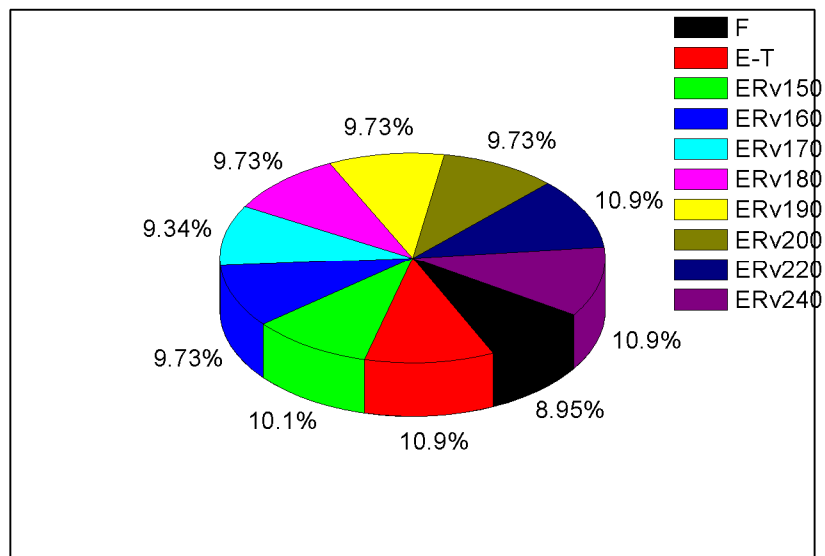
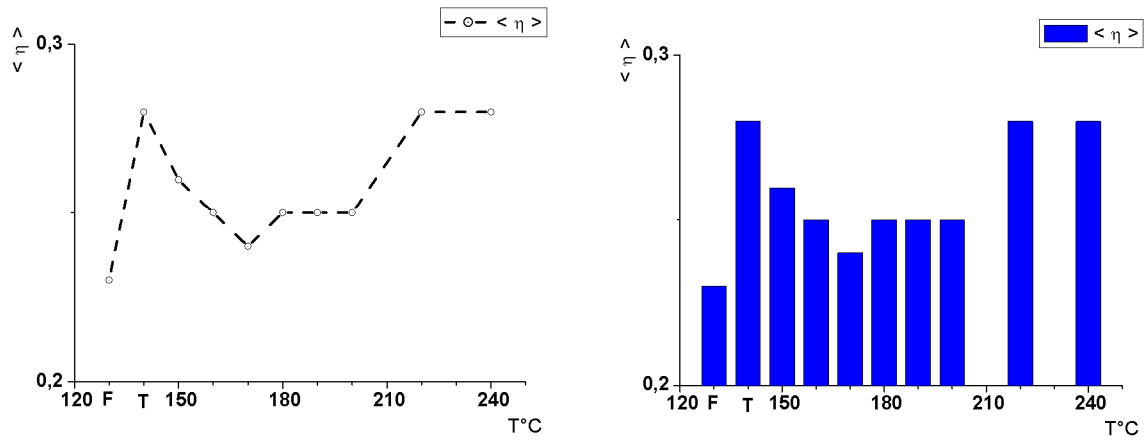


Figure (III.59): Graphe, histogramme ($\langle \eta \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients d'écroissage moyens des dix états

