

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and  
Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

**Option : Fabrication mécanique et productique**

Présenté par :

Mohammed Hamitiche

### Thème

---

DURCISSEMENT STRUCTURAL D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM  
SIMULE SOUS ABAQUS

---

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Makri Hocine	MCA	Président
Saib Cherif	MCA	Encadreur
Amroune Salah	Pr	Examineur

N° d'ordre : GM/...../2020

Année Universitaire : 2022 / 2023



## *Remerciement*



*Je remercie tout d'abord le directeur de ce mémoire : "Dr. Cherif Saib" pour Ses orientations et pour le temps qu'il m'a consacré.*

*C'est avec un grand plaisir que je remercie le responsable de service de Génie Mécanique au CRTI (Centre de recherche en technologie industriel-Chéraga-Alger) Bilal Cheniti et Sellam Mohammed, Qui m'ont soutenu avec leur précieux aide et leurs conseils pour terminer ce mémoire, ainsi je tiens à remercier l'ensemble des travailleurs de ce centre.*

*Je remercie aussi le responsable du laboratoire au centre "Sai Djamel", qui m'a aidé*

*dans toute la partie expérimentale et m'a conseillé en vertu de son expérience. J'exprime toutes les profondeurs reconnaissances à l'université Med Boudiaf de M'Sila, en particulier, le Département de génie mécanique.*

*Je tiens aussi à remercier Dr. "Chouki Farsi" et tous le personnel du Département.*

*J'aimerais exprimer mes chaleureux remerciements à mes parents et mes familles, qui m'ont apporté leur soutien et leur aide utile tout au long de mon étude.*

*Je souhaite exprimer ma reconnaissance et mes remerciements aux personnes qui m'ont soutenu à la réalisation de ce travail, aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter l'évaluation de ce travail.*

*- merci*



## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I : Aluminium et Alliages d'aluminium

Figure I.1 Les différents domaines d'utilisations d'aluminium.....	9
Figure I.2 Digramme d'équilibre Al-MgZn2.....	20
Figure I.3. Exemple d'utilisation des alliages d'aluminium 7075t6 en aéronautique .....	21

### Chapitre II: Le durcissement structural

Figure II.1 .Représentation des déformations de compression qui s'impose à des atomes hôtes un atome d'impureté en substitution. ....	25
Figure II.2. L'affinage du grain des alliages d'aluminium.....	26
Figure II.3. Les étapes de traitement thermique .....	31
Figure II.4.La mise en solution. ....	31
Figure II.5.Evolutions métallurgiques lors du refroidissement lent d'un alliage Al - Cu ( $\kappa$ remplaçant $\alpha$ et $\theta$ se substituant à $\beta$ ).....	32
Figure II.6 .Non- évolution métallurgique lors de l'étape de trempe d'un alliage Al - Cu ( $\kappa$ remplaçant $\alpha$ et $\theta$ se substituant à $\beta$ ).....	32
Figure II.7. On obtient une solution solide sursaturée. ....	33

### Chapitre III: Techniques expérimentale

Figure III.1. La tôle de l'alliage 7075t6.....	37
Figure III. 2. Appareille découpée les tôles.....	37
Figure III. 3.Les chantillons de l'alliage 7075t6 .....	37
Figure III. 4. Four utilisé pour la mise en solution.....	38
Figure III. 5. L'échantillon après trempe.....	38
Figure III. 6. Les 4 Échantillons après revenu. ....	39
Figure III. 7. Les échantillons après l'enrobage .....	40
Figure III. 8. Polisseuse utilisé.....	41
Figure III.9. Opération de Pré-polissage. ....	41
Figure III.10.Opération de polissage de finition .....	42
Figure III.11. Réactif d'attaque chimique utilisé (solution Keller). ....	42
Figure III. 12. Microscope optique. ....	43
Figure III.13. Photographie de logiciel d'analyse d'image.....	43

Figure III.14. Micro duromètre utilisé. ....	44
Figure III.15. Machine utilisée pour la traction. ....	45
Figure III. 16. Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique. ....	45
Figure III. 17. Courbe de traction conventionnelle et définition de quelques grandeurs classiques. ....	45
<b>Chapitre IV: modélisation numérique</b>	
Figure IV.1. Organisation d'abaqus. ....	49
Figure. IV.2. Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'Abaqus. ....	50
Figure IV.3. création de la géométrie de la plaque. ....	51
Figure IV.4. Les Propriétés thermiques de l'alliage d'aluminium 7075t6. ....	52
Figure IV.5. Pièce 3D de l'alliage 7075t6. ....	52
Figure IV.6. Création du pas d'analyse. ....	53
Figure IV.7. les conditions de l'interaction. ....	53
Figure IV.8. Les conditions de Boundary condition. ....	54
Figure III.9. Miallage de la piece. ....	54
Figure IV.10. la Boite de job manager. ....	55
Figure IV.11. Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température. ....	55
Figure IV.12. la distribution de la température lors trempe à l'eau. ....	56
Figure IV.13. la distribution de la contrainte lors trempe à l'eau. ....	56
Figure IV.14. Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température. ....	57
Figure IV.15. la distribution de la température lors trempe à l'eau. ....	57
Figure IV.16. la distribution de la contrainte lors trempe à l'eau. ....	57
Figure IV.17. Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température. ....	58
Figure IV.18. la distribution de la température lors trempe à l'aire. ....	58
Figure IV.19. la distribution de la contrainte lors trempe à l'aire. ....	59
Figure IV.20. Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température. ....	59
Figure IV.21. la distribution de la température lors du trempe à l'aire. ....	60
Figure IV.22. la distribution de la contrainte lors du trempe à l'aire. ....	60
<b>Chapitre V: Résultats et Discussion.</b>	

<b>Figure V.1. Micrographie d'échantillon1 (x10).....</b>	<b>63</b>
<b>Figure V.2. Micrographie d'échantillon 2 (x10).....</b>	<b>63</b>
<b>Figure.V.3. Micrographie d'échantillon 3 (x10).....</b>	<b>64</b>
<b>FigureV.4. Micrographie d'échantillon 4 (x10).....</b>	<b>66</b>
<b>FigureV.5. Micrographie d'échantillon 5 (x10).....</b>	<b>67</b>
<b>FigureV.6. Micrographie d'échantillon 6 (x10).....</b>	<b>67</b>
<b>FigureV.7. Micrographie d'échantillon 7 (x10).....</b>	<b>68</b>
<b>Figure V.8. Les éprouvettes d'alliage d'aluminium 7075t6.....</b>	<b>71</b>
<b>Figure V.9. Éprouvette 1 après l'essai de traction. ....</b>	<b>72</b>
<b>Figure V.10. L'essai de traction d'éprouvette 1.....</b>	<b>72</b>
<b>Figure V.11. Éprouvette 2 après l'essai de traction.....</b>	<b>73</b>
<b>Figure V.12. L'essai de traction d'éprouvette 2.....</b>	<b>73</b>
<b>Figure V.13. Éprouvette 3 après l'essai de traction.....</b>	<b>74</b>
<b>Figure V.14. L'essai de traction d'éprouvette 3.....</b>	<b>74</b>
<b>Figure V.15. Éprouvette 4 après l'essai de traction.....</b>	<b>75</b>
<b>Figure V.16. L'essai de traction d'éprouvette 4.....</b>	<b>75</b>
<b>Figure V.17. Graphique d'essai de traction de toutes les éprouvettes. ....</b>	<b>76</b>

## Liste des tableaux

### Chapitre I :

Tableau I.1. La carte d'identité de l'aluminium.....	7
Tableau I.2. Comparaison entre les alliages d'aluminium et d'autres matériaux subissant les mêmes sollicitations (flambage).....	21

### Chapitre III

Tableau III.1. Composition chimique de l'alliage 7075 t6 (w. %) .....	35
Tableau III.2. Les propriétés mécaniques et physiques des 7075t6.....	36
Tableau III. 3. Nomenclature et les différents traitements des pièces d'alliage d'aluminium 7075-T6 réalisées. ....	39
Tableau III.4. Illustration des ordres d'usinage effectués.....	41
Tableau III.5. Paramètres du polissage de finition. ....	42
Tableau III.6. Réactifs d'attaque chimique utilisé.....	42

