

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

ⵝⵓⵏⵉⵏⵉ ⵏ ⵉⵏⵉⵎⵉⵏⵉ ⵏ ⵉⵏⵉⵎⵉⵏⵉ

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En Vue de L'obtention Du Diplôme de Master Académique Sciences Techniques  
en Génie Mécanique, spécialité : Comportement et Mise en Forme des

**Matériaux**

Présenté par:

**LAZIZI Hakim**

**THEME**

Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage Al-4%Cu trempé dans un fluide à 70% h<sub>2</sub>O et 30% d'huile soluble.

Devant le jury composé de:

|                  |           |         |                           |       |              |
|------------------|-----------|---------|---------------------------|-------|--------------|
| M <sup>f</sup> . | ZAZI      | Nacer   | M.C.A en Génie Mécanique  | UMMTO | Président    |
| M <sup>f</sup> . | HAKEM     | Ahmed   | M.A.A. en Génie Mécanique | UMMTO | Rapporteur   |
| M <sup>me</sup>  | MOHELLEBI | Fadila  | M.A.A. en Génie Mécanique | UMMTO | Examinatrice |
| M <sup>f</sup> . | MOHELLEBI | Mouloud | M.A.B. en Génie Mécanique | UMMTO | Examineur    |

*Date de la soutenance : 30/09/2013*

**Année Universitaire: 2012/2013**

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

ⵍⵓⵎⵓⵔ ⵎⵎⵎⵉ ⵔⵉⵣⵉ ⵔⵓⵣⵓ



Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique



# Mémoire

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

## THEME

Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage Al-4%Cu trempé dans un fluide à 70% h<sub>2</sub>O et 30% d'huile soluble.

Proposé et dirigé par :  
**HAKEM Ahmed**

Présenté par:  
**LAZIZI Hakim**

**ANNEE: 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 ce modeste travail.*

*Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont ma apporté leurs conseils ou leur contribution.*

*Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à toute ma famille, qui m'a été la source d'assurance durant mon séjour à l'université.*

- *Mes chers parents.*
- *Mes sœurs.*
- *Mes frères.*
- *Tous mes amis.*
- *Tous les étudiants de la faculté génie de la construction et surtout a mes collègues de section C.M.F.M .*

*Hakim*

## ❖ Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure .I.1 :</b> Diagramme de phase Al-Cu entre 0 et 60 % massique d'élément cuivre.....  | 11 |
| <b>Figure .I.2 :</b> Microstructure d'un alliage Al- 4 % pds Cu obtenue, (a) par refroidissement lent (b) par refroidissement rapide..... | 11 |
| <b>Figure 1.3 :</b> Effet de l'écroutissage .....   | 13 |
| <b>Figure I.4:</b> Etapes de production de l'aluminium.....   | 16 |
| <b>Figure I.5. :</b> Schéma d'une électrolyse produit l'aluminium pur.....  | 17 |
| <b>Figure. I.6. :</b> Principe de laminage.....   | 20 |
| <b>Figure .I.7.</b> Exemple d'une Tôle d'aluminium produite par coulée continue .....   | 21 |
| <b>Figure I.8 :</b> Structure cristalline de l'aluminium a déférentes états des traitements thermiques.....                               | 27 |
| <b>Figure I.9. :</b> Diagramme des phases d'alliage Al-Cu entre 0 à 10% de masse de cuivre.....   | 27 |
| <b>Figure. I.10:</b> Les éprouvettes de traction .....  | 28 |
| <b>Figure : I.11</b> Dimension d'éprouvette de traction.....  | 29 |
| <b>Figure I.12 :</b> Schéma d'une éprouvette de traction et son évolution en cour d'essai.....  | 30 |
| <b>Figure I.13 :</b> Courbe contrainte déformation d'un matériau ductile.....   | 31 |
| <b>Figure I.14 :</b> Courbes de traction possibles.....   | 33 |
| <b>Figure I.15 :</b> Essai de dureté Brinell .....  | 35 |
| <b>Figure I.16 :</b> Principe de l'essai Vickers.....   | 36 |
| <b>Figure I.17</b> Principe l'essai Rockwell B (HRB) :.....   | 37 |
| <b>Figure I.18:</b> Courbe de traction montrant la ténacité.....  | 38 |
| <b>Figure .I.19:</b> Essai CHARPY.....  | 39 |
| <b>Figure I.20 :</b> Courbe de Wöhler.....  | 40 |
| <b>Figure : I.21.</b> Les défauts ponctuels.....  | 42 |
| <b>Figure I.22.</b> Figures défauts de frenkel et défauts de Schottky.....  | 43 |
| <b>Figure I.23</b> Comportement mécanique des matériaux.....  | 44 |
| <b>Figure .I.24 :</b> Lignes de dislocations enregistrées lors d'une charge appliquée sur un échantillon. ....                            | 45 |
| <b>Figure I.25.</b> Dislocations coin.....  | 45 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figure I.26 : Cristal parfait et les dislocations vis.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>Figure : I.27 : Micrographies optiques d'un acier inoxydable montrant les grains et les joints de grains constitutifs de l'alliage (à gauche) et Joints de grains (à droite) vus en MET (interface Aluminium/Aluminium en haut ; interface Aluminium/Germanium en bas).....</b> | <b>47</b> |
| <b>Figure : I.28 : les défauts d'empilements et les macles.....</b>  | <b>48</b> |
| <b>Figure : I.29 : Les précipités .....</b>  | <b>49</b> |
| <b>Figure I.30: Mécanismes de diffusion dans un cristal.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>Figure I.31 : Interdiffusion progressive de deux solides purs.....</b>  | <b>51</b> |
| <b>Figure II.1: Principes des machines de coulée continue .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>Figure .II.2: Scie mécanique .....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Figure .II.3 : Fraiseuse .....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Figure .II.4: Eprouvette finie .....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Figure .II.5: Four de trempe .....</b>  | <b>56</b> |
| <b>Figure II.6: Etuve utilisée.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>Figure II.7: Machine de traction .....</b>  | <b>57</b> |
| <b>Figure II.8: Eprouvettes subit un essai de traction.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>Figure II.9: Les Polisseuses .....</b>  | <b>58</b> |
| <b>Figure II.10: Duromètre .....</b>   | <b>59</b> |
| <b>Figure II.11: Microduromètre .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>Figure II.12: Microscope optique .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>Figure. II.13: Microscope électronique à balayage(MEB) .....</b>  | <b>60</b> |
| <b>Figure. II.14: Cycle Thermique .....</b>  | <b>63</b> |
| <b>Figure. II.15: Formes et dimensions d'éprouvette de traction .....</b>  | <b>64</b> |
| <b>Figure. II.16 : Echantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté.....</b>  | <b>64</b> |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure III.1:</b> Courbes de traction (contraints déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4% a l'état brut de coulée .....         | 69 |
| <b>Figure III .2 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état trempé LT.....           | 70 |
| <b>Figure III.3 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-150°C.....  | 71 |
| <b>Figure III.4 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-160°C.....  | 72 |
| <b>Figure III.5 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-170°C.....  | 73 |
| <b>Figure III.6 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-180°C.....  | 74 |
| <b>Figure III.7 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-190°C.....  | 75 |
| <b>Figure III.8 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-200°C.....  | 76 |
| <b>Figure III.9 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-160°C.....  | 77 |
| <b>Figure III.10 :</b> Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu lrv-160°C..... | 78 |
| <b>Figure. III.11 :</b> Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes, respectivement des états (BC, T, L-Rv150) °C. ....                        | 79 |
| <b>Figure. III.12 :</b> Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes des états (BC, T, L-Rv150) °C. ....                             | 79 |
| <b>Figure. III.13:</b> Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes, respectivement des états (L-Rv160, L-Rv170, L-Rv180) °C. ....               | 80 |
| <b>Figure. III.14 :</b> Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (L-Rv160, L-Rv170, L-Rv180) °C. ....             | 80 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure. III.15:</b> Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes, respectivement des états (L-Rv190, L-Rv200, L-Rv220) °C. ....            | 81 |
| <b>Figure. III.16 :</b> Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (L-Rv190, lrv200, L-Rv220) °C. ....           | 81 |
| <b>Figure. III.17:</b> Courbe de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes de l'état L-Rv240 °C. ....   | 82 |
| <b>Figure. III.18:</b> Courbe moyenne de traction (contrainte-déformation) pour la série de 5 éprouvettes de l'état L-Rv240 °C. ....  | 82 |
| <b>Figure III-19 :</b> Regroupement des courbes moyennes de traction (contraintes déformations) des 10 états considérés. ....   | 82 |
| <b>Figure III-20 :</b> Graphe, histogramme ( $\langle \sigma_e \rangle$ - la température de revenu) et secteur de la contrainte élastique moyenne de l'alliage Al-Cu 4%. .... | 84 |
| <b>Figure III-21 :</b> Graphe, histogramme, ( $\langle \sigma_m \rangle$ - la température de revenu) secteur de la contrainte maximale moyenne de l'alliage Al-Cu 4%. ....    | 85 |
| <b>Figure III-22 :</b> Graphe, histogramme, ( $\langle \sigma_r \rangle$ - la température de revenu) secteur de la contrainte maximale moyenne de l'alliage Al-Cu 4%. ....    | 86 |
| <b>Figure. III.23:</b> Graphe, histogramme ( $\langle n \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients d'écroutissage moyens des dix états. ....              | 87 |
| <b>Figure. III.24:</b> Graphe, histogramme ( $\langle E \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des modules d'Young E moyens des dix états considérés. ....             | 88 |
| <b>Figure III-25 :</b> Graphe, histogramme ( $\langle HB \rangle$ , température de revenu) de l'alliage Al-Cu 4%. Pour les dix états considérés. ....                         | 89 |
| <b>Figure. III.26:</b> Graphe, histogramme ( $\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) des microduretés moyennes des dix états de la Zone blanche. ....            | 90 |
| <b>Figure. III.27:</b> Graphe, histogramme ( $\langle Hv_{0,1} \rangle$ - Températures de revenu) des microduretés moyennes des dix états de la Zone noire. ....              | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure. III.28:</b> Graphe, histogramme ( $\langle Hv0, 1 \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états considérés. ....   | 91  |
| <b>Figure. III.29:</b> Graphe et histogramme des moyennes de la zone noire et la zone blanche des dix états considérés. ....  | 92  |
| <b>Figure. III.30:</b> Graphe, histogramme ( $\langle A\% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des allongements moyens des dix états. ....   | 93  |
| <b>Figure. III.31:</b> Graphe, histogramme ( $\langle Z\% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de striction moyens des dix états. ....  | 94  |
| <b>Figure. III.32:</b> Graphe, histogramme ( $\langle Zu\% \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des allongements de striction moyens des dix états. ....   | 95  |
| <b>Figure. III.33:</b> Graphe et histogramme des caractéristiques de ductilité ( $\langle A\% \rangle$ , $\langle Z\% \rangle$ et $\langle Zu\% \rangle$ - Températures de revenu) des 10 états considérés..... | 96  |
| <b>III. 34:</b> Graphe, histogramme ( $\langle V \rangle$ - Températures de revenu) et secteur des coefficients de poisson moyens des dix états. ....   | 97  |
| <b>Figure III.34 :</b> Microstructures obtenus par le microscope optique de l'alliage <b>2017A</b> pour l'état <b>BC</b> . ....   | 98  |
| <b>Figure III.35 :</b> Microstructures obtenus par le microscope optique de l'alliage <b>2017A</b> pour l'état <b>lrV-160°C</b> . ....  | 99  |
| <b>Figure III.36 :</b> Microstructures obtenus par le MEB de l'alliage <b>2017A</b> pour l'état <b>BC et lrV-160°C</b> .....  | 99  |
| <b>Figure III.37 :</b> Facies de rupture obtenus par le MEB de l'alliage <b>2017A</b> pour l'état <b>BC et LRV-160°C</b> .....  | 100 |





## ❖ Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau I.1</b> : Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium.....  | 2  |
| <b>Tableau I.2</b> : Influence des éléments d'adition principal .....   | 4  |
| <b>Tableau I.3</b> : Influence des éléments d'adition secondaires .....   | 4  |
| <b>Tableau I.4</b> : Désignation des états fondamentaux et leurs domaines d'application.....  | 7  |
| <b>Tableau I.5</b> : Composition chimique de l'alliage 2017A.....   | 18 |
| <b>Tableau I.6</b> : Influence des éléments d'adition.....  | 18 |
| <b>Tableau I.7</b> : types des défauts et leurs rôles.....  | 41 |
| <b>Tableau II.1</b> : Composition chimique de l'alliage étudié.....   | 61 |
| <b>Tableau.II.2</b> : composition chimique de réactif utilisé.....  | 67 |
| <b>Tableau III.1</b> : variation des caractéristiques mécaniques de l'alliage <b>Al-Cu a 4%</b> .<br>$\sigma_e$ : limite d'élasticité, $\sigma_m$ : résistance maximal, $\sigma_r$ : résistance a la rupture, ..... | 83 |
| <b>TableauIII.2</b> : valeurs moyennes de la dureté <b>HB</b> des dix états.....  | 89 |
| <b>Tableau III.3</b> : variation des caractéristiques de la microdureté Vickers :(< Hv0, 1 > : pour la Zone noire, zone blanche) de l'alliage 2017A pour les 10 états considérés. ....                              | 90 |
| <b>Tableau. III.4</b> : valeurs moyennes des caractéristiques de ductilité de l'alliage AlCu4%pour les différents états. ....   | 92 |
| <b>Tableau III.5</b> : valeurs moyennes Valeurs de coefficient de poisson de l'alliage AlCu4%<br>des dix états.....   | 96 |

## ❖ *Sommaire*

### **Introduction générale**

### **Partie I : Recherche bibliographique**

#### Chapitre I.1 : Aluminium et ses alliages

|   |   |
|---|---|
| I.1.1: HISTORIQUE :   | 1 |
| I.1.2. Propriétés de l'aluminium :  | 1 |
| I.1.2.1. Propriétés physiques :   | 1 |
| I.1.2.2 : Propriétés mécaniques :   | 2 |
| I.1.2.3 : <i>Propriétés chimiques</i> :   | 2 |
| I.1.2.4. <i>Propriétés de mise en forme</i> :   | 3 |
| I.1.3. Alliages d'aluminium   | 3 |
| I.1.4.1. Influence des éléments d'adition principal                                   | 4 |
| I.1.4.2 : Influence des éléments d'adition secondaires :                              | 4 |
| I.1.5. Classification des alliages d'aluminium  | 5 |
| I.1.5.1. Alliages sans durcissement structural  | 5 |
| I.1.5.2. Les alliages à durcissement structural :                                     | 5 |
| I.1.5.3. Les alliages corroyés :  | 6 |
| I.1.5.4. Les alliages de fonderies :  | 6 |
| I.1.5.5. Alliages obtenus par métallurgie des poudres                                 | 6 |
| I.1.5.6. Alliages de moulage :  | 6 |
| I.1.6.1: Symbolisation des états et domaines d'applications des alliages d'aluminium: | 7 |
| I.1.6.2 : Désignation normalisée des alliages d'aluminium:                            | 8 |
| I.1.7. Les alliages Aluminium Cuivre : se sont les alliages de la série (2000)        | 9 |
| Alliages pour structure à résistance mécanique élevée                                 | 9 |

|   |    |
|---|----|
| Alliage traditionnel 2014 .....   | 9  |
| Alliages pour décolletage .....   | 9  |
| Alliages pour déformation plastique : .....   | 10 |
| Alliages pour résistance chaud .....  | 10 |
| I.1.8.Diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu : .....                                | 10 |
| I.1.8.1.Microstructure d'un alliage de la série(2000) à 4% de masse de cuivre : ..... | 11 |
| I.1.8.2.Effet de l'écrouissage : .....  | 12 |
| I.1.9.Utilisation des alliages d'aluminium .....                                      | 13 |
| I.1.10.Recyclage des alliages d'aluminium : .....                                     | 14 |

## **Chapitre I.2 : Elaboration des alliages Al-Cu4%**

|  |    |
|--|----|
| Introduction : .....   | 15 |
| I.2.1 : Le minerai de l'aluminium : .....  | 15 |
| I.2.2: Extraction de l'alumine pure (oxyde d'aluminium) à partir de la bauxite : ..... | 16 |
| .2.3 : Le processus Hall-Héroult.....  | 16 |
| I.2.4 : L'alliage 2017A : .....  | 18 |
| I.2.4.1 : Composition chimique de l'alliage 2017A : .....                              | 18 |
| I.2.4.2 : Influence des éléments d'adition : .....                                     | 18 |
| I.2.4 : L'alliage 2017A : .....  | 19 |
| I.2.4.1 : Composition chimique de l'alliage 2017A : .....                              | 19 |
| I.2.4.2 : Influence des éléments d'adition : .....                                     | 19 |

## **Chapitre I.3 : Traitements thermiques**

|  |    |
|--|----|
| I.3:Traitements thermique des matériaux..... | 22 |
| I.3.1: Vieillessement thermique.....         | 22 |

|   |    |
|---|----|
| I.3.2: Vieillessement naturel.....                                      | 22 |
| I.3.3: Vieillessement artificiel.....                                   | 22 |
| <b>I.3: Traitements thermiques des matériaux</b>                        |    |
| <b>I.3.1: Vieillessement thermique.....</b>                             |    |
| thermique.....  | 23 |
| I.3.2: Vieillessement naturel.....                                      | 23 |
| I.3.3: Vieillessement artificiel.....                                   | 23 |
| I.3.4: Le recuit : .....  | 23 |
| I.3.5: Traitement thermiques des alliages d'aluminium : .....           | 23 |
| I.3.5. 1 : Les traitements d'homogénéisation : .....                    | 23 |
| I.3.5. 2 : Les traitements d'adoucissement : .....                      | 23 |
| I.3.5.3: Traitements de trempe structurale .....                        | 23 |
| Principe .....  | 23 |
| Mise en œuvre industrielle : .....                                      | 24 |
| a- Etape de mise en solution :  |    |
| b- Trempe : .....   | 24 |
| c- Revenu : .....   | 25 |
| I.3.6. 1 : Alliages de la série (2000) : .....                          | 25 |
| I.3.6. 2 : Processus de traitement thermique de l'alliage 2017A : ..... | 25 |
| ➤ Mise en solution : .....  | 25 |
| Refroidissement lent (recuit) : .....                                   | 26 |
| Trempe : .....  | 26 |
| ➤ Vieillessement artificiel .....                                       | 26 |

## **Chapitre I.4. Essais mécaniques**

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| Introduction.....               | 28 |
| I.4.1: Essai de traction :..... | 28 |

|  |    |
|--|----|
| I.4.1.1: Déformations des éprouvettes :.....                           | 28 |
| I.4.1.2: Courbe contrainte-déformation pour un matériau ductile :..... | 30 |
| I.4.1.3: Exploitation de la courbe :.....                              | 31 |
| I.4.1.4: Contraintes et déformations vraies : .....                    | 32 |
| I.4.2.1: Le taux d'écroutissage : .....                                | 32 |
| I.4.2: Ecrouissage : .....   | 32 |
| I.4.2.2: Le coefficient d'écroutissage $n$ :.....                      | 33 |
| I.4.3: Classification des matériaux :.....                             | 33 |
| 1 : matériaux fragile .....  | 33 |
| 2 : matériaux ductiles :.....  | 33 |
| 3 : élastomères :.....   | 33 |
| I.4.4: La dureté :.....  | 34 |
| I.4.4.1: Types d'essais : .....  | 34 |
| 1-Essai Brinell (NF EN 10003-1 à 3) :.....                             | 34 |
| 2-Essai de micro dureté Vickers :.....                                 | 35 |
| 3-Essai de dureté Rockwell .....                                       | 36 |
| ❖ Exécution de l'essai :.....  | 36 |
| a-Essai Rockwell C (HRC) :.....  | 37 |
| b-Essai Rockwell B (HRB) :.....  | 37 |
| I.4.5: Ductilité : .....   | 37 |
| I.4.6: Ténacité :.....   | 37 |
| I.4.7: Les essais de fissuration.....                                  | 38 |
| I.4.7.1: La résilience :.....  | 38 |
| I.4.7.3: Les essais de fatigue conventionnels : .....                  | 39 |
| I.4.7.2: La fatigue :.....   | 39 |
| 1-le domaine de la fatigue oligocyclique (ou fatigue plastique) :..... | 40 |

|  |    |
|--|----|
| 3- le domaine de l'endurance :                         | 40 |
| 2- le domaine de la fatigue à grand nombre de cycles : | 40 |

## Chapitre. I.5. Défauts cristallins

|  |    |
|--|----|
| Introduction :                                       | 41 |
| I.5.1 : Les Défauts Ponctuels :                      | 42 |
| I.5.1.1 : Les Lacunes.....                           | 42 |
| I.5.1.2 : Les Interstitiels.....                     | 42 |
| Concentration des Défauts Ponctuels.....             | 43 |
| ➤ Défauts de Frenkel et de Schottky :                | 43 |
| I.5.1.3 : Atomes en Substitution.....                | 43 |
| I.5.2 : Les défauts linéaires :                      | 44 |
| I.5.2.1 : Comportement mécaniques des matériaux :    | 44 |
| ❖ Historique :                                       | 44 |
| I.5.2.2: Dislocations coin.....                      | 45 |
| I.5.2.3: Interaction avec des défauts ponctuels..... | 46 |
| ❖ Mouvement des Dislocations.....                    | 46 |
| I.5.3.1:Les Joints de Grains.....                    | 47 |
| I.5.3: Les Défauts Bidimensionnels.....              | 47 |
| I.5.3.2:Les Défauts d'Empilement et les Macles :     | 48 |
| I.5.4:Les Défauts Tridimensionnels.....              | 48 |
| I.5.4.1:Les précipités :                             | 49 |
| Les précipités incohérents :                         | 49 |
| Les précipités cohérents :                           | 49 |
| I.5.4.2:Les inclusions :                             | 49 |
| I.5.5:La diffusion.....                              | 50 |
| I.5.5.1: Mécanisme lacunaire :                       | 50 |
| I.5.4.2:mécanisme interstitiel :                     | 50 |

|   |    |
|---|----|
| I.5.5.3:diffusion superficielle.....                      | 50 |
| I.5.5.4:diffusion dans un joint de grains.....            | 50 |
| I.5.6:Autodiffusion : .....                               | 50 |
| I.5.7:Lois de la diffusion.....                           | 51 |
| I.5.7.1:Etat stationnaire (première loi de Fick).....     | 51 |
| I.5.7.2:Etat non stationnaire (deuxième loi de Fick)..... | 52 |

## ❖ **Partie II : Expérimentale**

### **Chapitre. II.1 : Appareillage**

|  |    |
|--|----|
| Introduction : .....                                   | 53 |
| II.1 .1 :Transformationparcorroyage .....              | 53 |
| 1-la coulée continue : .....                           | 53 |
| 2- Transformation par laminage.....                    | 53 |
| II.1.2 : Le découpage .....                            | 54 |
| II.1.3: Le fraisage.....                               | 54 |
| II.1.4:Les traitements thermiques :.....               | 55 |
| 1 :Fourdetrempe :.....                                 | 55 |
| 2 :Four de revenu.....                                 | 56 |
| I.1.5.La Machine de traction.....                      | 57 |
| II.1.6 :Examensmicroscopiques :.....                   | 57 |
| II.1.6.1 :Lespolisseuses :.....                        | 57 |
| II.1.6.2 :Le microscope optique :.....                 | 58 |
| II.1.6.3 : Microscope électronique abalayage(MEB)..... | 59 |
| II.1.7 : Mesure de la dureté : .....                   | 59 |
| L'essai de dureté : .....                              | 59 |
| L'essai de microdureté .....                           | 60 |

## **Chapitre II. 2. Matériaux et modes opératoires**

|   |           |
|---|-----------|
| II.2.1 :Le mode d'élaboration .....                                     | 61        |
| <b>II.2.2 :: Analyse chimique sur le matériau étudié : .....</b>        | <b>61</b> |
| II.2.3 :Techniques d'élaboration de matériau d'étude : .....            | 61        |
| II.2.3.1 : Elaboration par corroyage : .....                            | 61        |
| II.2.3.2 : Prélèvement et usinage des éprouvettes : .....               | 62        |
| II.2.4 :.Traitements thermiques : .....                                 | 63        |
| II.2.4 .1:Traitement d'homogénéisation : .....                          | 63        |
| II.2.4 .2: Traitement de trempe : .....                                 | 63        |
| II.2.4 .3: Traitement de vieillissement naturel : .....                 | 63        |
| II.2.4 .4: Traitement de revenu : .....                                 | 63        |
| II.2.5:Cycle thermique effectué pour l'alliage AL-Cu a 4% de Cu : ..... | 64        |
| II.2.6:Essais mécaniques : .....  | 65        |
| II.2.6.1:Essais de traction : .....                                     | 65        |
| II.2.6.2:Essai de dureté et de microdureté : .....                      | 65        |
| II.2.7: Observation microscopique.....                                  | 63        |
| II.2.7.1: Polissage.....  | 66        |
| II.2.7.2:Pré - polissage.....   | 66        |
| II.2.7.3: Polissage de finition.....                                    | 66        |
| II.2.7.4:Attaque chimique.....  | 67        |
| II.2.7.5:Microscopie : .....  | 67        |

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

|                      |    |
|----------------------|----|
| Introduction : ..... | 68 |
|----------------------|----|

|   |     |
|---|-----|
| III.1.1.Caractéristiques de traction : .....  | 68  |
| III.1.2.1 :Caractéristiques de résistance : .....   | 84  |
| III.1.2.2 :Effets des traitements thermiques sur les caractéristiques de dureté HB et la<br>microdureté HV0, 1: ..... | 89  |
| III.1.3 :CARACTERISTIQUES DE DUCTILITE : .....  | 92  |
| III.1.3.1 :Allongement a la rupture A(%) : .....  | 93  |
| III.1.3.2 :Coefficient de striction Z(%) : .....  | 94  |
| III.1.3.3 :Allongement a la striction .....   | 95  |
| III.1.3.4 :Coefficient de poisson $\nu$ : .....   | 96  |
| III.1.4 :Effet des traitements thermiques sur l'évolution de la microstructure de l'alliage<br>Al-Cu 4% : .....       | 98  |
| III.1.4.1 :Analyse et interprétation de la microstructure : .....   | 100 |
| ➤ Etat brut .....   | 100 |
| ➤ Etat homogénéisé et trempé : .....  | 100 |
| ➤ Etat de revenu : .....  | 100 |
| ➤ Observation par le MEB : .....  | 101 |
| III.1.5 :Résultats et discussion : .....  | 101 |
| III.1.6 :Effet des traitements thermiques : .....   | 101 |
| Conclusion générale .....   | 104 |

### Nomenclature des symboles utilisés

$M$  : Masse atomique ;

$L_0$  : longueur initiale (mm) ;

$S_0$  : section initiale (mm<sup>2</sup>) ;

$F$  : Effort de traction(N) ;

$R_m$  : Resistance à la rupture ;

$R_e$  : Resistance à la limite d'élasticité ;

$A\%$  : Allongement à la rupture ;

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

$Z\%$  : Coefficient de striction ;

$Z_u\%$  : Allongement de striction ;

$\sigma$  : Contrainte ;

$E$  : Module de Young ;

$\varepsilon$  : Déformation ;

$K$  : Constante ;

$K_{CV}$  : résilience ;

$HB$  : Dureté brinell ;

$HV$  : Dureté Vickers ;

$D$  : Diamètre de la bille en millimètres ;

$d$  : Diamètre de l'empreinte en millimètre ;

$HR$  : Dureté Rockwell ;

$HRB$  : Dureté Rockwell à bille ;

$HRC$  : Dureté Rockwell cône diamante ;

$T$  : La température en C ;

$K_{cv}$  : La résilience

## Introduction générale

Depuis sa naissance en 1854, l'aluminium a connu un développement spectaculaire, qui fait qu'aujourd'hui, il présente l'un des matériaux le plus utilisé dans différents secteurs tels que l'industrie automobile, emballage et spatiale.

Un tel développement repose bien évidemment sur ses remarquables propriétés de ductilité, de légèreté et de résistance mécanique, qui ont fait consolider sa position de second après l'acier dans tous les domaines d'application.

L'élaboration et la caractérisation d'un matériau est d'un grand intérêt technologique et pratique. Avant de l'utiliser dans une application donnée, il est nécessaire d'entreprendre une étude préalable de ses propriétés qui devront répondre à son bon fonctionnement dans diverses réalisations afin de l'exploiter rationnellement et éviter, dans certains cas, des catastrophes conduisant à de graves conséquences.

Parmi ces matériaux, on retrouve en premier les alliages d'aluminium de corroyage de la classe Al-Cu qui font l'objet de notre travail. En raison de nombreux avantages qu'ils présentent, leurs utilisations ont connu ces dernières années une expansion très importante en particulier dans les secteurs de haute technologie comme l'aéronautique ou l'industrie spatiale. Dans cette présente étude, nous nous sommes intéressés à l'influence de la variation de la température de revenu sur les caractéristiques mécaniques de traction, de dureté Brinell, de microdureté et de la modification de leurs microstructures en considérant 10 états différents : brut de coulée noté F, état trempé noté T et 8 états de revenu avec un incrément de la température de revenu de 10°C à 20°C de (150,160,170,180 ;190,200,220 et 240)°C. En utilisant comme nuance d'étude un alliage de corroyage de la série 2000 qui est le **2017A** et comme fluide de trempage un lubrifiant constitué de (70 % H<sub>2</sub>O + 30 % d'huile soluble).

Ce mémoire se scinde en trois parties :

**La première partie** présente une synthèse bibliographique concernant l'aluminium et ses alliages en général, les alliages de la série 2000, en particulier l'alliage 2017A en spécifiant dans : Le premier chapitre leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques, leurs désignations et la microstructure. Le chapitre II est consacré aux différentes techniques d'élaboration des alliages aluminium cuivre. Le troisième chapitre traite les traitements thermiques en spécifiant le traitement de trempage structurelle des alliages de la série 2000. Les essais mécaniques feront l'objet de IV<sup>ème</sup> chapitre. Enfin le V<sup>ème</sup> chapitre est consacré respectivement aux défauts cristallins et la diffusion.

**La deuxième partie** est consacrée aux techniques et procédures expérimentaux utilisés comme premier chapitre, Matériaux et modes opératoires feront l'objet du 2<sup>ème</sup> chapitre.

**La troisième partie** est consacrée aux résultats expérimentaux obtenus ainsi que Leur interprétation.

Enfin, ce travail sera achevé par une conclusion générale et les perspectives.

## Chapitre I.1 Aluminium et ses alliages

**I.1.1: 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 de potassium.

Le chimiste allemand *Friedrich WOHLER* améliora le procédé d'*OERSTED* en utilisant le potassium

Métallique entre 1827 et 1845. En France *Henri SAINTE CLAUDE DEVILLE* obtient le métal en réduisant chlorure d'aluminium avec le sodium (métal) en 1854. Soutenu par *NAPOLIUN III*, il créa un atelier expérimental et présenta les premiers lingots d'aluminium pur à l'Exposition universel de *Paris*, en 1855. Depuis cette année l'aluminium pur a connu un développement spectaculaire. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ces alliages se produit en 1886 avec l'invention de du procédé d'électrolyse de l'aluminium par *Paul HEROULT* en France *Charles MARTIN HAUL* aux *Etats-Unis*. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux en tonnage et arrive en seconde position les métaux ferreux. . L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. [1,2]

### **I.1.2. Propriétés de l'aluminium :**

#### **I.1.2.1. Propriétés physiques :**

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

Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité  $2.7\text{ g/cm}^3$  à température ambiante. Cette densité ne varie pas de façon sensible dans les alliages légers, elle reste toujours inférieure à  $3\text{ g/cm}^3$ . Sa conductibilité thermique est de  $0.57\text{ cal/cm.s.C}^\circ$  et sa conductibilité électrique est élevée ( $2.6548\text{ ohm. mm}^2/\text{m}$ ).[1.2.3].

**I.1.2.2 : Propriétés mécaniques :**

- **Résistance à la traction :** Les propriétés mécaniques d'aluminium non allié recuit sont très limitées, il est moins rigide que les aciers. Son module de Young est de l'ordre de 65 000 à 70 000 MPa (comparé à celui des aciers de construction qui est égal à 210 000 MPa). L'allongement à la rupture varie de 23 à 43%, les caractéristiques de traction dépendent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique (recuit, écroui ou trempé). Malgré que les éléments d'addition offrent à l'aluminium non allié recuit une multitude de propriétés, mais la plus part d'eux n'influent pas sur le module de Young, du fait que leurs masses ne dépassent pas 8% du composé.
- **Coefficient de Poisson :** Le coefficient de Poisson des alliages d'aluminium varie de 0,33 à 0,35. Généralement on prend la valeur de 0,35 [1].

Les principales caractéristiques retenues sont regroupées dans le tableau I.1.

**Tableau I.1 :** Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium

| Propriété                                   | Valeur                   |
|---|--------------------------|
| Module d'élasticité                         | 70000 MPa                |
| Module de cisaillement (Coulomb)            | 27000 MPa                |
| Coefficient de Poisson $\nu$                | 0,35                     |
| Masse volumique $\rho$                      | 2700 Kg. m <sup>-3</sup> |
| Coefficient de dilatation linéique $\alpha$ | 2700 Kg. m <sup>-3</sup> |

**I.1.2.3 : Propriétés chimiques :**

L'aluminium est fortement oxydable, grâce à la couche d'alumine ( $Al_2O_3$ ) qui se forme à la surface, l'aluminium et ses alliages résistent relativement bien à la corrosion. Cette couche se caractérise par sa compacité et sa réfraction. On peut d'ailleurs rendre cette couche plus épaisse par anodisation pour résister aux attaques violentes des bases, l'aluminium et ses alliages peuvent être utilisés comme revêtements extérieur de bâtiments. En pratique, le comportement de l'aluminium dépend donc des propriétés du film d'oxyde qui le recouvre.

Les cas de mauvaise résistance de l'aluminium à la corrosion sont souvent liés à une modification du degré de porosité du film d'oxyde. De plus, l'aluminium présente une sensibilité à la corrosion localisée, comme par exemple la corrosion par piqûres. Ce type de corrosion conduit à la rupture du film passif. [1]

#### **I.1.2.4. Propriétés de mise en forme : [1]**

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

**I.1 .3. Alliages d'aluminium:** Les propriétés mécaniques de l'aluminium pur sont relativement faibles, ce qui nous mène à éviter son emploi pour certaines applications. Ces propriétés peuvent être notablement augmentées par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages.

**a) Additions principales (éléments d'alliages) :** Elles sont déterminantes pour les propriétés de résistance, elles conditionnent de plus l'appartenance aux différents groupes d'alliages. Parmi ces additions on peut citer : le cuivre, silicium, magnésium et le manganèse.

**b) Additions secondaires (éléments d'aditions) :** Ce sont différentes métaux rajoutés dans certains alliages en faible quantité (moins de 1%), pour obtenir des propriétés particulières ou spécifiques mais sans changer le groupe d'appartenance. Parmi ces additions : le fer, chrome, zirconium, nickel, strontium, cobalt, plomb, bismuth, cadmium, titane, l'antimoine, l'étain, béryllium et le bore.