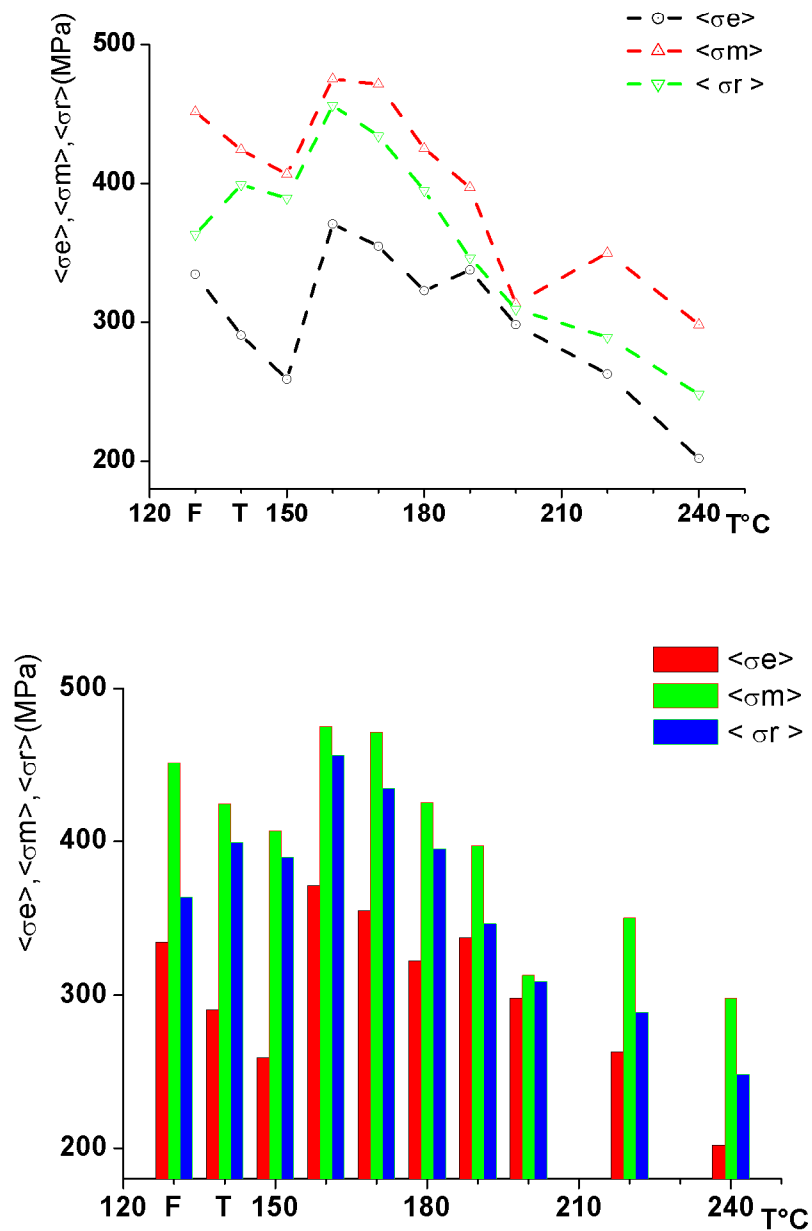
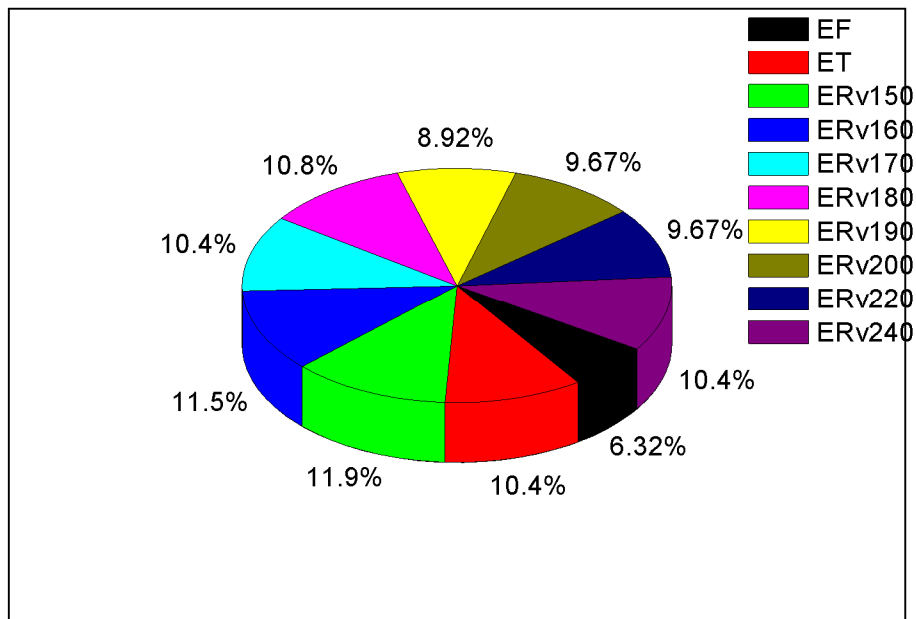
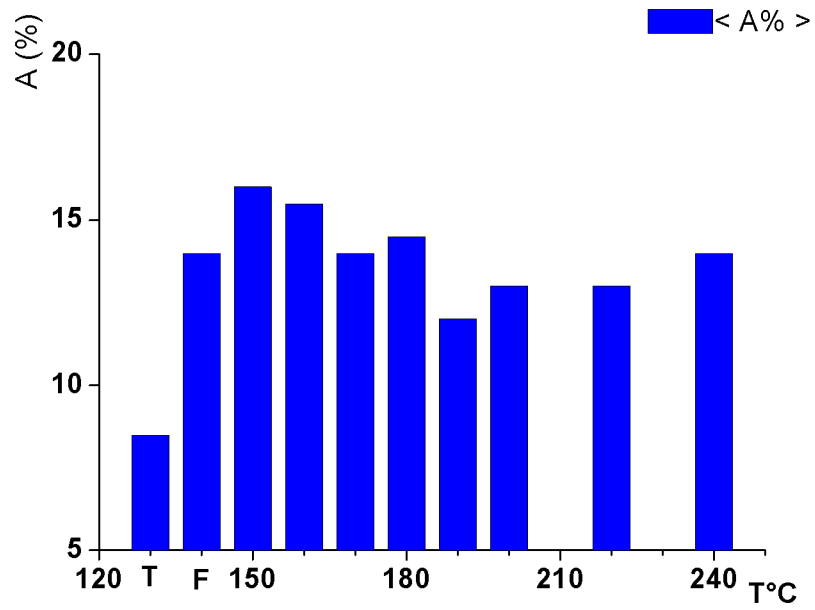