### Chapitre IV:

Tableau IV1. Les unités utilisées en ABAQUS.....	50
Tableau IV.2. les propriétés thermiques et mécaniques de l'alliage 7075t6 .....	52

### Chapitre V:

Tableau V.1. Micro-dureté des échantillons d'alliage d'aluminium 7075t6...	68
Tableau V. 2. Paramètres mécaniques obtenus à partir des courbes de traction de toutes les éprouvettes. ....	76

# Sommaire

Introduction générale :.....	1
Chapitre I :Aluminium et Alliages d'aluminium .....	4
I.1) L'aluminium:.....	5
I.1.1) Découverte et développement: .....	5
I.1.2) Propriétés d'aluminium:.....	6
I.1.3) Les différents domaines d'utilisations: .....	8
I.2) Les alliages d'aluminium.....	9
I.2.1) Définition: .....	9
I.2.2) Catégories d'alliage:.....	9
I.2.3) Alliages non trempent .....	11
I.2.4) Alliages trempent.....	12
I.2.5) État métallurgique des alliages d'aluminium: .....	13
I.2.6) États de base .....	13
I.2.7) Alliages trempant.....	14
I.2.8) Alliages non trempant .....	16
I.2.9) caractéristiques général des alliages d'aluminium: .....	17
I.2.10) L'alliage 7075t6: .....	19
I.2.11) Domaine d'application du 7075t6 :.....	20
Chapitre II Le durcissement structural .....	22
II.1) Définition: .....	23
II.2) Le durcissement structural pour l'acier: .....	23
II.3) Le durcissement structural Pour les métaux non-ferreux: .....	23
II.4) Le durcissement des alliages d'aluminium: .....	24
II.5) Les mécanismes de durcissement des alliages d'aluminium: .....	24
II.5.1) Durcissement par solution solide: .....	24
II.5.2) durcissement par L'affinage du grain (réduction de la taille des grains) : .....	25
a)Le principe de l'affinage:.....	25
b)Influence de l'affinage sur les propriétés mécaniques:....	26
c) L'affinage du grain, un moyen de traitement important des alliages d'aluminium:.....	27

II.5.3) Durcissement par écrouissage:.....	27
II.5.4) Durcissement structurale (durcissement par précipitation):.....	28
II.5.4.1) Définition de la précipitation:.....	28
II. 5.4.2) Principe de durcissement par précipitation:.....	28
II.5.4.3) Traitements thermiques des alliages d'aluminium:.....	29
II.5.4.4) Principaux types de traitements thermiques:.....	29
II.5.4.5) Les étapes de traitement thermique:.....	31
Chapitre III: Techniques expérimentale .....	34
III.1) Présentation du matériau à étudier: .....	35
III.2) Propriétés mécaniques et physiques :.....	36
III.3) Découpage des pièces: .....	37
III.4) Traitement thermiques de l'alliage 7075 t6:.....	38
III.5) Enrobage à froid: .....	40
III.6) Polissage: .....	40
a) Pré-polissage:.....	40
b) Polissage de finition:.....	41
III.7) Attaque métallographique: .....	42
IV.8) Observation microscopique: .....	43
III.9) Caractérisation mécanique: .....	43
III.9.1) Essai de micro dureté: .....	43
III.9.2) Essais de traction: .....	44
Chapitre IV: modélisation numérique.....	47
IV.1) Définition d'ABAQUS: .....	48
IV.2) Description des possibilités d'ABAQUS : .....	49
IV.3) Pourquoi utiliser la simulation numérique dans le milieu de l'ingénierie mécanique? .....	50
IV.4 )Simulation numérique: .....	51
IV.4.1)Réalisation du modèle sous ABAQUS:.....	51
a)Module PART:.....	51
b) Module PROPRETY : .....	52
c)Module ASSEMBLY : .....	52
d)Module STEP - Creation du pas d'analyse: .....	53
e) Module_ Interaction-LOAD: .....	53

<b>f)Module MESH - Attribution du type d'élément:</b> .....	<b>54</b>
<b>j )Module JOB -Créer et soumettre le job:</b> .....	<b>55</b>
<b>IV.4.2) Résultats numériques -Simulation 1:</b> .....	<b>55</b>
<b>IV.4.3) Résultats numériques -Simulation 2:</b> .....	<b>58</b>
<b>IV.4.4) Interprétation de résultats:</b> .....	<b>60</b>
<b>Chapitre V: Résultats et Discussion.</b> .....	<b>62</b>
<b>V.1) Micrographie :</b> .....	<b>63</b>
<b>V.1.1) Après trempe (le refroidissement) :</b> .....	<b>63</b>
<b>V.1.2) Interprétation de résultats :</b> .....	<b>64</b>
<b>a) Échantillon (2) trempé à l'aire:</b> .....	<b>64</b>
<b>b) Échantillon (3) trempé à l'eau:</b> .....	<b>65</b>
<b>V.1.3) Après le revenu (vieillessement artificiel) :</b> .....	<b>66</b>
<b>V.1.4) Interprétation de résultats:</b> .....	<b>68</b>
<b>V.2) Résultats Métallurgique:</b> .....	<b>69</b>
<b>V.2.1) Essai de micro dureté:</b> .....	<b>69</b>
<b>2.3) Interprétation de résultats :</b> .....	<b>70</b>
<b>V.2.2) Essais de traction:</b> .....	<b>71</b>
<b>V.2.2.1)Les résultats de l'essai de traction:</b> .....	<b>71</b>
<b>V.2.2.2) Paramètres mécaniques obtenus à partir des courbes de traction de toute les éprouvettes:</b> .....	<b>76</b>
<b>V.2.2.3) Interprétation de résultats :</b> .....	<b>77</b>
<b>V.3) Discussion des résultats:</b> .....	<b>78</b>
<b>Conclusion générale.....</b> .....	<b>80</b>



# **Introduction générale**

# *Introduction générale*

---

## *Introduction générale :*

L'utilisation des matériaux dépend de leur disponibilité, de leur coût, de leur aptitude à la mise en forme et de leur compatibilité avec l'environnement, en termes de propriétés mécaniques, physiques et chimiques. Les progrès technologiques majeurs sont souvent liés au développement de matériaux offrant des propriétés améliorées ou de nouveaux matériaux. Parmi les différentes méthodes visant à améliorer la résistance des métaux, le durcissement par précipitation a connu un succès remarquable, en particulier pour les métaux hautement ductiles tels que l'aluminium ou le cuivre.

Le durcissement structural permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance tout en préservant une bonne ductilité. Cette technique repose sur la solubilité de certaines phases à haute température, qui peut être partiellement ou totalement éliminées sous forme de précipités dispersés par des traitements appropriés tels que la trempe et le revenu, à des températures proches de la température ambiante.

Le durcissement structural est devenu une technique essentielle pour accroître la résistance des alliages, non seulement pour ceux destinés aux applications à température ambiante, mais aussi pour ceux utilisés à des températures élevées, atteignant même 1000 °C ou plus. Les applications du durcissement structural dans les alliages légers sont extrêmement vastes et importantes, couvrant un large éventail d'industries.

La précipitation dans les alliages d'aluminium et le phénomène de durcissement structural sont des exemples significatifs d'un défi scientifique où l'innovation industrielle, les chercheurs théoriques, les expérimentateurs et les instruments d'observation et de caractérisation ont progressé conjointement, et continuent de progresser. La formation de nouvelles phases, sous une forme extrêmement fine, à partir d'une solution solide sursaturée, constitue le fondement du durcissement structural des alliages d'aluminium.