**I.1.4.1. Influence des éléments d'addition principal :** Ils sont résumés dans le tableau I.2 suivant : [5]

| Elément | Avantage   | Inconvénient   |
|---------|--|--|
| Cu      | Caractéristique mécaniques<br>Tenue à chaud et au fluage<br>Facilite l'usinage | Resistance a la corrosion<br>Soudabilité<br>Conductivité électrique  |
| Mn      | Aptitude a la déformation<br>Résistance a la corrosion<br>Aptitude au brasage  |  |
| Si      | Coulabilité  | Usinabilité (usure des outils)<br>Coefficient de dilatation linéaire |
| Mg      | Caractéristiques mécaniques<br>Resistance a la corrosion<br>Soudabilité        | Déformation a chaud  |
| Mg+Si   | Caractéristiques mécaniques<br>Déformation a chaud                             |  |
| Zn+Mg   | Caractéristiques mécaniques<br>Usinabilité                                     | Resistance a la corrosion<br>Soudabilité                             |

**I.1.4.2 : Influence des éléments d'addition secondaires :** Ils sont résumés dans le tableau I.3 suivant : [5]

| Elément | Avantage  | Inconvénient |
|---------|---|--------------|
| Mn      | Soudabilité des alliages Al-Mg                          |              |
| Cr      | Diminue la criquabilité au soudage<br>Taille de grain   | Trempabilité |
| Pb, Bi  | Coulabilité, usinabilité                                |              |
| Ni      | Caractéristiques a chaud et fluage                      |              |
| Ti      | Affinage de la structure coulée                         |              |
| Zr      | Taille de grain   |              |
| Li      | Densité plus faible des alliages<br>Module d'élasticité |              |
| Sn      | Usinabilité, Antifriction                               |              |

**I.1.5. Classification des alliages d'aluminium: [4]**

Les alliages d'aluminium sont classés de plusieurs manières :

- Alliages à durcissement structural et alliages sans durcissement structural
- Alliages de corroyages, alliages de fonderies et alliages de obtenus par métallurgie de poudre.
- Classification suivant la nature de l'élément d'addition principale
- Classification suivant le domaine d'utilisation.

**I.1.5.1. Alliages sans durcissement structural :**

Ce sont des alliages non trempant, le niveau de caractéristiques mécaniques dépend du taux d'écrouissage ou de la teneur en addition c.-à-d par l'effet combiné des éléments d'addition (durcissement par solution solide) et de l'écrouissage. Si on combinant l'effet de durcissement par écrouissage et l'effet d'adoucissement par traitement de restauration ou de recuit on obtient pour chaque alliage une plage étendue de dureté allant de l'état recuit O à plasticité maximale et résistance mécanique minimale jusqu'à l'état extra-dur H19 à résistance maximale mais plasticité minimale. Ils sont utilisés pour remplacer l'aluminium non allié toutes fois qu'une légère augmentation des caractéristiques mécaniques est nécessaire, ils font preuve d'une excellente tenue à en atmosphère humide et marine. Ils regroupent les séries suivantes :

- Série 1000 : Aluminium pur
- Série 3000 : Alliages aluminium –manganèse
- Série 5000 : Alliage aluminium- magnésium

**I.1.5.2. Les alliages à durcissement structural :**

Ce sont des alliages non trempant, leur durcissement structural est dû à des transformations métallurgiques à la suite des traitements thermiques de mise en solution, de trempe et de revenu, aboutissant à la précipitation à l'intérieur des grains ou aux joints de grains de précipités de phase durcissant. Ils regroupent les séries suivantes :

- Série 2000 : Alliage aluminium –cuivre
- Série 4000 : Alliage aluminium –silicium
- Série 6000 : Alliage aluminium –magnésium-silicium

- Série 7000 : Alliage : aluminium –zinc –magnésium (soit avec cuivre ou sans cuivre)

### **I.1.5.3. Les alliages corroyés : [6]**

Le corroyage est une déformation à chaud. Après la coulée de ces alliages en plaques ou billettes, ils subissent une transformation à chaud par laminage, filage, forgeage...etc. 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.

### **I.1.5.4. Les alliages de fonderies :**

Les alliages prévus pour le moulage 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. Ce dernier se forme dans de nombreux alliages dont la teneur en éléments d'additions est supérieure à la solubilité limitée dans l'aluminium. C'est ce qui détermine la teneur en éléments plus élevée dans les alliages de fonderie que dans les alliages croyables.

### **I.1.5.5. Alliages obtenus par métallurgie des poudres: [1.3]**

La métallurgie des poudres présente pour l'aluminium un grand avantage par rapport à la métallurgie traditionnelle. Du fait de la grande vitesse de refroidissement des particules lors de la solidification, il est possible d'augmenter très fortement le choix et la quantité des éléments d'addition, tout en obtenant une microstructure particulièrement fine et homogène et donc très favorable pour les propriétés.

### **I.1.5.6. Alliages de moulage :**

Les alliages de moulage sont ceux utilisés en fonderie pour la fabrication de pièces obtenues par coulée, parmi ces alliages, les alliages au silicium sont les plus nombreux en quantité et en application.

Mais leurs résistances à la corrosion dépendent à l'addition du cuivre. Si cette addition est forte, la résistance à la corrosion sera faible. Ils ne subissent donc pas de

déformation importante mais présentent d'autres qualités comme la bonne coulabilité, faible retrait à la solidification. Les alliages de moulage sont désignés sous forme alphanumérique suivant la norme **AFNOR NF 02-004** dans lesquelles les lettres qui suivent le A correspondent aux éléments d'additions :

- U pour le cuivre
- S pour le silicium
- Z pour le zinc
- M pour le manganèse
- G pour le magnésium
- T pour le titane...etc.

### **I.1.6.1: Symbolisation des états et domaines d'applications des alliages d'aluminium: [6]**

L'aluminium et ces alliages couvrent un domaine étendu de caractéristiques mécaniques, ses caractéristiques sont obtenues non seulement en agissant sur la composition des alliages d'une part et en effectuant des traitements thermiques d'autres part. Pour effectuer un quelconque traitement, il faut connaître les états fondamentaux de ces alliages qui sont cinq, symbolisés par des lettres comme il indique le tableau I.3, selon la norme :

NF A 02-006.

**Tableau I.4** : Désignation des états fondamentaux et leurs domaines d'application.

| <b>Symbole</b> | <b>Domaine d'applications</b>  |
|----------------|--|
| <b>F</b>       | Produits transformés sur lesquels aucun traitement chimique ou écrouissage n'est effectué.   |
| <b>O</b>       | -Alliages de corroyage recuits pour obtenir l'état le plus doux -Alliages de fonderie pour améliorer leurs ductilités et leurs stabilités dimensionnelles.       |
| <b>W</b>       | Seulement aux alliages qui vieillissent à la T° de la pièce. Une des rares applications de cet état concerne les rivets utilisés dans l'industrie de l'aviation. |
| <b>T</b>       | Alliages traités thermiquement avec ou sans écrouissage supplémentaire pour produire des états stables.  |
| <b>H</b>       | Produits à propriétés mécaniques augmentées par écrouissage avec ou sans traitement thermique visant à réduire leurs résistances mécaniques.                     |

Les états H et T comportent des subdivisions :

Subdivision de l'état H (H1X, H2X, H3X) :

Sont décrites au moins par deux chiffres : le premier indique le traitement par écrouissage et le second l'état de dureté de l'alliage L'état H est toujours désigné par deux chiffres, le second qui est 2, 4, 6, 8 ou 9 correspond à la nuance de dureté du métal. Les principaux états possibles sont : -Nuance 1/4-dur : H12 –H22 –H32

- Nuance 1/2-dur : H14 –H24 –H34

- Nuance 3/4-dur : H16 –H26 –H36

- Nuance dur : H18–H28 –H38

- Nuance extra-dur : H19 –H29 –H39

-L'état T comporte certains états particuliers, sont désigné par deux, trois et même quatre chiffres : Exemple : T51- T61-T 351-T6651.

### I.1.6.2 : Désignation normalisée des alliages d'aluminium:

Les normes NF 02-104 et NF A 02-004 définissent deux systèmes de désignation des alliages d'aluminium qui tous deux font référence à la composition chimique :

Un système numérique et un système alphanumérique.

- ❖ **Le système numérique** : Il met en jeu un code à 04 chiffres et fait référence à la composition. Il est utilisé surtout pour les alliages d'aluminium de corroyages (NF 02-104).
- **Le premier chiffre** : Allant de (0 jusqu'à 9), il indique la série ou le groupe d'appartenance, le chiffre (1) pour l'aluminium pur, le chiffre (8) pour des alliages spéciaux et les chiffre (0 et 9) sont réservés à l'usage privé des producteurs d'aluminium.
- **Le second chiffre** : Dans le groupe 1 : Il identifie des variantes ou impuretés. Dans les groupes 2 à 8 : Il est réservé aux modifications successives de l'alliage
- **Les deux derniers chiffres** : Dans le groupe 1 : Ils indiquent le (%) en aluminium au-delà de 99,00%. Dans les groupes 2 à 8 : Ils servent seulement à identifier l'alliage.
- ❖ **Le système Alphanumérique** :

Il permet de distinguer l'aluminium non allié et les alliages d'aluminium. Il est utilisé surtout pour les alliages de moulage (NF A 02-004).

Exemple (A-S13) -Les lettres suivent le A correspondent aux éléments d'additions.

- Ces lettres sont suivies de l'indication numérique de la teneur de l'élément d'addition si celle-ci dépasse 1%.

### **I.1.7. Les alliages Aluminium / Cuivre : se sont les alliages de la série (2000) : [7]**

Les alliages de la série 2000, à durcissement structural, forment une gamme importante d'alliages se caractérisant par :

- une résistance mécanique moyenne à l'état trempé mûri mais relativement élevée à l'état trempé revenu ;
- une bonne tenue à chaud ;
- une aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels ;
- une résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive.

#### **a) Alliages pour structure à résistance mécanique élevée : [7]**

L'alliage **2017A**, 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, dans les domaines les plus variés

#### **b) Alliage traditionnel 2014 :**

A des applications importantes dans les domaines de l'armement (chars, missiles, obus...), de la mécanique (poutrelles), de l'aéronautique [structure des avions militaires (Mirage, Jaguar)] (article Aluminium et alliages d'aluminium corroyés : propriétés métalliques [M 438] pour la tenue à chaud).

#### **c) Alliages pour décolletage**

Ces alliages, grâce à la présence d'éléments tels que le plomb et le bismuth, donnent des copeaux courts à l'usinage permettant le décolletage à grande vitesse sur tours automatiques.

#### **▪ L'alliage 2030 :**

Peut être considéré comme un alliage 2017A avec addition de 0,8 à 1,5 % de plomb. Fabriqué uniquement sous forme de barres ou tubes filés (état T4) ou filés étirés (état T3), il est très utilisé en France et en Europe. La bonne aptitude à l'anodisation permet une protection efficace contre la corrosion, de bonnes qualités de frottement et, éventuellement, la décoration par coloration.

▪ L'alliage **2011** :

Surtout utilisé aux États-Unis, voit ses applications grandir en Europe. Son aptitude à la déformation à chaud, très supérieure à celle de l'alliage précédent, permet son obtention non seulement sous forme de produits filés mais également sous forme de pièces matricées. De plus, il peut être utilisé à l'état mûri (T3, T4) mais aussi revenu (T6, T8).

**d) Alliages pour déformation plastique :**

Ces alliages ont une composition spécialement adaptée (en particulier teneurs en cuivre et magnésium diminuées) de façon à présenter une bonne aptitude à la mise en forme à la température ambiante à l'état T4. On peut citer dans cette famille les alliages (2117A et l'alliage 2002).

**e) Alliages pour résistance à chaud :**

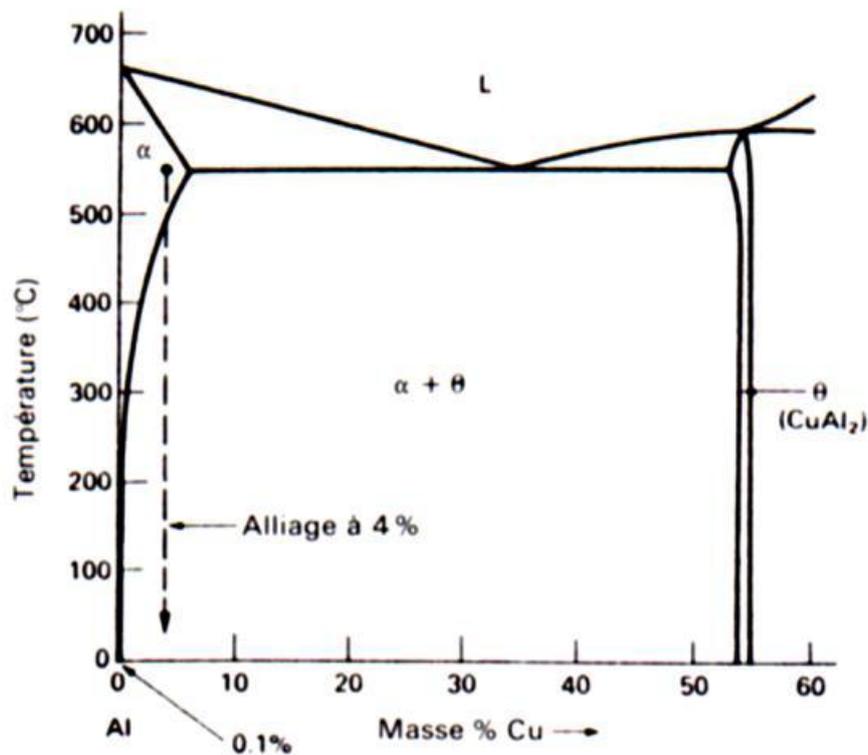
En peut citer les alliages : 2618, 2219 et 2419 : ils sont caractériser par :

- une bonne résistance au fluage de 110 à 150 °c
- une bonne stabilité thermique des caractéristiques mécaniques
- un bon comportement aux basses températures
- une aptitude au soudage

**I.1.8. Diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu : [8]**

Le diagramme de phases Al-Cu est donné Figure suivante. Il nous indique qu'entre 500 et 580°C, l'alliage Al-4%Cu est monophasé : le cuivre fait dans l'aluminium une solution solide désordonnée de substitution.

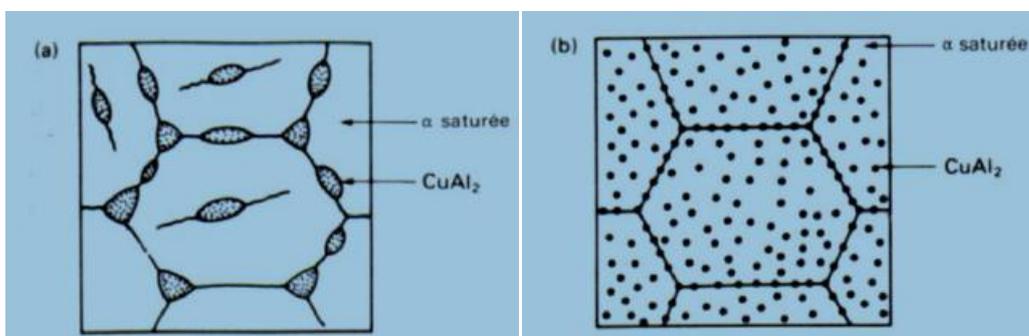
En dessous de 500°C l'alliage devient biphasé  $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ . Au fur et à mesure que la température diminue, la proportion de  $\text{Al}_2\text{Cu}$  augmente. A la température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de phase  $\alpha$  et de 7% de  $\text{Al}_2\text{Cu}$ .



**Figure 1.1:** Diagramme d'équilibre d'un alliage Al-Cu entre 0% et 60% de masse de cuivre

### I.1.8.1. Microstructure d'un alliage de la série(2000) à 4% de masse de cuivre : [8]

Dans le cas d'un refroidissement lent, les précipités sont grossiers et très espacés. Dans le cas d'un refroidissement rapide, ils sont fins et très rapprochés, Figure suivante :



**Figure 1.2 :** Microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement lent à partir de 550°C. b) par refroidissement rapide à partir de 550°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  $Al_2Cu$ , 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.1.8.2.Effet de l'écrouissage : [9]**

L'écrouissage, classé à juste titre comme un travail à froid, se fait à basse température. Son effet est d'appliquer et de déformer les grains dans le sens de laminage. Il en résulte que lorsqu'on applique des contraintes à la plaque écrouie, le glissement des plans d'atomes est entravé par la présence des défauts générés et il faut plus d'énergie pour déformer la plaque, une fois écrouie. Les limites élastiques et ultimes augmentent, de même que la résistance à la déformation, mais la ductilité diminue. La pièce est donc plus rigide. **La figure I.3** illustre le procédé d'écrouissage d'une pièce d'aluminium pur de l'état recuit 1100-O à l'état écroui dur, c'est-à-dire écroui à 75%. L'écrouissage permet donc d'augmenter la limite élastique et les caractéristiques mécaniques d'une manière très remarquable.

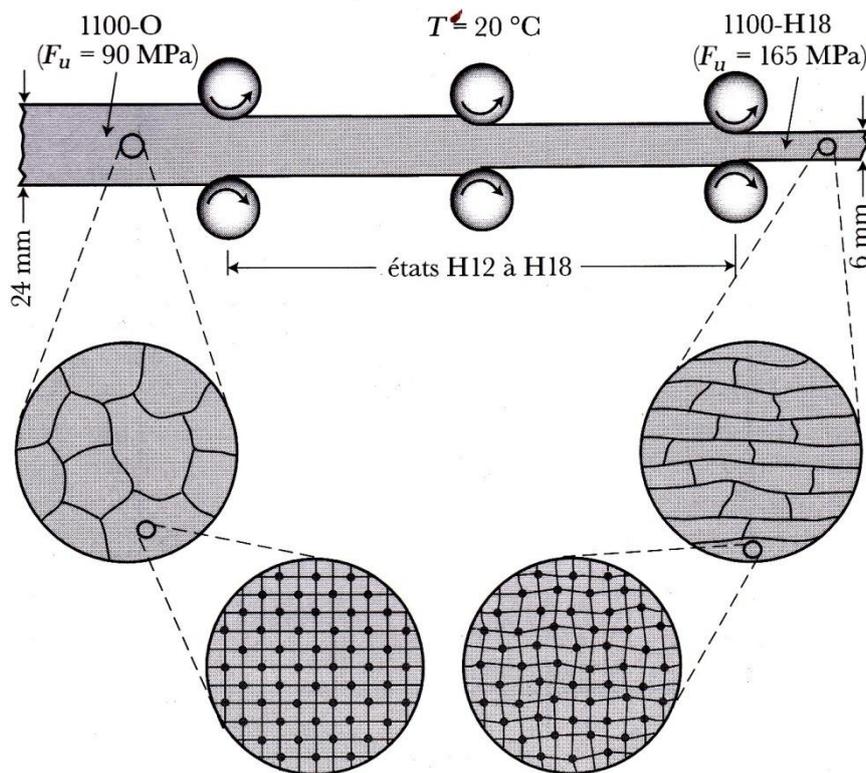


Figure 1.3 : Effet de l'écrouissage

### I.1.9. Utilisation des alliages d'aluminium : [10]

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.

**I.1.10. Recyclage des alliages d'aluminium : [10]**

Il n'y a guère d'autre métal non ferreux qui soit si facile à recycler que l'aluminium. Grâce à ses propriétés physiques et chimiques, il aide surtout à réduire la consommation d'énergie.

L'aluminium est l'un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique.

La ré-fusion de l'aluminium ne présente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai.

L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des (vieux métaux) montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles

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.

## Chapitre I.2 : Elaboration des alliages aluminium - cuivre

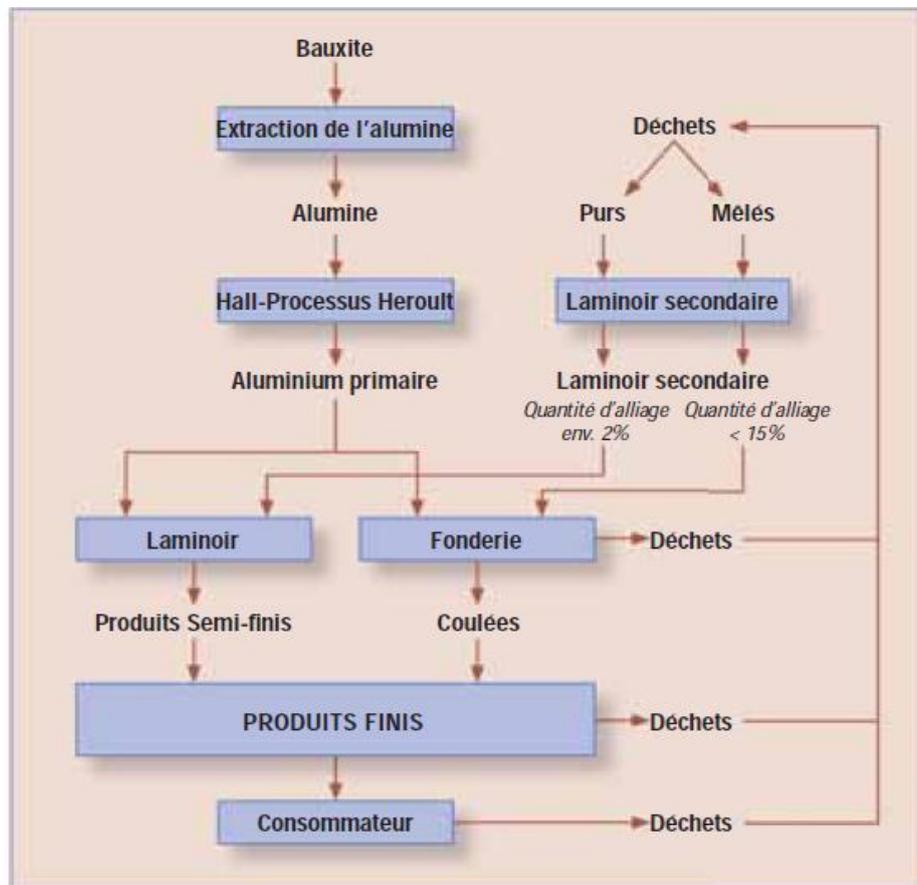
**Introduction :** Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, l'aluminium est peu à peu devenu l'un des principaux métaux industriels. Des produits de haute technologie aux canettes de boissons, l'aéronautique, l'automobile etc. il s'en consomme plus de 30 millions de tonnes par an dans le monde.

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

### I.2.1 : Le minerai de l'aluminium : [11,12]

La production au niveau industriel de l'aluminium commence à partir de la bauxite, celle-ci se présente sous forme de poudre, granules, roche ou d'argile, et peut être de couleur crème, rouge, brune, jaune ou grise. Elle contient entre 45 et 60% en poids d'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) appelé alumine.

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



**Figure I.4:** Etapes de production de l'aluminium

### I.2.2: Extraction de l'alumine pure (oxyde d'aluminium) à partir de la bauxite : [13]

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

### I.2.3 : Le processus Hall-Héroult: transformer l'alumine en aluminium.

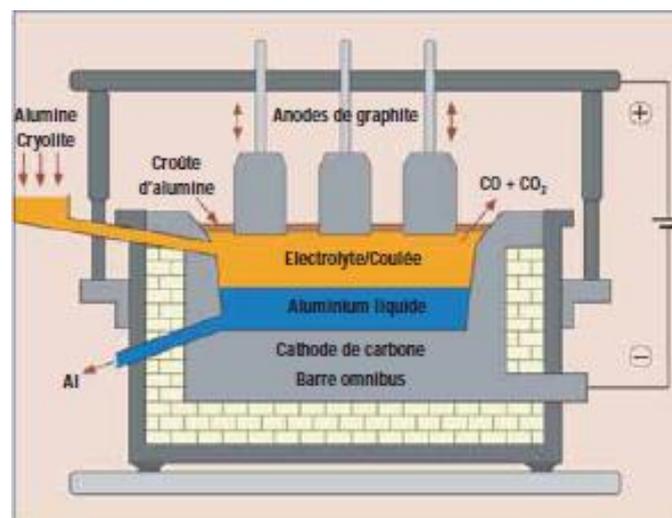
L'obtention de l'alumine pure nécessite un processus électrochimique qui permettra d'extraire l'aluminium de son oxyde.

Comme le point de fusion de l'oxyde d'aluminium est très élevé, 2050°C, il est mélangé à de la cryolite qui réduit le point de fusion à 950°C. De plus, la cryolite fait augmenter la conductivité et en conséquence, l'apport d'électricité.

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



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



**Figure I.5:** schéma d'une électrolyse produite 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.

#### I.2.4 : L'alliage 2017A : [12]

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.2.4.1 : 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.5 :** Composition chimique de l'alliage 2017A

##### I.2.4.2 : Influence des éléments d'addition : ils sont classés dans le **tableau. I.6** suivant :

| Élément d'alliage | Son rôle   |
|-------------------|--|
| <b>Cu</b>         | Résistance mécanique moyenne à l'état trempé mûri mais relativement élevée à l'état trempé revenu.<br>Bonne tenue à chaud.<br>Aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels.<br>Résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive. relativement élevée à l'état trempé revenu |
| <b>Si</b>         | Coulabilité  |
| <b>Fe</b>         | Diminue les retassures internes  |
| <b>Mn</b>         | Aptitude à la déformation<br>Résistance à la corrosion,<br>Aptitude au brasage et soudage  |
| <b>Mg</b>         | Caractéristiques mécaniques élevées<br>Résistance à la corrosion, Soudabilité  |
| <b>Cr</b>         | soudabilité et taille de grain moyenne   |

**Tableau. I.6 :** Influence des éléments d'addition

**I.2.5 : Elaboration et préparation de l'alliage 2017A : [12]**

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 avec unes grandes précision 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.

**I.2.5.1 : 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 connus 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.

**I.2.5 .2: Principe de laminage : [14,15]**

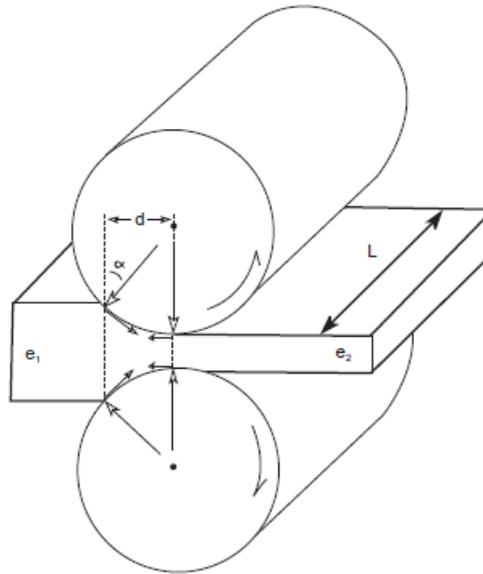
Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme le métal, alliages ou tout autre matériau sous forme pâteuse. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés, appelés *rouleaux*.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

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

Il existe de nombreux types de laminoirs :

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

La figure suivante illustre le procédé de laminage où une tôle est engagée entre les deux cylindres tournant en sens inverse. La tôle d'épaisseur  $e_1$  doit pouvoir s'engager entre les cylindres où elle sera déformée en compression pour ressortir à une épaisseur  $e_2$  correspondant à l'ajustement du jeu entre les cylindres.



**Figure I.6.**Principe de laminage [14]

**Note :**

Dans notre cas les barres d'aluminium sont très longues, elles sont de longueur 6m, et de diamètre 55 mm. On utilise alors un type de laminage un peu compliqué qui demande des laminoirs spéciaux utilisés généralement dans l'industrie pour obtenir des barres longues à formes cylindriques. C'est le laminage à produits longs, ou laminage par coulée continue. Le schéma suivant illustre le procédé de laminage par coulée continue.

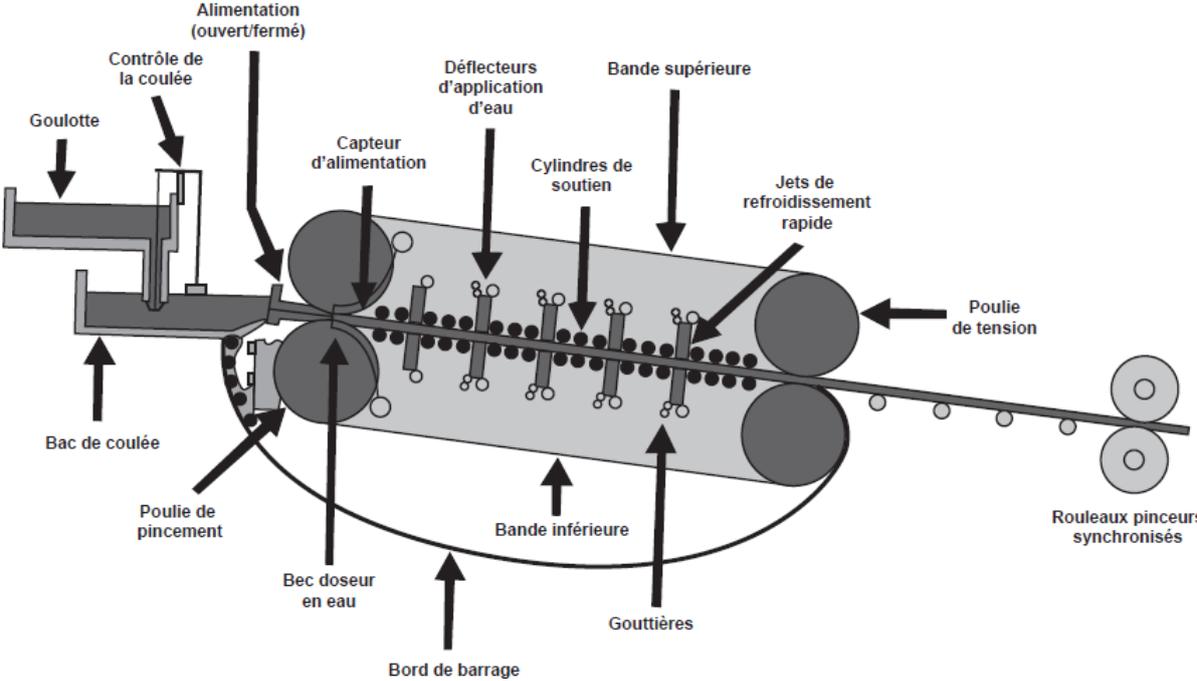


Figure I.7 : Tôle d'aluminium produite par coulée continue

## Chapitre I.3 : Traitements thermiques

### I.3: Traitements thermiques des matériaux :[15].

Les traitements thermiques ont pour but de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier. En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : la trempe, le revenu, le recuit et le vieillissement

#### I.3.1: Vieillissement thermique

Le terme vieillissement désigne l'évolution (généralement défavorable) des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique environnant. Bien que la distinction soit parfois difficile, le terme de corrosion désigne plus spécifiquement une dégradation et/ ou une perte de matière par réaction chimique du matériau avec son environnement, réaction qui se produit en surface de la pièce considérée. L'usure est une perte de matière d'origine mécanique, consécutive au mouvement relatif de deux surfaces solides en contact.

L'évolution des propriétés mécaniques d'un métal écroui soumis à une température supérieure ou égale à environ 0.5 T fusion par restauration ou recristallisation constitue un exemple typique de vieillissement thermique [16].

#### I.3.2: Vieillissement naturel

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage, de sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années. Certains alliages de la série 6000 qui sont durcissant et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante.

#### I.3.3: Vieillissement artificiel

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en maintient selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité, la précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel. Ceci est appelé vieillissement artificiel et il est effectué à des températures allant jusqu'à 240°C (100 à

240°C dans le cas de la série 6000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné.

#### **I.3.4: Le recuit :**

Le recuit est un procédé correspond a un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement lent dans le four ou l'air d'environnement. Le recuit est également utilisé pour changer les propriétés magnétiques d'une pièce. Le recuit de recristallisation, après écrouissage, a pour but de conférer au métal une taille de grain optimale pour son utilisation future (pliage, emboutissage). [17]

#### **I.3.5: Traitement thermiques des alliages d'aluminium :**

Certains alliages d'aluminium peuvent recevoir un traitement thermique permettant une amélioration des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté...etc.).

##### **I.3.5. 1 : Les traitements d'homogénéisation : [17]**

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.

##### **I.3.5. 2 : Les traitements d'adoucissement : [5]**

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.

##### **I.3.5.3: Traitement de trempe structurale [18]**

- ❖ **Principe :** Le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium comprend

1- une mise en solution solide suivie d'un :

2- Refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la

Solution solide existant à des températures plus élevées.

3- D'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (maturation) ou à une température Supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.

❖ **Mise en œuvre industrielle : [18]**

Le traitement est réalisé dans un four sous air possédant une très bonne Homogénéité de température (de l'ordre de +/- 5°C). Le refroidissement doit être Très rapide. Pour ces raisons, l'eau est souvent utilisée comme milieu de trempe, la Charge tombe par gravité dans le bac d'eau, huile, lubrifiant.

**a- Etape de mise en solution** : maintien d'une pièce à une température suffisamment élevée (540°C dans notre cas) et pour une période de temps assez longue pour que les éléments d'alliage soient distribués de façon homogène. Le temps de chauffage varie selon la géométrie de la pièce. Il peut aller de quelques minutes pour une feuille mince à 20 heures pour une grosse pièce. Il faut accorder une attention particulière à la disposition des pièces dans le four pour assurer un chauffage homogène. On respectera les paramètres de mise en solution puisqu'une surchauffe entraînera la perte des propriétés et une dégradation de la pièce. Au contraire, un chauffage insuffisant ou inégal signifiera que la pièce n'atteindra pas les propriétés mécaniques souhaitées.

**b- Trempe** : refroidissement rapide d'une pièce pour l'amener à la température ambiante afin de préserver l'effet de la mise en solution. la trempe s'effectue généralement dans un fluide peut être l'eau, huile ou lubrifiant. On va donc amener l'alliage le plus rapidement possible à la température ambiante de manière à immobiliser les atomes dans leur position en solution solide. La trempe est, de bien des façons, l'étape la plus critique dans le procédé de traitement thermique parce que le refroidissement rapide introduit des contraintes. Cela explique que bien que la trempe se réalise le plus souvent par immersion dans l'eau fraîche, il arrive que les pièces complexes, ayant de grandes variations dans l'épaisseur de ses parois, soient trempées dans un milieu procurant un refroidissement moins rapide, comme l'eau chaude, une solution aqueuse de glycol, de l'air forcé ou un brouillard (parfois au détriment des propriétés métallurgiques optimales).

Juste après la trempe (on dit : état de trempe fraîche), l'alliage se trouve dans un état très malléable et, dépendamment de l'alliage, reste dans cet état pour quelques minutes, quelques heures ou quelques jours. Au cours de cette période, on procédera à des opérations de dégauchissement ou de mise en forme. Le durcissement structural (formation de précipités) produit ensuite à température ambiante pendant une longue période, ce qu'on appelle le

vieillesse naturel, ou, dans un four à température et temps contrôlés, le vieillissement artificiel.

**c-Revenu** : le revenu est un traitement thermique effectué sur les pièces mécaniques afin de leur donner leurs caractéristiques mécaniques et parfois de résistance à la corrosion. Le revenu s'opère à une température supérieure à celle de la maturation et inférieure à la température de mise en solution. Le but de revenu est de diminuer les effets de la trempe d'homogénéisation et stabiliser les propriétés mécaniques et d'atténuer ou de faire disparaître les tensions internes. Il durcit la pièce par précipitation de composés intermétalliques dans la matrice d'aluminium.