Figure (III.60): Graphe et histogramme des contraintes σ_e , σ_m , σ_r moyennes des dix états

La figure (III.55) et (III.59) représentent respectivement les valeurs du module d' Young et de la contrainte σ_e , σ_m , σ_r , η pour les dix états



Figure(III.61): Graphe, histogramme (< A% > - Températures de revenu) et secteur des allongements moyens des dix états.

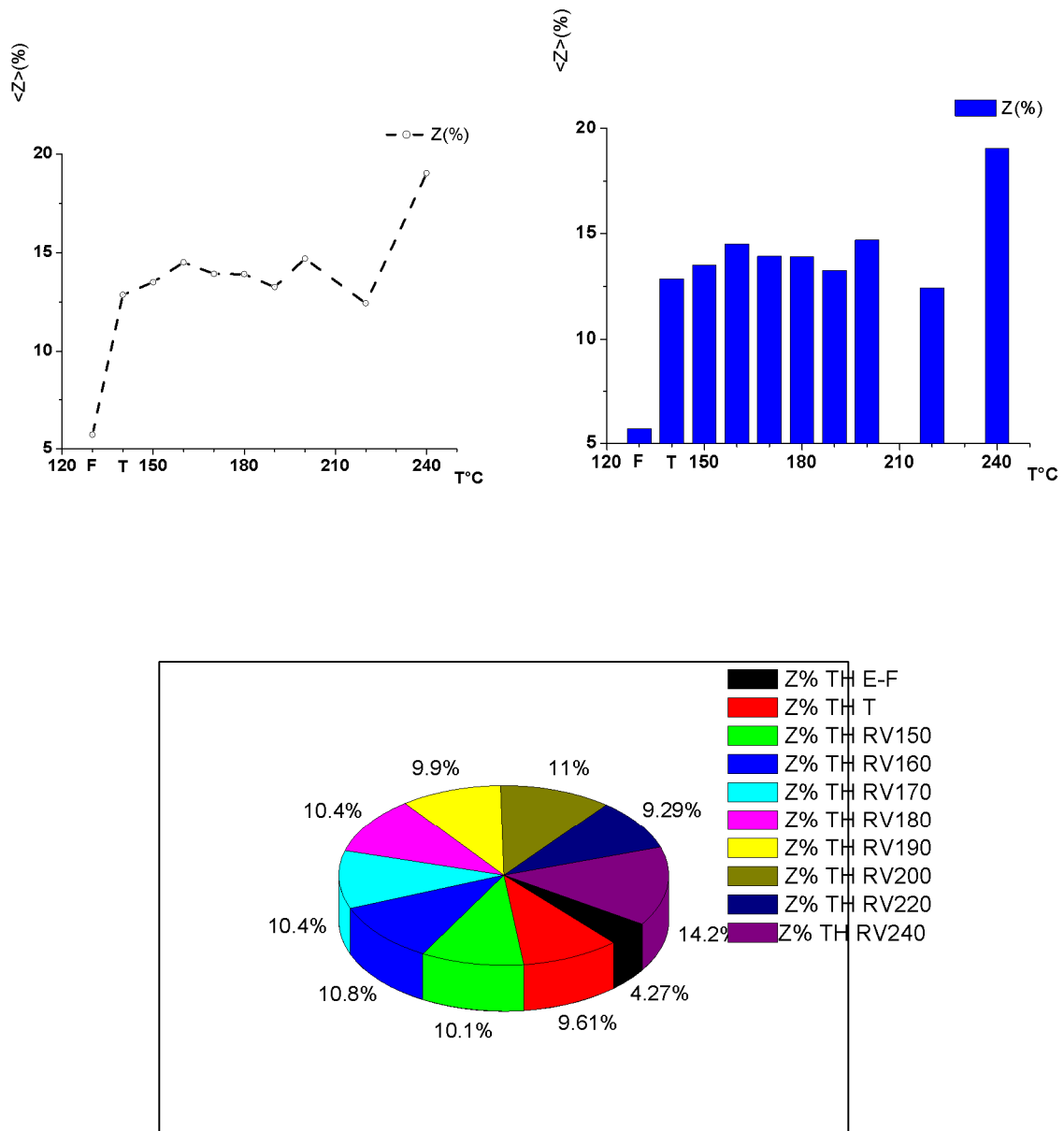
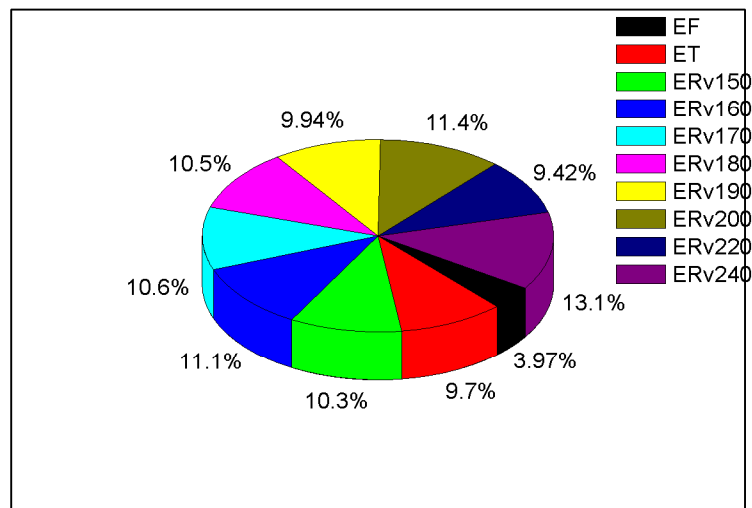
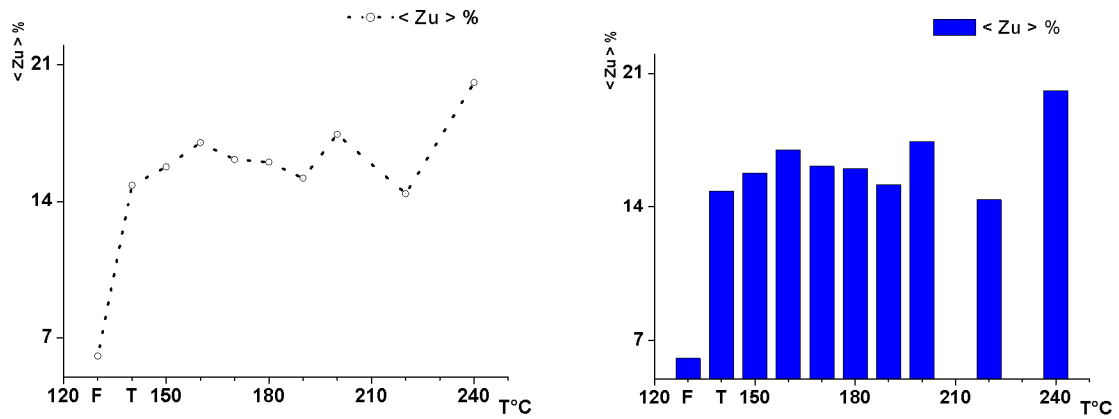