L'aluminium pur présente des caractéristiques mécaniques faibles, ce qui limite son utilisation dans la construction de structures mécaniques. Cependant, en ajoutant des éléments d'alliage et en appliquant des traitements thermiques, il est possible de provoquer la précipitation de certaines phases dans la matrice d'aluminium. Ces alliages présentent généralement une résistance accrue, mais aussi une ductilité moindre par rapport à l'aluminium pur. Différentes familles d'alliages corroyés à base

## *Introduction générale*

---

d'aluminium existent, se distinguant par leurs principaux éléments d'alliage : Al-Cu (série 2000), Al-Mn (série 3000), Al-Si (série 4000), Al-Mg (série 5000), Al-Mg-Si (série 6000) et Al-Mg-Zn (série 7000). Parmi eux, les alliages de la série 2xxx (Al-Cu / Al-Cu-Mg), la série 6xxx (Al-Mg-Si) et la série 7xxx (Al-Zn) répondent au durcissement structural par précipitation.

Le traitement thermique est l'une des opérations fondamentales et cruciales dans l'industrie des matériaux métalliques, car il contribue à améliorer les propriétés mécaniques des matériaux et à renforcer leurs performances dans diverses applications industrielles. L'un de ces matériaux métalliques d'une grande importance est l'alliage d'aluminium 7075t6, qui se distingue par sa résistance élevée et sa légèreté. Et c'est le sujet de notre étude.

Cette étude vise à examiner l'impact du traitement thermique sur l'alliage d'aluminium 7075t6 et à analyser l'effet du milieu de refroidissement sur ses propriétés mécaniques. L'accent sera mis sur la compréhension de l'influence des différentes opérations de traitement thermique sur la structure des matériaux et leurs propriétés mécaniques, ainsi que sur l'évaluation de l'effet du milieu de refroidissement sur le comportement de l'aluminium 7075t6.

Dans ce travail nous avons utilisé différentes techniques de caractérisation telle que métallographie par microscopie optique. Essai de micro dureté et l'Essai de traction.

En plus d'une introduction où on présente et on justifie le choix de ce thème de recherche, et d'une conclusion où on résume l'essentiel des résultats obtenus et d'une liste des références bibliographiques consultées, ce mémoire est constitué de cinq chapitres :

Le premier chapitre s'intéresse aux notions générales sur l'aluminium et les alliages d'aluminium;

Le second chapitre est un rappel sur le durcissement structural en général et le durcissement structural des alliages d'aluminium ;

Le troisième chapitre présente une description des méthodes expérimentales utilisées, c'est-à-dire: Le traitement thermique, L'enrobage, Polissage, Observation microscopique, Essai de micro dureté et l'essai de traction ;

Le quatrième chapitre comporte une simulation du traitement thermique pour l'alliage 7075t6 sur Abaqus.

## ***Introduction générale***

---

Le cinquième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus par les différentes techniques et leur interprétation.

# **Chapitre I :**

## **Aluminium et Alliages d'aluminium**



twinkl

***I.1) L'aluminium:***

L'aluminium est un matériau omniprésent dans nos vies. Chaque jour, nous entrons en contact avec lui dans notre vie quotidienne : sûrement tout au long de la journée, nous ouvrons une fenêtre, buvons une canette de boisson gazeuse ou utilisons un appareil électronique (tablette, ordinateur portable, téléphone portable) qui ont des pièces en aluminium. Dans l'industrie manufacturière, l'aluminium est l'un des métaux les plus utilisés, en raison de ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et technologiques, telles que la résistance à la corrosion, son aptitude à l'alliage, sa conductivité électrique et thermique, son faible poids spécifique (un tiers de l'acier), sa durabilité, sa recyclabilité et sa ductilité, entre autres.

L'aluminium est le troisième élément le plus abondant sur la Terre. Même les émeraudes, les rubis et les saphirs sont principalement constitués d'oxyde d'aluminium dans des cristaux. C'est donc la première ressource de plus en plus d'industries. [1]

***I.1.1) Découverte et développement:***

En 1821, un dénommé Blavier avait envoyé au minéralogiste et ingénieur des Mines français Pierre Berthier, professeur à l'école des Mines de Paris, un échantillon, pour analyse, d'un minerai trouvé près des Baux de Provence (proche de Marseille en France), pour savoir si on pouvait l'utiliser comme minerai de fer; auquel il donnera le nom de bauxite. En 1827, le scientifique allemand Friedrich Wöhler obtient des particules d'aluminium impur.

En 1854, en France, Henri Sainte-Claire Deville parvient à fabriquer, pour la première fois de l'histoire, un petit lingot d'aluminium dans un laboratoire de l'École normale supérieure de Paris, où il occupe la chaire de chimie et met au point le premier procédé de fabrication industriel.

En 1886, Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis découvrent, indépendamment, que l'oxyde d'aluminium ou alumine se dissout dans la cryolite et peut être décomposé par électrolyse pour donner du métal brut en fusion. En 1887, le chimiste autrichien Karl Joseph Bayer fait breveter un procédé de transformation. [2]

**I.1.2) Propriétés d'aluminium:**

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un métal pauvre, malléable, de couleur argentée, qui est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium ; il représente en moyenne 8 % de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète. L'aluminium est trop réactif pour exister à l'état natif dans le milieu naturel : on le trouve au contraire sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents, son minerai principal étant la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. [3]

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

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

Les principales propriétés de l'aluminium sont:

- Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité;
- Faible masse volumique : 2,7 kg/dm<sup>3</sup>;
- Point de fusion : 658° C;
- Faible module d'Young : 70000 N/mm<sup>2</sup> 70000 Mpa 7000DaN/mm<sup>2</sup>;
- Faible limite élastique;
- Fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier);
- Bonne conductibilité (67 % de celle du).

**a) Résistance à la corrosion:**

L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage,...).

**b) Conductivité thermique et électrique:**

-L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité.

-La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules).

-A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.

**c) Ductilité, malléabilité:**

L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, Ce qui permet de lui donner des formes très variées.

**d) Résistance mécanique:**

L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise.

A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.

**e) Légèreté:**

L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm<sup>3</sup>) ou du cuivre (8,96 g/cm<sup>3</sup>). [4]

**La carte d'identité de l'aluminium**

Réseau cristallin	cubique à faces centrées
Symbole chimique	Al
Numéro atomique	13
Masse molaire atomique	27 g.mol <sup>-1</sup>
Température de fusion	660 ° C
Point d'ébullition	2056 °C
Densité	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Résistivité électrique	2,7.10 <sup>-8</sup> Ω.m
Conductivité thermique	220 W.m <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup>
Capacité thermique massique	9.102 J.kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup>
Coefficient de dilatation	24.10 <sup>-6</sup> °K <sup>-1</sup>
Module d'élasticité	69 000 MPa

**Tableau I.1.** La carte d'identité de l'aluminium

***1.1.3) Les différents domaines d'utilisations:***

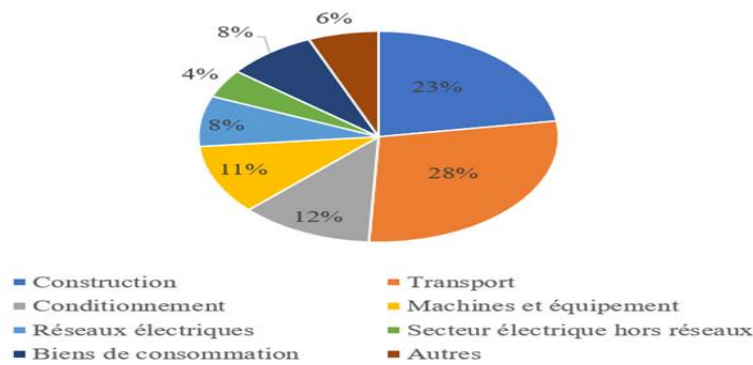
-L'aluminium est un matériau polyvalent utilisé dans de nombreuses industries en raison de ses propriétés exceptionnelles. Il est léger, solide et résistant à la corrosion, ce qui en fait un choix idéal pour une variété d'applications

- L'aluminium est couramment utilisé dans la construction de bâtiments en raison de sa légèreté et de sa durabilité. Il est souvent utilisé pour fabriquer des profilés, des poutres et des plaques de revêtement de façade. L'aluminium est également utilisé pour fabriquer des fenêtres et des portes, car il est résistant à la corrosion et facile à entretenir.