### **I.3.6. 1 : Alliages de la série (2000) : [19]**

Dans le cas des alliages de type 2017A l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du temps du reste relativement faible durant une période dite incubation, d'autant plus longue que la température est plus basse. Durant cette période d'incubation, il semble cependant que les caractéristiques mécaniques ne restent pas rigoureusement constantes mais très lentement.

Vers la fin de la période d'incubation, la maturation s'accélère, sa vitesse passe maximum, puis décroît de nouveau et les caractéristiques mécaniques tendent asymptotiquement vers des valeurs limites.

La période d'incubation peut être avantageusement mise à profit pour effectuer des mises en forme, c'est-à-dire effectuer ce que l'on appelle le travail sur trempe fraîche. Afin d'augmenter cette période d'incubation, il est conseillé d'introduire les pièces trempées dans un milieu froid tel qu'un réfrigérateur : c'est la solution retenue par exemple pour la pose des rivets dans l'industrie aéronautique.

Avec les alliages de **type 2017 A, 2024 et 2014** on peut admettre qu'à 20°C, les caractéristiques deviennent stables après une maturation de quelques jours. Contrairement à la vitesse de mise en solution, la vitesse de maturation dépend beaucoup plus de la température.

### **I.3.6. 2 : Processus de traitement thermique de l'alliage 2017A : [9]**

#### **➤ Mise en solution :**

Le processus de mise en solution consiste à prendre une pièce de l'alliage d'aluminium à la température de la pièce (état 1A sur les **figures I.8 et I.9**). Et à la ramener le plus rapidement possible à l'état (2). Si la pièce a été fabriquée selon un processus de fabrication à chaud (1B),

Elle serait aussi amenée a (2).lorsque la pièce a atteint 515°C de part en part, les éléments d'alliages sont alors totalement dissous en solution solide, c'est e dire dans l'aluminium solide dont la structure granulaire.

➤ **Refroidissement lent (recuit) :**

Il faut éviter de refroidir lentement l'aluminium mise en solution, c'est-à-dire de passer lentement de l'état (2) à l'état (3). En occurrence, il se forme de gros précipités aux joints de grains et les propriétés ne sont pas maximales (**figure I.8.b**), on obtient ainsi des propriétés équivalentes a celles de l'état recuit. Pour avoir un effet maximal sur les propriétés, les précipités doivent se produire partout dans les grains et ils ne doivent pas êtres trop gros.

➤ **Trempe : [9]**

Si on refroidit rapidement de (2) à (3), les atomes de cuivre n'ont pas le temps de migrer aux joints de grains et ils demeurent en solution dans les grains (**figure I.8.c**). Par conséquent, aussitôt que la pièce dans l'état(2) est sortie du four, elle doit être refroidie rapidement à l'état (3) en la trempant dans l'eau. Les propriétés obtenues sont alors celle du l'état T4 (mise en solution et vieilli naturellement à un état relativement stable), dont la limite ultime est égale à 470 MPa. A cet état, la structure est instable car des précipités se forment, mais très lentement. Il se produit alors un vieillissement naturel. Pour accélérer le processus, il faut chauffer légèrement. L'opération s'appelle un vieillissement artificiel. Le vieillissement artificiel est nécessaire pour la plupart des alliages, car le vieillissement naturel est trop lent.

➤ **Vieillissement artificiel**

Le vieillissement artificiel consiste à amener la pièce de l'état (3) à l'état (4) en chauffant pendant 12 heures à 190 °C, puis à refroidir en ramenant la pièce à l'état (5). Des précipités se forment dans toute la structure et les précipités maximales sont obtenues (**figure I.8.d**). En fait, il s'agit de l'état T6 (mis en solution et vieilli artificiellement), et l'alliage ainsi obtenu est le 2017 – T6 dont la limite est égale à 485 MPa.

Si on prolonge indument le traitement a 190°C, les précipités migrent aux joints de grains. Les propriétés sont alors les même qu'a l'état de recuit (**figure I.8.e**).on dit qu'il y a **survieillissement**.

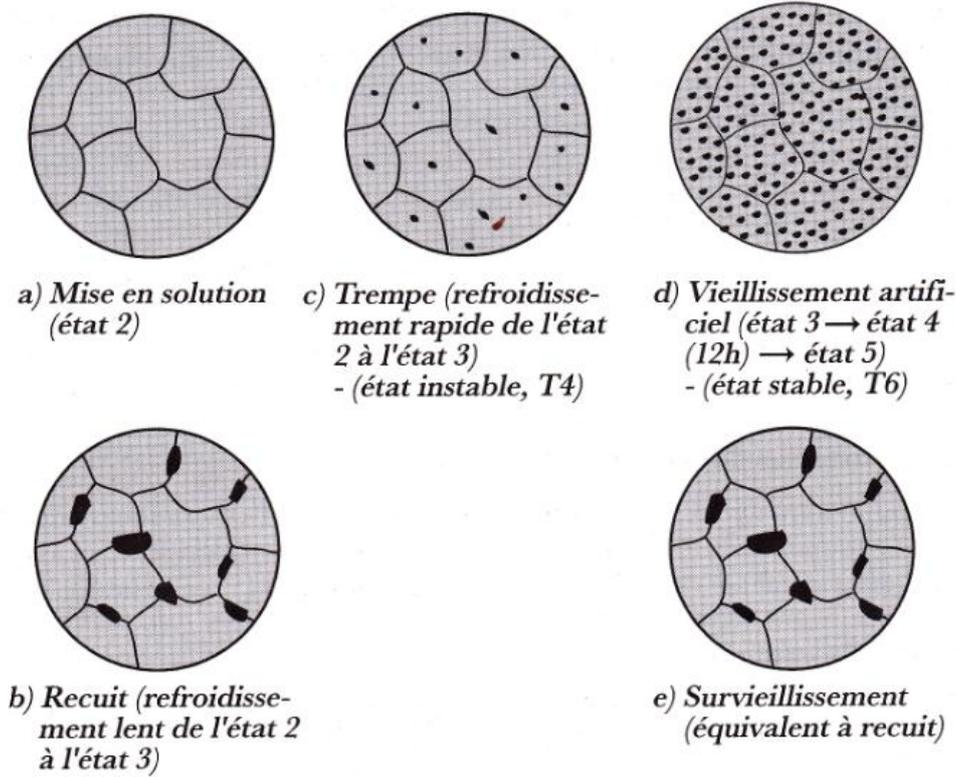


Figure I.8 : Structure cristalline de l'aluminium a différents états des traitements thermiques

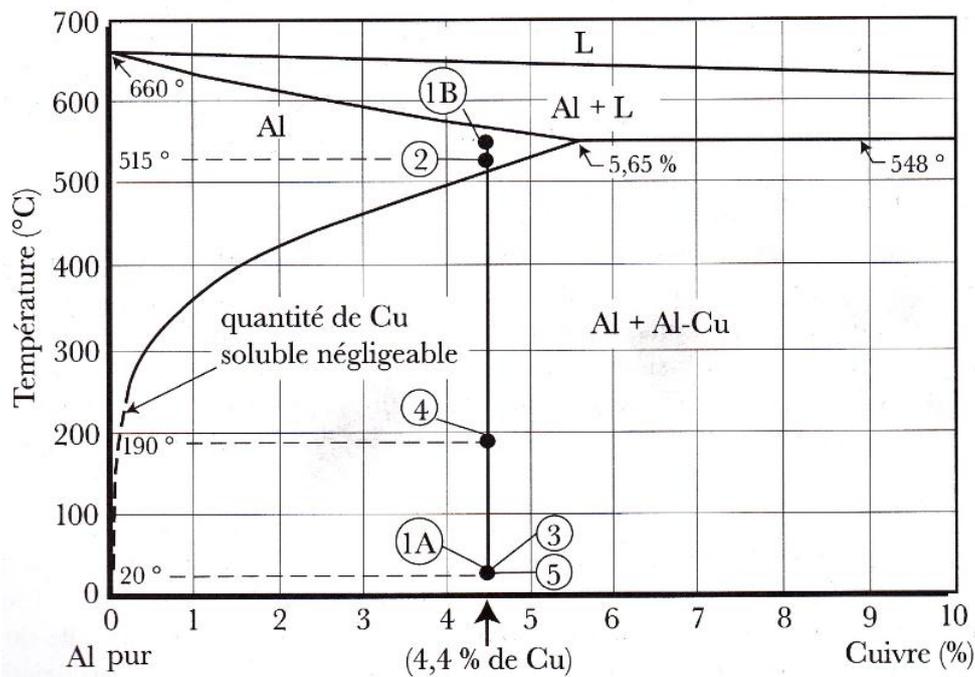


Figure I.9. : Diagramme des phases d'alliage Al-Cu entre 0 à 10% de masse de cuivre

## Chapitre I.4 : Essais mécaniques

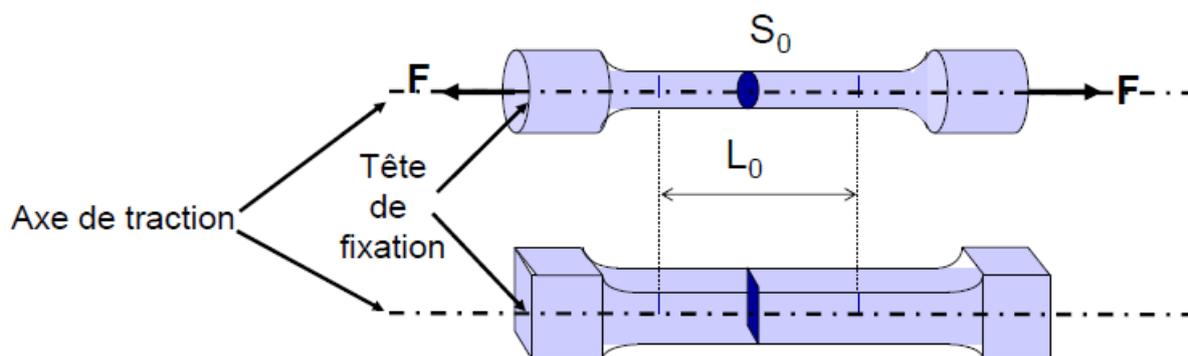
### introduction

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

Les résultats obtenus, par ces différents essais qui en œuvrent des techniques particulières, sont en relation directe avec la structure du métal et permettent de prévoir son comportement dans les conditions réelles d'utilisation.

#### I.4.1: Essai de traction : [20,21]

Le plus simple et le plus courant. Il consiste à placer une éprouvette du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur le matériau jusqu'à sa rupture. On enregistre la force et l'allongement, que l'on peut convertir en contrainte déformation.



**Figure : I.10 éprouvette de traction**

Ce type d'essai est normalisé par des réglementations nationales ou internationales :

- Géométrie des éprouvettes
- Machine d'essai et leur étalonnage
- Techniques expérimentales mises en œuvre.

#### I.4.1.1: Démentions des éprouvettes :

Selon les normes internationales les éprouvettes de traction doivent satisfaire des conditions normalisées suivantes :

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

Pour les d'aluminium de forme ( $d$  ou  $b > 0,04\text{mm}$ ), la norme est **NF A 03-251**.

Et le dimensionnement normalisé est :  $L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$ .

$$L_0 = k\sqrt{S_0}$$

Avec :  $K = 5,65$  et  $s_0$  : section initial en mm

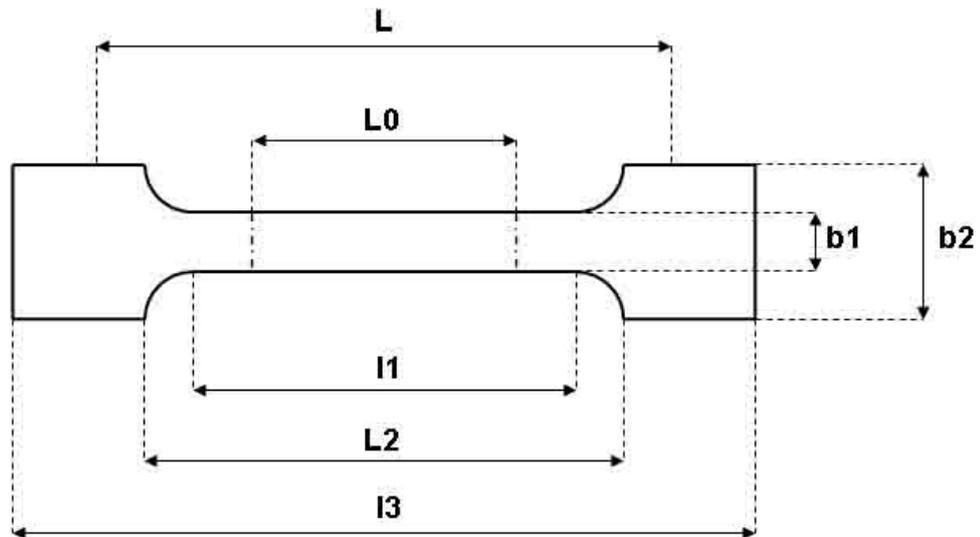


Figure : I.11 dimension d'éprouvette de traction

$L_0$  = Longueur de référence

$L$  = Ecartement entre outillages

$l_1$  = Longueur de la partie calibrée étroite

$L_2$  = Ecartement entre les parties parallèles larges

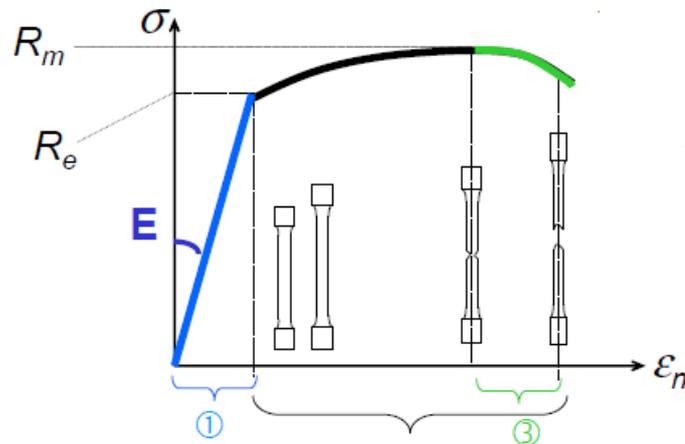
$l_3$  = Longueur totale

$b_2$  = Largeur dans la zone d'épaulement

$b_1$  = Largeur dans la zone de la longueur de référence

$h$  = épaisseur de l'éprouvette

### I.4.1.2: Courbe contrainte-déformation pour un matériau ductile : [20,21]



**Figure I.12** : Schéma d'une éprouvette de traction et son évolution en cour d'essai

La Courbe si dessus montre l'évolution d'une éprouvette de traction en cour d'essai de traction pour un matériau ductile

Avec :  $\sigma_n = F / S_0$  : contrainte nominale.

$\epsilon_n = \Delta L / L_0$  : déformation nominale.

$R_e = F_e / S_0$  : limite apparente d'élasticité (MPa).

$R_m = F_m / S_0$  : résistance maximale à la traction (MPa).

**1 : domaine élastique** : (la déformation est réversible) :

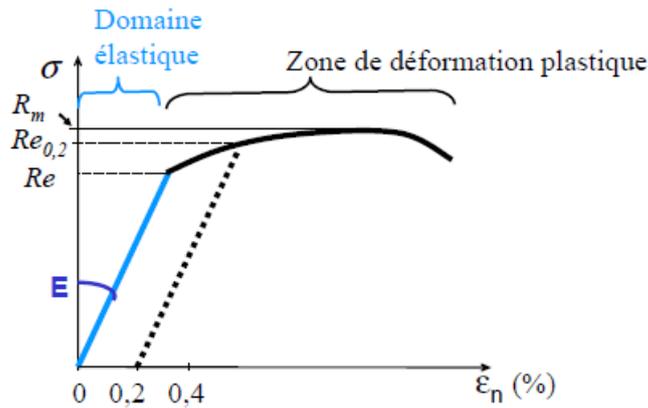
**2 : domaine plastique** : (déformation est réversible) déformation plastique permanente + déformation élastique. La suppression de la force appliquée laisse apparaître un allongement plastique.

**3 : la striction et la rupture** : (déformation irrémédiable) apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles.

Domaine élastique : la contrainte est proportionnelle à la déformation (loi de Hooke) : constante de proportionnalité E (module d'Young).

### I.4.1.3: Exploitation de la courbe :

La figure ci-dessous montre les différents paramètres qui caractérisent la zone élastique et la zone de déformation plastique.



**Figure I.13** : Courbe contrainte déformation d'un matériau ductile

- **Module d'Young E:**

$$\sigma_n = E \varepsilon_n$$

- **Limite d'élasticité Re** = limite entre zones élastique et plastique : limite d'élasticité conventionnelle **Re(0.2)**

(Contrainte correspondant à 0,2 % de déformation)

- **Résistance à la traction Rm** : contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction
- **Allongement A%** : si A% allongement à la rupture

Alors on peut écrire :  $A = (L_f - L_0)/L_0 = \Delta L / L_0$

- **Striction Z** : variation de section à l'endroit où la rupture s'est produite elle est donnée par la formule suivante :

Coefficient de striction :

$$Z \% = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100$$

- **Allongement à la striction Zu** :

$$Zu \% = \frac{S_o - S_u}{S_u} \cdot 100$$

**I.4.1.4: Contraintes et déformations vraies : [20,21]**

Grandeurs rapportées aux dimensions instantanées

- **Contrainte vraie** :  $\sigma = F / S$  avec : S est la section à l'instant considéré

Au cours d'une déformation plastique, le volume se conserve

$$S_0 L_0 = S L$$

- **Déformation vraie**  $\varepsilon$

Pour une déformation élémentaire:  $\varepsilon = dL/L$

$\varepsilon$  vraie s'écrit comme suit :

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

On peut relier grandeurs nominales (rapportées aux dimensions initiales) et grandeurs vraies et on écrit :

$$\varepsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} \qquad \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_n)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} (1 + \varepsilon_n) = \sigma_n (1 + \varepsilon_n)$$

**I.4.2: Ecouissage** : de formation plastique d'un alliage métallique qui s'accompagne d'un durcissement du a une très grande augmentation de la densité des dislocations qui peut atteindre jusqu'à :  $10^{12} \text{ cm} / \text{cm}^3$ .

**I.4.2.1: Le taux d'écrouissage** : le métal qui a subi une certaine déformation plastique dit écroui. Le taux d'écrouissage est égal aux taux de déformation. Son intensité peut caractériser, selon le type de déformation imposé, par la valeur :  $\frac{\Delta L}{L}$  Allongement, par la valeur de réduction :

$$\frac{S_0 - S}{S}, \text{ ou d'épaisseur : } (E - e)/e.$$

**I.4.2.2: Le coefficient d'écroutissement  $n$**  : est défini analytiquement dans la partie plastique (non linéaire) d'une courbe de traction rationnelle selon loi: Ludwik-Hollomon

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot \varepsilon^n$$

Ou bien :

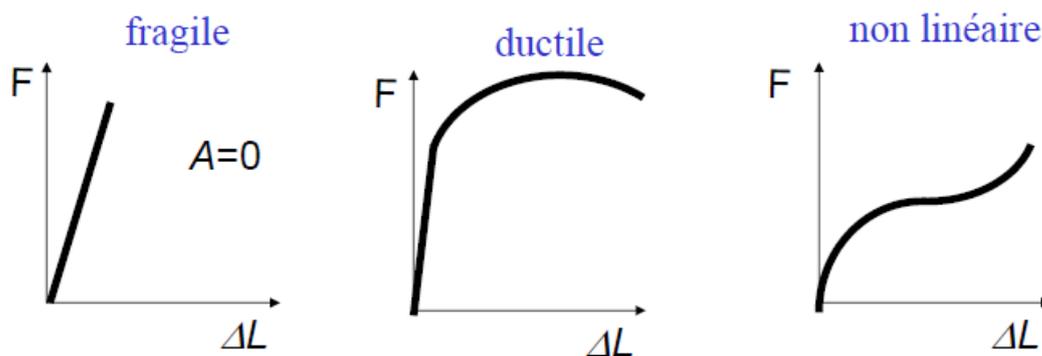
$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n$$

Avec :  $\sigma_0$ ,  $k$  et  $n$  sont des constantes;  $k$  est parfois appelée consistance.

$n$  : coefficient d'écroutissement ou coefficient de consolidation.

### I.4.3: Classification des matériaux :

Trois comportements possibles : fragile, ductile et élastique non linéaire : sont représentés sur la figure suivante



**Figure I.14** : courbes de traction possibles

#### 1 : matériaux fragile :

Domaine plastique n'existe pas elle caractérise les métaux fragile comme le verre, les céramiques, le béton, les polymères thermodurcissables...etc.

#### 2 : matériaux ductiles :

Déformation plastique permanente et importante on trouve ce type de graphes dans les métaux, alliages, polymères plastiques...etc.

#### 3 : élastomères :

Déformation plastique non proportionnelle à la charge

**I.4.4: La dureté : [16,24]**

La mesure de la dureté correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La dureté est alors une propriété mécanique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration

**I.4.4.1: Types d'essais :**

Ils existent plusieurs essais mais les plus utilisés sont l'essai de BRINELL, VICKER, ROCKWELL.

**1-Essai Brinell (NF EN 10003-1 à 3) :** Le pénétrateur est une bille en acier trempé (dureté HBS) ou en carbure de tungstène (dureté HBW) de diamètre  $D$  (mm). L'empreinte est une calotte sphérique de diamètre moyen  $d$  (en mm, moyenne de deux diamètres orthogonaux mesurés à l'aide d'un appareil optique approprié).

La charge d'essai  $F$  (N) est choisie dans une gamme normalisée adaptée à  $D$  Et au matériau testé. La dureté est donnée par le rapport de  $F$  (en kg force à l'origine) à la surface de l'empreinte, exprimée sans dimension :

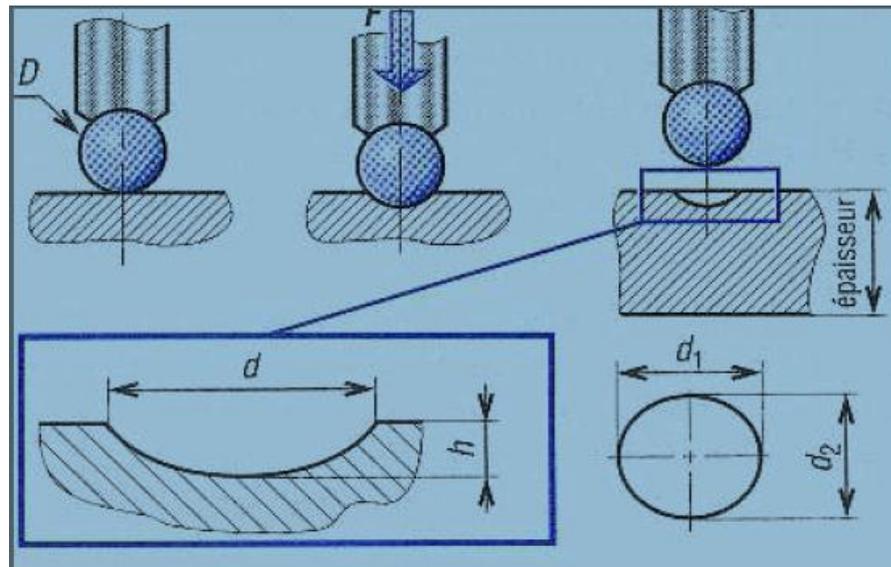
$$HBW = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$F$  : est la force appliquée en kilogramme-force (kgf) ; Si  $F$  est Newton, il faut multiplier  $F$  par 0,102

$D$  : le diamètre de la bille en millimètre (mm).

$d$  : le diamètre de l'empreinte laissée par la bille en millimètre (mm).

$h$  : profondeur en millimètre (mm)



**Figure I.15** : Essai de dureté Brinell

## 2-Essai de micro dureté Vickers : [24,16]

L'essai de la microdureté Vickers consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet  $136^\circ$ , sous une charge  $F$ , et à mesurer la diagonale  $d$  de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. La dureté est donnée par le rapport de  $F$  (en kg-force à l'origine) à la surface latérale de l'empreinte pyramidale, exprimée sans dimension :

$$HV = 0,102 \frac{2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

$$HV = F / S$$

$$S = d^2 / (2 \cdot \sin A/2)$$

$$HV = 0,189 F / d^2$$

$d$  : diagonale moyenne de l'empreinte en millimètres.

$A$  : angle au sommet du pénétrateur :  $136^\circ$ .

$F$  : charge d'essai en newtons, celle qu'on a appliquée est de 10 g.

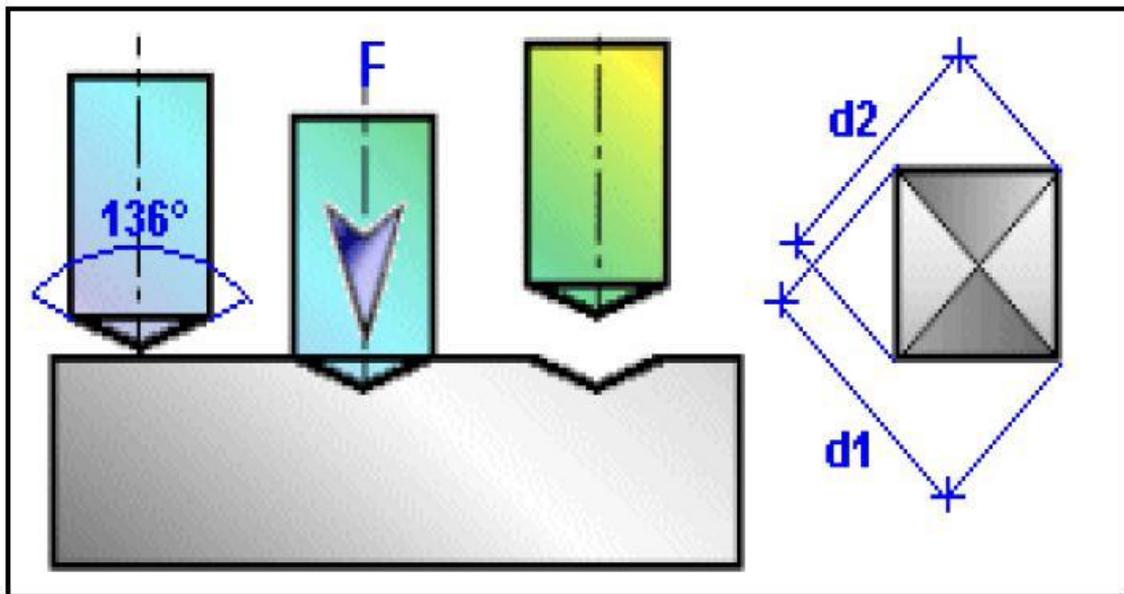


Figure I.16 : Principe de l'essai Vickers.

### 3-Essai de dureté Rockwell :

Le pénétrateur est soit une bille en acier trempé, soit un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté est définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge.

Pour les fortes duretés, on utilise un pénétrateur en diamant conique (essai HRC)

Pour les faibles duretés, on utilise un pénétrateur en acier trempé avec bille (essais HRB et HR F).

#### ❖ Exécution de l'essai :

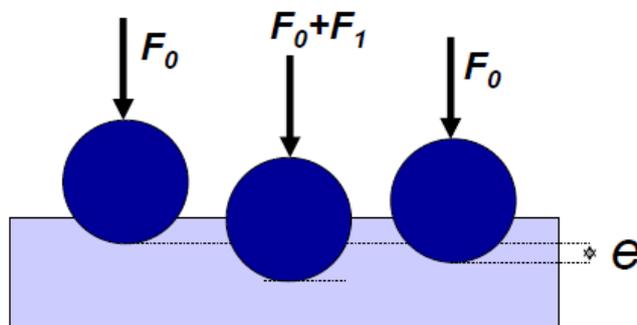
- Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une pré charge  $F_0$ . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures.
- Une surcharge  $F_1$  est appliquée, pour atteindre la valeur de la charge totale d'essai  $F$ ; le pénétrateur descend.
- La surcharge est retirée, entraînant une légère remontée du pénétrateur en raison de la disparition d'une partie élastique de la déformation.
- On mesure alors à l'aide d'un comparateur l'accroissement  $h$  de la profondeur de pénétration, entre le début et la fin de l'essai sous pré charge  $F_0$ . pénétrateur descend.

**a-Essai Rockwell C (HRC) : [16,20]**

Le pénétrateur est un cône en diamant d'angle au sommet  $120^\circ$ . L'accroissement se mesure en unité égal à 0,002. La charge utilisée est 150 N dont 10 N de pré charge. Cet essai est utilisé pour qualifier les aciers durs. Aciers trempés.

**b-Essai Rockwell B (HRB) :**

En utilise le même principe que la dureté (HRC).Le pénétrateur est une bille d'acier trempé de diamètre 1,59mm. L'accroissement se mesure également en unité à 0,02 mm. La charge utilisé est 100 N dont 10 N de pré charge .cette essai est utilisé en aciers doux, non trempé, alliages d'aluminium et non ferreux



**Figure I.16** Principe l'essai Rockwell B (HRB) :

**I.4.5: Ductilité :** Propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer de façon permanente avant de se rompre (aptitude des matériaux à la déformation plastique). C'est un atout important pour la mise en forme des matériaux.

**I.4.6: Ténacité :** La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures L'aire sous la courbe de traction  $F(L)$  représente l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette.

La ténacité s'exprime par la relation suivante :

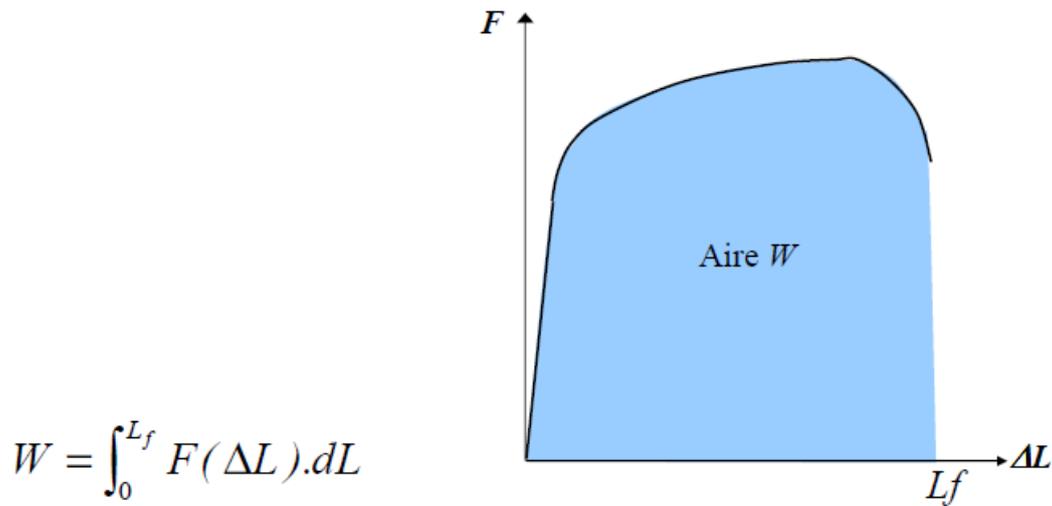


Figure I.17 : Courbe de traction montrant la ténacité

#### I.4.7: Les essais de fissuration : [16,22]

##### I.4.7.1: La résilience :

L'essai Charpy : a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. On mesure ce que l'on appelle leur *résilience*, c'est-à-dire l'énergie consommée pour rompre une éprouvette de référence de section égale à  $1\text{cm}^2$  en utilisant un mouton-pendule.

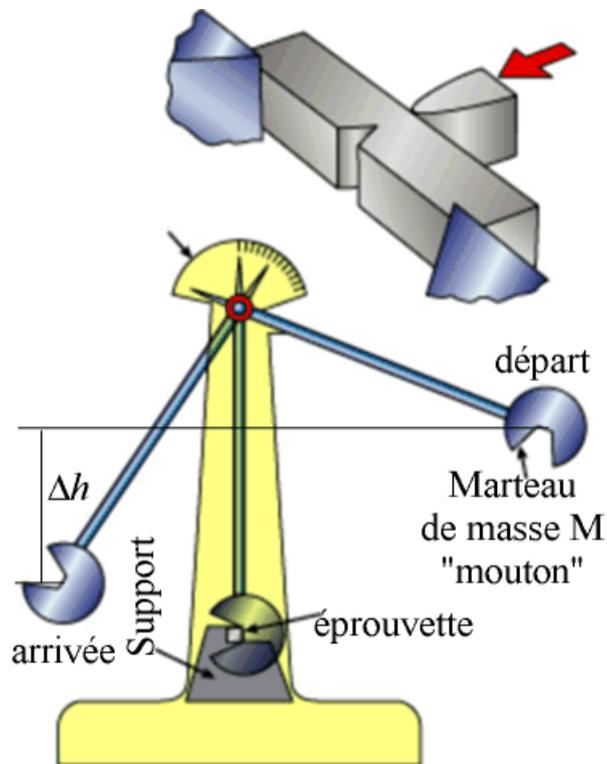
L'éprouvette de référence utilisée est un barreau de longueur 55 mm, à section carrée de dix par dix millimètres et entaillée sur une profondeur de 5 mm. L'entaille peut revêtir diverses formes : en U ou, le plus souvent, en V. Comme il ne s'agit pas d'une fissure parfaite mais d'une entaille, on peut observer une dispersion des résultats liée à la nucléation d'une fissure principale au fond de l'entaille.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du mouton et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le mouton remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

La résilience, généralement notée KCV se calcule comme suit :

$$K_{CV} (\text{J} / \text{cm}^2) = \frac{M \cdot g \cdot \Delta h}{1 \text{ cm}^2}$$

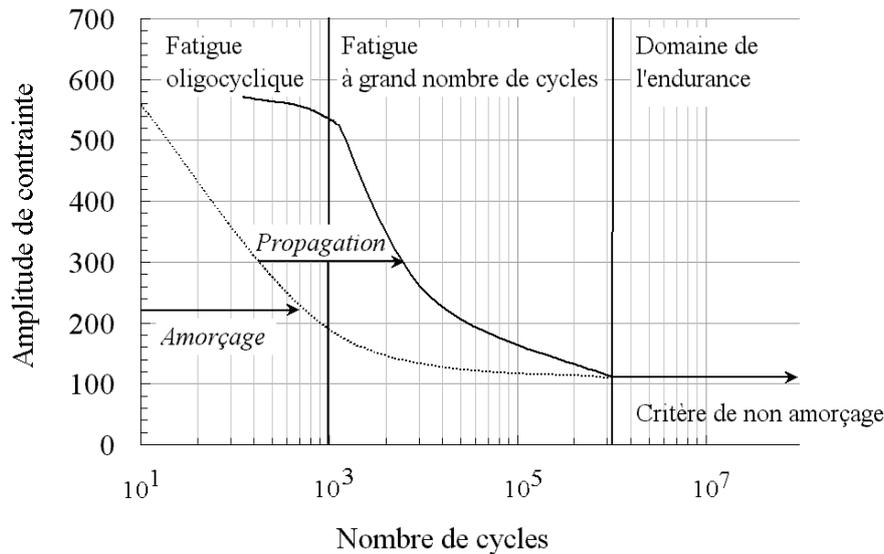
Avec : La résilience  $K_{cv}$  : l'énergie consommée lors de la rupture d'éprouvettes de référence de section égale à  $1\text{cm}^2$  au cours d'un essai Charpy.