Figure (III.62): Graphe, histogramme ($\langle Z \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de striction moyens des dix états.



Figure(III.63): Graphe, histogramme (<Zu% > - Températures de revenu) et secteur des allongements de striction moyens des dix états.

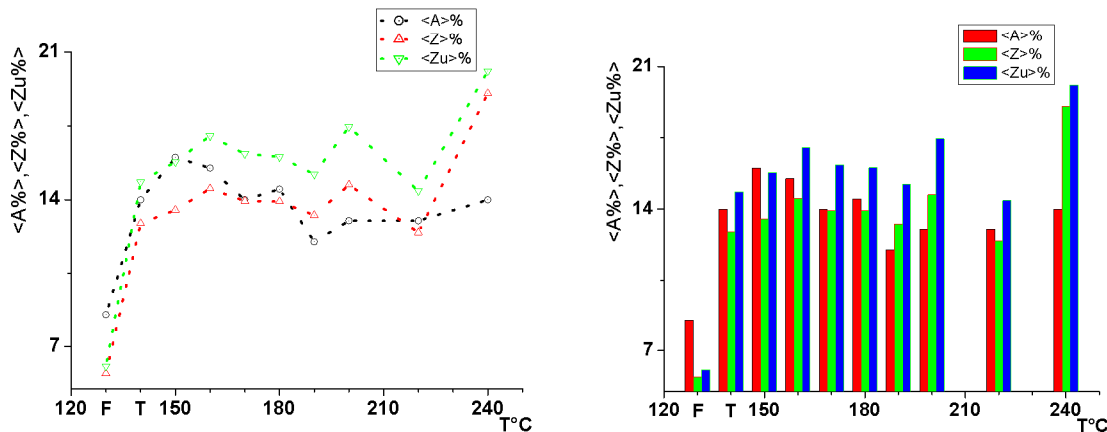


Figure (III.64): Graphe et histogramme des caractéristiques de ductilité (<A% >, < Z% > et < Zu% > - Températures de revenu) des 10 états considérés.