- L'aluminium est également largement utilisé dans l'industrie automobile pour fabriquer des pièces de voiture légères et résistantes. Il est utilisé pour fabriquer des moteurs, des châssis, des carrosseries et des roues. L'utilisation de l'aluminium dans l'industrie automobile permet de réduire le poids des véhicules, ce qui améliore leur consommation de carburant et leur performance générale.

- L'aluminium est souvent utilisé pour fabriquer des boîtes de conserve et des barquettes alimentaires en raison de sa capacité à conserver la fraîcheur des aliments. Le rouleau aluminium industriel est également utilisé pour fabriquer des films alimentaires et des sacs de rangement alimentaire. L'aluminium est une excellente option pour l'emballage alimentaire car il est résistant à la corrosion et ne réagit pas avec les aliments.

- L'aluminium est également un matériau de choix dans l'industrie aérospatiale en raison de sa légèreté et de sa résistance à la corrosion. Il est utilisé pour fabriquer des structures d'avions, des réservoirs de carburant et des pièces de moteur. L'aluminium est également utilisé dans la construction de satellites et de fusées, car il est capable de résister aux conditions extrêmes de l'espace. [5]



**Figure I.1.** Les différents domaines d'utilisations d'aluminium.

***1.2) Les alliages d'aluminium:***

Les alliages d'aluminium sont incroyablement polyvalents, robustes et fiables. Pour cette raison, ils sont très recherchés dans l'ingénierie, la construction et les applications automobiles, ce qui en fait l'un des matériaux métalliques les plus populaires, avec l'acier.

Bien que l'aluminium ait des propriétés surprenantes en tant qu'élément pur, il peut ne pas être assez fort pour des utilisations de longue durée. Pour cette raison, il peut être combiné avec d'autres éléments pour former des alliages, qui résistent exponentiellement plus dans le temps et sont adaptés à des applications industrielles. Les alliages d'aluminium sont particulièrement utiles lorsque les ingénieurs essaient de réduire le poids de quelque chose (par exemple un avion) sans en compromettre la résistance. [6]

***1.2.1) Définition:***

Un alliage d'aluminium est une composition chimique où d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pour améliorer ses propriétés. La principale raison est d'augmenter sa résistance mécanique. Ces éléments comprennent le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc à des concentrations combinées pouvant représenter jusqu'à 15% de l'alliage en poids. Les alliages sont identifiés par un numéro à quatre chiffres dans lequel le premier chiffre identifie une série caractérisée par ses principaux éléments d'alliage. [7]

***1.2.2) Catégories d'alliage:***

Le système de "l'Aluminium Association" est le plus largement reconnu aux

États-Uni. Le système d'identification des alliages utilise différentes nomenclatures pour les alliages, mais divise les alliages en familles pour simplifier. Pour les alliages ouvrés, un système à quatre chiffres est utilisé pour produire une liste des familles de composition ouvrée comme suit:

**a) 1xxx:** Composition non alliée (pure), utilisée principalement dans les industries électriques et chimiques.

**b) 2xxx :** Alliages dans lesquels le cuivre est le principal élément d'alliage, bien que d'autres éléments, notamment le magnésium, puissent être spécifiés. Les alliages de la série 2xxx sont largement utilisés dans les aéronefs où leur résistance élevée (des limites d'élasticité pouvant atteindre 455) est évaluée.

**c) 3xxx :** Alliages dans lesquels le manganèse est le principal élément d'alliage, utilisés comme alliages d'usage général pour des applications architecturales et divers produits.

**d) 4xxx :** Alliages dans lesquels le silicium est le principal élément d'alliage utilisé dans les tiges de soudage et les feuilles de brasage.

**e) 5xxx :** Alliages dans lesquels le magnésium est le principal élément d'alliage utilisé dans les coques de bateau, les bordures de pont et d'autres produits exposés aux milieux marins.

**f) 6xxx :** Alliages dans lesquels le magnésium et le silicium sont les principaux éléments d'alliage, couramment utilisés pour les extrusions architecturales et les composants automobiles.

**g) 7xxx :** Alliages dans lesquels le zinc est le principal élément d'alliage (bien que d'autres éléments, comme le cuivre, le magnésium, le chrome et le zirconium, puissent être précisés), utilisés dans les composants structuraux d'aéronefs et d'autres applications à haute résistance. Les séries 7xxx sont les alliages d'aluminium les plus résistants, avec une limite d'élasticité de 500 MPA possible.

**h) 8xxx :** Alliages caractérisant diverses compositions. Les alliages de la série 8xxx peuvent contenir des quantités appréciables d'étain, de lithium ou de fer. [8]

-Ces alliages apparaissent suivant les deux catégories :

- **Alliages non trempent (sans durcissement structural):** les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les phénomènes d'écrouissage et d'adoucissement par recuit ou restauration série 1000, 3000, 5000;
- **Alliages trempent (à durcissement structural):** les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les différents paramètres de la trempe structurale: série 2000, 6000, 7000.

### ***1.2.3) Alliages non trempent :***

Le durcissement est obtenu, pour cette catégorie, par l'effet combiné des éléments d'addition (Mg, Mn, Fe, Si, etc.) et de la déformation plastique du métal, appelé « écrouissage ». De plus, en combinant l'effet de durcissement par écrouissage et l'effet d'adoucissement par traitements thermiques de recuit ou de restauration, on obtient pour chaque alliage une plage étendue de dureté à plasticité maximale et dureté minimale jusqu'à l'état extra dur à dureté maximale et plasticité minimale. Cette catégorie comporte les alliages des familles 2000, 3000 et 5000. [9]

#### **a) Série 3000 :**

Le manganèse est le principal élément d'alliage de cette série, souvent avec une petite quantité de magnésium. Cependant, seul un pourcentage limité de manganèse peut être ajouté efficacement à l'aluminium, soit de 1.0 % à 1.5 %. Le 3003 est un alliage populaire à usage général et peut être utilisé dans des applications telles que tôles de toiture, réservoirs d'entreposage, articles ménagers, échangeurs de chaleur et ustensiles de cuisine. L'alliage 3304, qui a une plus grande résistance mécanique, est utilisé dans les canettes de bière ou de boissons gazeuses en aluminium. [10]

#### **b) Série 4000 :**

L'alliage aluminium-silicium présente les caractéristiques de haute résistance thermique et de résistance à l'usure. L'alliage d'aluminium séries 4000 contient une teneur en silicium de 4,5-6%. La tige en alliage d'aluminium typique de séries 4000 est fabriquée à partir d'alliage d'aluminium 4A01. Cette série est généralement utilisée dans les matériaux de construction, les pièces de machines, les matériaux de forgeage et les matériaux de soudage. Elle se caractérise par un faible point de fusion et une haute résistance à la corrosion. [11]

**c) Série 5000 :**

Les alliages d'aluminium série 5000 appartiennent au groupe alliage de magnésium. C'est un alliage qui ne permet pas de traitement thermique mais offre une forte ténacité, une haute résistance à corrosion et une grande usinabilité. Cette série se caractérise par une bonne apparence après le traitement d'anodisation et une bonne performance en soudage. Elle est largement appliquée dans les bateaux, l'automobile, les avions, les rails légers de métro, les unités de réfrigération et les pièces de missiles. [12]

**1.2.4) Alliages trempent:**

Ce traitement thermique consiste en principe en un recuit à haute température suivi immédiatement d'une trempe dans l'eau et ensuite d'un revenu nommé aussi vieillissement. Celui-ci se produit pour certains métaux à la température ordinaire (vieillissement naturel) et pour d'autres à des températures plus élevées (vieillissement artificiel). [13]

**a) Série 2000:**

Les alliages d'aluminium de la série 2000 sont l'alliage d'aluminium dur le plus fréquemment utilisé. C'est un alliage qui permet le traitement thermique. Il présente une résistance élevée et une forte résistance à la chaleur. Il est applicable dans des environnements inférieurs à 150 °C et largement utilisé dans les structures d'avions, les rivets, les moyeux de camions et autres composants structurels. [14]