**Figure I.18** : Essai de Charpy

**I.4.7.2: La fatigue** : est un mode de rupture différé qui se produit lorsque le matériau est soumis à des chargements cycliques, et cela même pour des contraintes bien inférieures à sa limite d'élasticité et des températures faibles. Ce mode d'endommagement limite la durée de vie des composants de la plupart des machines et des installations industrielles.

**I.4.7.3: Les essais de fatigue conventionnels** : consistent à soumettre une éprouvette de traction compression ou de flexion à des cycles de contrainte. La sollicitation de fatigue est caractérisée par l'amplitude de contrainte du cycle de fatigue ( $\Delta\sigma$ ) et par le rapport de charge ( $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ). On mesure le nombre de cycles à rupture  $N$  pour chaque type de sollicitation ( $\Delta\sigma, R$ ). On trace alors les courbes dites S-N qui donnent la demi-amplitude de contrainte  $\sigma_a = \Delta\sigma/2$  en fonction du nombre de cycles à rupture  $N$  pour divers rapport de charge.



**Figure I.19** : courbe de Wöhler

La première observation que l'on peut faire sur une courbe de Wöhler, est que les durées de vie en fatigue pour une amplitude de contrainte donnée sont distribuées statistiquement. L'origine principale de cette variabilité des durées de vie est l'existence de défauts dans le matériau qui conduisent à l'amorçage et la propagation de fissures.

On distingue trois domaines sur une courbe de Wöhler :

### 1-le domaine de la fatigue oligocyclique (ou fatigue plastique) :

La durée de vie en fatigue est fortement dépendante du comportement plastique cyclique du matériau. La durée de vie la plus courte possible sur la courbe de Wöhler est égale à  $\frac{1}{4}$  de cycle et est obtenue lorsque la contrainte appliquée est la contrainte maximale du matériau.

### 2- le domaine de la fatigue à grand nombre de cycles :

Le matériau est sollicité dans son domaine d'élasticité macroscopique. La rupture provient de l'amorçage d'une fissure et de leur propagation par fatigue jusqu'à la rupture. La durée de vie correspond alors au nombre de cycles nécessaires pour que ce défaut se propage jusqu'à la rupture.

### 3- le domaine de l'endurance :

Une asymptote apparaît sur la courbe S-N (mais ce n'est pas toujours vrai), ce qui signifie que la rupture ne se produit pas même au bout d'un nombre de cycles infini, soit parce qu'aucun défaut ne s'est amorcé, soit parce que les fissures cessent de se propager. Les critères habituellement employés pour dimensionner les structures dans le domaine de l'endurance, sont des critères de non-amorçage de fissures.

## Chapitre : I.5 : Défauts cristallins et diffusion

### Introduction : [1 ,23]

Les cristaux parfaits formés par la répétition périodique d'une maille élémentaire sont des cristaux idéaux.

Les cristaux réels ont des structures qui diffèrent, au moins localement, de cet arrangement périodique car ils sont le siège de défauts de différentes natures.

Ces défauts peuvent être sans dimension (défauts ponctuels), à une dimension (dislocations), à deux dimensions (joints de grains, macles) ou à trois dimensions (précipités).

Certaines propriétés des matériaux dépendent essentiellement de la structure et très peu des défauts (coefficient de dilatation linéaire, propriétés magnétiques et ferroélectriques).

D'autres, en revanche, sont fortement influencées par la nature et la concentration des défauts qu'ils contiennent (comportement sous contrainte, phénomène de diffusion et traitement thermique, conductibilité électrique, etc.)...

Le tableau suivant représente les types des défauts, leurs dimensions, leurs influences dans les réseaux cristallins.

| Dimension | Type   | Caractéristiques principales   | Influence  |
|-----------|--|--|--|
| 0         | Lacunes  | Concentration fonction de la température, de $10^{-4}$ à $10^{-15}$                    | Diffusion à l'état solide<br>Propriétés mécaniques (action sur les dislocations) |
| 0         | Interstitiels<br>Substitutions<br><br>Les défauts de Shottky<br>Les défauts de Frenkel | Atomes légers (C, N, O,...), concentration de $10^{-1}$ à $10^{-3}$ atomes métalliques | Solutions solides d'insertion ou de substitution<br>Propriétés mécaniques        |
| 1         | Dislocations   | Densité de $10^6$ à $10^{12}$ cm/cm <sup>3</sup>                                       | Propriétés mécaniques (ductilité, ténacité, fluage, etc.)                        |
| 2         | Macles<br>Joints de grains<br>Défauts d'empilement                                     | Taille de grains de 1 μm à 1 cm  | Propriétés mécaniques, ductilité   |
| 3         | Précipités<br>Inclusions   | 5 nm à 100 μm  | Propriétés mécaniques<br>Thermiques, magnétiques                                 |

**Tableau I.7: types des défauts et leurs rôles**

### I.5.1 : Les Défauts Ponctuels :

Ce sont des défauts sans dimension qui ont une taille de l'ordre de la distance interatomique.

Il existe trois types de défauts ponctuels :

- **les lacunes.**
- **les interstitiels.**
- **les atomes en substitution.**

La présence de défauts ponctuels entraîne une distorsion locale du réseau cristallin et engendre un champ de contrainte dans un volume du cristal supérieur à celui du défaut lui-même

#### I.5.1.1 : Les Lacunes

Ce défaut correspond à un site atomique inoccupé dans la structure.

Les lacunes jouent un rôle fondamental dans la diffusion à l'état solide qui engendre des déplacements d'atomes sur de longues distances et est à la base des traitements thermiques.

#### I.5.1.2 : Les Interstitiels

Ce sont des atomes qui s'insèrent dans les espaces vides du réseau cristallin. Si l'atome en insertion est lui-même un atome du réseau cristallin, on parle d'auto-interstitiel. Les défauts interstitiels jouent un grand rôle dans la constitution des alliages

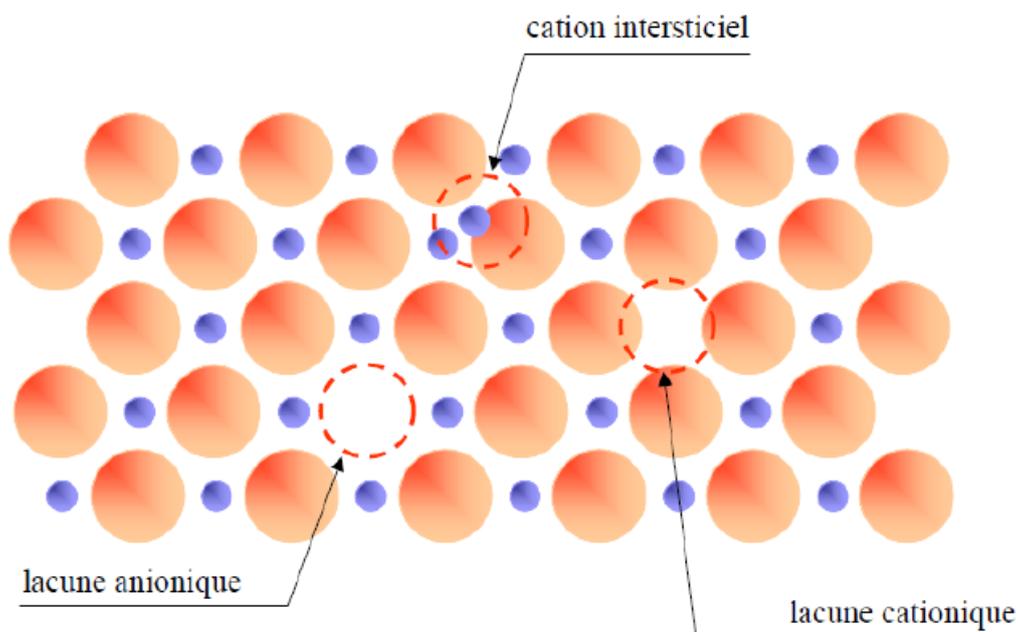


Figure : I.20. Les défauts ponctuels

### ➤ Concentration des Défauts Ponctuels

Le nombre  $n_f$  de défauts ponctuels est fonction de la température, il est donné par une relation de type Arrhenius :

$$n_f = N \cdot \exp\left(-\frac{Q_f}{kT}\right)$$

$N$  : est le nombre de nœuds du réseau,  $Q_f$  : est l'énergie de formation du défaut (de l'ordre de 1eV pour une lacune et 7 eV pour un interstitiel)

$k$  est la constante de Boltzmann ( $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K).

### I.5.1.3 : Atomes en Substitution

C'est un atome étranger qui se place à un nœud du réseau cristallin. Ce type de défauts joue également un rôle important dans la constitution des alliages

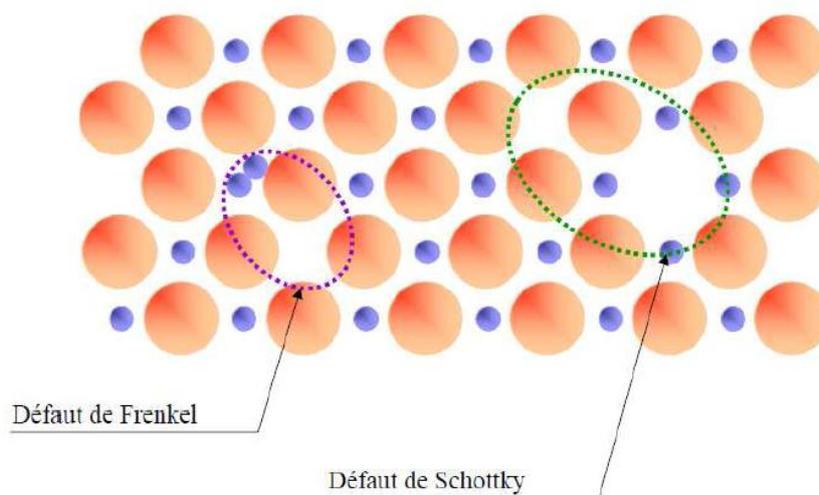
#### ➤ Défauts de Frenkel et de Schottky :

Dans les cristaux ioniques, la création de défauts doit préserver la neutralité électrique du matériau.

En conséquence, les défauts sont créés par paire de signes opposés.

On distingue :

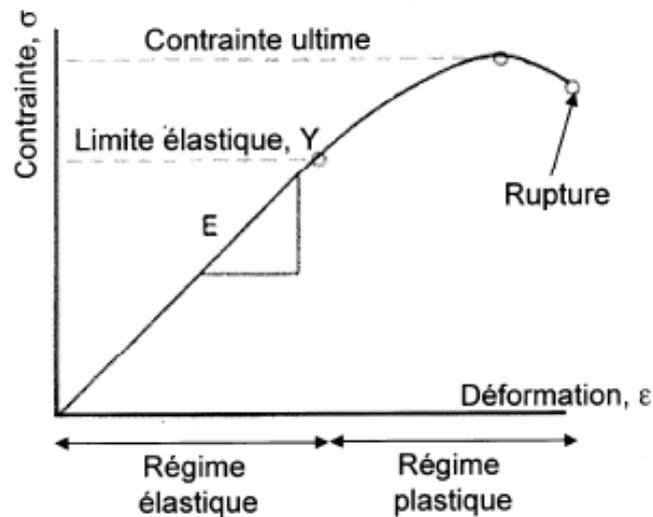
- Les défauts de **Shottky** constitués d'une lacune anionique et d'une lacune cationique
- Les défauts de **Frenkel** constitués d'une lacune (cationique ou anionique) et d'un ion (anion ou cation)



**Figure I.21.** Figures défauts de frenkel et défauts de Schottky

### I.5.2 : Les défauts linéaires :

### I.5.2.1 : Comportement mécanique des matériaux : Régime élastique et plastique



**Figure I.22** comportement mécanique des matériaux

Régime Élastique : Linéaire selon la Loi de Hooke  $E = \sigma_x / \epsilon_x$

Avec E : module de Young ou d'élasticité.

$$\sigma_x = F / A. \text{ Et } \epsilon_x = \Delta l / l$$

#### ❖ Historique :

Lorsque l'on déforme un cristal au delà de son domaine élastique, on voit apparaître à sa surface des lignes appelées traces de glissement.

Ces traces correspondent à de petites marches qui traduisent le glissement des plans cristallins les uns par rapport aux autres

1)



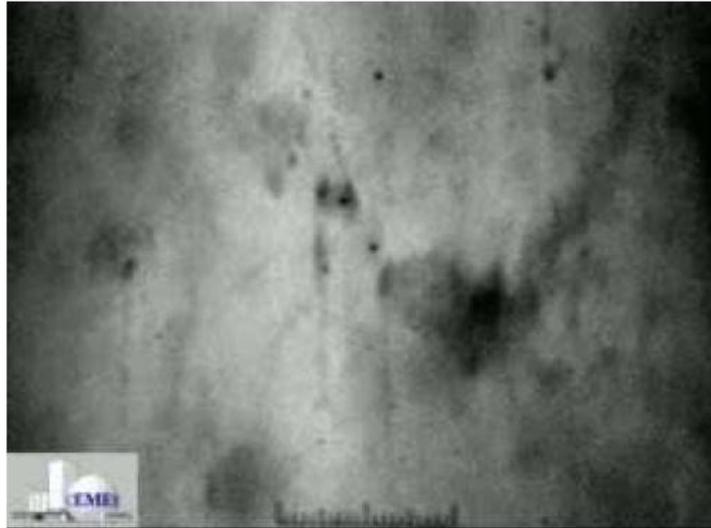
2)



Si on calcule la contrainte nécessaire pour cisailer un cristal parfait (sans défauts), on s'aperçoit qu'elle serait de 1000 à 10 000 fois la contrainte réelle observée

La déformation plastique intervient pour des contraintes beaucoup plus faibles

Dans les années 1930, Orowan, Polanyi et Taylor proposèrent que le cisaillement puisse se produire par la propagation de défauts linéaires élémentaires appelés dislocations



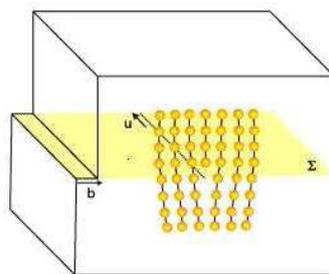
**Figure.23 :** lignes de dislocations enregistrées lors d'une charge appliquée sur un échantillon.

Les lignes noires verticales sont des dislocations qui se déplacent sous l'effet de la contrainte appliquée à l'échantillon.

Le glissement relatif des deux parties du cristal ne se fait pas en bloc, mais grâce à la propagation de ces imperfections le long d'une direction ou dans un plan donné. Leur déplacement peut alors provoquer une déformation même pour de faibles niveaux de contrainte.

### I.5.2.2: Dislocations coin

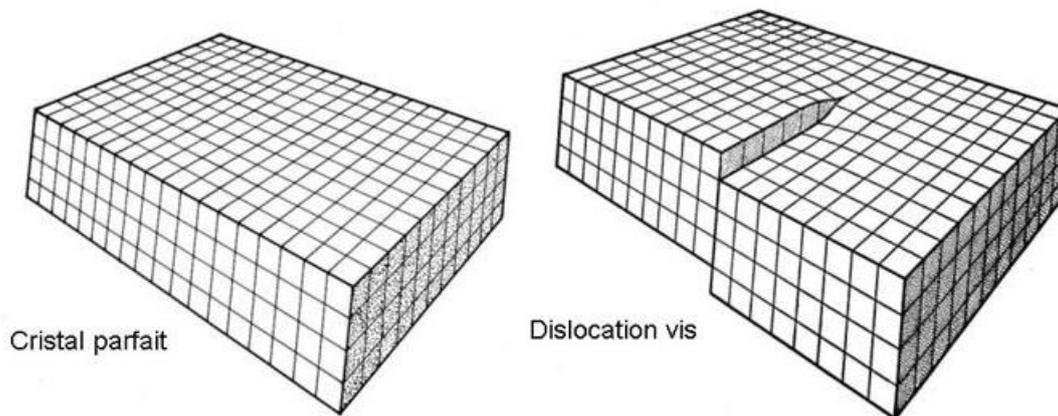
Géométriquement, une dislocation coin peut être comprise comme résultant de l'introduction d'un demi plan atomique à l'intérieur d'un cristal parfait. Les atomes du demi-cristal supérieur sont dilatés. Les autres sont comprimés



**Figure I.24.** Dislocations coin.

On peut se représenter une dislocation vis en imaginant que l'on fait une entaille dans le cristal et que l'on fait glisser l'un des bords de cette entaille par rapport à l'autre d'une distance interatomique.

Une dislocation vis transforme les plans atomiques successifs en une surface hélicoïdale d'où son nom.



**Figure I.25** : cristal parfait et les dislocations vis.

### **I.5.2.3: Interaction avec des défauts ponctuels**

Les dislocations attirent les atomes ne faisant pas partie du réseau (atomes étrangers : impuretés ou éléments d'alliage). Si ces atomes étrangers sont mobiles, ils migrent vers les dislocations et constituent un « nuage de Cottrell ». Ce nuage de Cottrell gêne le mouvement des dislocations, ceci explique que les métaux purs sont plus ductiles que l'alliage

#### **❖ Mouvement des Dislocations**

La déformation plastique est induite par la propagation des dislocations. Pour se représenter leur mouvement, on peut utiliser l'image d'un lourd tapis que l'on voudrait déplacer sur le sol.

Deux méthodes sont utilisables : soit tirer le tapis pour le faire glisser, soit créer une ondulation à un bord et la faire propager à travers le tapis. La première méthode correspond au cas d'un glissement suivant un plan compact, la seconde donne une image de la propagation des dislocations dans les cristaux.

### I.5.3: Les Défauts Bidimensionnels: [1 ,23]

Les Joints de Grains

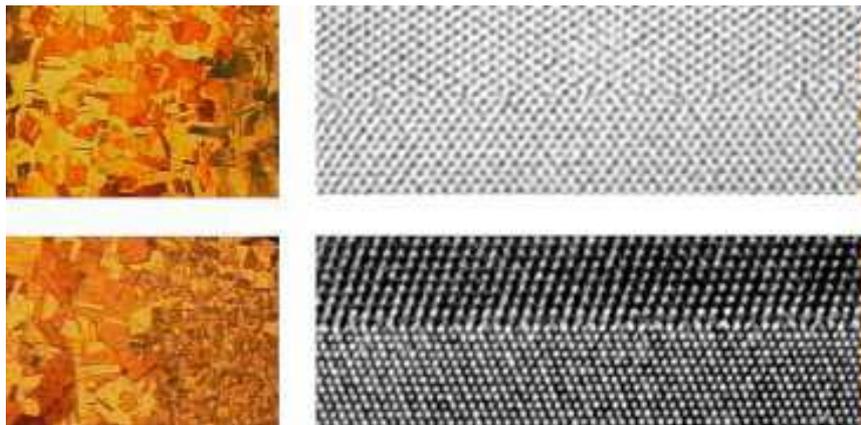
Les Défauts d'Empilement et les Macles

#### I.5.3.1: Les Joints de Grains

Les matériaux cristallins utilisés couramment, à quelques exceptions près tels que les semi-conducteurs ou les superalliages sont généralement poly cristallins.

Ils ne sont pas formés d'un seul grain (monocristal) mais d'un ensemble de grains de taille plus ou moins grande (de 1  $\mu\text{m}$  à plusieurs centimètres selon le mode d'élaboration et les traitements subis par le matériau).

Ces grains sont juxtaposés et les régions où les différents grains sont en contact sont appelés les joints de grains. Ces régions sont des zones de transition caractérisées par des structures plus ou moins perturbées qui permettent l'accommodation géométrique et cristallographique des grains constitutifs du poly cristal



**Figure : I.26.** Micrographies optiques d'un acier inoxydable montrant les grains et les joints de grains constitutifs de l'alliage (à gauche) et Joints de grains (à droite) vus en MET (interface Aluminium/Aluminium en haut ; interface Aluminium/Germanium en bas).

Les poly cristaux sont en général isotrope quand ils sont constitués de grains ayant des orientations cristallographiques aléatoires dites grains équiaxes. Au contraire, les monocristaux sont fortement anisotropes. Les propriétés mesurées sur un poly cristal résultent généralement d'une moyenne sur l'ensemble des grains. Par exemple, le module d'Young du cuivre poly cristallin vaut environ 110 GPa alors qu'il varie de 67 GPa selon les directions  $\langle 100 \rangle$  à 192 GPa selon les directions  $\langle 111 \rangle$  dans les monocristaux.

De manière générale, les joints de grains sont à la fois des sources et des pièges pour les défauts ponctuels et les dislocations.

Au cours d'une trempe, les lacunes excédentaires s'éliminent plus rapidement aux joints de grains. Ils jouent également un rôle important dans la déformation plastique puisqu'ils peuvent induire des dislocations sous l'effet d'une contrainte et constituer des obstacles au mouvement des dislocations.

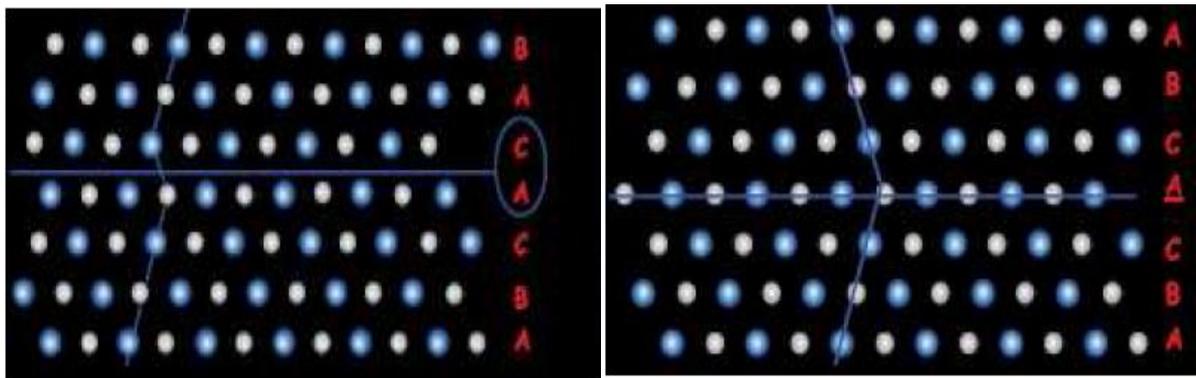
### I.5.3.2.:Les Défauts d'Empilement et les Macles : [23]

L'édifice cristallin peut être considéré comme un empilement régulier de plans suivant un certain motif qui se répète indéfiniment : on peut caractériser cela par une séquence d'empilement.

Par exemple dans la structure Cubique à Faces Centrées, la séquence d'empilement de plans {111} est de type [...ABCABCABC...]

On appelle défaut d'empilement une modification de la séquence d'empilement.

Ces défauts peuvent être Intrinsèques : ceci correspond au retrait d'un plan et se traduit par une séquence d'empilement du type [...ABCACABC...]



**Figure : I.27** : les défauts d'empilements et les macles

Il peut arriver également que la séquence [...ABCABCABC...] se transforme localement en une structure symétrique [...CBACBACBA...] (au cours de la solidification ou de la recristallisation par exemple).

La séquence résultante est [... ABCABCACBACBA...]. Le défaut d'empilement occasionné par cette altération de la séquence est appelé macle et le plan A est un plan de maillage

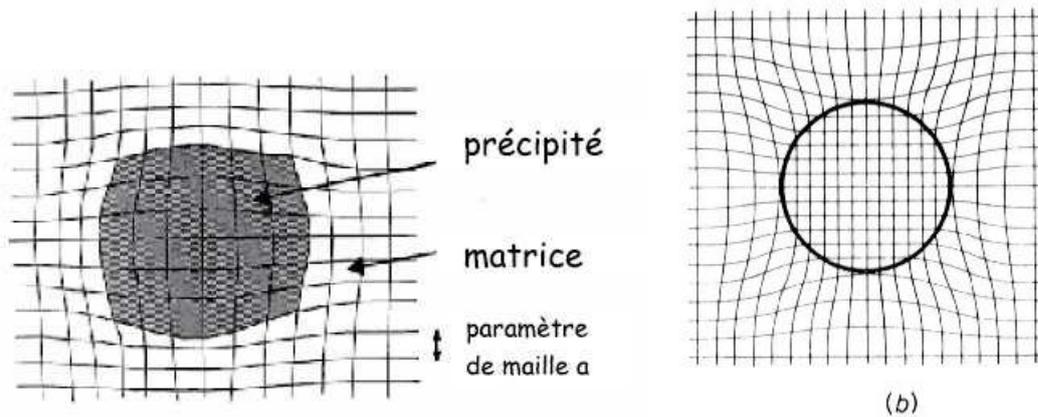
### I.5.4:Les Défauts Tridimensionnels

Le remplacement d'une partie du cristal par un volume d'un composé différent est un défaut tridimensionnel. Ce composé "étranger" peut différer du cristal par sa nature chimique et/ou cristallographique et peut être soit un précipité soit une inclusion.

**I.5.4.1:Les précipités :** sont des particules de seconde phase qui sont formés par combinaison entre les atomes du métal et les atomes des éléments d'alliage.

**I.5.4.2:Les inclusions :** correspondent à des impuretés qui proviennent généralement de son élaboration depuis l'état liquide. Ce sont généralement des sulfures, des oxydes ou des silicates.

- **Les précipités cohérents :** présentent une continuité cristallographique avec la matrice (les réseaux cristallins de la matrice et du précipité sont semblables mais leur paramètres de maille peuvent être différents ce qui entraîne une distorsion élastique de la matrice).
- **Les précipités incohérents :** n'ont aucune relation cristallographique avec la matrice. Les inclusions sont toujours incohérentes.



**Figure : I.28 :** les précipités

### I.5.5:La diffusion : [16]

les phénomènes de la diffusion à l'état solide correspondent à des sauts effectués par les atomes dans les défauts, sous l'effet de l'agitation thermique. Alors que les vitesses de migration des atomes dans les gaz ou liquides sont pratiquement visibles à l'échelle macroscopique, il est rare sur le métal de voir, à la température ambiante, l'évolution des propriétés par suite d'un phénomène de diffusion.

La diffusion est un phénomène important, qu'est à la base de tous les traitements thermiques industriels conditionnant les propriétés structurales des matériaux en service.

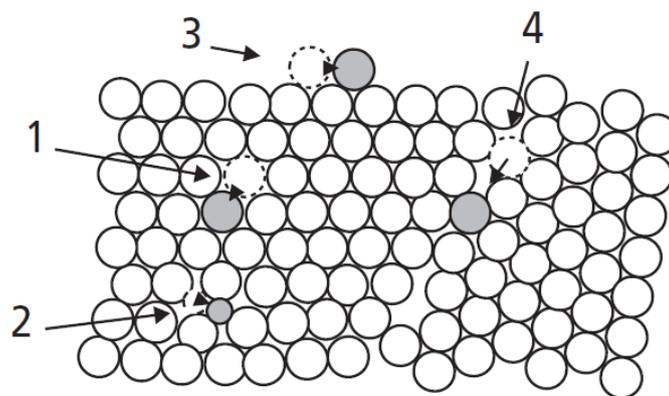


Figure I.29: Mécanismes de diffusion dans un cristal

**I.5.5.1: Mécanisme lacunaire :** Ce mécanisme concerne tous les cas classiques de diffusion d'atomes de substitution.

**I.5.4.2:mécanisme interstitiel :** Ce mécanisme intéresse des éléments de petits rayons ionique inférieur à  $1 \text{ \AA}^\circ$ , il est placé dans un réseau en position interstitielle. En raison de l'encombrement des atomes l'un para port a l'autre la diffusion ne peut avoir lieu que s'il existe une lacune au voisinage immédiat de l'atome qui doit migrer.

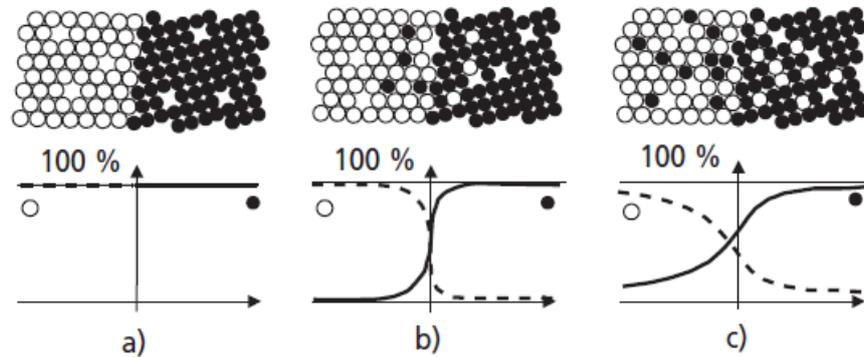
**I.5.5.3:diffusion superficielle.**

**I.5.5.4:diffusion dans un joint de grains.**

**I.5.6:Autodiffusion :** On parle d'autodiffusion pour le déplacement des atomes d'un élément pur ou majoritaire et d'hétéro diffusion pour le déplacement des atomes d'un soluté au sein d'un solvant. Dans tous les matériaux, l'agitation thermique et la mobilité atomique qu'elle entraîne commencent à avoir des effets perceptibles au-dessus d'une certaine fraction de la température absolue de fusion  $TF$  du matériau considéré.

Pour :  $T > 0,4 \text{ à } 0,5 TF$  pour l'autodiffusion dans les éléments purs;

$T > 0,5$  à  $0,7 TF$  pour l'hétéro diffusion dans les solides contenant plusieurs types d'atomes.



**Figure I.30** : Interdiffusion progressive de deux solides purs

- a)  $t = 0$  : contact direct entre les deux solides purs de natures chimiques différentes.  
 b)  $t_1 > 0$  : passage progressif des atomes l'un dans l'autre en tout point des concentrations.  
 c)  $t_2 > t_1$  : l'évolution est progressive en tout point des concentrations en chacun des deux des solide.

### I.5.7: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.

#### I.5.7.1:Etat stationnaire (première loi de Fick) [16]

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  $\text{m}^2/\text{s}$  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.

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

### I.5.7.2: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).

## Chapitre II.1 : Appareillage

### Introduction :

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

- Nous avons procédé à l'élaboration de l'alliage corroyé **Al-Cu 4% (2017A)**.
  - Notre alliage est obtenu par un procédé de fabrication de laminage des produits longs.
- L'essai de traction et l'essai, de dureté, microdureté, ainsi que l'examen microscopique ont été réalisés au niveau du laboratoire de métallurgie (S D M) de l'université Mouloud Mammeri (U.M.O.T.O) de Tizi- Ouzou

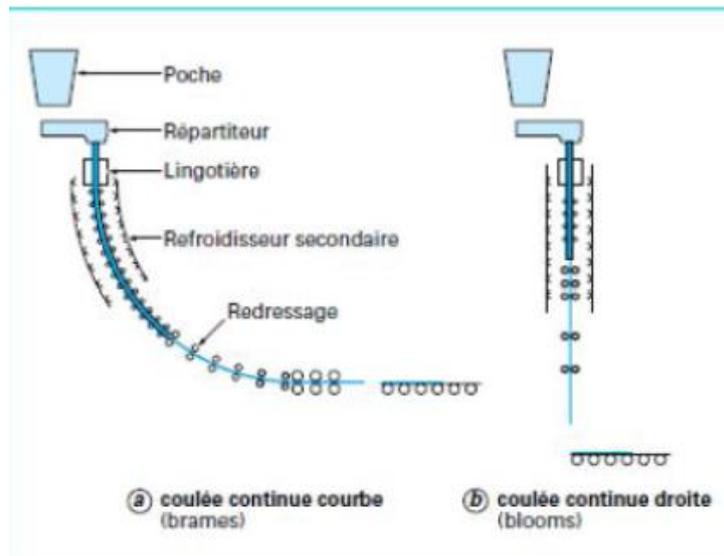
Les différents dispositifs utilisés dans notre travail sont comme suit :

### II.1 .1 : Transformation par corroyage :

**1- la coulée continue :** La coulée continue s'effectue à partir de l'alliage à l'état liquide. Le métal descend par gravité dans une filière ou moule refroidie par un circuit d'eau. Ce procédé métallurgique permet d'obtenir des produits semi-ouvrés longs du type : billettes, blooms, brames et largets. Le nom de ces produits semi-ouvrés dépend de la filière qui leurs donnent leurs formes et leurs dimensions.

### 2- Transformation par 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.



**Figure II.1:** Principes des machines de coulée continue

### II.1.2 : Le découpage :

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

Tension  $T=380V$ ,

Puissance  $P=1,5Kw$ ,

Poids = 600Kg



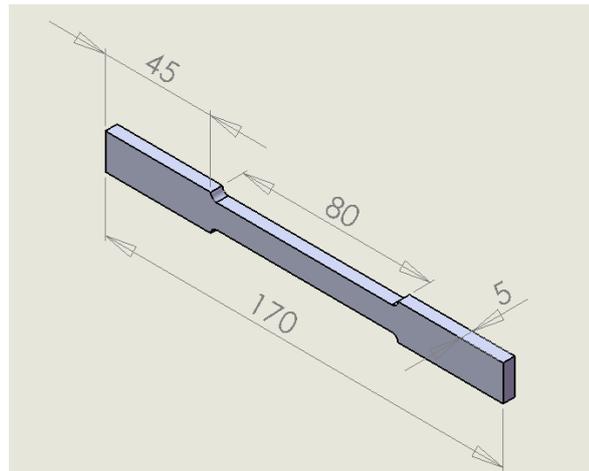
**Figure : II.2:** Scie mécanique

**II.1.3: La fraiseuse :** pour le prélèvement des éprouvettes on utilise une fraiseuse universelle pour réaliser les opérations de fraisage et de tournage. la préparation des éprouvettes et des échantillons a été réalisé au niveau de hall de technologisé a : Oued-Aissi.



**Figure. II.3.** Fraiseuse

Pour réaliser les essais de traction on utilise des éprouvettes plates de forme. La figure ci-contre montre la forme finale et les dimensions d'éprouvettes de traction utilisées.



**Figure II.4:** Epreuve de traction.

#### **II.1.4: Les traitements thermiques :**

##### **1 : Four de trempe :**

C'est un four à mufle à une résistance électrique alimenté sous une tension de 380V et de puissance 11KW allant jusqu'à 1200°C en température de chauffage, construit en tôle et profilés robustes, il est isolé avec de la laine d'alumine pour la rendre plus légère et isolée thermiquement. Un contact électrique coupe le circuit de résistances dès l'ouverture de la porte pour éviter au manipulateur toute décharge électrique. ses dimensions sont :

La largeur utile : 300 mm, La hauteur utile : 250 mm, La profondeur utile 400 mm

Un contact électrique coupe le circuit de résistance dès l'ouverture de la porte pour éviter au manipulateur toute décharge électrique.



**Figure II.5 :** Four de trempe

## **2 : Four de revenu:**

Le four à résistance électrique de tension de 380V et de puissance de 7KW allant jusqu'à 700°C en température de chauffage, équipé d'un thermocouple et d'une turbine pour convection forcée. La porte du four se ferme à l'aide d'un système vis écrou papillon permettant un bon serrage. Son isolation est faite par la laine d'alumine pour le rendre plus léger. Les deux fours sont munis d'un régulateur de type (OMRON) alimenté sous une tension de 220V allant jusqu'à 1200°C en température.