Les figures (III.61) à (III.63) représentent respectivement l'évolution de l'allongement à la rupture A%, allongement de striction Zu% et le coefficient de striction Z% à travers les états considérés ,et à partir de ces résultats illustrés dans les différentes figures on montrent que les caractéristiques mécaniques de résistance correspondantes aux différents états et se rapprochent avec une légère supériorité pour l'état brut de coulée et les états des températures de revenu (150, 160 ,170 ,180 ,190 ,200 ,220 ,240) °C

III.6) Effets des traitements thermiques sur les caractéristiques de dureté HB :

Pour contrôler la déformation d'un matériau, il est nécessaire d'évaluer son état de champs de contraintes internes, qui sert d'obstacle pour le mouvement de dislocations. La dureté est l'une des méthodes permettant de déterminer quantitativement l'intensité de ce champ.

Pour l'alliage étudié nous avons utilisé la dureté Brinell, avec un pénétrateur de diamètre de 2,5mm, sous une charge de 15kg

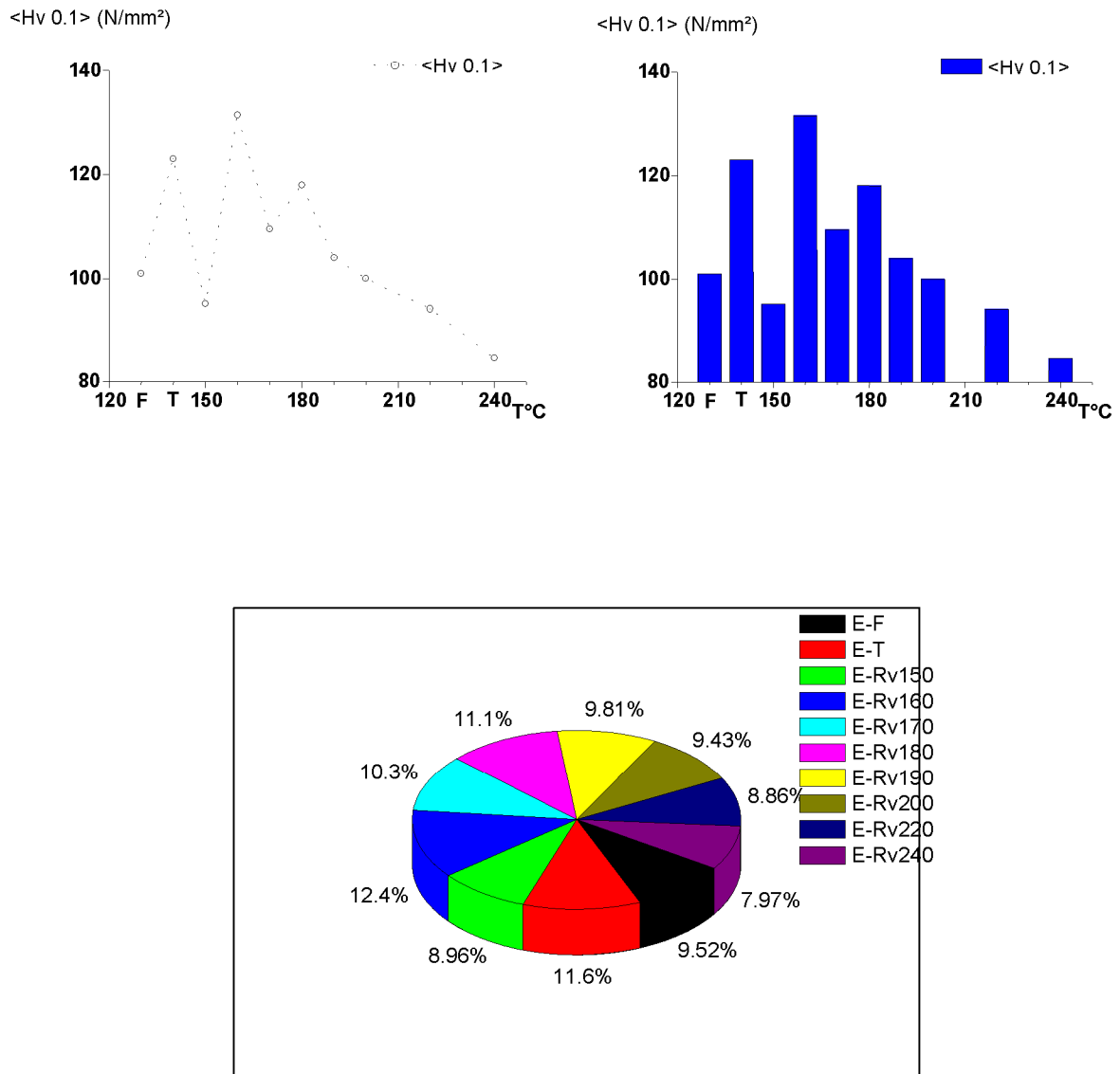


Figure (III.67): Graphe, histogramme (< Hv0, 1 > - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états de la Zone blanche.