**b) Série 6000:**

La série 6000 est une famille d'alliage d'aluminium qui contient du magnésium et du silicium comme composants d'alliage prédominants. Les propriétés remarquables de l'alliage série 6000 est une excellente résistance et une résistance élevée à la corrosion. L'alliage de la série 6000 peut également être traité thermiquement pour améliorer leur propriété mécanique. L'alliage de la série 6000 est parfait pour les applications structurelles et architecturales. [15]

**c) Série 7000:**

Le zinc est le principal agent d'alliage pour cette série. Pour améliorer les propriétés mécaniques, il faut que le magnésium soit ajouté en une petite quantité. D'autres

éléments tels que le cuivre et le chrome peuvent également être ajoutés en petites quantités. Néanmoins, ces alliages sont difficiles à produire et à fabriquer. C'est pourquoi ils sont utilisés dans des applications très spécifiques requérant une grande résistance mécanique comme la fabrication d'un avion ou d'un pare-choc automobile. Les alliages les plus connus sont 7050 et 7075, largement utilisés dans l'industrie aéronautique. La plupart des alliages de cette série ont une couche protectrice puisqu'ils ont une moins bonne résistance à la corrosion. [16]

### ***1.2.5) État métallurgique des alliages d'aluminium:***

État d'un métal, par rapport à sa dureté et à sa résistance, produit par un traitement thermique, par un travail à froid ou leur combinaison dans le but d'amener le métal aux propriétés désirées. Il existe deux grands groupes d'alliages d'aluminium. Les alliages à durcissement par écrouissage et les alliages à durcissement structural.

Les états métallurgiques sont identifiés dans la dénomination des alliages par une lettre qui suit le numéro de l'alliage. Cette lettre est souvent suivie d'un ou de plusieurs chiffres qui ont chacun leur signification. [17]

### ***1.2.6) États de base:***

**a) F. Brut de fabrication:** Cet état s'applique aux produits qui sont issus de procédés de transformation durant lesquels aucun contrôle de durcissement structural ou d'écrouissage n'a été utilisé. Pour les produits de corroyage dans cet état, aucune limite de propriété n'est donnée. Les alliages d'aluminium sont rarement utilisés pour des produits finis dans l'état F.

**b) O. Recuit :** Cet état s'applique aux produits corroyés qui sont recuits pour obtenir l'état avec la plus faible résistance mécanique. Il s'applique aussi aux produits moulés qui sont recuits pour augmenter leur ductilité et leur stabilité dimensionnelle. Le O peut être suivi par un chiffre autre que 0.

**c) H. Écroui (alliages de corroyage seulement):** Cet état s'applique aux produits dont la résistance est augmentée par écrouissage, avec ou sans traitements thermiques supplémentaires pour produire des diminutions de résistance. Le H est toujours suivi d'au moins un chiffre, dont la signification est expliquée à la section Alliages à durcissement par écrouissage.

**d) W. Traitement de mise en solution:** Cet état instable s'applique uniquement aux alliages qui vieillissent spontanément à température ambiante après un traitement thermique de mise en solution. Cette désignation est seulement spécifique quand la période de vieillissement à froid est indiquée; par exemple, W 1/2 h.

**F) T. Traitements thermiques :** pour obtenir un état stable autre que F, O ou H Cet état s'applique aux produits qui sont traités thermiquement pour obtenir des états stables, avec ou sans écrouissage supplémentaire. Le T est toujours suivi d'au moins un chiffre dont la signification est expliquée à la section Alliages à durcissement structural (cette section sera traitée dans le prochain numéro). [18]

### ***1.2.7) Alliages trempant :***

Appelés alliages à durcissement structural, ils obtiennent leurs caractéristiques mécaniques par une succession de traitement thermiques durcissant ou adoucissants. Ce sont les alliages des familles 2000, 6000, 7000. Leur état métallurgique est symbolisé par la lettre T [19]:

**a) T1 :** Traitement de trempe à partir de la température d'extrusion et maturation naturelle , D'application pour les demi-produits, qui depuis la température d'extrusion sont refroidis à une vitesse suffisante (trempe), de sorte que leurs propriétés mécaniques sont augmentées après une maturation naturelle postérieure. Sont inclus dans cet état les produits qui, après refroidissement, sont soumis à un aplatissement ou à un dressage par traction sans aucun effet sensible sur les propriétés mécaniques.

**b) T2 :** Traitement de trempe à la température d'extrusion, d'écrouissage et de maturation naturelle , D'application pour les demi-produits, qui sont refroidis à une vitesse suffisante (trempe) à partir de la température d'extrusion (ou laminage), et subissent un écrouissage déterminé suivi d'une maturation naturelle afin d'améliorer leur résistance mécanique. Sont inclus dans cet état les produits qui, après la trempe, sont soumis à un aplatissement ou à un dressage par traction sans aucun effet sensible sur les propriétés mécaniques.

**C) T3 :** Traitement thermique de mise en solution (1), trempe (1), d'écrouissage et de maturation naturelle , D'application pour les demi-produits, qui après une mise en solution ou trempe, subissent un écrouissage déterminé suivi d'une maturation naturelle

afin d'améliorer leur résistance mécanique. Sont inclus dans cet état les produits qui, après la trempe, sont soumis à un aplatissement ou à un dressage par traction avec des effets sur leurs propriétés mécaniques.

**d) T4** : Traitement thermique de mise en solution (1), trempe (1) et maturation naturelle, D'application pour les demi-produits, qui après une mise en solution, trempe et vieillissement naturel améliorent leurs propriétés mécaniques. Sont inclus dans cet état les produits qui, après la trempe, subissent un aplatissement ou un dressage par traction sans effet sur les propriétés mécaniques.

**e) T5** : Traitement de trempe à partir de la température d'extrusion et maturation artificielle , D'application pour les demi-produits, qui, à partir de la température d'extrusion, sont refroidis par air forcé à une vitesse suffisante (trempe), de sorte que leurs propriétés mécaniques sont augmentées après une maturation artificielle postérieure. Sont inclus dans cet état les produits qui, après refroidissement, subissent un aplatissement ou un dressage par traction sans aucun effet sensible sur les propriétés mécaniques.

**f) T6** : Traitement thermique de mise en solution (1), trempe (1) et maturation artificielle, D'application pour les demi-produits, qui après une mise en solution, trempe brusque et vieillissement naturel améliorent leurs propriétés mécaniques. Sont inclus dans cet état les produits qui, après la trempe, subissent un aplatissement ou un dressage par traction sans effet sur les propriétés mécaniques.

**G) T7** : Traitement thermique de mise en solution (1), trempe (1) et sur revenu / stabilisé, D'application pour les demi-produits qui sont mûris artificiellement après le traitement de mise en solution et trempe, au-delà de la limite correspondante à la résistance maximale dans le but de contrôler une caractéristique significative.

**h) T8** : Traitement thermique de mise en solution (1), trempe (1), écrouissage et revenu, D'application pour les demi-produits, qui subissent un écrouissage déterminé entre la trempe et le revenu afin d'améliorer sa résistance. Sont inclus dans cet état les produits qui, après la trempe, sont soumis à un aplatissement ou à un dressage par traction avec effet sur les propriétés mécaniques.

**l) T9 :** Traitement thermique de mise en solution (1), trempe (1), revenu et écrouissage , D'application pour les demi-produits qui sont déformés à froid, après traitement de mise en solution, écrouissage et revenu afin d'améliorer leur résistance mécanique.

**j) T10:** Traitement thermique de trempe à partir de la température d'extrusion, écrouissage et revenu, D'application pour les demi-produits, qui après refroidissement (trempe) et avant la maturation artificielle, subissent un écrouissage déterminé. [18]

### **1.2.8) Alliages non trempant:**

Appelés alliages à durcissement par écrouissage, ils obtiennent leurs caractéristiques mécaniques par une succession de déformations mécaniques et d'adoucissements par passage au four. Ce sont les alliages des familles 1000, 3000, 5000. Leur état métallurgique est symbolisé par la lettre H: [19]

**a) H1. Écroui uniquement:** S'applique aux produits qui sont uniquement écrouis, sans traitements de recuit subséquents, notamment aux alliages de la famille 1000 qui, même avec un écrouissage maximal, garde une bonne malléabilité.