**Figure II.6:** Four de revenu

### II.1.5 :: Essai de traction :

Machine de traction: la machine de traction utilisée est de type IBERTEST alimentée sous une tension de 220V, ayant une charge maximale de 400 KN dotée d'un microordinateur qui a pour utilité de suivre l'évolution des essais et de les sauvegarder pour ne pas perdre les résultats des essais effectués.



Figure II.7 : Machine de traction



Figure II.8 : Echantillons de traction

### II.1.6 : Examens microscopiques :

Pour procéder à l'observation des différentes structures de surface, on prépare les échantillons traités thermiquement et brut de coulé avec les différents procédés de polissages et les attaque chimiquement avec le réactif qui convient, et pour cela on utilise des polisseuses pour effectuer les opérations de polissage, un bon réactif pour réaliser l'attaque chimique, un microscope optique pour réaliser l'observation microscopique, un microscope électronique à balayage (MET) observer les détails de la surface.

#### II.1.6.1 : Les polisseuses :

Pour obtenir une surface plane et la qualité de surface miroir. Cette opération de polissage est effectuée à l'aide de deux polisseuses:

- La première à deux disques de type : (STRUERS) alimentée sous une tension de 220V et d'une puissance de 150W munie d'un dispositif d'arrosage

- La deuxième à un seul disque de même type alimentée sous la tension mais de puissance de 432W utilisée pour réaliser les polissages de finition



**Figure II.9:** a) polisseuse de finition

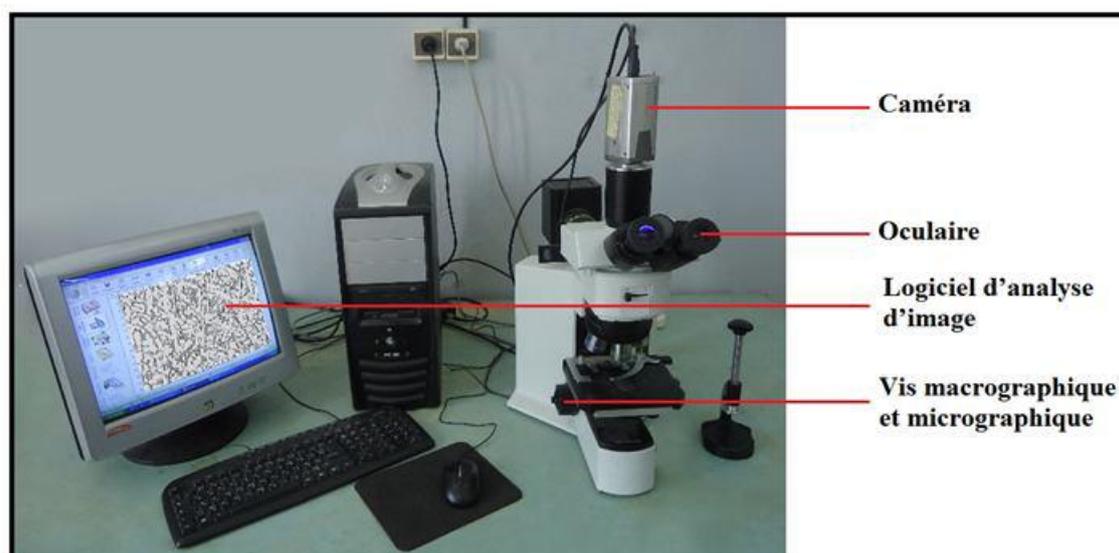
b) polisseuse a deux disques

▪ **Attaque chimique :**

L'attaque a pour but de relever les joints des cristaux et de différencier les constituants de l'alliage utilisé, après le polissage de finition. On rince notre échantillon et on le sèche puis ensuite on le soumet à une attaque chimique qui consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif pendant un temps convenable à la température ambiante, puis on lave l'échantillon sous un jet d'eau et on sèche à l'aide d'un séchoir.

**II.1.6.2 : Le microscope optique :**

C'est un microscope optique universel de marque ZEISS XL30 alimenté sous une tension de 220 V, avec une fréquence de 50Hz et une puissance de 100W, Muni d'un appareil photo automatique ayant un pouvoir de résolution allant 50 à 400 fois.



**Figure: II.10:**microscope optique

**II.1.6.3 : Microscope électronique a balayage (MEB) :** c'est un microscope un microscope environnemental de type ASEM XL30 de marque Philips équipé d'un EDAX pour microanalyse X par dispersion d'énergie (EDS).



**Figure II.11:** Microscope électronique a balayage (MEB)

### II.1.7 : Mesure de la dureté :

La dureté de matériau est une propriété mécanique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration (type d'essai). Dans notre travail en a réalisé deux types d'essais : la dureté BRINEL et la dureté VICKERS et pour réaliser ces essais en a utilisé un duromètre et un microduromètre.

- **L'essai de dureté :** a été réalisé grâce un duromètre, ce dernier est muni d'une bille de diamètre 2,5mm, et d'un sélecteur de charge de 15 kgf, une table sur laquelle on pose l'échantillon 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  $f=50Hz$

- **L'essai de microdureté** : a été réalisé grâce un microduromètre, ce dernier est muni d'un pénétrateur en diamant en forme pyramidale d'angle au sommet de  $136^\circ$  d'un sélecteur de charge de 100 g, une table sur laquelle on pose l'éprouvette. Ce dernier affiche automatiquement le diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur ainsi que sa microdureté correspondante. Il possède les caractéristiques suivantes : Tension  $T=220V$ , Fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$



**Figure : II.12** : a) Duromètre      b) Microduromètre

## Chapitre II.2 : Matériau et modes opératoires

Dans cette partie qui suit, nous vous présentons les différentes techniques expérimentales 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
- Trempée dans un lubrifiant contenant d'huile soluble mélangé avec eau qui contient (30% d'huile soluble+ 70%de H<sub>2</sub>O) notée : LT
- Les températures de Revenu (vieillessement artificiel) notées : L-Rv(150, 160,170,180,190,200,220 et 240 )°C

**II.2.1 : Le mode d'élaboration** : on utilise comme matériau d'étude un matériau élaboré avec un procédé de fabrication de corroyage et de laminage. Notre matériau est un alliage d'aluminium fourni par le Hall de technologie II contient : **4% cuivre** comme élément d'alliage principale et quelques impuretés (éléments d'alliages secondaires) tel que : **Mg, Fe, Si** qui est le : **2017A**

Composition chimique de notre alliage :

Sa composition chimique est donnée par le tableau II.1 suivant :

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

**Tableau II.1:** composition chimique de l'alliage étudié.

**II.2.2 : Analyse chimique sur le matériau étudié :**

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

**II.2.3 : Techniques d'élaboration de matériau d'étude :**

Pour obtenir le matériau d'études il faut subir les différentes étapes et modes d'élaboration de corroyage et de laminage qui convient :

**II.2.3.1 : Elaboration par corroyage :**

- **Le corroyage** : est un procédé d'élaboration de produits dont la première étape est réalisation d'éléments en coulée continue.

La coulée continue s'effectue à partir de l'alliage à l'état liquide. Le métal descend par gravité dans une filière ou un moule refroidie par un circuit d'eau.

Ce procédé métallurgique permet d'obtenir des produits semi-ouvrés long du type : billettes, blooms, brames et largets. Le nom de ces produits semi-ouvrés dépend de la filière qui leurs donnent leurs formes et leurs dimensions.

Dans cette étape les éléments d'alliages et d'additions seront ajoutés avec une grande précision pour obtenir la sortie du coulé continue l'alliage désiré. et dans notre cas les éléments d'alliages sont les éléments de : **2017A**.

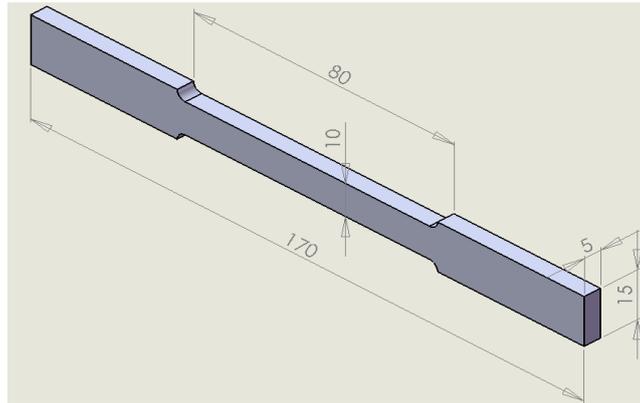
A la suite de cette première élaboration, ces produits (alliages) semi-ouvrés seront transformés par les différentes procédés de la mise. Et dans notre cas en vas suivre la transformation et la mise en forme par laminage.

- **Laminage** : il permet la transformation de l'alliage par déformation à chaud ou à froid. Le laminage confère également au produit les propriétés mécaniques et les qualités de surface et de structure interne souhaitées. Cette transformation à la fois physique et métallurgique implique généralement plusieurs « passes » de laminage dans diverses « cages » de laminoirs
- **Laminage a chaud** : Lorsque la déformation s'opère à une température supérieure à la température de recristallisation à l'état pâteux.
  - **Le laminage à froid** : s'opère à une température inférieure à la température de recristallisation. Un laminage à froid est réalisé après le laminage à chaud pour des épaisseurs inférieures à 6 mm.

### II.2.3.2 : Prélèvement et usinage des éprouvettes :

On a prélevé les éprouvettes de traction selon les normes nationales et internationales. Le découpage a été effectué respectivement par une scie mécanique et usinage a été fait par une fraiseuse universelle.

La découpe des éprouvettes a été établie suivant les géométries présentées sur la figure suivante :



**Figure : II.13:** Forme et dimension des éprouvettes de traction utilisées

#### **II.2.4 : Traitements thermiques :**

Pour effectuer les différents traitements il faut laisser 5 éprouvettes et 2 échantillons à l'état brut de coulé : (BC) ou F dans le but de contrôler les résultats et les caractéristiques mécaniques effectués à la fin de notre travail. Les autres éprouvettes vont subir les traitements thermiques suivants :

##### **II.2.4 .1: Traitement d'homogénéisation :**

Il consiste à chauffer les éprouvettes et les échantillons dans un four de trempe à une température de 500 °C pendant un temps de maintien de 8 h.

##### **II.2.4 .2: Traitement de trempe :**

Les traitements de trempe consiste à trempés par gravité (avec grande vitesse) les éprouvettes et les échantillons dans un bain de lubrifiant qui contient (70% H<sub>2</sub>O+30%d'huile soluble).

Mais en laisse toujours 5 éprouvettes de traction et 2 échantillons pour plissage.

##### **II.2.4 .3: Traitement de vieillissement naturel :**

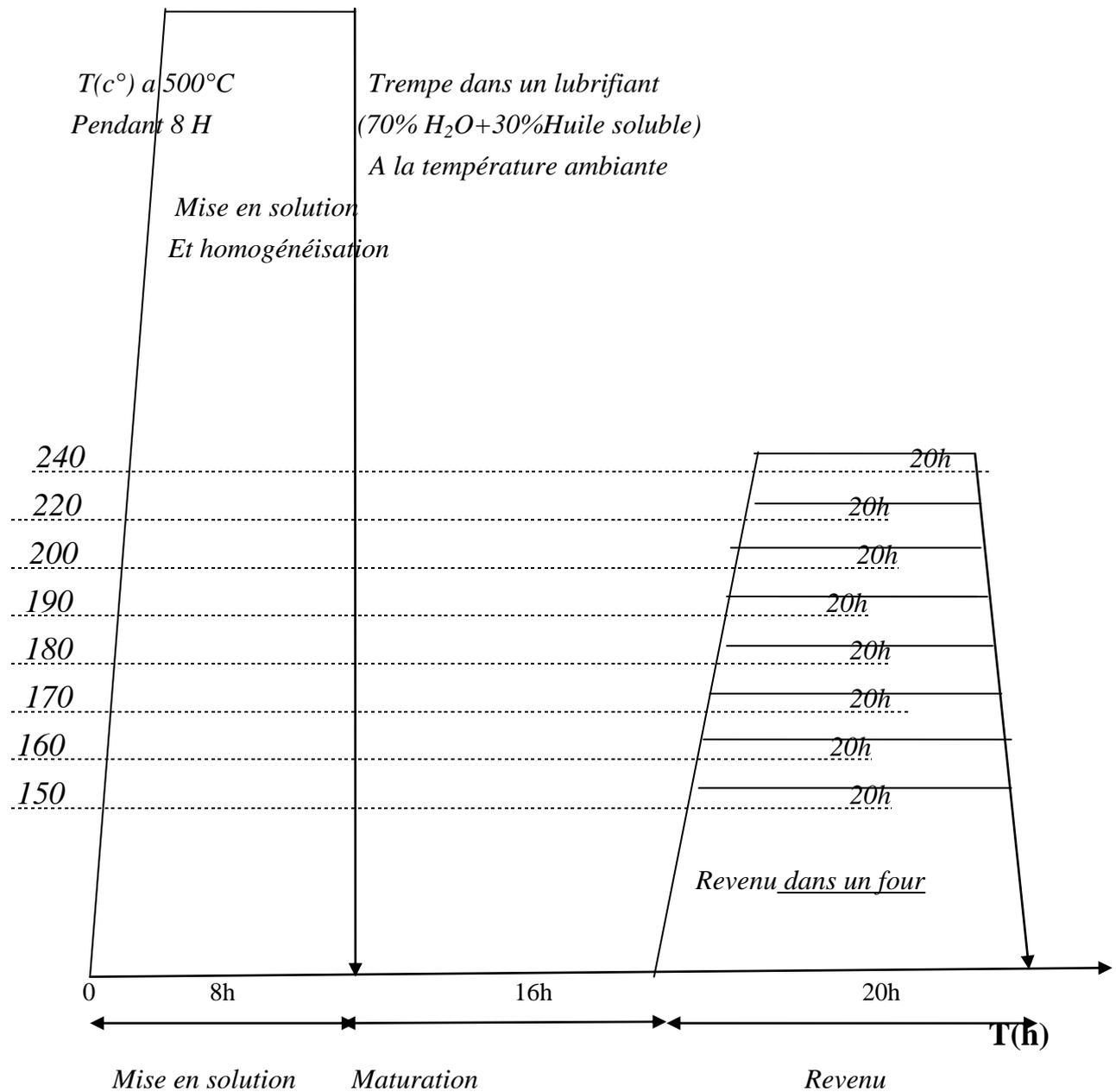
Juste après la trempe on laisse les éprouvettes et les échantillons à l'air libre pour subir un vieillissement naturel pendant 16h.

##### **II.2.4 .4: Traitement de revenu :**

Les éprouvettes et les échantillons vont subir les différents traitements de maturation avec des températures de revenu (maturation) différentes. Les températures de revenu seront variées avec un pas de 10 à 20 °C. En règle le four de revenu à la température désirée pour chaque opération en met dans le four 5 éprouvette de traction et 2 échantillons pour la dureté et microstructure, et en laisse les éprouvettes et les échantillons dans le four pendant un temps de maintien de 20 h.

Les températures de revenu seront notées comme suit : LRv150, LRv160, LRv170, LRv180, LRv190, LRv200, LRv220, LRv240.

**II.2.5: Cycle thermique effectué pour l'alliage AL-Cu a 4% de Cu :**



**Figure : II.14:** Cycle Thermique

### II.2.6:Essais mécaniques :

Les essais mécaniques effectués sont les essais de traction et de dureté.

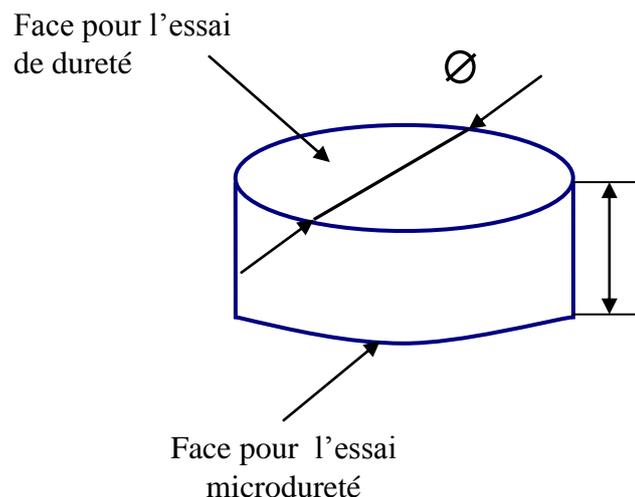
Essai de traction : les éprouvettes de traction traitées thermiquement par différentes températures de revenu, de trempée et brut de coulée en subit un effort de traction continu jusqu' à la rupture avec une vitesse de traction de 0,5 daN /s a température ambiante.

#### II.2.6.1:Essais de traction :

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

#### II.2.6.2:Essai de dureté et de microdureté :

Les essais de la dureté réalisés sont : essai Brinell et l'essai Vickers. Le diamètre de la bille égal à 2,5mm, sous une charge de 15 kgf pour l'essai Brinell, et une charge de 0,05g pour l'essai de Vickers. la première étape est la réalisation d'une empreinte, tandis que la deuxième étape est la mesure de diamètre de l'empreinte, la mesure s'effectue à l'aide d'une règlette sur un écran de verre dépoli avec un grossissement de 70 fois. Pour chaque essai en réalise au moins 5 empreintes. Et en calcule la moyenne.



**Figure II.15:** Echantillon pour l'essai de dureté et pour la microdureté.

### II.2.7: Observation microscopique

Dans tout travail métallurgique se basant sur une observation microscopique, il est très important de bien préparer les échantillons afin d'aboutir aux meilleurs résultats possibles. Les échantillons doivent passer par des opérations connues et bien déterminées. Pour cela nous devons adopter divers étapes :

#### II.2.7.1: Polissage

Le polissage a pour but principal l'obtention d'une surface plane et la qualité de surface miroir. Cette opération de polissage est effectuée en deux étapes :

#### II.2.7.2: Pré - polissage

Il se fait par frottement de l'échantillon, à l'aide de tout moyen approprié, par exemple sur des papiers abrasifs de granulométries de plus en plus fines. Dans le cas où des papiers abrasifs sont utilisés, ceux-ci doivent être fixés sur des disques tournant à une vitesse donnée à l'aide d'une polisseuse **Figure II.9:b** L'échantillon étant alors frotté à la main sur les papiers. Le polissage se fait habituellement avec arrosage d'eau pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon.

Le polissage consiste à éliminer successivement les traces de polissage d'un papier d'une granulométrie donnée par de nouvelles suivantes. À chaque changement de granulométrie, l'échantillon doit être lavé à l'eau et séché. De plus, lors du polissage manuel, à chaque changement de granulométrie, l'échantillon doit subir une rotation de 90° De façon à ce que les nouvelles raies de polissage soient perpendiculaires aux raies Précédentes.

#### II.2.7.3: Polissage de finition

Après avoir terminé l'opération de pré-polissage nous avons fait subir aux échantillons un polissage de finition. Cette opération permet d'améliorer davantage l'état de surface en Utilisant des feutres imbibés de suspensions d'alumine diluées dans l'eau. La granulométrie de la poudre d'alumine utilisée est de 0,05  $\mu\text{m}$ . **La figure II.9.a** représente la polisseuse utilisée pour le polissage de finition avec une vitesse maximale de rotation de 400 tours/mn.

**II.2.7.4:Attaque chimique**

Provoquant une dissolution différentielle des cristaux suivant leur orientation, des Phases suivant leur nature ou une attaque spécifique aux joints de grains. Comme montre-le Tableau suivant :

| élément  | NaOh | ZnCl <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O |
|----------|------|-------------------|------------------|
| quantité | 5 g  | 1 g               | 100 ml           |

**Tableau. II.2:** composition chimique de réactif utilisé

**II.2.7.5:Microscopie :**

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

## ❖ Partie .III. Résultats et interprétation

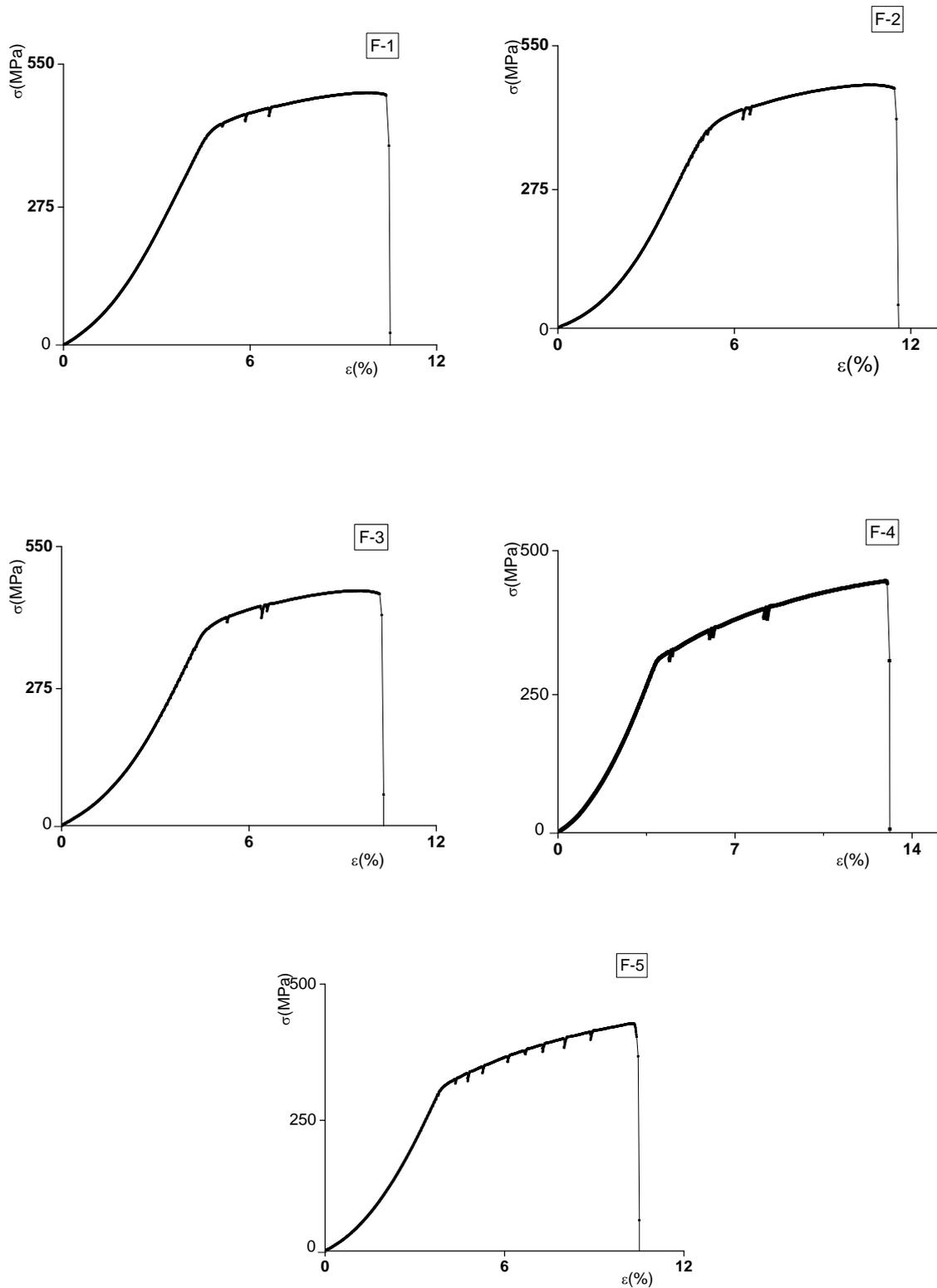
### Introduction :

L'aluminium a une apparence blanche argentée, il est très léger et est utilisé comme allié pour une multitude de différentes applications. Seules de très petites quantités d'éléments d'alliage peuvent renforcer sa robustesse, et en raison de leur faible densité, et de leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques. Les alliages d'aluminium sont tout particulièrement indiqués pour les applications dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. Les alliages d'aluminium sont aussi fréquemment utilisés dans l'industrie automobile pour favoriser les réductions de poids. La grande résistance à la corrosion de l'aluminium est due à une couche passivante d'oxyde d'aluminium. Parmi ces alliages le système Al-Cu qui occupe une place importante dans l'industrie aérospatiale, grâce à ces avantages mini à être un alliage de corroyage à durcissement structurale peut améliorer leurs propriétés grâce à une série de traitements thermiques effectués avant leurs utilisations.

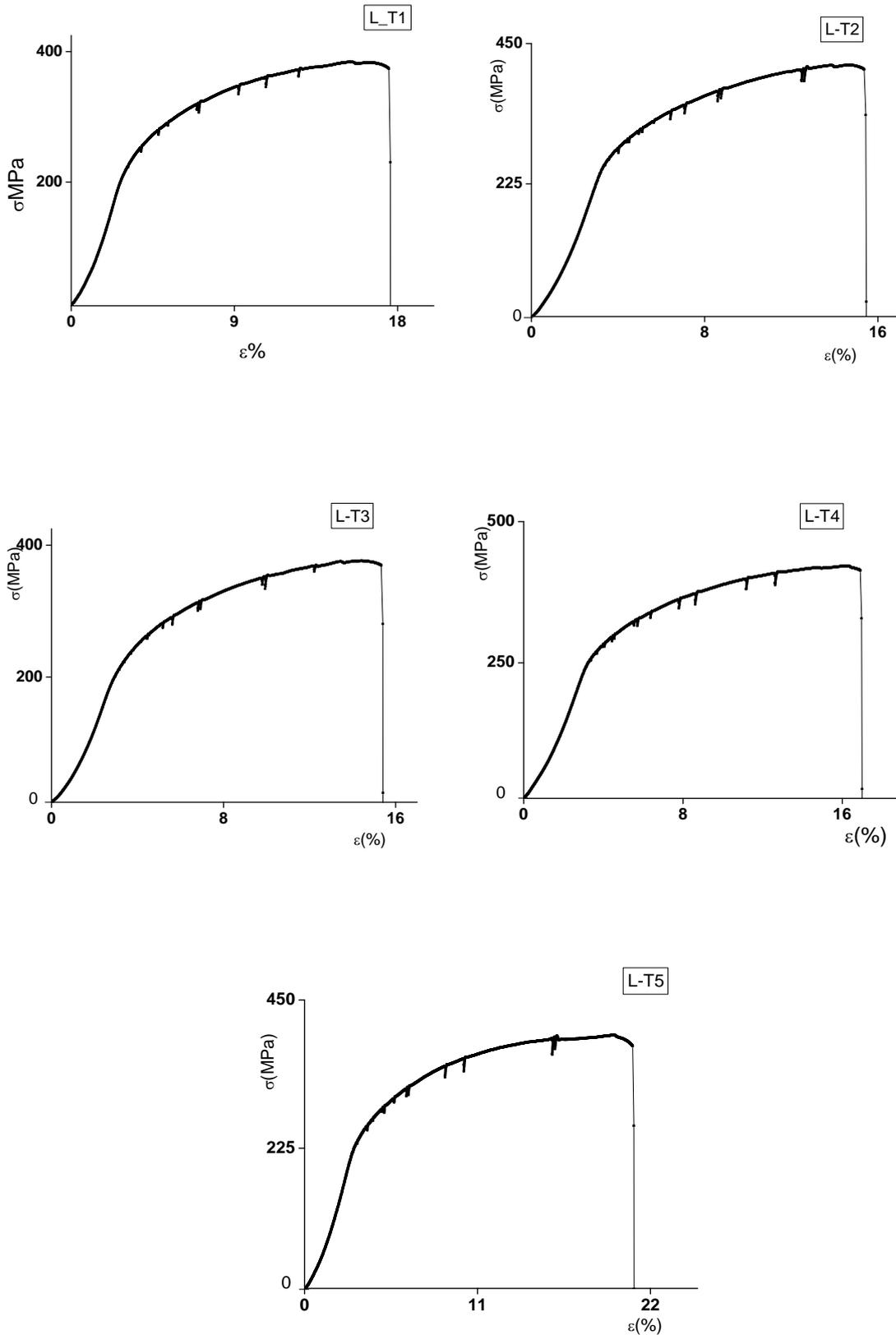
Dans cette partie on s'est intéressé à l'étude des effets de la variation de température de revenu et de fluide de trempe, ainsi que les éléments d'aditions Mg, Si. en effectuons 10 états déférentes BC,T, LRv(150, 160, 170, 180,190,200,220,240)°C sur les l'évolution des caractéristiques de traction, de dureté HB , de microdureté HV et de la microstructure de l'alliage corroyé **2017A**.

### III.1.Caractéristiques de traction :

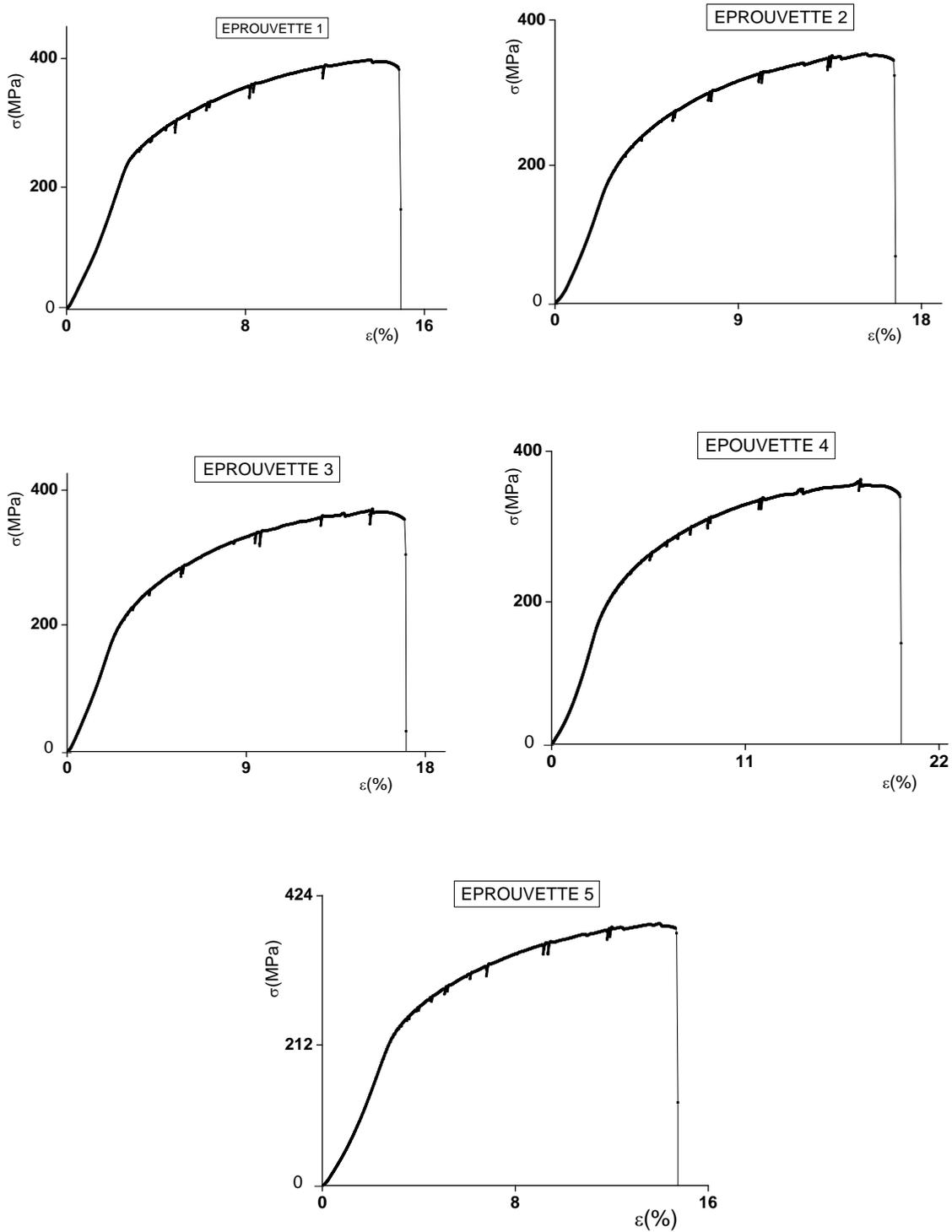
Les caractéristiques élastiques et plastiques des matériaux sont des paramètres très importants lors de la conception des éléments entrant dans déverses réalisations soumise à des efforts extérieurs en général et mécaniques en particuliers. En effet, la limite élastique fixe le seuil admissible à ne pas dépasser pour éviter aux pièces réalisées de franchir le domaine réversible (élastique) à celui de la déformation permanente (plastique). L'élongation et la charge à la rupture nous renseignent respectivement sur la limite de déformabilité des matériaux destinés à subir des modification géométriques et l'estimation de la résistance du matériau au delà de laquelle ce dernier amorce son entrée dans la phase de la rupture . Tous ces paramètres sont déterminés à la suite de l'essai de traction.