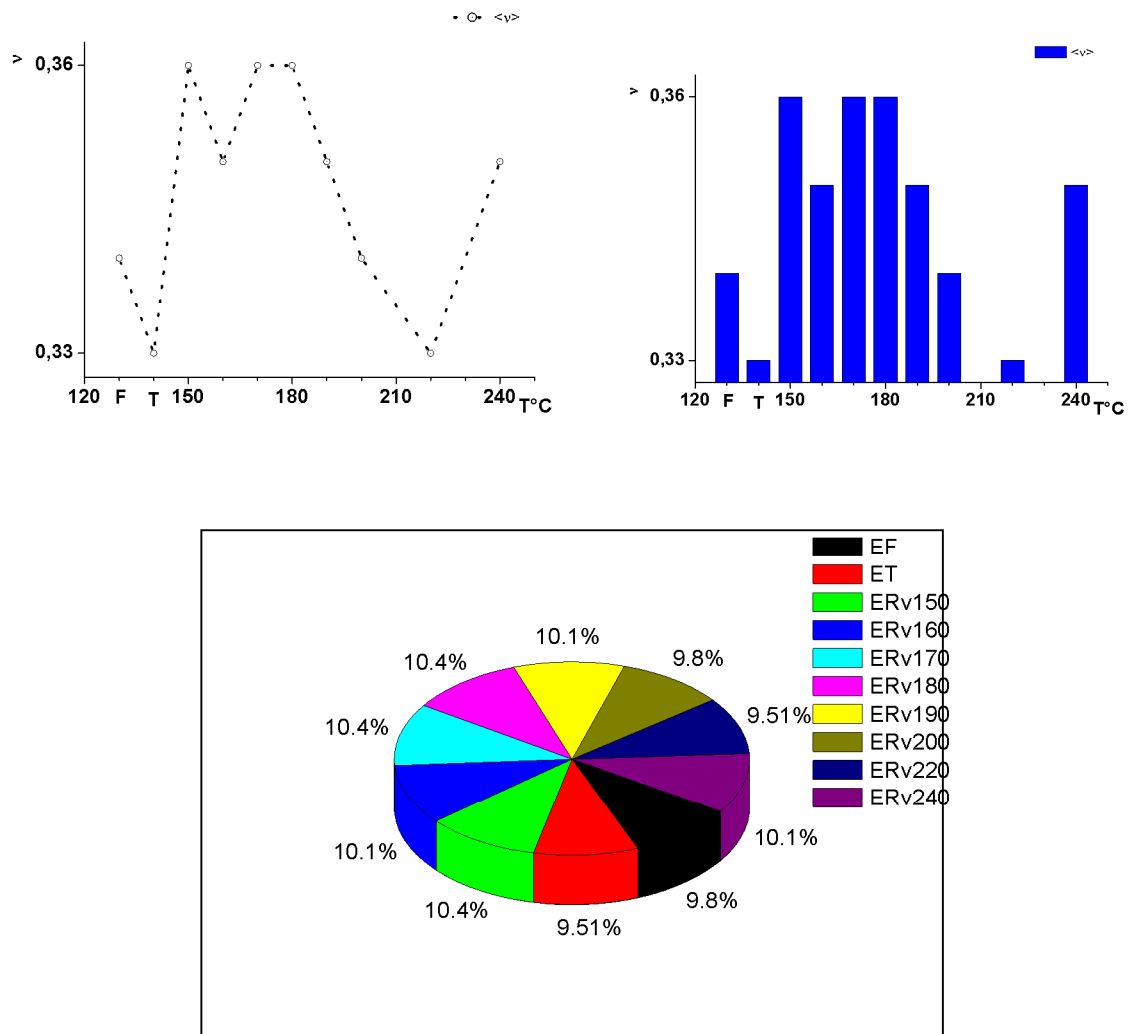
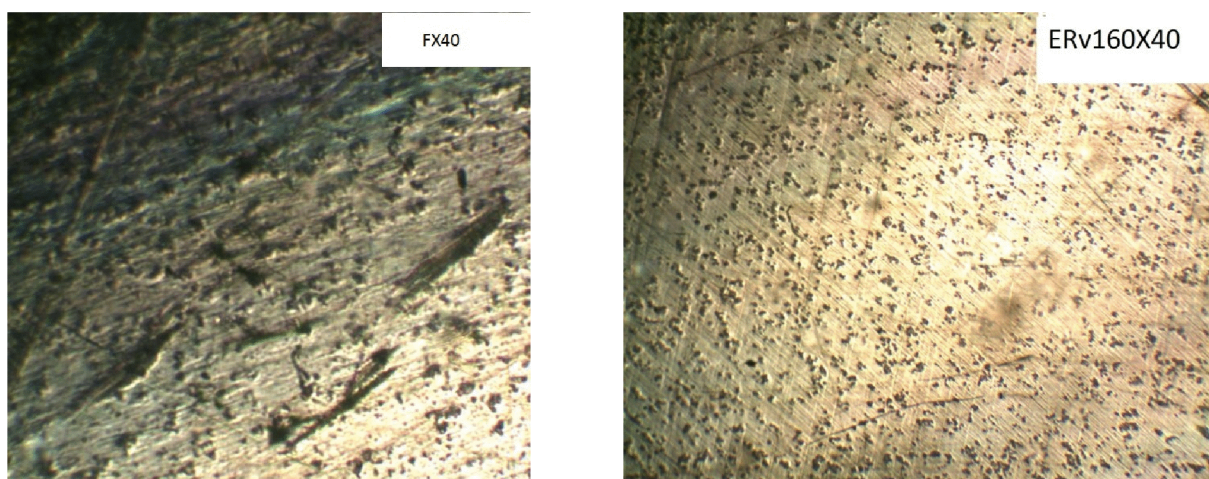