**b) H2. Écroui et partiellement recuit :** S'applique aux produits qui sont durcis par écrouissage, plus que la valeur finale désirée, et dont la résistance mécanique est ramenée, par un recuit partiel, au niveau souhaité. Le nombre suivant cette désignation indique l'effet restant de l'écrouissage après que le produit ait été partiellement recuit.

**c) H3. Écroui et stabilisé :** S'applique aux produits qui sont écrouis et dont les propriétés mécaniques sont stabilisées par un traitement thermique de basse température ou le sont en raison de la chaleur introduite pendant le procédé de transformation. C'est l'état stabilisé, surtout appliqué aux alliages de la famille 5000, dont certains alliages s'adoucissent (perte de propriétés mécaniques) à température ambiante. La stabilisation améliore habituellement la ductilité. Le nombre suivant cette désignation indique l'effet restant de l'écrouissage après le traitement de stabilisation.

**d) H4. Écroui et peint ou laqué :** S'applique aux produits qui sont écrouis et qui sont soumis à un certain traitement thermique lors de la cuisson des peintures ou des laques. Le nombre suivant cette désignation indique le degré d'écrouissage restant après que le produit ait subi la cuisson. Les limites des propriétés mécaniques correspondantes, par exemples au HX2 ou HX3, s'appliquent. [20]

***1.2.9) caractéristiques général des alliages d'aluminium:***

**a) Alliages de la série 1xxx :** cette série est souvent appelée la série d'aluminium pur parce qu'elle doit avoir un minimum d'aluminium de 99,0 %. Ils sont soudables. Cependant, en raison de leur plage de fusion étroite, ils nécessitent certaines considérations afin de produire des procédures de soudage acceptables. Lorsqu'ils sont envisagés pour la fabrication, ces alliages sont choisis principalement pour leur résistance à la corrosion supérieure, comme dans les réservoirs et les canalisations chimiques spécialisés, ou pour leur excellente conductivité électrique comme dans les applications de barres omnibus .

Ces alliages ont des propriétés mécaniques relativement faibles et seraient rarement considérés pour des applications structurelles générales. Ces alliages de base sont souvent soudés avec un matériau de remplissage correspondant ou avec des alliages de remplissage 4xxx dépendant des exigences d'application et de performance.

**b) Alliages de la série 2xxx:** il s'agit d'alliages d'aluminium et de cuivre (ajouts de cuivre allant de 0,7 à 6,8 %) et d'alliages à haute résistance et haute performance qui sont souvent utilisés pour l'aérospatiale et les avions. Ils ont une excellente résistance sur une large gamme de températures. Certains de ces alliages sont considérés comme non soudables par les procédés de soudage à l'arc en raison de leur sensibilité à la fissuration à chaud et à la fissuration par corrosion sous contrainte; cependant, d'autres sont soudés à l'arc avec succès avec les procédures de soudage correctes. Ces matériaux de base sont souvent soudés avec des alliages de remplissage de la série 2xxx haute résistance conçus pour correspondre à leurs performances, mais peuvent parfois être soudés avec les charges de la série 4xxx contenant du silicium ou du silicium et du cuivre, selon les exigences d'application et de service.

**c) Alliages de la série 3xxx :** Il s'agit des alliages d'aluminium et de manganèse (ajouts de manganèse variant de 0,05 à 1,8 %) et ils sont de résistance modérée, ont une bonne résistance à la corrosion. bonne formabilité et sont adaptés pour une utilisation à des températures élevées. Une de leurs premières utilisations a été les casseroles, et elles sont aujourd'hui le composant principal pour les échangeurs de chaleur dans les véhicules et les centrales électriques. Leur résistance modérée, cependant, empêche souvent leur considération pour des applications structurelles. Ces alliages de base sont

soudés avec des alliages de remplissage des séries 1xxx, 4xxx et 5xxx, en fonction de leur chimie spécifique et de leurs exigences particulières d'application et de service.

**d) Alliages de la série 4xxx :** Il s'agit des alliages d'aluminium et de silicium (additions de silicium allant de 0,6 à 21,5 %) et sont les seules séries qui contiennent à la fois des alliages traitables à la chaleur et non traitables à la chaleur. Le silicium, lorsqu'il est ajouté à l'aluminium, réduit son point de fusion et améliore sa fluidité en fusion. Ces caractéristiques sont souhaitables pour les matériaux de remplissage utilisés pour le soudage par fusion et le brasage. Par conséquent, cette série d'alliages est principalement trouvée comme matériau de remplissage. Le silicium, indépendamment dans l'aluminium, n'est pas traitable par la chaleur ; cependant, un certain nombre de ces alliages de silicium ont été conçus pour avoir des ajouts de magnésium ou de cuivre, qui leur fournit la capacité de répondre favorablement au traitement thermique de solution. Généralement, ces alliages de remplissage traitables par la chaleur ne sont utilisés que lorsqu'un composant soudé doit être soumis à des traitements thermiques après soudage.

**e) Alliages de la série 5xxx :** Il s'agit des alliages d'aluminium et de magnésium (additions de magnésium allant de 0,2 à 6,2 %) et ont la plus grande résistance des alliages non traitables à la chaleur. En outre, cette série d'alliages est facilement soudable, et pour ces raisons, ils sont utilisés pour une grande variété d'applications telles que la construction navale, le transport, les navires sous pression, les ponts et les bâtiments. Les alliages à base de magnésium sont souvent soudés avec des alliages de remplissage, qui sont sélectionnés après examen de la teneur en magnésium du matériau de base, et l'application et les conditions de service de l'élément soudé. Les alliages de cette série contenant plus de 3,0 % de magnésium ne sont pas recommandés pour un service à température élevée supérieure à 150 degrés F en raison de leur potentiel de sensibilisation et de leur sensibilité subséquente à la fissuration par corrosion sous contrainte. Les alliages de base contenant moins de 2,5 % de magnésium sont souvent soudés avec succès avec les alliages de remplissage des séries 5xxx ou 4xxx. L'alliage de base 5052 est généralement reconnu comme l'alliage de base à teneur maximale en magnésium qui peut être soudé avec un alliage de remplissage de série 4xxx. En raison des problèmes associés à la fusion eutectique et des mauvaises propriétés mécaniques associées, il n'est pas recommandé de souder les matériaux de cette série d'alliages, qui contiennent des quantités plus élevées de magnésium avec les charges de la série 4xxx.

Les matériaux de base en magnésium sont soudés uniquement avec des alliages de remplissage 5xxx, qui correspondent généralement à la composition de l'alliage de base.

**f) Alliages de la série 6XXX :** Il s'agit des alliages aluminium/magnésium - silicium (ajouts de magnésium et de silicium d'environ 1,0 %) et se retrouvent largement dans l'industrie de la fabrication par soudage, utilisés principalement sous forme d'extrusions, et incorporé dans de nombreux composants structurels. L'ajout de magnésium et de silicium à l'aluminium produit un composé de magnésium-siliciure, qui donne à ce matériau sa capacité à devenir une solution traitée thermiquement pour une résistance améliorée. Ces alliages sont naturellement sensibles aux fissures de solidification et, pour cette raison, ils ne doivent pas être soudés à l'arc (sans matériau de remplissage). L'ajout de quantités adéquates de matériau de remplissage pendant le processus de soudage à l'arc est essentiel pour assurer la dilution du matériau de base, évitant ainsi le problème de fissuration à chaud. Ils sont soudés avec des matériaux de remplissage 4xxx et 5xxx, selon l'application et les exigences de service.