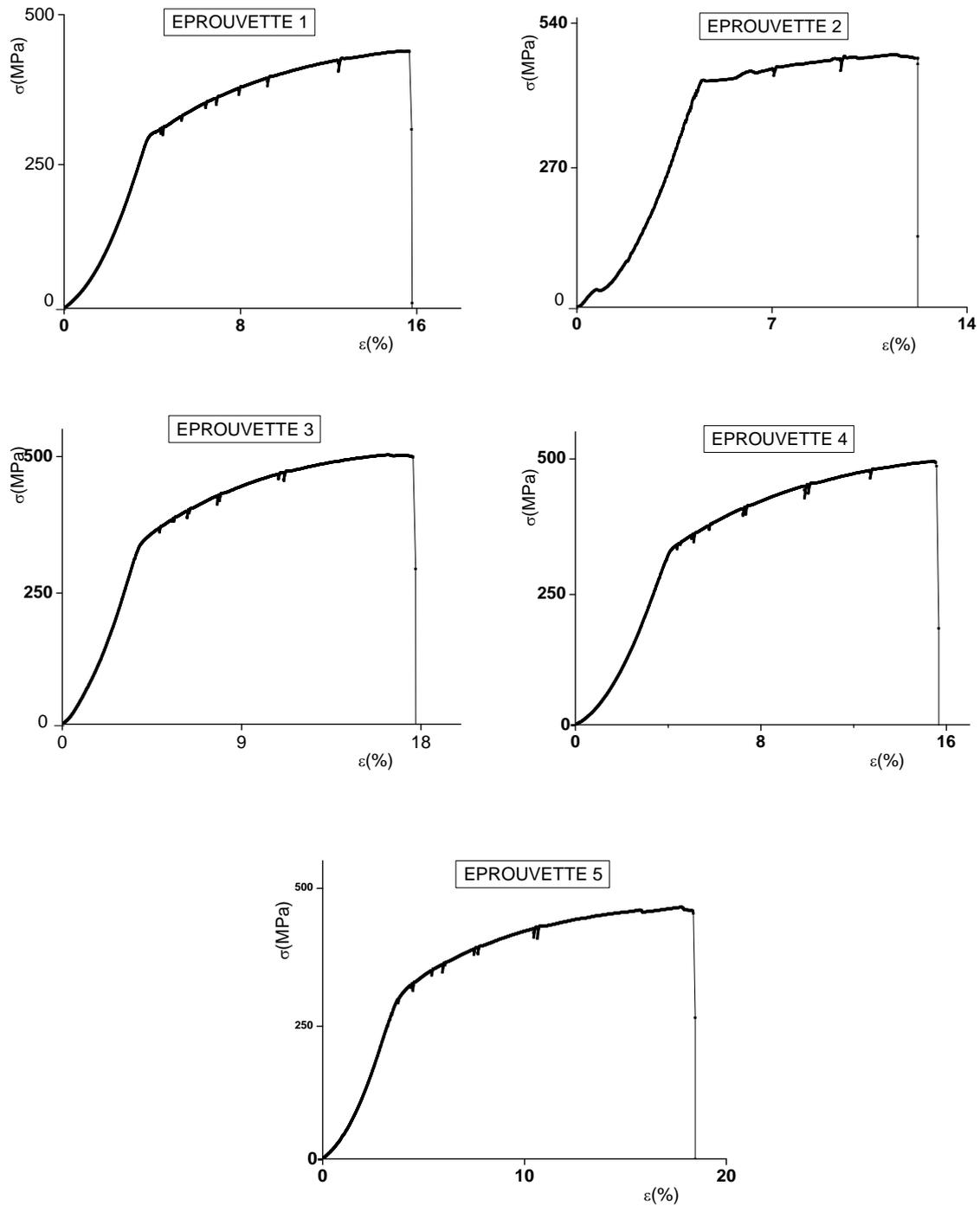
**Figure III.1:** Courbes de traction (contraints déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4% a l'état brut de coulée



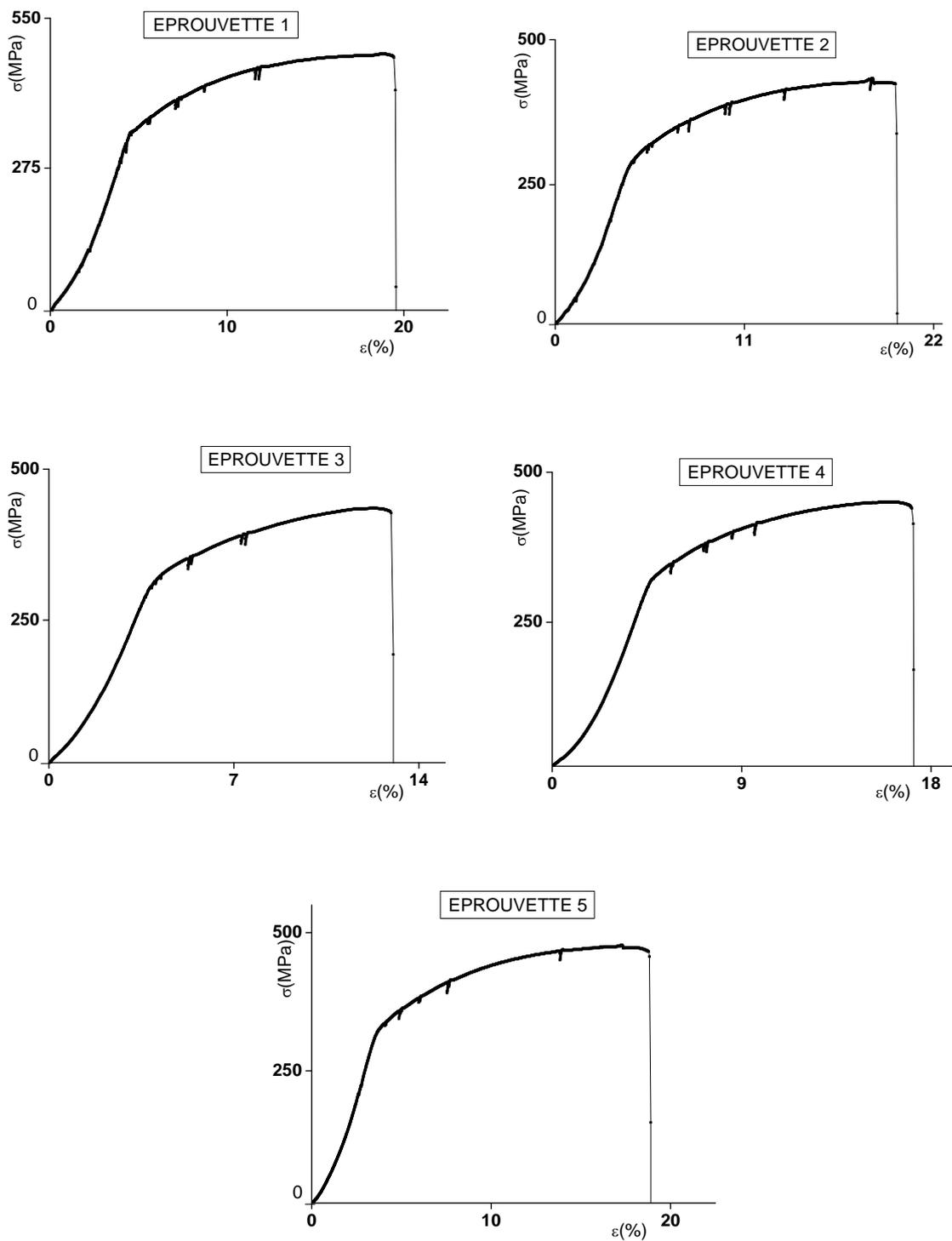
**Figure III .2 :** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état trempé LT



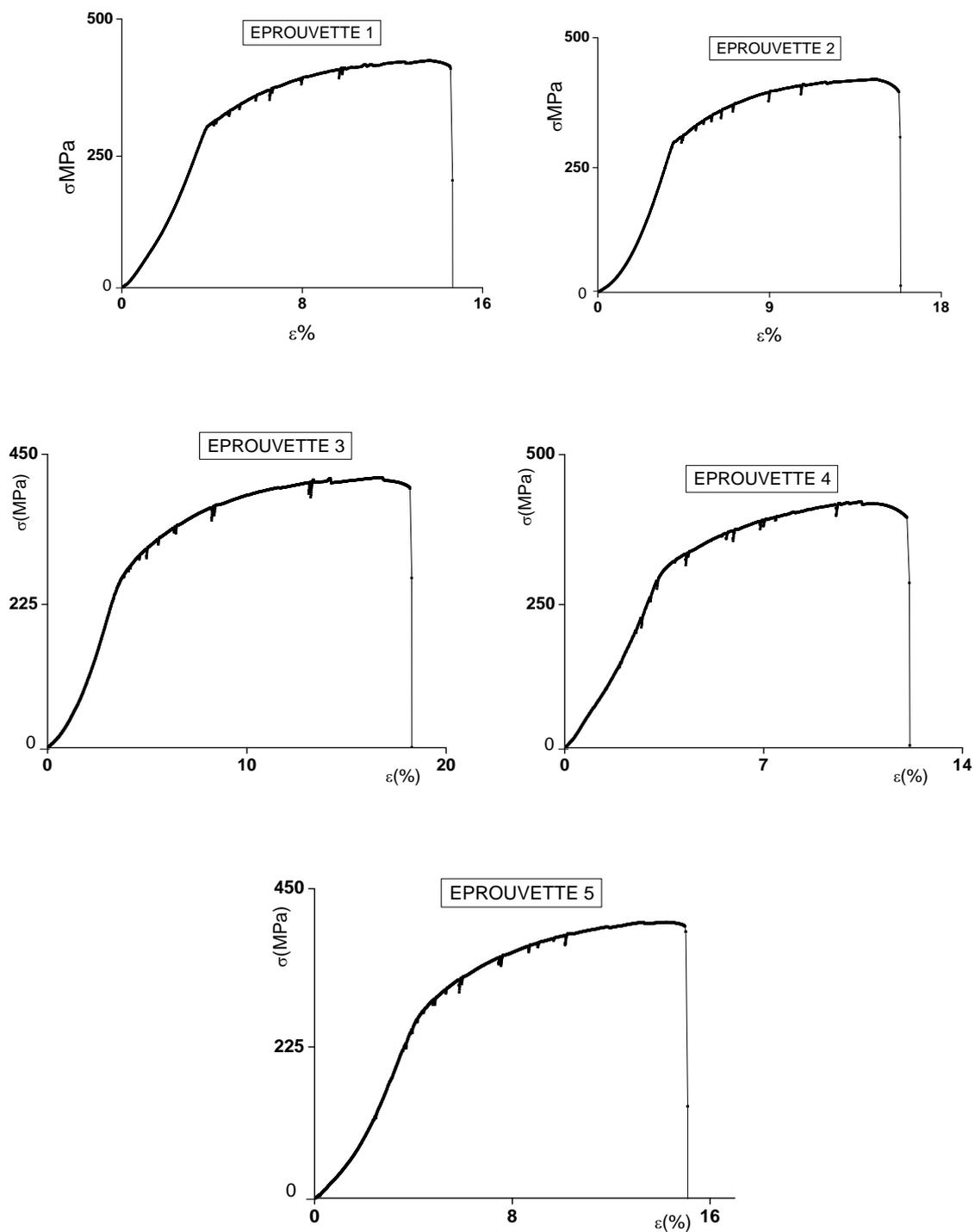
**Figure III.3 :** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu LRv-150°C



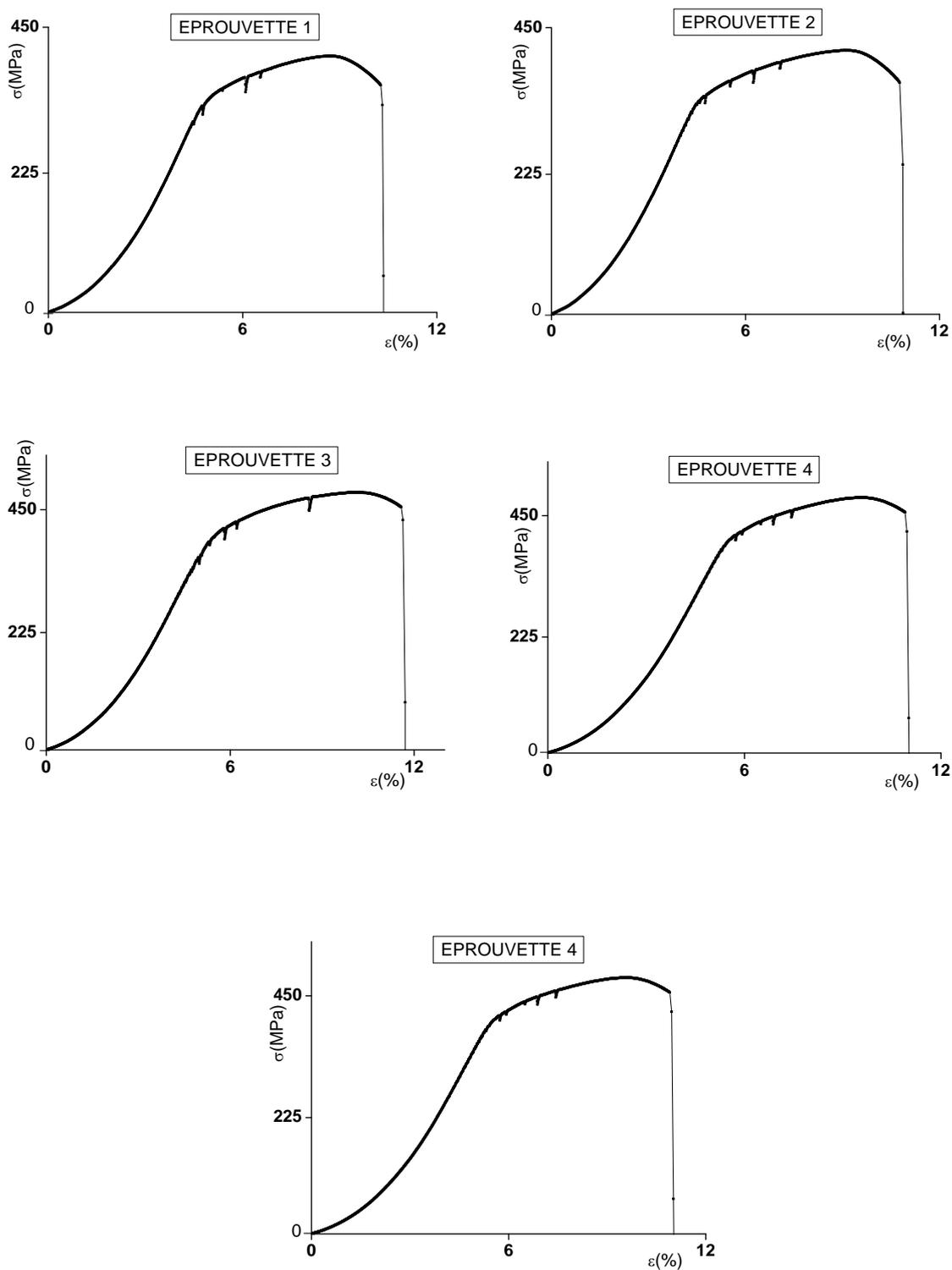
**Figure III.4 :** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état LRv-160°C



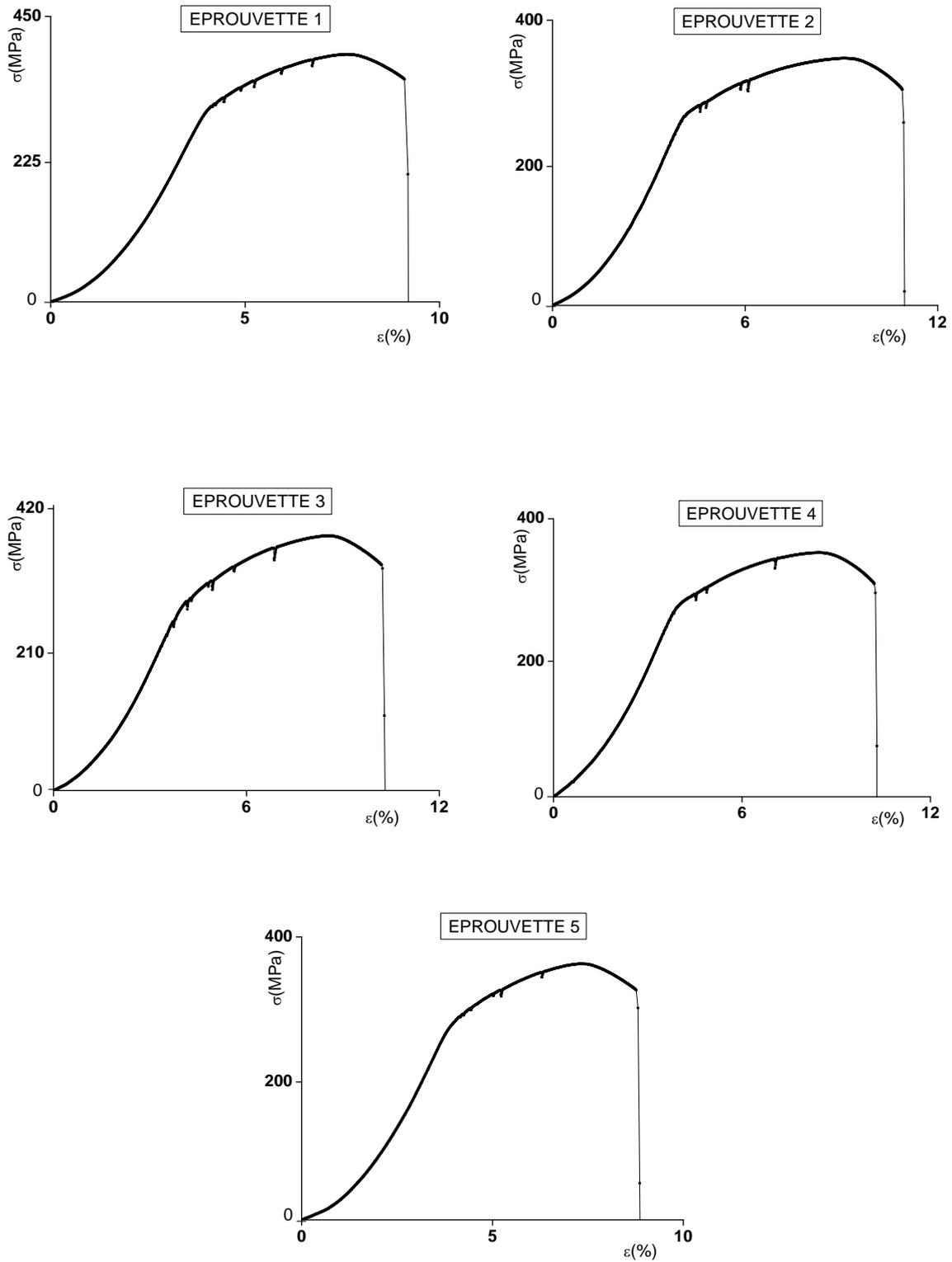
**Figure III.5 :** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage Al-Cu 4 % laminé à l'état LRv-170°C



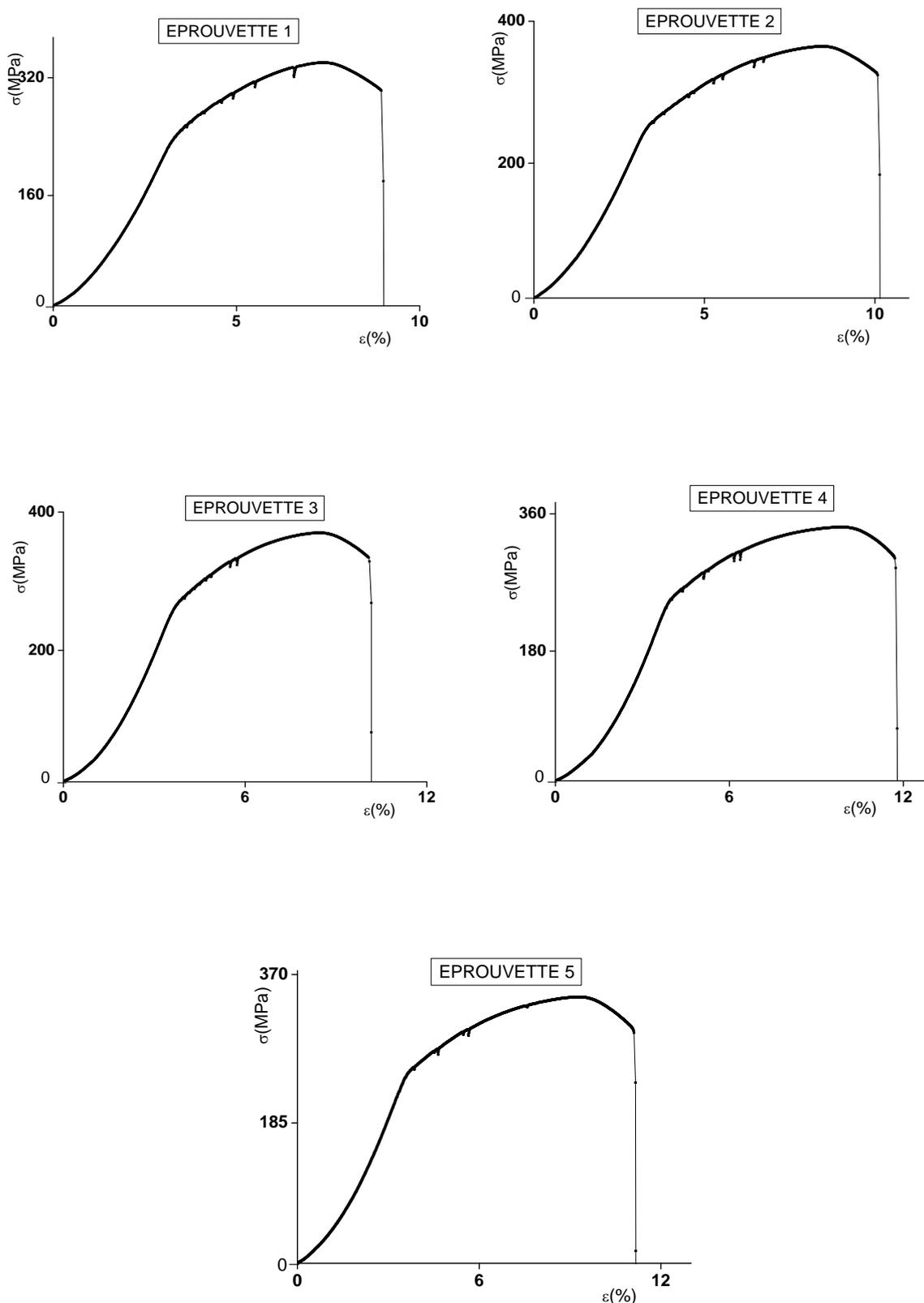
**Figure III.6 :** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage Al-Cu 4 % laminé a l'état de revenu de LRv-180°C



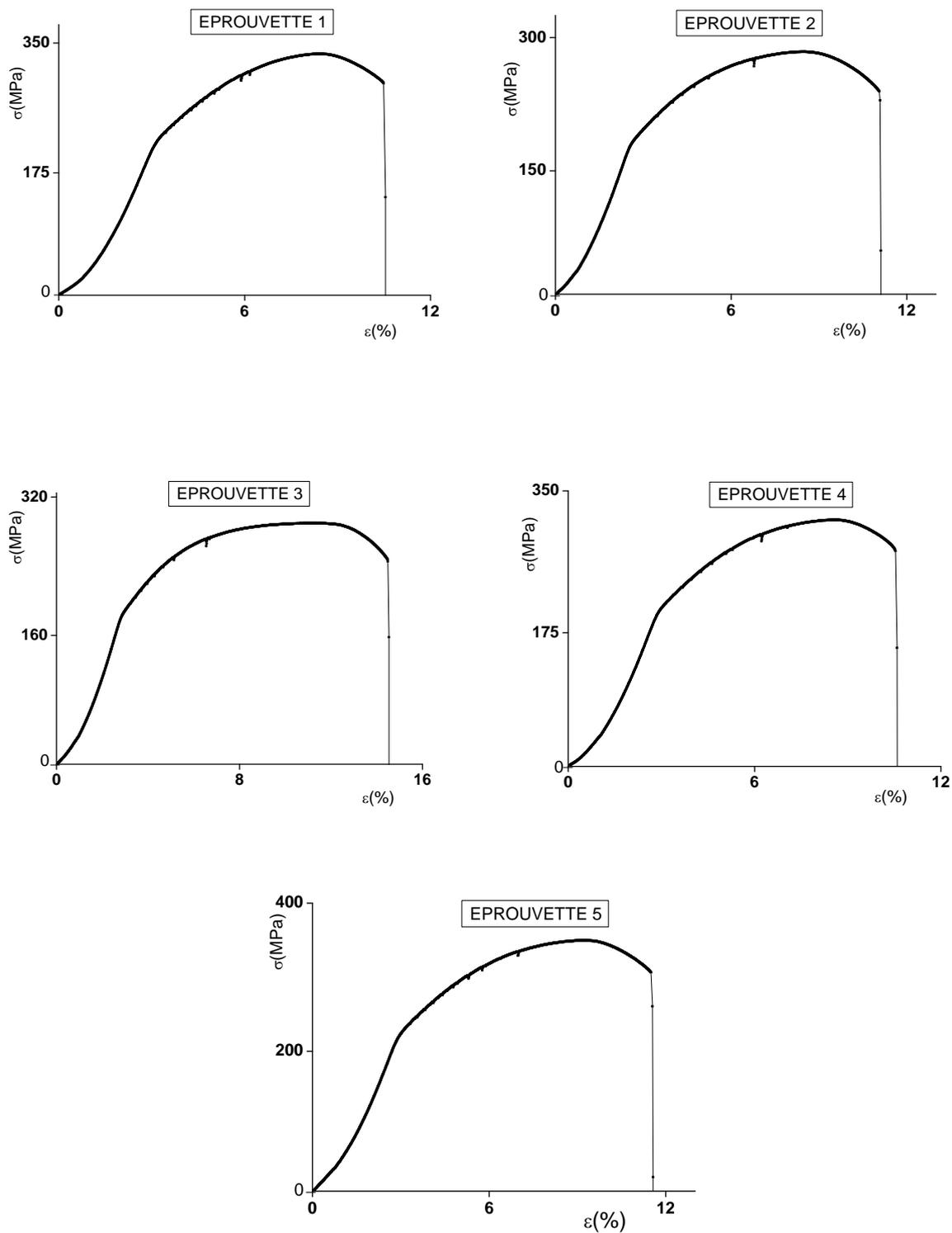
**Figure III.7 :** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage Al-Cu 4 % laminé a l'état de revenu de LRv-190°C



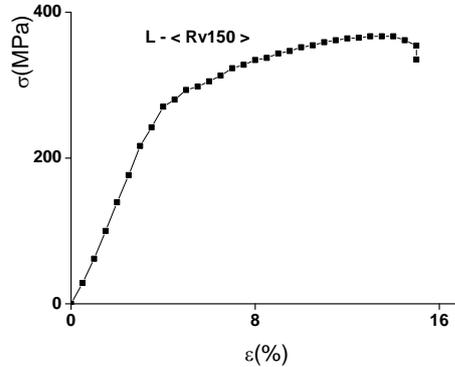
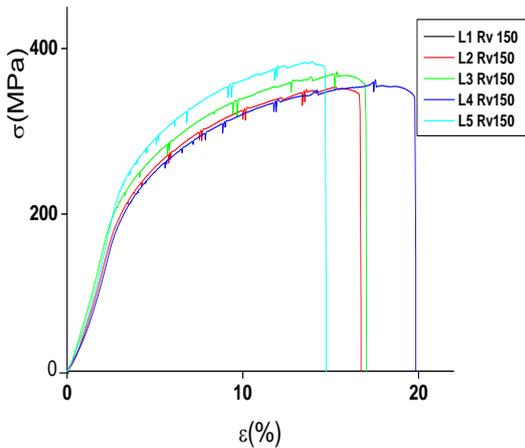
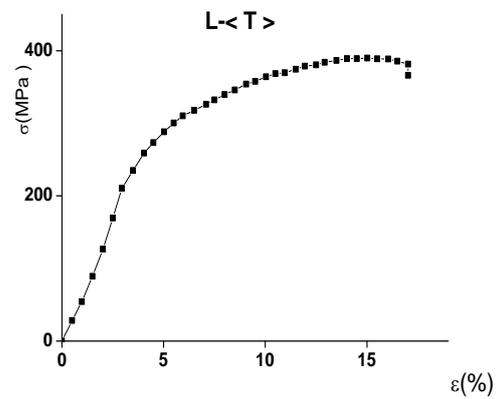
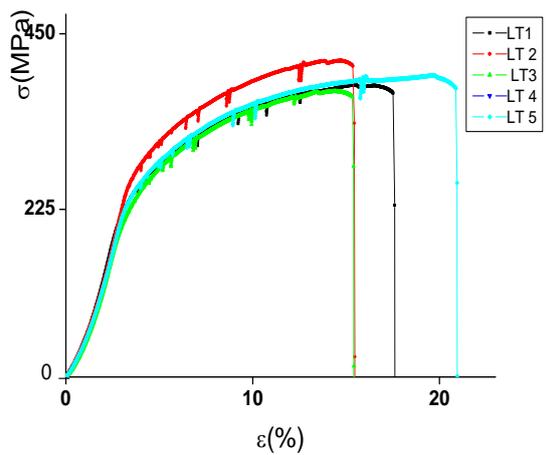
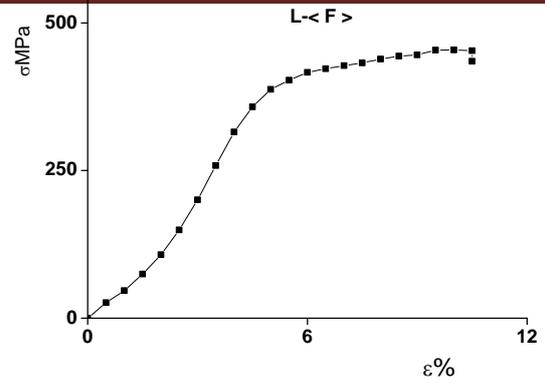
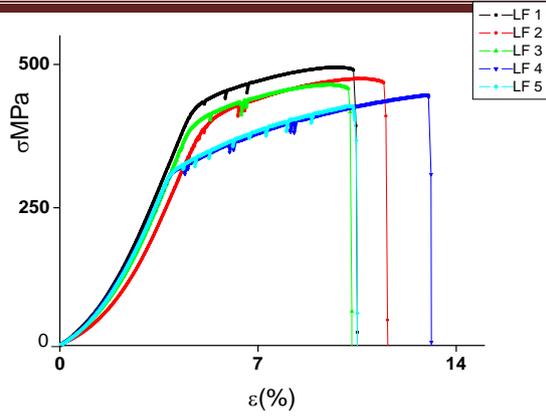
**Figure III.8 :** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage Al-Cu 4 % laminé à l'état de revenu LRv-200°C



**Figure III.9** : Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % a l'état de revenu LRv-220°C

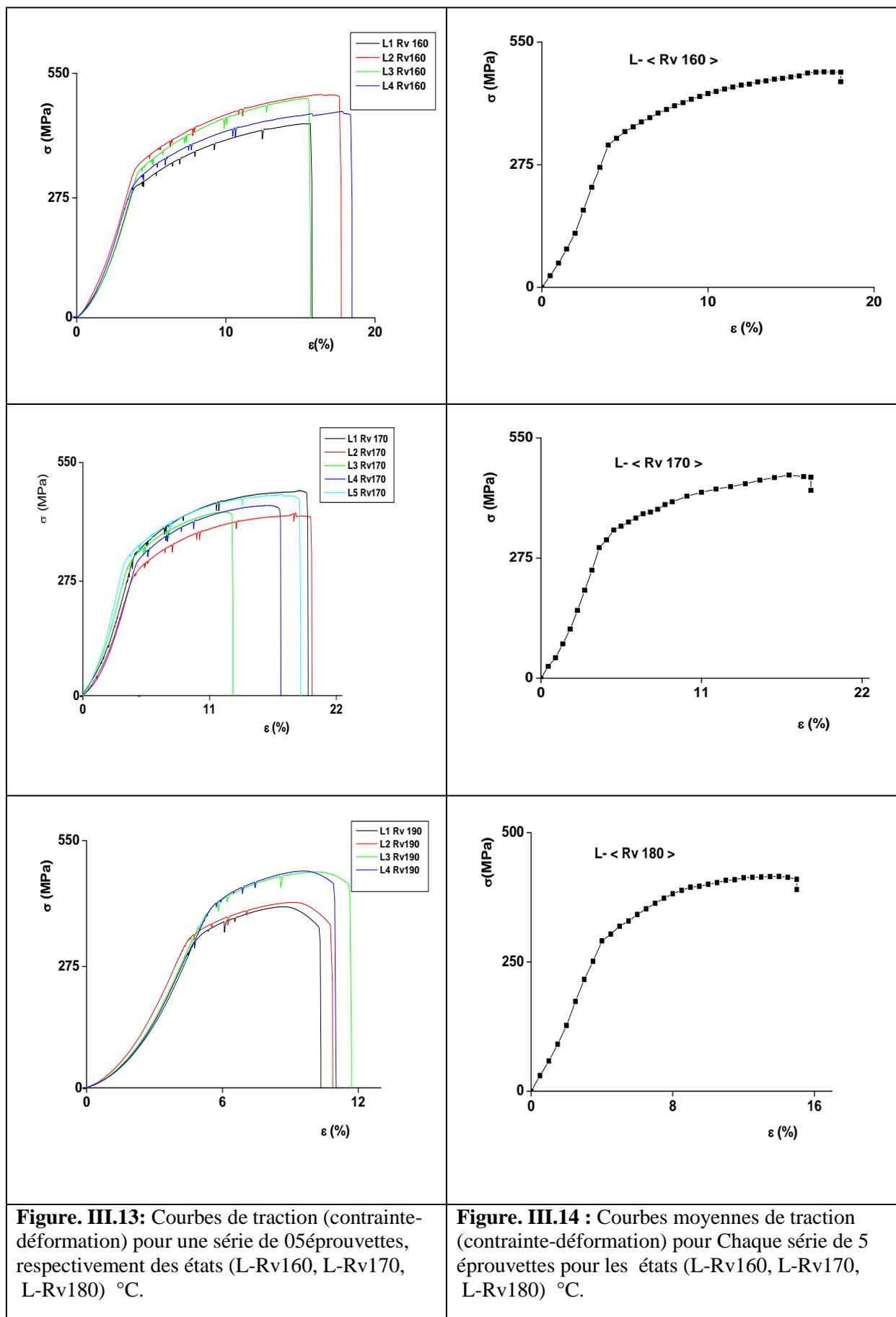


**Figure III.10:** Courbes de traction (contrainte- déformation) pour une série de 5 éprouvettes identiques de l'alliage corroyé Al-Cu 4 % à l'état de revenu de LRv-240°C



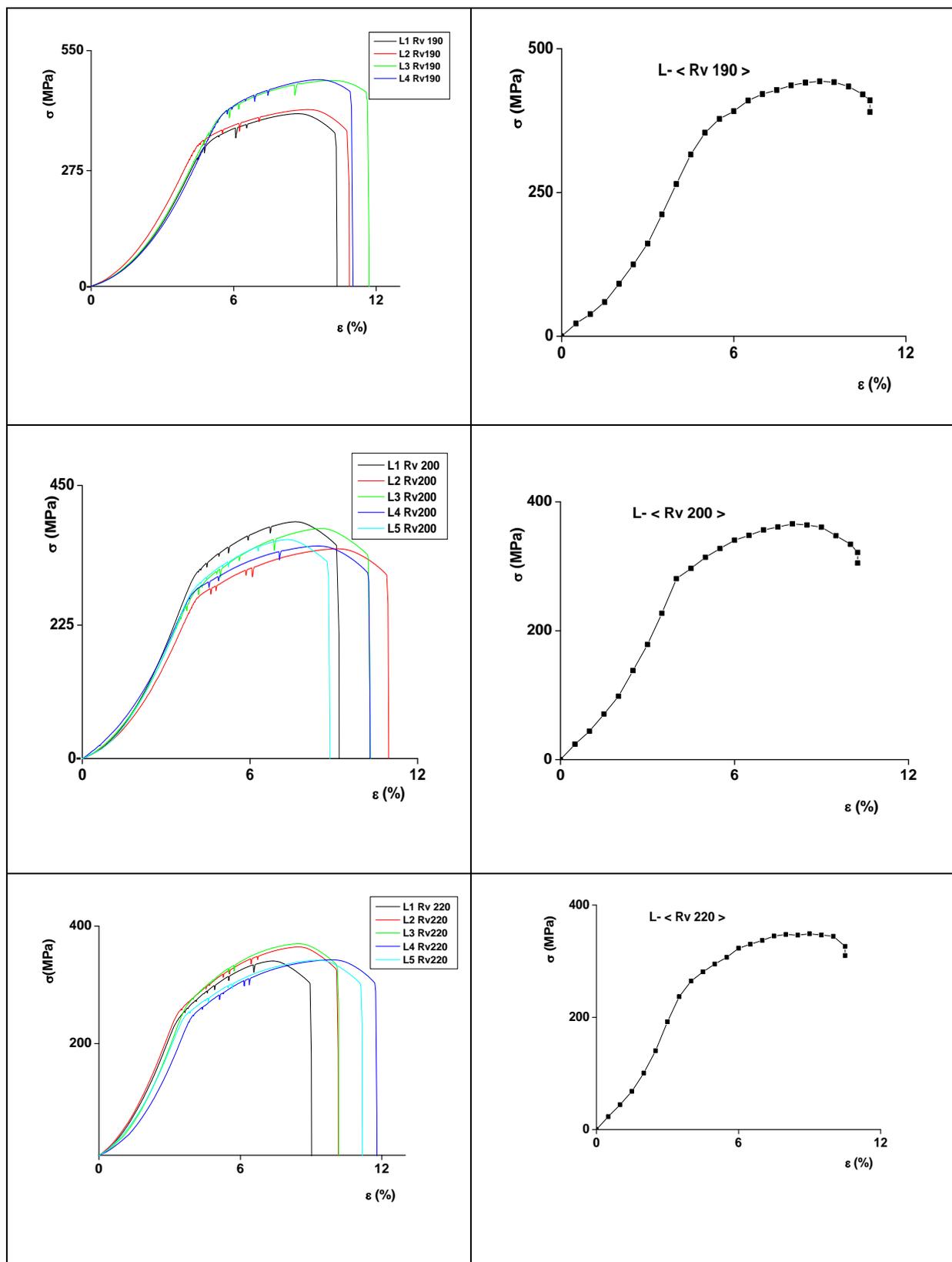
**Figure. III.11 :** Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes, respectivement des états (BC, T, L-Rv150) °C.