Figure (III.69): Graphe, histogramme ($\langle \nu \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de poisson moyens des dix états.

III.8) EFFETS 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. toute étude de matériaux métalliques passe presque souvent par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs différentes caractéristiques mécaniques.

Les échantillons utilisés sont de forme circulaire et de dimension ($D=28$, $e=20$ mm) ont été découpés à l'aide d'une scie métallique. Un échantillon à l'état brut de coulée et à la température de revenu 160°C a été poli, attaqué et observé au microscope optique pour déterminer la structure et la texture granulaire du matériau étudié, comme le montre la (figure. III.70).



Figure(III.70): Micrographie de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et à la température de revenu 160°C par microscope optique.

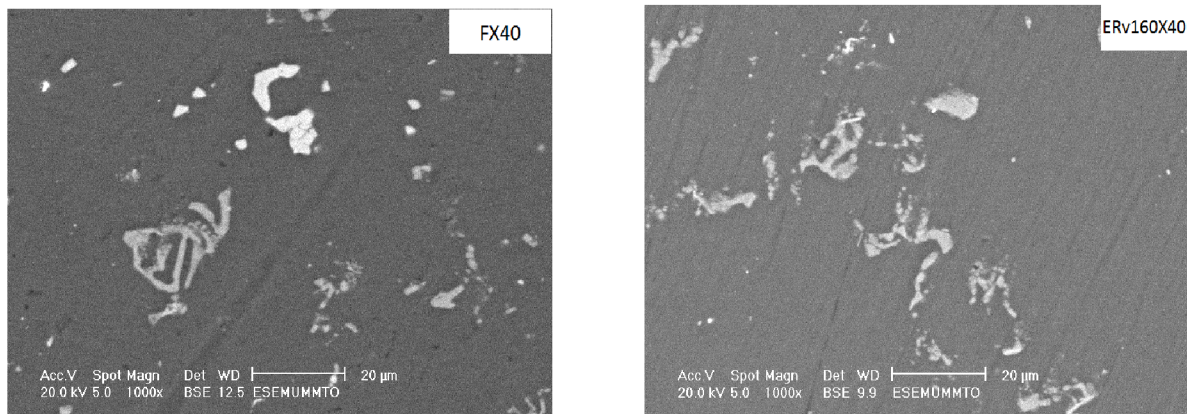
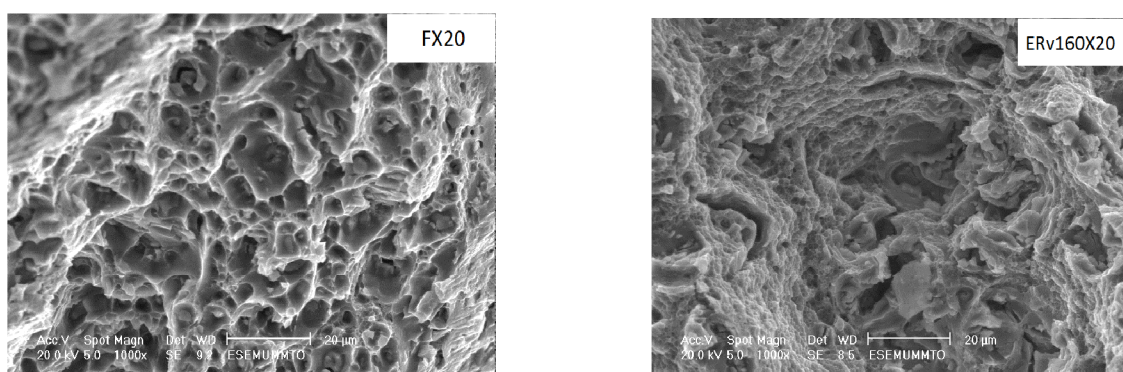


Figure (III.71): Micrographie de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et à la température de revenu 160° par MEB.