**g) Alliages de la série 7XXX :** Il s'agit des alliages d'aluminium et de zinc (additions de zinc allant de 0,8 à 12,0 %) et comprennent certains des alliages d'aluminium les plus résistants. Ces alliages sont souvent utilisés dans des applications de haute performance telles que l'aviation, l'aérospatiale et l'équipement sportif compétitif. Comme la série 2xxx d'alliages, cette série intègre des alliages qui sont considérés comme des candidats inappropriés pour le soudage à l'arc, et d'autres, qui sont souvent soudés à l'arc avec succès. Les alliages couramment soudés dans cette série, tels que 7005, sont principalement soudés avec les alliages de remplissage de la série 5xxx. [21]

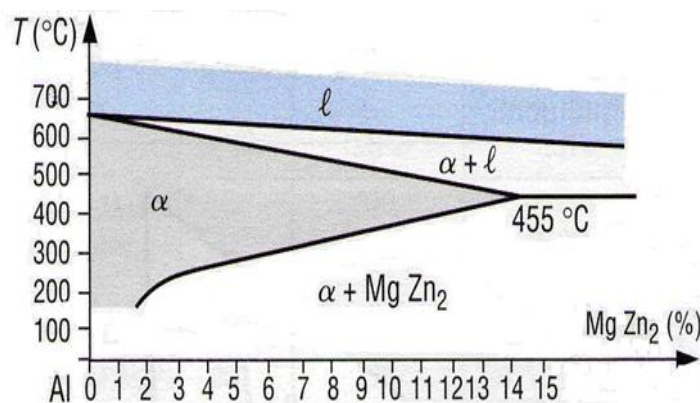
### ***1.2.10) L'alliage 7075t6:***

L'alliage d'aluminium 7075t6 a d'abord été développé secrètement par une société japonaise en 1936. Il a ensuite été introduit par Alcoa en 1943. L'aluminium 7075 existe pour être l'un des alliages d'aluminium les plus résistants avec un excellent rapport résistance/poids. Il offre une large gamme de propriétés mécaniques impressionnantes et se caractérise par une bonne résistance à la fatigue et une bonne ductilité. En raison de ses excellentes propriétés, il est largement utilisé pour les applications fortement sollicitées et dans les pièces structurelles d'avions.

L'alliage d'aluminium 7075 contient 5.6 à 6.1 % de zinc, 2.1 à 2.5 % de magnésium et 1.2 à 1.6 % de cuivre. D'autres métaux dans ses compositions comprennent le silicium, le manganèse, le chrome, le titane, le fer, etc. De plus, l'alliage d'aluminium 7075 provient de la série d'alliages d'aluminium 7xxx.. [22]

L'Al-7075t6 répond au traitement thermique de durcissement par vieillissement, ce qui se traduit par des propriétés mécaniques extrêmement élevées. Cependant, cet alliage présente un certain degré de sensibilité à l'entaille. La matière 7075 présente une bonne formabilité dans des conditions recuites et traitées thermiquement en solution à température ambiante et dans des conditions 7075-T6 à des températures élevées. [23]

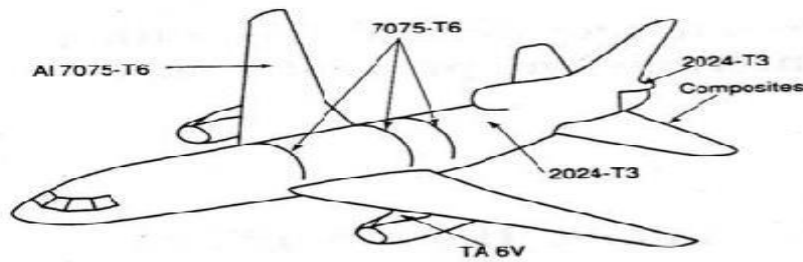
On a noté antérieurement qu'il est exigé les nuances d'alliage présentant le meilleur compromis entre différentes propriétés métallurgiques déjà mentionnées, l'alliage qui réalise actuellement ce meilleur compromis et ce au stade industriel est le 7075 qui fait l'objet de notre étude. [24]



**Figure I.2.** Digramme d'équilibre Al-MgZn<sub>2</sub>.

### ***1.2.11) Domaine d'application du 7075t6 :***

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines de l'industrie et de la vie quotidienne : construction aéronautique, automobile, ferroviaire et navale (superstructures et équipements), bâtiment (toitures, façades, aménagement intérieur), industrie électrique (câbles et appareillages), boîtes de boissons, etc... L'aluminium pur n'est pas une très grande résistance mécanique mais ses alliages peuvent avoir des propriétés remarquables.



**Figure I.3.** Exemple d'utilisation des alliages d'aluminium 7075t6 en aéronautique

-Aussi, et étant donnée leur faible densité, ils sont aussi destinés aux applications nécessitant des propriétés mécaniques élevées pour un moindre poids.

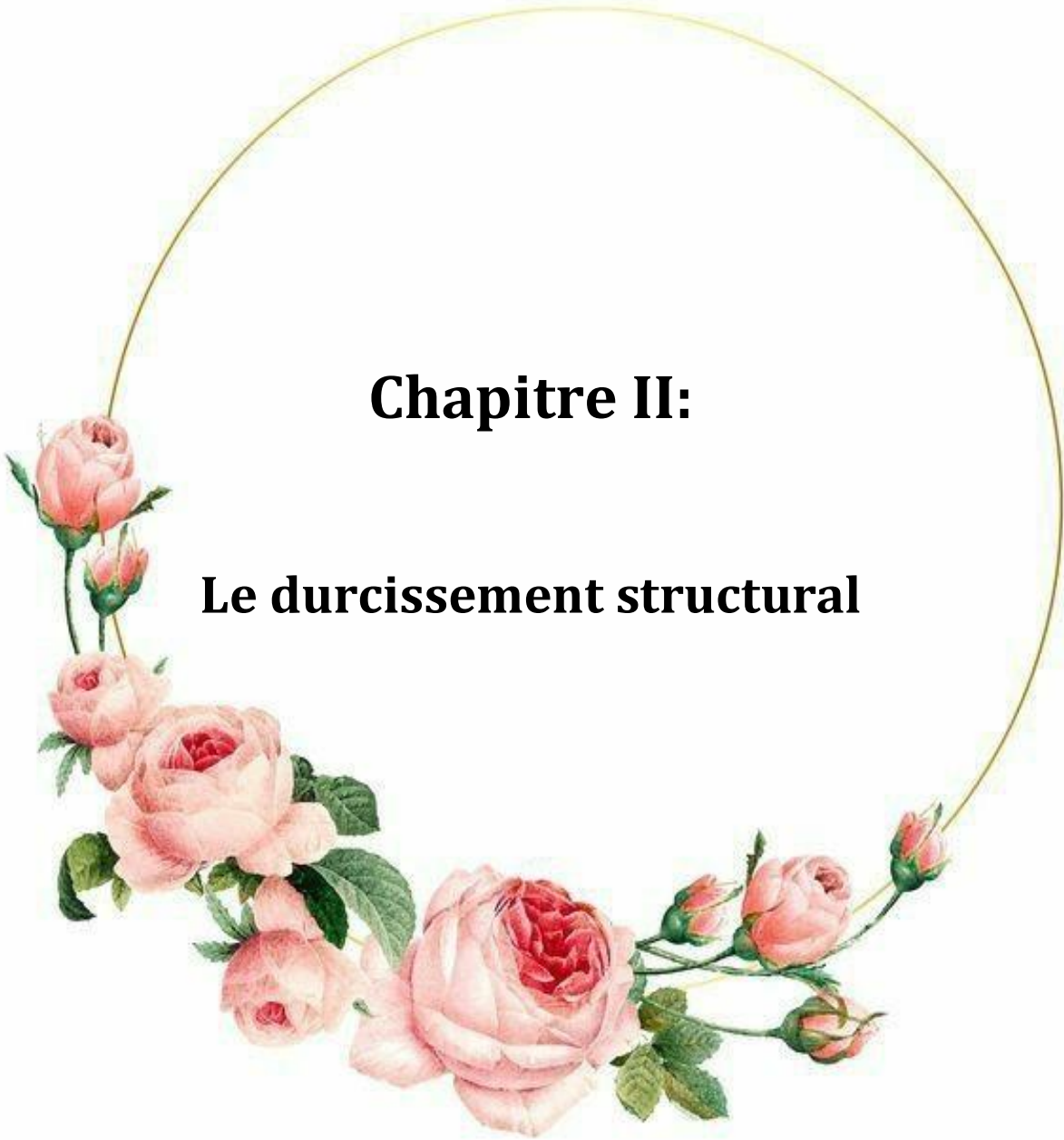
Le tableau 1 représente une comparaison entre les alliages d'aluminium et d'autres matériaux subissant les mêmes sollicitations (flambage). [25]

	Limite d'élasticité (MPa)	Module de Young (GPa)	Densité g/cm <sup>3</sup>	E1/3/p (Flambage)
Acier inoxydable FV 520	1080	215	7.83	0.765
Alliage de Titane TA6V	830	110	4.43	1.080
<b>Alliage d'aluminium 7075 T6</b>	<b>470</b>	<b>72</b>	<b>2.80</b>	<b>1.480</b>

**Tableau I.2.** Comparaison entre les alliages d'aluminium et d'autres matériaux subissant les mêmes sollicitations (flambage).