**Figure. III.12 :** Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes des états (BC, T, L-Rv150) °C.



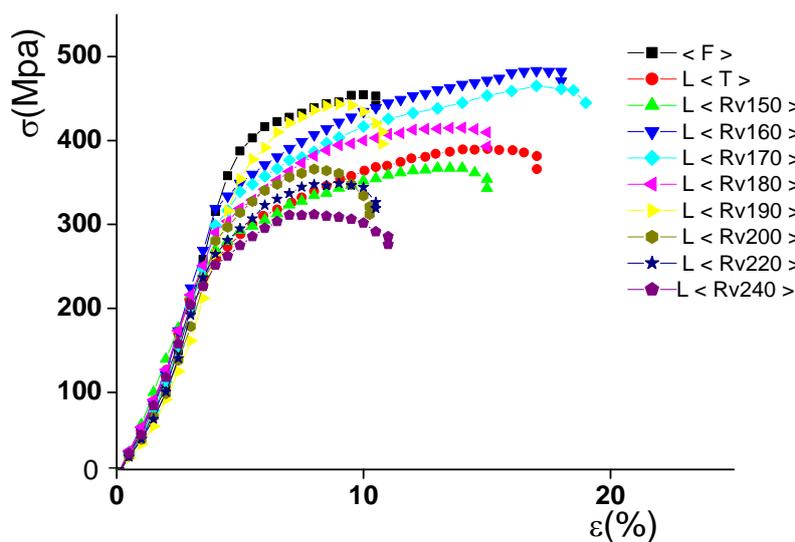
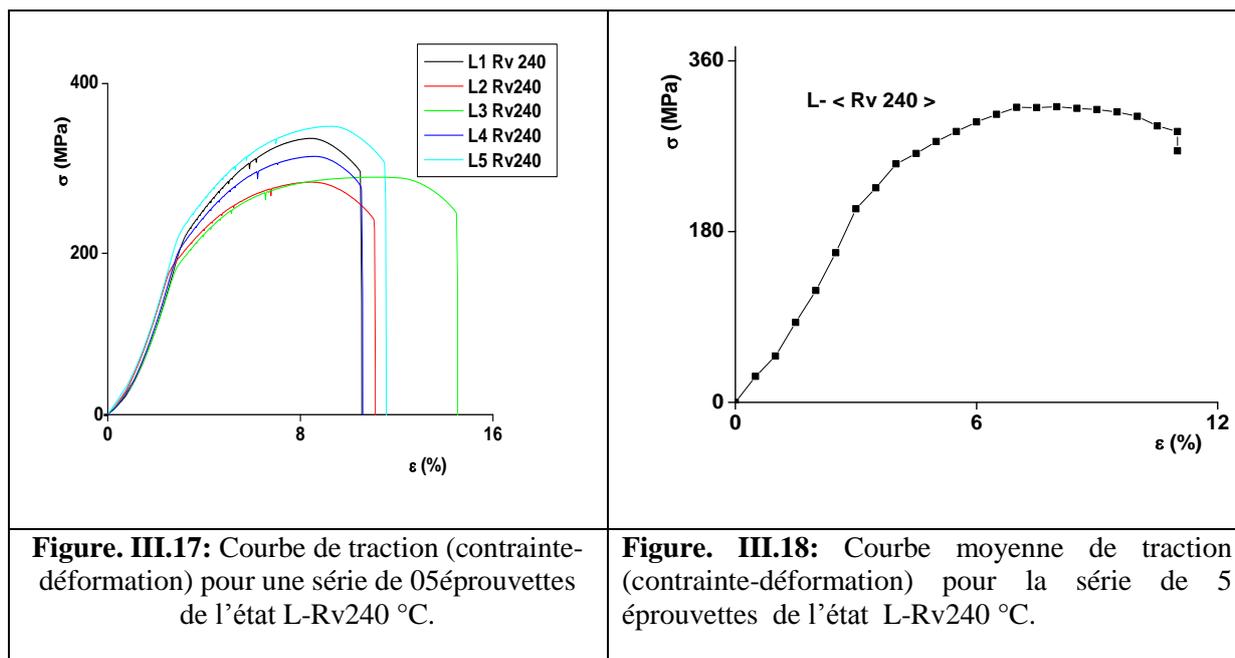
**Figure. III.13:** Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05 éprouvettes, respectivement des états (L-Rv160, L-Rv170, L-Rv180) °C.

**Figure. III.14 :** Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (L-Rv160, L-Rv170, L-Rv180) °C.



**Figure. III.15:** Courbes de traction (contrainte-déformation) pour une série de 05éprouvettes, respectivement des états (L-Rv190, L-Rv200, L-Rv220) °C.

**Figure. III.16 :** Courbes moyennes de traction (contrainte-déformation) pour Chaque série de 5 éprouvettes pour les états (L-Rv190, LRv200, L-Rv220) °C.



Les figures (III.1) jusqu'à (III.10) représentent les courbes tractions (contrainte-déformation) pour une série de cinq éprouvettes identiques de l'alliage Al-Cu à 4% pour chaque état effectué : brut de coulée, trempée (L-Rv150, L-Rv160, L-Rv170, L-Rv180, L-Rv190, L-Rv200, L-Rv220, L-Rv240) °C.

Pour une bonne comparaison des résultats obtenus. On a groupé pour les mêmes conditions d'essais (même température de revenu) les 5 courbes obtenues pour chaque essai dans un seul graphe, qui sont représentés sur les figures (III-11, III-13, III-15 et III-17).

L'analyse de ces figures montre que presque toutes les courbes coïncident entre elles pour les 10 états précédents. Sauf quelques états exceptionnels.

Les courbes (III-12, III-14, III-16, III-18) représentent les résultats moyens obtenus pour une série de 5 éprouvettes de traction dans les mêmes conditions d'essais.

Dans le but de comparer les résultats. On a regroupé sur la figure: III-19 les courbes moyennes de traction (contraintes-déformation) de l'alliage corroyé Al-Cu 4%. L'étude de toutes les figures précédentes ainsi que les différents résultats obtenus par les essais de traction a différentes conditions thermiques (température de revenu) nous a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'alliage étudié, Ainsi que la température de revenu optimale.

Les principales caractéristiques mécaniques déterminées lors de nos essais sont :

$\sigma_e$  : limite d'élasticité,  $\sigma_m$  : résistance maximal,  $\sigma_r$  : résistance a la rupture,  
 $\epsilon_m$  : allongement correspond a la constante maximal,  $\epsilon_e$  : allongement élastique,  
 $\eta$  : coefficient de poisson,  $E$  : module d'Young.

Caractéristiques de résistance :

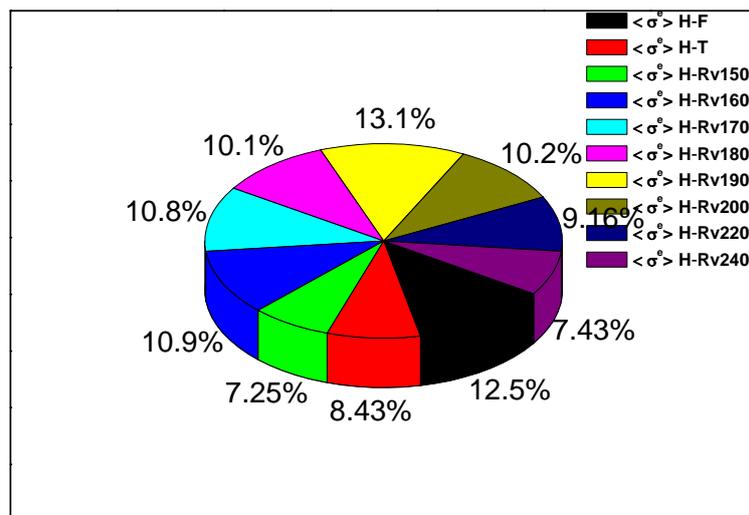
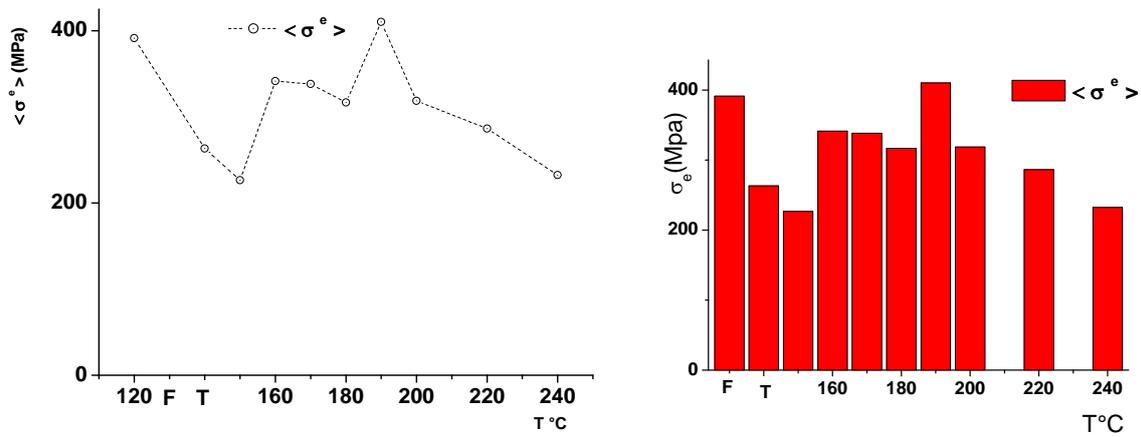
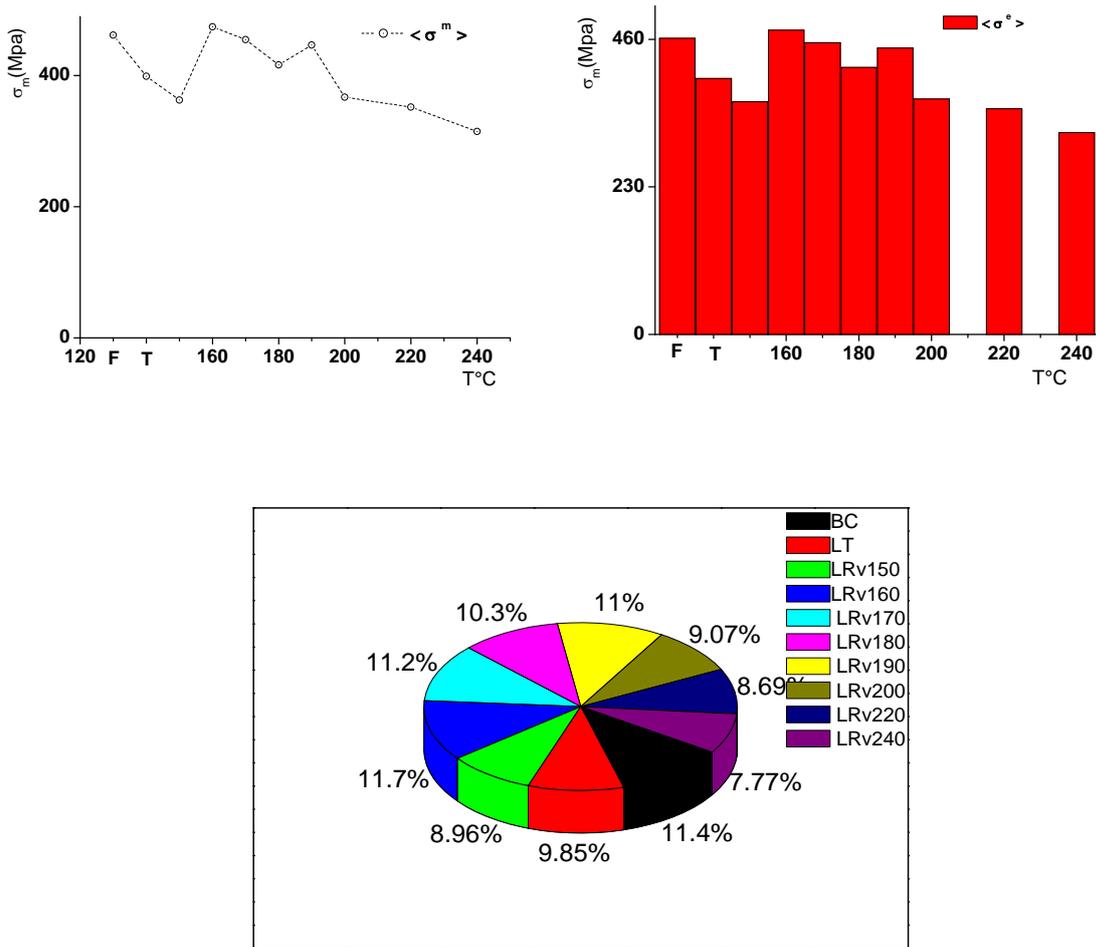
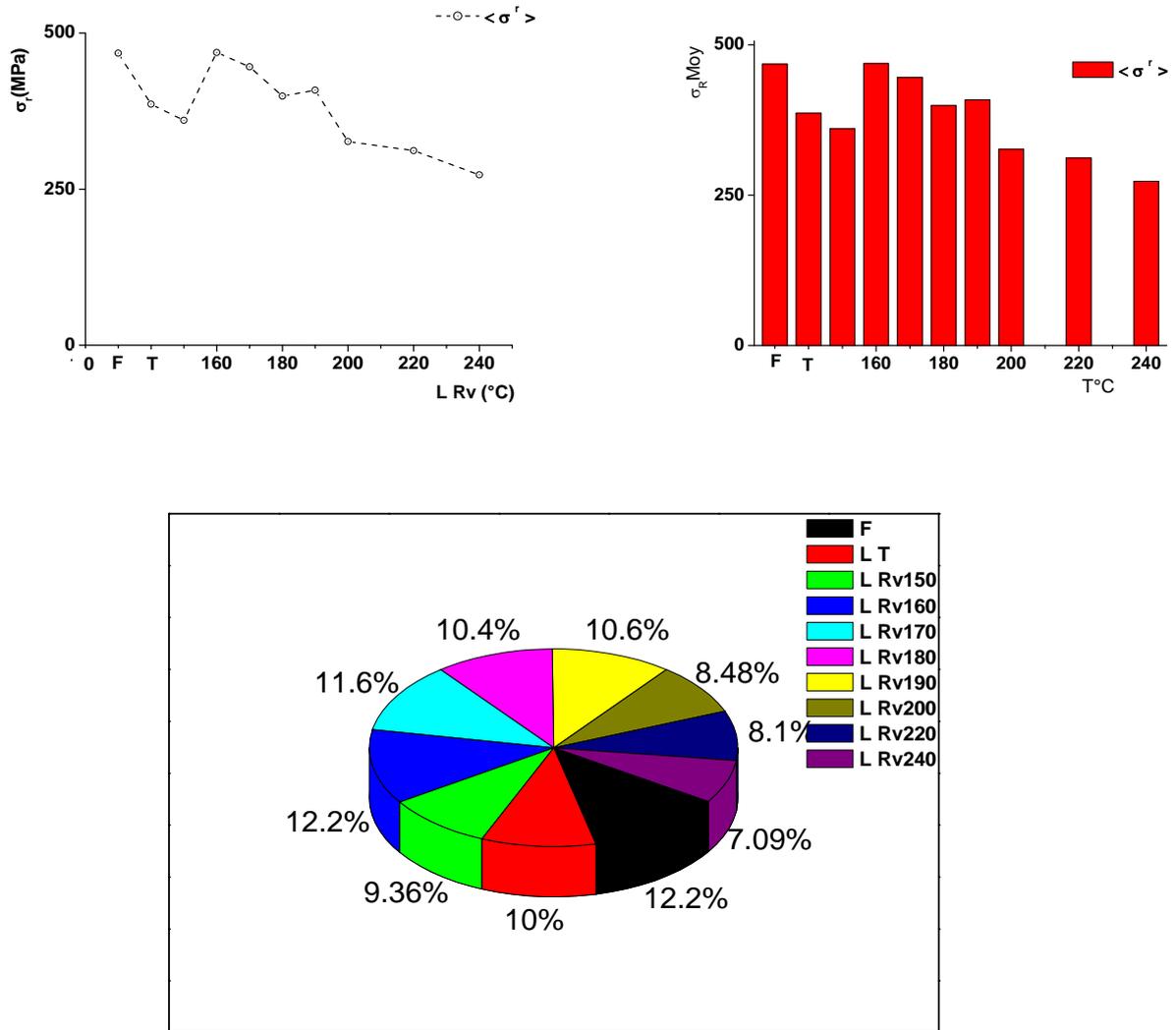


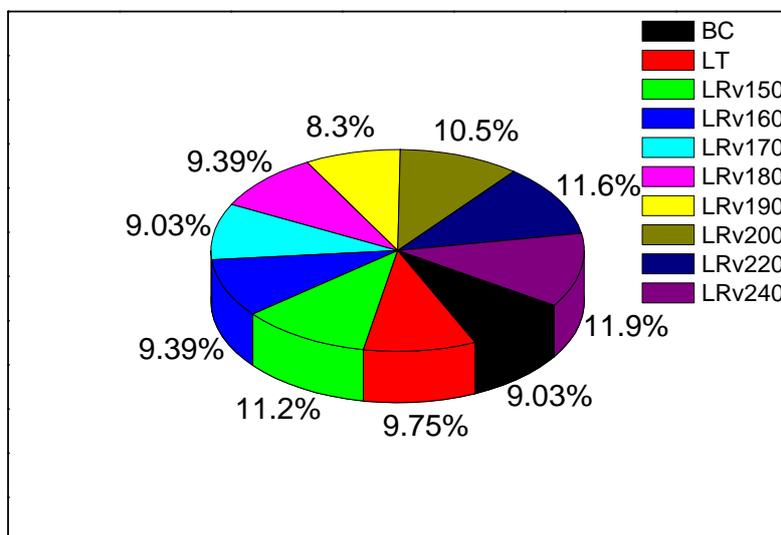
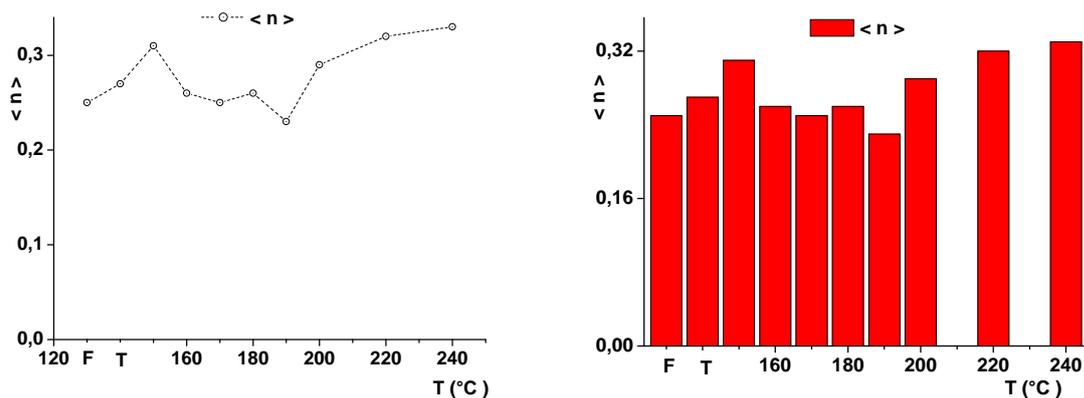
Figure III-20 : graphe, histogramme ( $\langle \sigma_e \rangle$  - la température de revenu) et secteur de la contrainte élastique moyenne de l'alliage Al-Cu 4%.



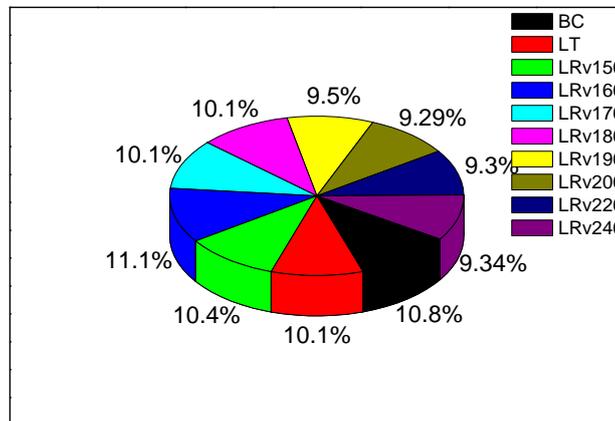
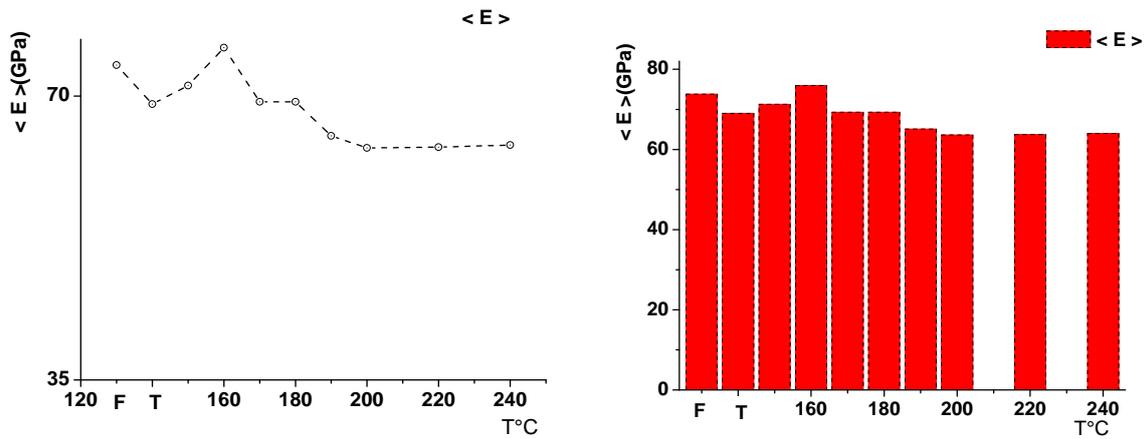
**Figure III-21 :** graphe, histogramme, ( $\langle \sigma_m \rangle$  - la température de revenu) secteur de la contrainte maximale moyenne de l'alliage Al-Cu 4%.



**Figure III-22 :** graphe, histogramme, ( $\langle \sigma_R \rangle$  - la température de revenu) secteur de la contrainte maximale moyenne de l'alliage Al-Cu 4%.

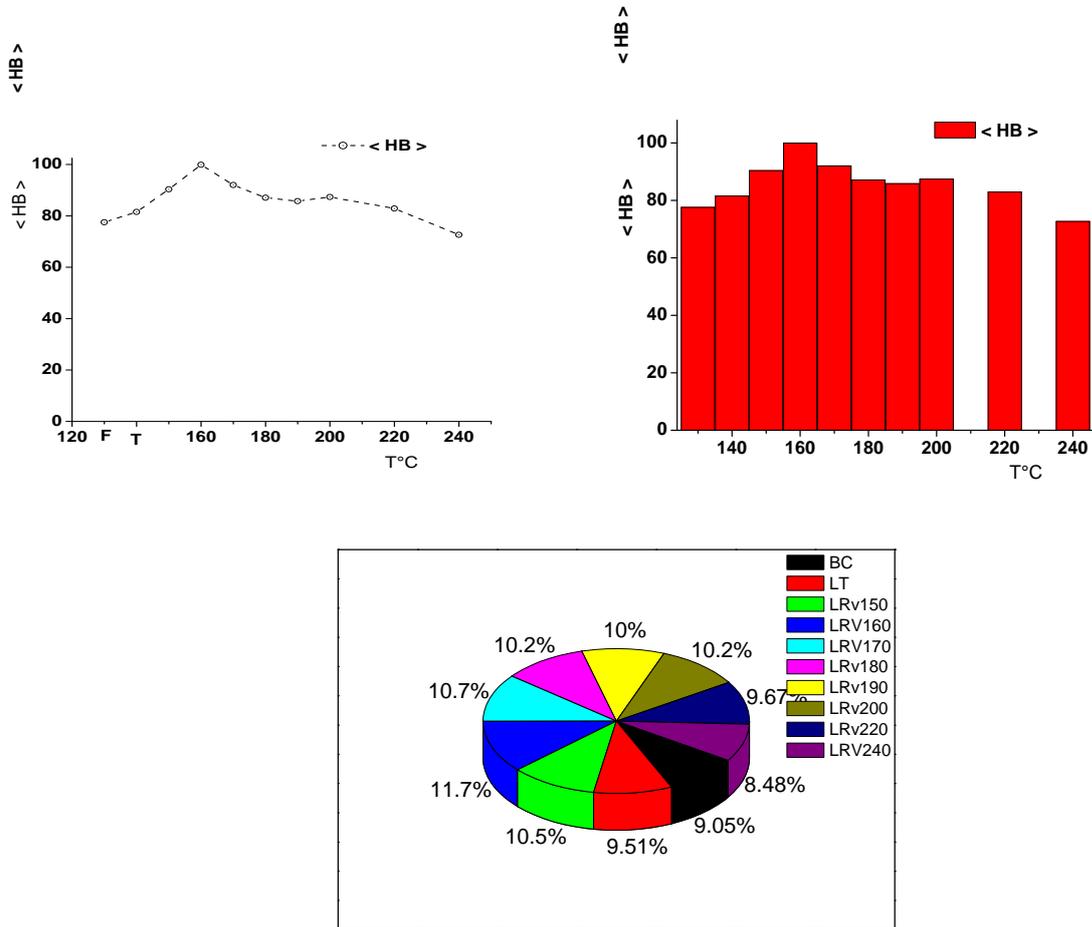


**Figure. III.23:** Graphe, histogramme ( $\langle n \rangle$  - Températures de revenu) et secteur des coefficients d'écroutissage moyens des dix états

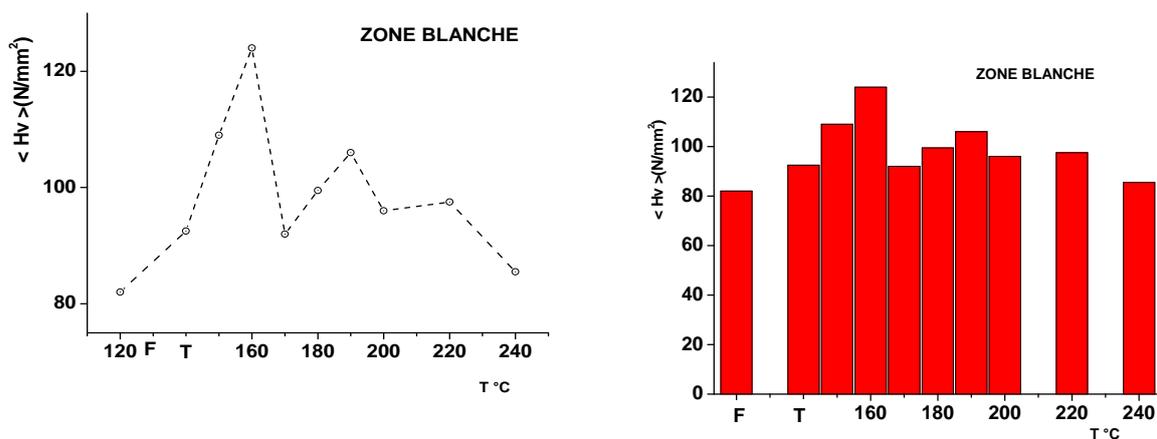


**Figure. III.24:** Graphe, histogramme ( $\langle E \rangle$  – Températures de revenu) et secteur des modules d'Young E moyens des dix états considérés.

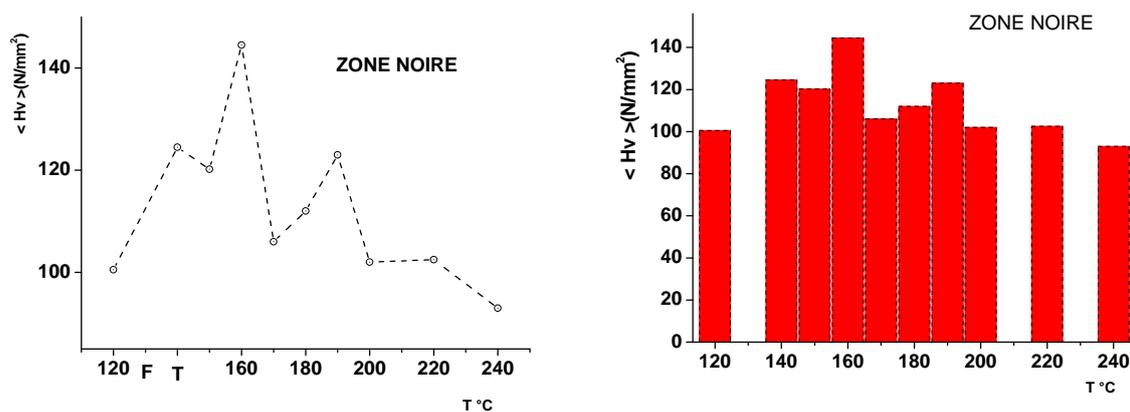
**II. Effets des traitements thermiques sur les caractéristiques de dureté HB et la microdureté HV0, 1:**



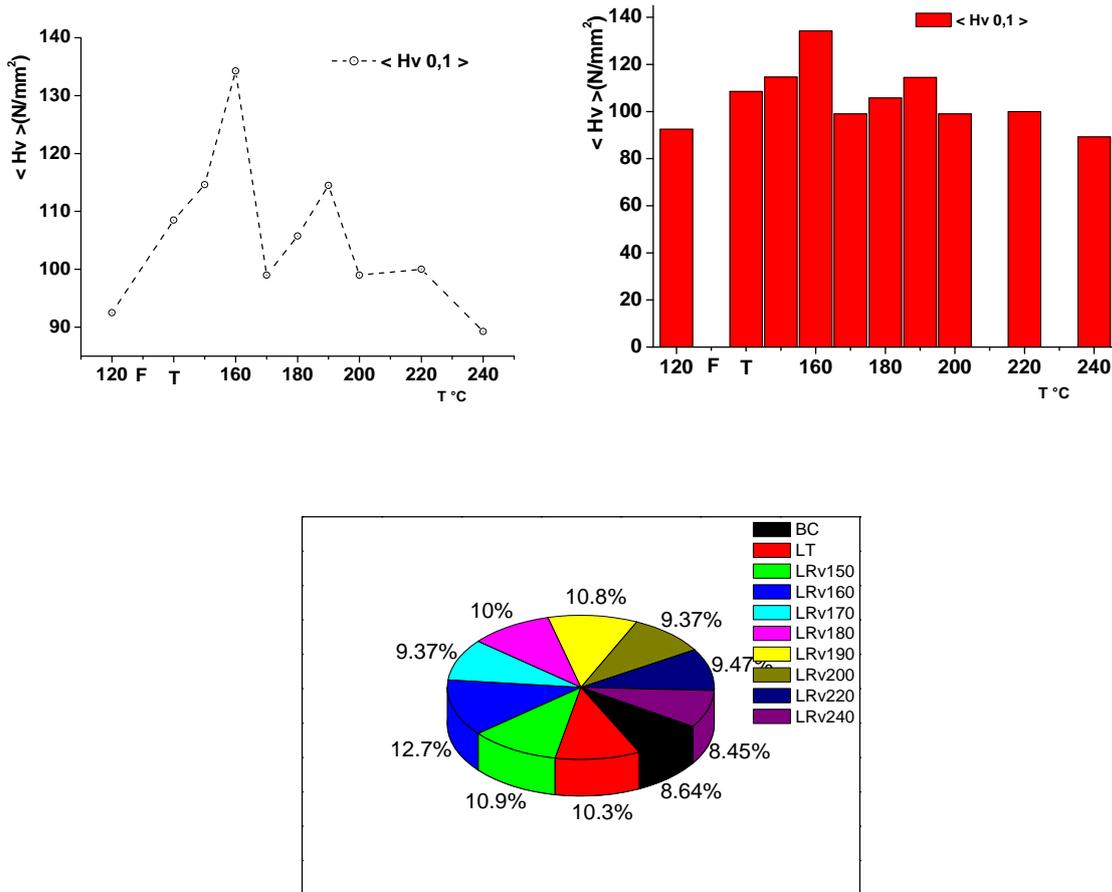
**Figure III-25 :** graphe, histogramme (<math>\langle HB \rangle</math>, température de revenu) de l'alliage Al-Cu 4%. Pour les dix états considérés



**Figure. III.26:** Graphe, histogramme (< Hv<sub>0, 1</sub> > - Températures de revenu) des microduretés moyennes des dix états de la Zone blanche.



**Figure. III.27:** Graphe, histogramme (< Hv<sub>0, 1</sub> > - Températures de revenu) des microduretés moyennes des dix états de la Zone noire.



**Figure. III.28:** Graphe, histogramme ( $\langle H_v 0, 1 \rangle$  - Températures de revenu) et secteur des microduretés moyennes des dix états considérés.