Sur cette micrographie les, on observe des grains apparaissent on sombre dans la matrice (solution solide AlCu4%) qui est en clair à l'intérieur desquels sont logés des pores noirs de petite taille, Une observation au microscope électronique à balayage, en mode électrons rétrodiffusés, a permis de mettre en évidence ces précipités qui est en claire sur les joints de grains . On remarque aussi que le mode d'élaboration influe sur la quantité des pores d'un autre coté 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.



Figure(III.72): Micrographie des facies de rupture de l'alliage AlCu4% à l'état brut de coulée et a la température de revenu 160° par MEB.

Le 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

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

-Pour faire dissoudre les précipités dans la matrice d'aluminium et maintenir la structure de solution solide sursaturée obtenue après refroidissement, un traitement thermique de trempe a été mené à une température de chauffage TH (500°C) suivi d'une trempe dans l'eau est effectué à (20-25°C).

- Après chauffage jusqu'à la température voulue, on fait plonger le métal dans un bain eau, pour se refroidir. Ce refroidissement rapide jusqu'à la température ambiante ou voisine, permet de maintenir l'état initial du métal à la température ambiante et 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.

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 : **E Rv 160°C**

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

Conclusion:

Finalemment, 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

L'objectif assigné à ce travail est d'étudier principalement l'influence de l'ajout de (4%) de cuivre qui est l'agent important afin d'améliorer certaines propriétés mécaniques associées au procédé industriel de l'alliage de corroyage qui est une opération consistant à déformer un métal avec allongement dans un sens privilégié : il est effectué à température ordinaire, pour avoir la forme désirée. Pour cela on a effectué en deuxième lieu des traitements thermiques de durcissement structural en suit la progression des propriétés mécaniques.

Le choix de cette alliages a été dicté par le fait qu'il est très utilisé dans diverses application mécaniques .Pour améliorer les caractéristiques mécaniques obtenues à l'état brut de coulée (pris comme état de référence) on a effectué un traitement thermiques de durcissement structural qui se fait en 3 étapes :

- 1- **mise** en solution à 500°C avec homogénéisation d'un maintien de 8h dans un four de trempe
- 2- refroidissement rapide à température ambiante (20- 25) °C par trempe à l'eau, suivi d'une maturation de 16h à l'air ambiante.
- 3- puis en effectue des revenus 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 dans le four .

Les remarques illustrées dans ce travail peuvent être résumées comme suit :

- Il ya une mise en solution qui à été apporter pour l'alliage utilisée par phénomène de recuit.
- Il ya une augmentation des caractéristiques mécaniques (résistance) causée par l'homogénéisation qui à favoriser les éléments de soluté (Mg, Si) à ce diffuser très rapidement dans la matrice
- Après trempe il ya champ de contraintes résiduelles qui ce forme à l'intérieur de l'alliage et une mise en œuvre d'un système pondéré de compression en surface, et de tension au cœur suivit d'une précipitation moyenne de Al_2Cu , ce qui fait d'augmenter la dureté.
- La maturation et le revenu ramène pour notre alliage une légère augmentation de la morphologie des précipités optimale comme Cu, et la stabilisation de la microstructure qui explique d'avantage l'accroissement des caractéristiques mécaniques de notre matériau.

Le compromis : en à arriver à déterminer le compromis grâce à les traitements thermiques effectué sur les dix pièces utilisées dans notre étude à dire que c'est l'état **E-RV160°C**.

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] COLOMBIE et COLL, Matériaux métallique, matériaux industriel (DUNOD) paris (2000)
- [5] J.Philibert, AVignes, Y Bréchet, P Combarde, Métallurgie de minerai du matériau, Edition MASSON (1998)
- [6] B.Jooffery, G Murry, Technique de l'ingénieur Aluminium et alliage d'aluminium, édition (2000)
- [7]. J.M.Cuntz, Aéronautique / Prévention et lutte contre la corrosion (Théma-Cor 2002)
Tome III, V 2, p. 1-20, (Oct 2002) Anglet.
- [8]. J.M.Cuntz, Aéronautique / Prévention et lutte contre la corrosion (Théma-Cor 2002)
Tome III, V 2, p. 7, (Oct 2002) Anglet.
- [9]. C.Blanc, Etude comparative de la sensibilité à la germination et à la propagation des piqûres des alliages d'aluminium 2024 et 6056, (1997) INPToulouse
- [11].Christian VARGEL , Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, BORDAS, Paris 1979 .
- [12] GHOMARI Fouad, science des Matériaux de construction (UAB)
- [13]I.LAKHTINE, Métallographie et traitements thermiques des métaux, 4^{ème} édition, MIR. MOSCOU 1986.
- [14] Polycopie
- [15] Brunos DUBOS, Pierre SAIN FORT, Technique de l'ingénieur, durcissement par précipitation des alliages d'aluminium

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

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