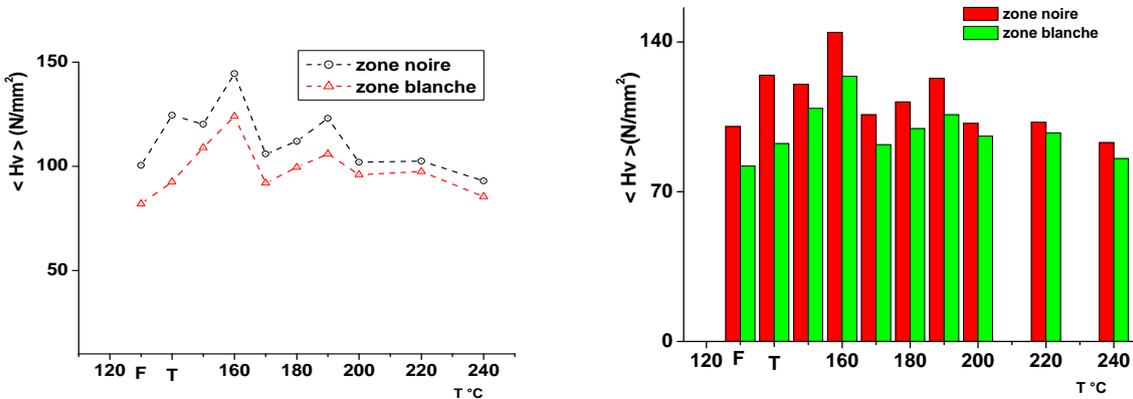
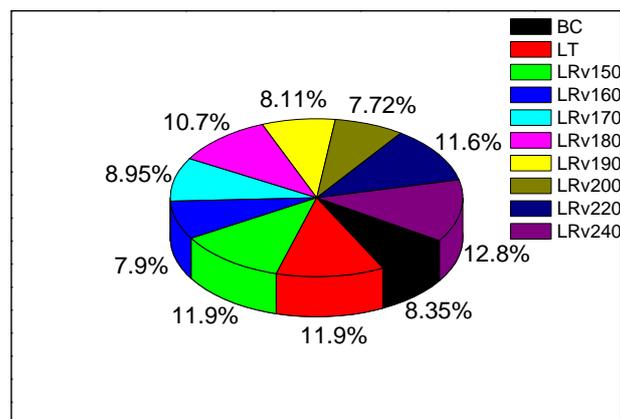
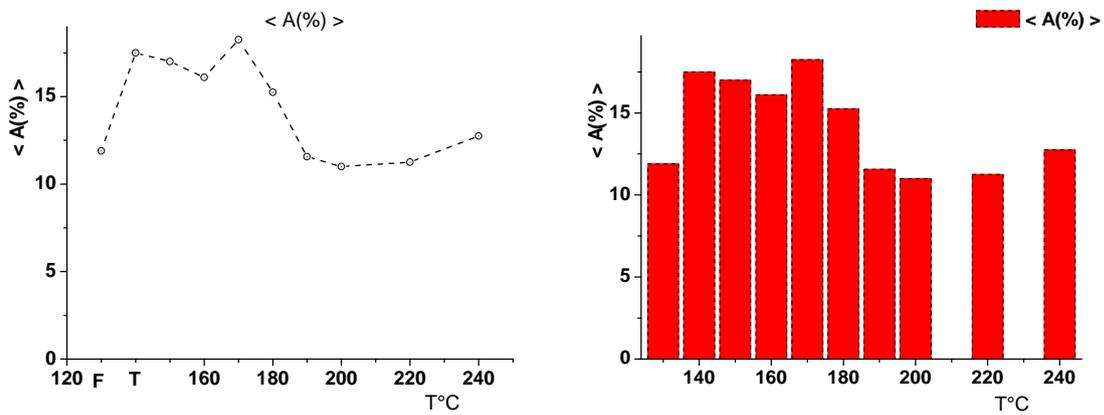


Figure. III.29: Graphe et histogramme des moyennes de la zone noire et la zone blanche des dix états considérés.

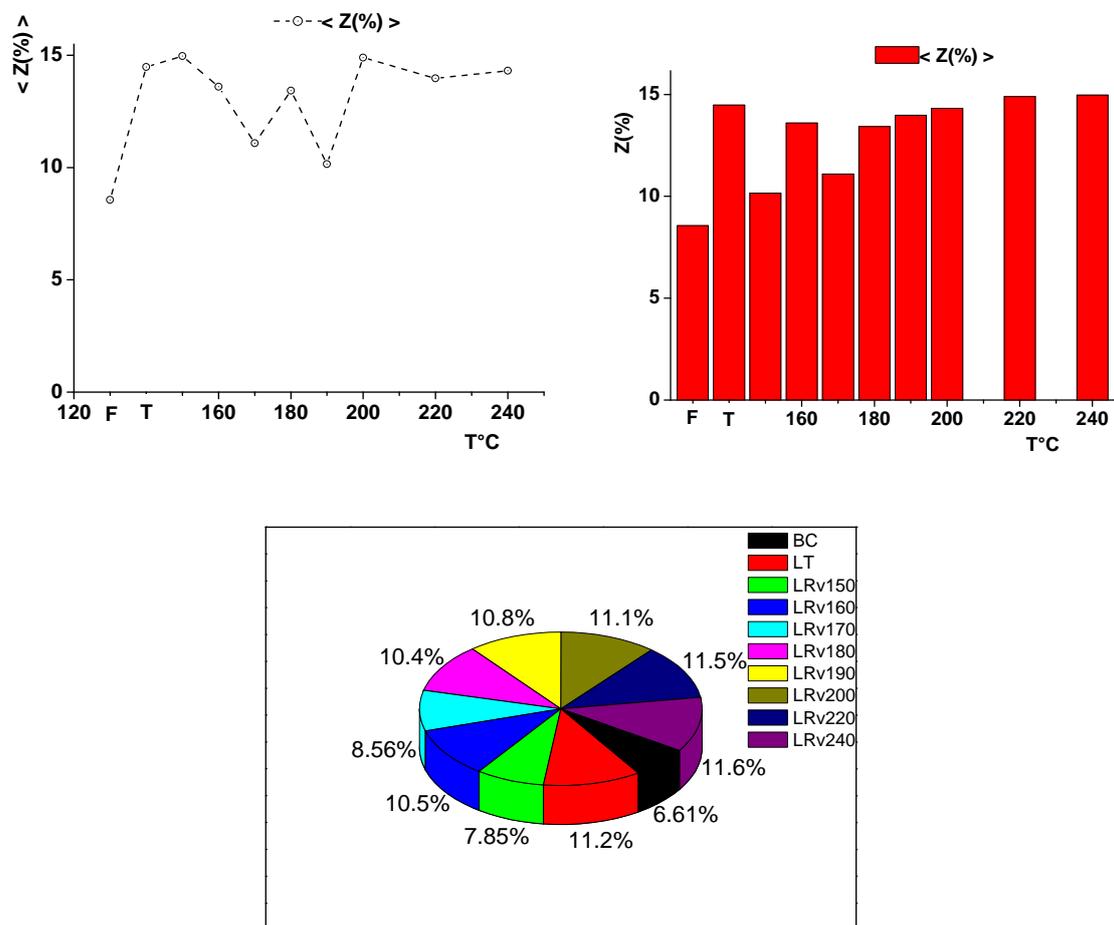
**II.1.CARACTERISTIQUES DE DUCTILITE :**

**Allongement a la rupture A(%) :**



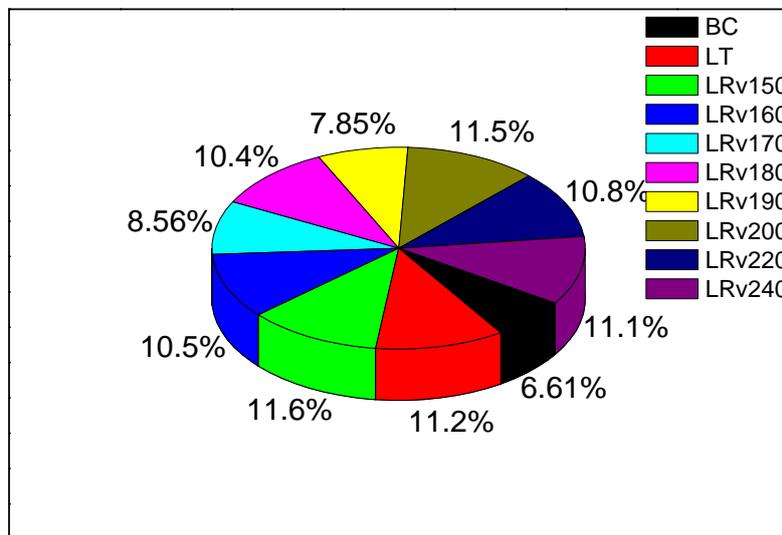
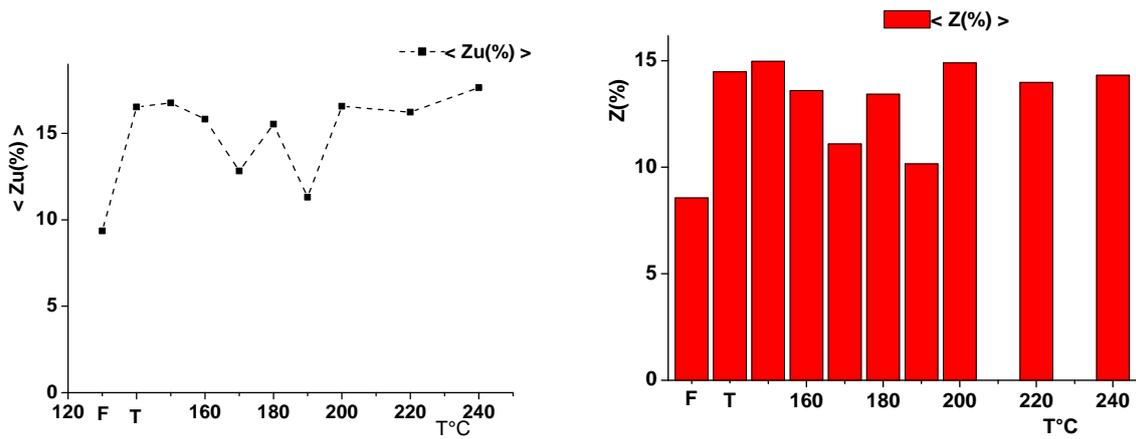
**Figure. III.30:** Graphe, histogramme ( $\langle A\% \rangle$  - Températures de revenu) et secteur des allongements moyens des dix états.

**Coefficient de striction Z(%) :**

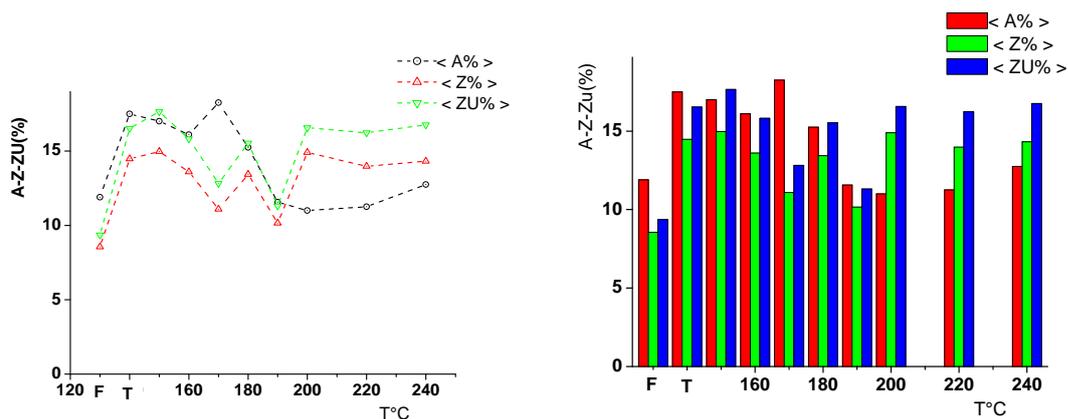


**Figure. III.31:** Graphe, histogramme ( $\langle Z\% \rangle$  - Températures de revenu) et secteur des coefficients de striction moyens des dix états.

**Allongement a la striction :**

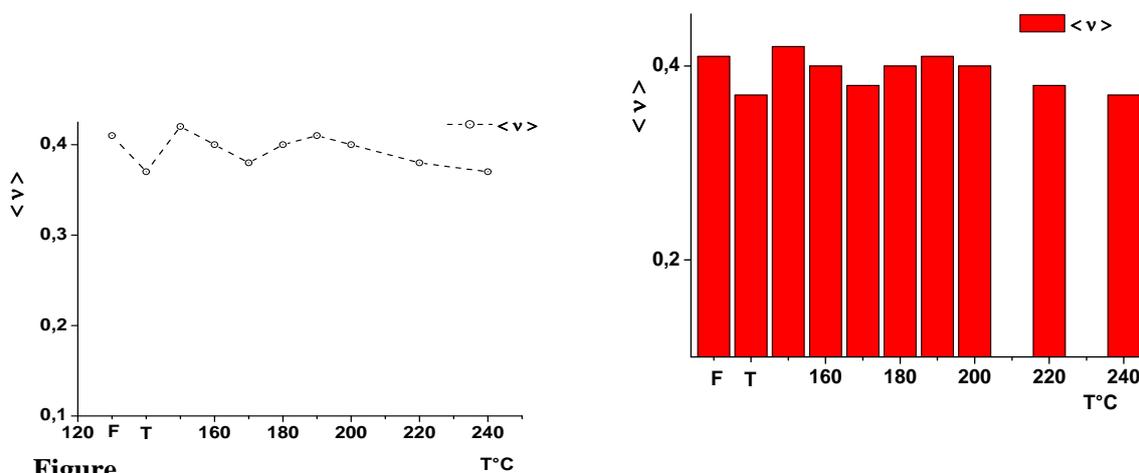


**Figure. III.32:** Graphe, histogramme ( $\langle Z_u \rangle$  - Températures de revenu) et secteur des allongements de striction moyens des dix états.

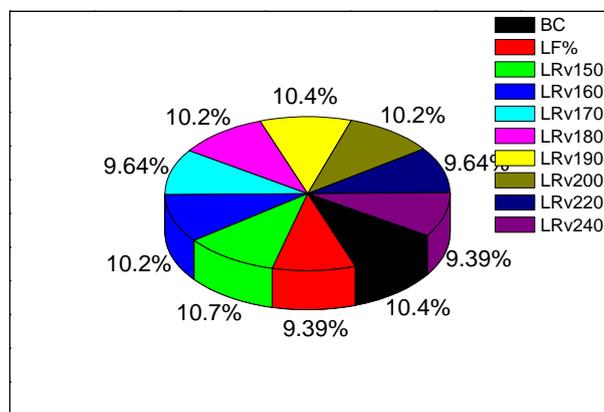


**Figure. III.33:** Graphe et histogramme des caractéristiques de ductilité (< A% >, < Z% > et < Zu% > - Températures de revenu) des 10 états considérés.

Coefficient de poisson  $\bar{v}$



**Figure.**



**III. 34:** Graphe, histogramme (< V > - Températures de revenu) et secteur des coefficients de poisson moyens des dix états.

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

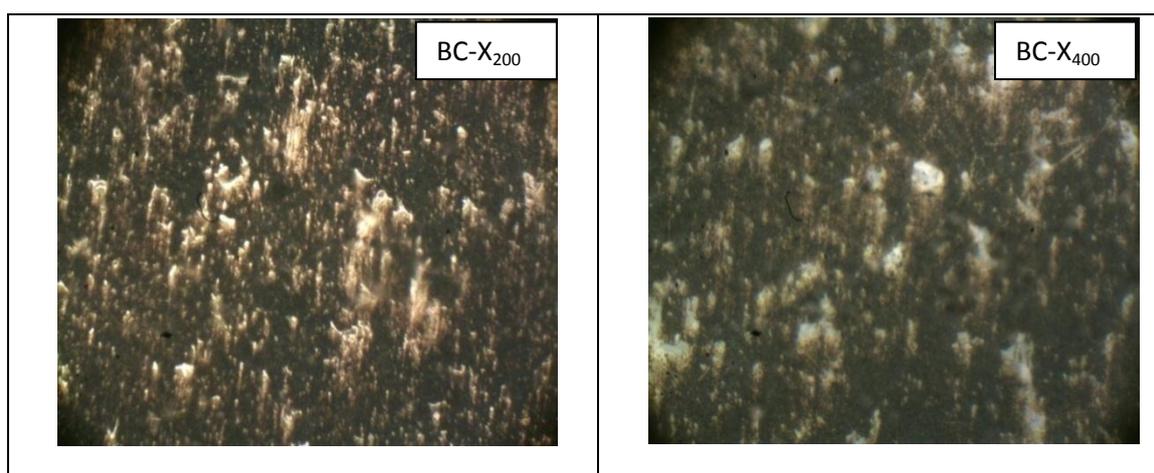
#### **Effet des traitements thermiques sur l'évolution de la microstructure de l'alliage Al-Cu 4% :**

La métallographie est la technique consistant à déterminer la structure d'un métal en l'observant avec un microscope optique. On peut déterminer ainsi, selon les cas :

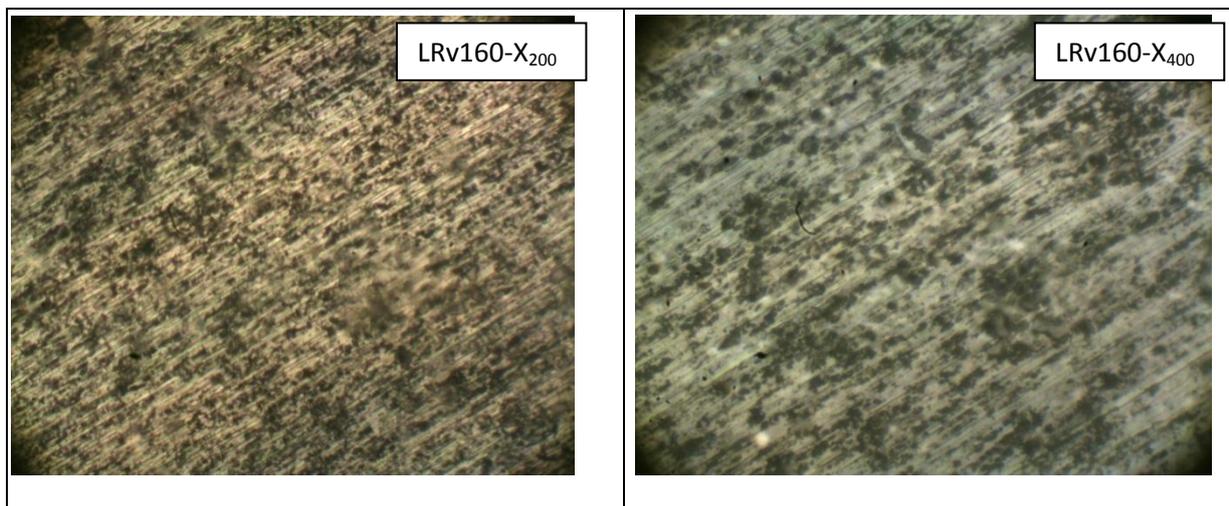
- La taille et la forme des cristallites (ou grains).
- La répartition des phases.
- La direction des lignes de glissement (intersection des plans de glissement avec la surface), dans le cas d'un échantillon déformé.

L'observation simple d'un objet métallique ne donne pas de renseignement particulier hormis l'état de surface (aspérités, fissures).

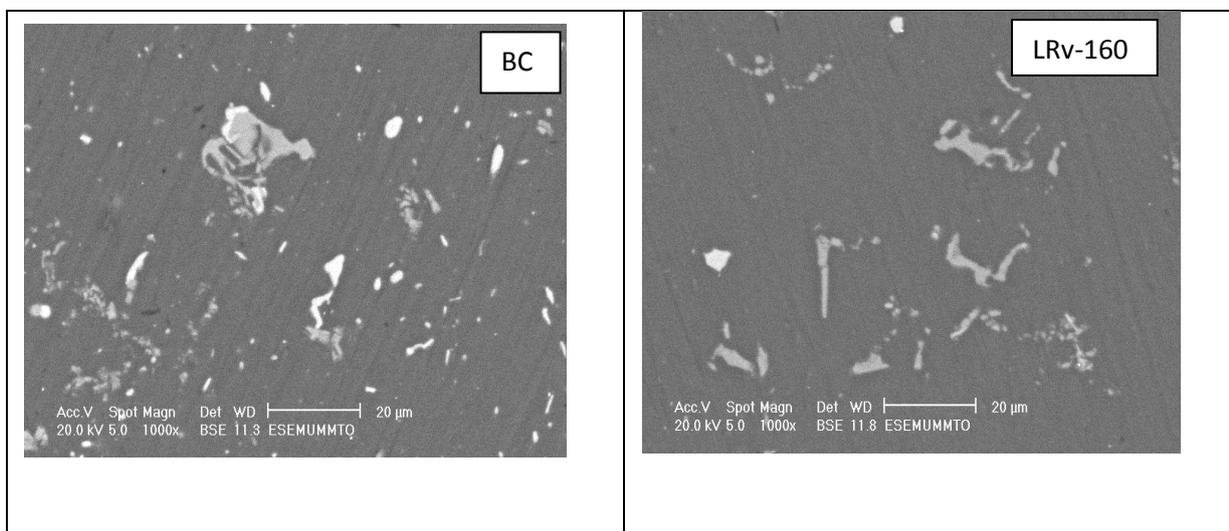
Dans notre travail nous nous intéressons essentiellement à suivre l'évolution de la microstructure cristalline et déterminer l'effet des différents traitements thermiques effectués sur notre alliage : Al-Cu 4%.



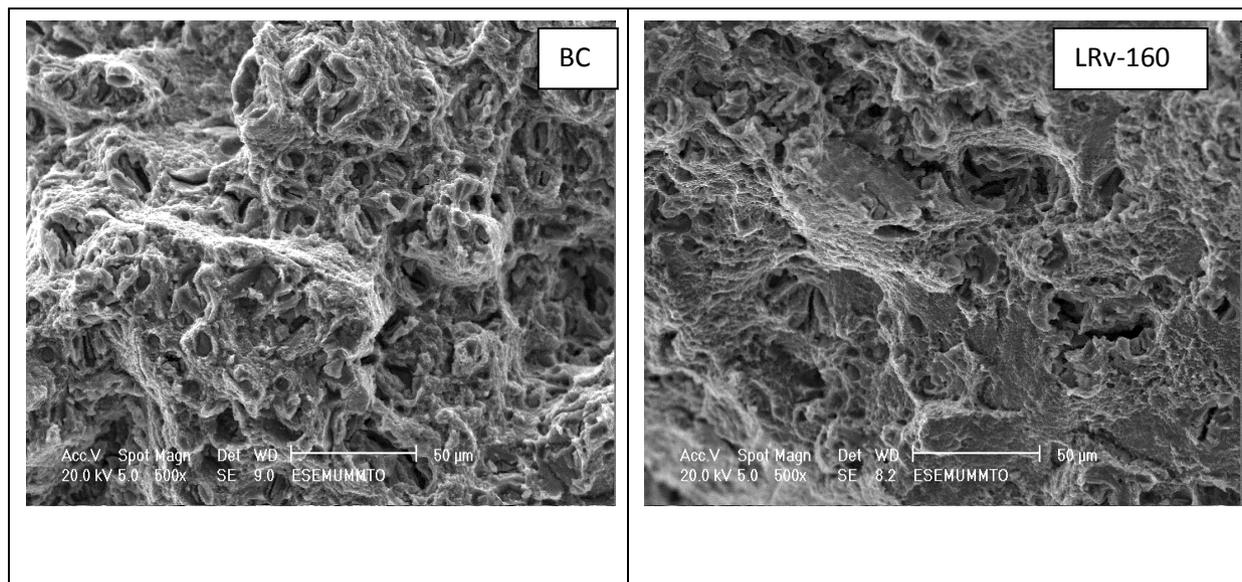
**Figure III.34** : Microstructures obtenus par le microscope optique de l'alliage **2017A** pour l'état **BC**.



**Figure III.35** : Microstructures obtenus par le microscope optique de l'alliage **2017A** pour l'état **LRv-160°C**.



**Figure III.36** : Microstructures obtenus par le MEB de l'alliage **2017A** pour l'état **BC** et **LRv-160°C**



**Figure III.37** : facies de rupture obtenus par le MEB de l'alliage **2017A** pour l'état **BC** et **LRV-160°C**

### Analyse et interprétation de la microstructure :

A partir des figures précédentes on peut observer :

#### 1 : Etat brut

La microstructure de l'état brut des échantillons de l'alliage : **2017A** étudié est présentée dans les **Figures III.34**. Cette dernière montre qu'il y a une distribution non-uniforme de taille des Grains. Elle met aussi en évidence la présence de quelques précipités à l'intérieur des grains, se sont des zones claires formant des gros précipités ( $\text{Al}_2\text{-Cu}$ ) et très distants les uns des autres.

#### 2 : Etat homogénéisé et trempé :

Les microstructures des échantillons de l'alliage étudié homogénéisés à  $500^\circ\text{C}$  Pendant 8 heure, trempé dans un lubrifiant produit une microstructure homogène, avec une distribution uniforme de tâches claires : des précipités ( $\text{Al}_2\text{-Cu}$ ).

#### 3 : Etat de revenu :

Les microstructures des échantillons de l'alliage:  $\text{Al-Cu 4\%}$  homogénéisés à  $500^\circ\text{C}$  pendant 8 heures, trempé dans lubrifiant ( $70\% \text{ H}_2\text{O} + 30\% \text{ huile soluble}$ ) et puis vieillis artificiellement à des températures de revenu entre ( $160^\circ\text{C}$  et  $240^\circ\text{C}$ ) pendant 16 heures montrent que la température de revenu optimale est la température  $160^\circ\text{C}$  notée :  $\text{LRv-160}^\circ\text{C}$ , c'est la température qui correspond aux propriétés mécaniques maximales, le maximum de précipitées.

Les figures **Figure III.35** Représentées aux dessus nous montrons: Des tâches claires peuvent être attribuées à des précipités.

L'observation par microscope optique des échantillons de la **Figure III.35** Traités thermiquement n'a révélé aucune différence en microstructure, sauf que la taille moyenne des grains dans le cas de l'alliage LRv-160°C est plus petite que celle dans les cas : brut de coulée et les autres cas de revenus. Cet affinement de grains est attribué à la présence de Cu et les autres éléments d'aditions dans l'alliage, l'effet des traitements thermiques effectuées qui affinent la microstructure.

On observe aussi une concentration des précipités dans les joints de grains. Ce traitement entraîne une migration d'une partie des éléments alliés tels que le Cu, Mg et Si vers les dislocations. Ces dernières, étant notamment concentrées au niveau des joints de grains (interfaces). Favorisant la formation des précipités ( $Al_2Cu$ ) qui sont disposés le long de ces interfaces.

➤ **Observation par le MEB :**

Cependant ces précipités, n'étant pas décelables par microscope optique, peuvent être mis en évidence par le MEB. En effet, ces précipités sont complètement cohérents avec la matrice et leur formation est accompagnée d'un accroissement des propriétés mécaniques tel que la dureté.

➤ **Résultats et discussion :**

Dans notre contribution nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence de fluide de trempe (70%  $H_2O$ +30% huile soluble), l'effets des traitements thermiques par chauffage, mise en solution avec homogénéisation, de trempe structurale et de **la variation de température de revenu** par incrément de 10°C à 20°C aux état brut de coulée, trempée et les revenus LRv( 150, 160, 170, 180, 190, 200, 220, 240)°C sur l'évolution des caractéristiques mécaniques de l'alliage corroyé Al-Cu 4%, ainsi que l'importance des éléments d'additions principales et secondaires sur la modification de la microstructure et l'amélioration des caractéristiques mécaniques tel que la dureté, le module d'Young, la contrainte maximale de traction de l'alliage étudié... etc.

➤ **Effet des traitements thermiques :**

Pour améliorer plus les caractéristiques mécaniques de l'alliage corroyé à l'état brut de coulée, on a fait varier les températures de revenu afin de déterminer les caractéristiques mécaniques optimales du matériau de désignation numérique 2017A ayant subi un traitement thermique de trempe structurale dans un lubrifiant spécifique.

La mise en solution effectuée à une température au dessus de 500°C pendant une période assez longue pour que les éléments d'alliages soient distribués de façon homogène. Le maintien dans four de 8 heures est suffisant pour la formation d'une solution solide de **substitution Al-Cu**. Mais il faut accorder une attention particulière à la disposition des pièces dans le four pour assurer un chauffage homogène ce qui nous conduit à éviter les zones de fissuration et les défauts de l'élaboration dans les éprouvettes.

La trempe par gravité dans un fluide formé de l'eau et d'huile soluble à la température ambiante favorise la formation des **fortes précipitations (Al<sub>2</sub>Cu)** dans les grains et à travers l'interface (joints de grains), plus le refroidissement soit plus rapide les grains seront plus fines et la distribution de la précipitation plus homogène. Cet affinement de grain et l'homogénéité de la distribution des précipités augmentent plus la dureté et les caractéristiques mécaniques de résistance.

Le vieillissement artificiel (revenu) provoque la migration des précipités (**Al<sub>2</sub>Cu**) en particulier et les dislocations vers les joints de grains et dans toute la masse de l'alliage.

Le mouvement des dislocations ne peut se poursuivre que si la contrainte extérieure est augmentée, ceci traduit l'effet de durcissement dû à un précipité, ce durcissement provoque alors une augmentation sensible de la dureté et des caractéristiques de résistance.

En effet la déformation plastique est facilitée par le mouvement de dislocations sous l'effet d'une contrainte en cisaillement, lors d'une mise sous charge des éprouvettes.

Aux cours de leurs déplacements, dans les plans de glissements à l'intérieur de même grain, les dislocations vont arriver aux joints de grains et l'on va constater que :

Le joints de grain peut constituer un piège : la dislocation disparaît dans la perturbée et la déformation plastique est interrompue.

Les joints de grain peuvent stopper la première dislocation qui présente, les suivantes ne pouvant poursuivre leur mouvement viendront s'empiler derrière elle, et le glissement sera interrompu.

Les déplacements des dislocations seront d'autant plus gênés, et le durcissement obtenu sera d'autant plus important que les dislocations rencontrent un plus grand nombre de joints de grains. Or dans une masse donnée de la matrice, l'importance de joint de grain croît quand le nombre des joints de grains augmente dans la matrice c'est-à-dire quand le volume occupé par chaque grain diminue. Pour développer ce mode de durcissement on doit diminuer la taille de grains moyenne dans l'alliage.

On peut dire alors que grâce à l'affinement de grains observé, les caractéristiques mécaniques augmentent d'une manière remarquable, et les traitements thermiques effectués sont donc efficaces et indispensables avant l'utilisation des alliages : aluminium-cuivre.

Dans notre travail on remarque que l'allure des courbes moyennes : **contrainte-déformation** de l'alliage **2017A** à l'état de revenu LRv-160°C donne des valeurs de caractéristiques mécaniques supérieures à celle des autres cas : brut de coulée, trempée, et les autres températures de revenus.

En analysant les données obtenues par la dureté HB et la microdureté HV(0,1) on obtient les résultats de traitement de revenu **LRv-160°C**, sont aussi supérieurs à celle de l'état BC, trempée et autres cas de revenus.

Les microstructures obtenues par le microscope optique et le MEB montrent que les grains sont plus fins dans la matrice et la distribution des éléments d'alliages est plus uniforme dans le cas de revenu à la température 160°C.

En conclusion, nous distinguons pratiquement que presque toutes les caractéristiques mécaniques de traction, de dureté, microdureté correspondent à l'état de revenu de LRv-160°C sont pratiquement supérieures à celle des autres cas.

### ❖ Conclusion générale

Dans le cadre de cette présente étude, on s'intéresse à l'influence d'une part de la variation de la température de revenu par incrément de 10°C à 20°C, d'autre part de l'ajout de Cu comme élément d'addition principale et de Mg et Si comme éléments d'additions secondaires sur l'évolution des caractéristiques mécaniques de résistance, de ductilité et la microstructure de l'alliage d'aluminium de corroyage de la série (2000) de désignation numérique : **2017A** ayant subi un traitement thermique de trempe structurale trempé dans un fluide qui est constitué de *(70% $H_2O$ +30% d'huile soluble)*.

Le choix de ce matériau étudié a été dicté par le fait qu'il est très utilisé dans diverses applications mécaniques, tandis que leur traitement thermique a été choisi suite aux améliorations considérables de certaines propriétés recherchées.

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

Les propriétés mécaniques de l'alliage étudié montrent une légère supériorité des caractéristiques mécaniques dans le cas de revenu à 160°C par rapport aux autres états, cela est dû au fait qu'après solidification la structure de l'alliage est plus fine, plus homogène à celles obtenues par les autres cas. Un sur revenu est remarquable dans notre travail pour les cas de revenus supérieurs à 190°C, cela nous conduit à obtenir des propriétés mécaniques inférieures à celles de l'état brut de coulée.

Le revenu provoque la précipitation optimale des éléments d'additions : principale (Cu) et secondaires (Si, Mg) dans la matrice de l'aluminium, ce qui peut expliquer l'augmentation des caractéristiques mécaniques après la trempe structurale.

Lors de l'investigation de la microstructure par microscope optique et le MEB nous avons constaté que le revenu à 160°C noté LRv-160°C affine les joints de grains ; et donne une homogénéité importante c'est-à-dire la concentration des précipités ( $Al_2Cu$ ) s'uniformise à l'intérieur des différents grains et à leurs joints.

Après discussion on constate que les caractéristiques de résistances de l'état revenu à 160°C sont meilleurs par rapport aux autres cas et ce quels que soient les états considérés au détriment des caractéristiques de ductilité.

## ❖ BIBLIOGRAPHIE

- [1] : M. Colombie et all : *Matériaux industriels, Matériaux métalliques.*(propriété chimique)
- [2] Jean Philibert. Alain vignes. *Métallurgie du minerai du matériau* p.1101. (1998)  
Jean Barralis, Gérard Raeder
- [3] *Précis Métallurgie : Elaboration, Structures-Propriétés, Normalisation.*
- [4] : j. Baralis & g. Maeder : *précis métallurgie, nathan, paris, 1997.*
- [5] Hervé Gransac : *lundi de la mécanique par laboratoire de la métallurgie a ourlien*
- [6]: C.Vargel : *le comportement de l'aluminium et ses alliages*
- [7] Roger Develay *propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés alliages de la série* (2000)
- [8] Victor Castilhano *conservatoire national des artes et métiers centre régional de Champagne-Ardenne*
- [9] Denis Beaulieu *les caractéristiques de l'aluminium structural.les presses de l'université de Laval*
- [10] Ghomari fouad *Université Aboubekr Belkaid, Faculté Des Sciences De L'ingénieur.*
- [11] Frédéric GONZALES : *Etude des morphologies de solidification dans les alliages Aluminium, thèse Doctorat, école polytechnique Fédérale de Lausanne-Suisse.*
- [12] Denis Beaulieu : *les caractéristiques de l'aluminium structural.les presses de l'université de Laval*
- [13] Rosendahls Bogtrykkeri : *Préparation métallographique De l'aluminium et des alliages D'aluminium 04.2008 / 62340407. Printed in Denmark – 51*
- [14] Maurice Duval *Collaboration Édith Villeneuve: Le laminage de l'aluminium Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium*
- [15] Y.Aouabdia. *Mémoire de magister. Université de Constantine* (2005).
- [16] M. Dupeux, *Aide mémoire science des matériaux, Dunod, (Paris 2004), pp.105-148*
- [17] R. Develay : *Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux métalliques, M1290, 2001.*
- [18] Villeneuve *Collaboration Maurice Duval. Les traitements thermiques des alliages d'aluminium. Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium*
- [19] M. Renouard et y. Bresson. *Traitements thermiques des alliages d'aluminium* (1963)
- [20]PDF : *Propriétés Mécaniques Des Matériaux*

*[21] Michel Dupeux Aide mémoire science des matériaux*

*[22] Sylvie Pommier 2010 Mécanique des Matériaux :*

*[23] Les Défauts Dans Les Solides PDF*

*[24] Robert Lévêque Traitements thermiques dans la masse des aciers à outils. Techniques de l'Ingénieur. M1134. Traité Des Matériaux. 2003.*