## **Chapitre II:**

### **Le durcissement structural**



**II.1) Définition:**

Le durcissement structural est comme son nom l'indique un procédé permettant de durcir un alliage de métaux. Il nécessite un alliage métastable, dont la forme stable à température ambiante est un intermétallique constitué de deux phases différentes. Un recuit à l'intérieur du nez du diagramme TTT entraîne la germination de précipités de différentes nouvelles phases plus ou moins stables.

Ces précipités, qu'ils soient cohérents ou incohérents avec la phase principale constituent des obstacles sur le chemin des dislocations ce qui augmente la dureté du matériau. [26]

**II.2) Le durcissement structural pour l'acier:**

Les traitements thermiques par précipitation (durcissement structural) permettent de rendre les matériaux plus résistants en permettant la libération contrôlée des constituants pour former des agrégats de précipités, qui renforcent de façon significative la résistance du composant.

Il existe une multitude d'alliages d'acier inoxydable moulés et usinés dont diverses caractéristiques peuvent être améliorées par traitement de mise en solution et durcissement par vieillissement de précipitation. Ces traitements thermiques permettent généralement d'améliorer les caractéristiques telles que la résistance mécanique à température ambiante et/ou élevée et la résistance à la corrosion. [27]

**II.3) Le durcissement structural Pour les métaux non-ferreux:**

La même méthode est aussi utilisée pour différents métaux non ferreux tels que le titane, l'aluminium ou des alliages de bronze; Une application importante du durcissement structural est le durcissement des alliages d'aluminium.

Une condition nécessaire mais non suffisante pour le durcissement d'un alliage d'aluminium est qu'il contienne du cuivre, du magnésium en combinaison avec du silicium, du zinc ou du lithium; Un exemple remarquable de durcissement structural est le duralumin, un alliage d'aluminium, de cuivre (4%) et de magnésium (0,5%). Le recuit de mise en solution est effectué à 510°C.

Contrairement à l'acier, le duralumin peut être aussi formé après le refroidissement, car il reste d'abord mou après la trempe. La résistance finale est obtenue par vieillissement naturel ou vieillissement artificiel. Le durcissement peut être aussi retardé par une cryogénéisation (min.  $-18^{\circ}\text{C}$ ). Cela est utilisé par exemple pour des rivets composés d'alliages de ce type afin d'en rallonger le temps de travail; Presque tous les alliages d'aluminium qui peuvent être durcis sont sensibles à la corrosion, car les éléments d'alliage empêchent la formation d'une couche d'oxyde continue.

Par le fait que le durcissement structural a lieu à des températures relativement basses, la déformation après le durcissement peut être maintenue très basse, contrairement à d'autres méthodes. [28]

#### ***II.4) Le durcissement des alliages d'aluminium:***

Le durcissement des alliages d'aluminium a été découvert en 1906 par l'allemand Alfred Wight dans le système Al-Cu-Mg-Mn. Il est obtenu par l'ajout d'éléments qui modifient plus ou moins sa microstructure soit en entrant en solution solide de substitution, soit en formant des précipités hors solutions solide, soit en permettant le durcissement structural.

Les propriétés mécaniques d'un matériau, sont liées à sa microstructure et précisément au mouvement facile ou difficile des dislocations. En effet, pour améliorer les propriétés mécaniques d'un matériau, il faut créer des obstacles au mouvement des dislocations, c'est le type d'obstacle qui va définir le mécanisme de durcissement, dont on peut citer quelques-uns : Durcissement par réduction de la taille des grains, Durcissement en solution, Durcissement par déformation plastique (écrouissage), Durcissement par précipitation (durcissement structural). [29]

#### ***II.5) Les mécanismes de durcissement des alliages d'aluminium:***

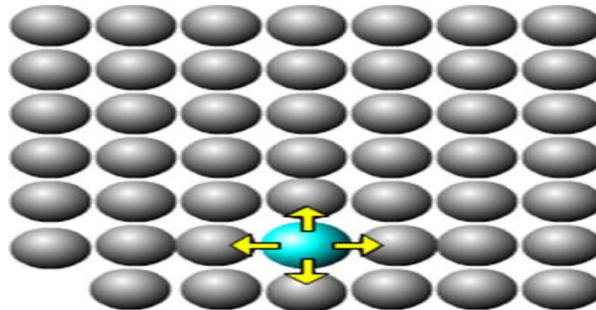
##### ***II.5.1) Durcissement par solution solide:***

Les atomes étrangers en solution solide qu'ils soient en position d'insertion ou en position de substitution, créent une dilatation ou une contraction locale dans le réseau cristallin du fait de sa taille différente de celle des atomes du solvant.

Ces distorsions induisent une force d'interaction entre les atomes d'alliage et les dislocations c.-à-d. il y a interaction entre le champ de contrainte de solution solide d'insertion ou de substitution et le champ associé aux dislocations, et la contrainte

requis pour en créer les dislocations augmente.

Dans le cas des solutés de substitution, et conformément aux calculs théoriques, le durcissement est d'autant plus fort que la différence de taille entre les atomes d'addition et les atomes de la matrice est plus grande.



**Figure II.1** .Représentation des déformations de compression qui s'impose à des atomes hôtes un atome d'impureté en substitution.

Avec des atomes en solution solide d'insertion (un petit atome s'insère entre les nœuds du réseau du métal de base); Puisque ces atomes diffusent facilement dans la matrice ils vont pouvoir se rassembler autour des dislocations, dans la zone de perturbation du réseau et constituer des « nuages » (dits de Cottrell) très efficaces pour freiner les dislocations en rendant plus difficile le début de leur mouvement (c.-à-d à la dislocation et devient très difficile de se déplacer).

L'effet des éléments en solution solide d'insertion sera, de ce fait, plus important que celui des éléments en solution solide de substitution. [30]

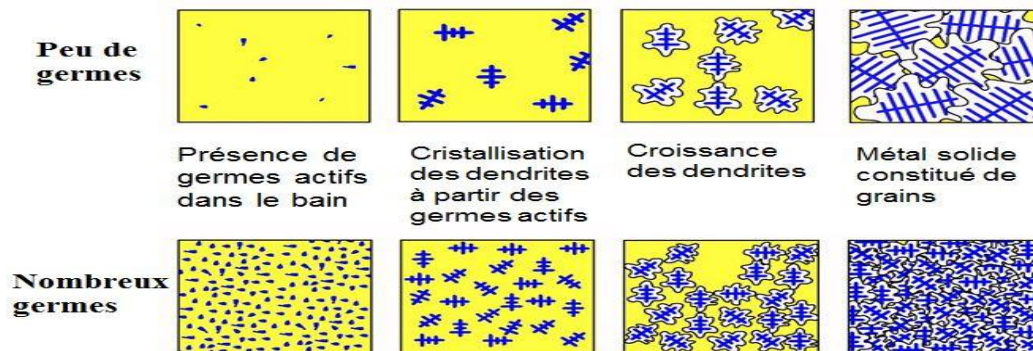
### ***II.5.2) durcissement par L'affinage du grain (réduction de la taille des grains) :***

L'affinage du grain consiste à réduire la taille des grains. Dans le cas des alliages d'aluminium, l'affinage chimique (avec emploi d'agents d'affinage) est de loin le plus efficace en comparaison avec l'affinage naturel par la vitesse de solidification ou l'affinage par voie mécanique.

#### ***a) Le principe de l'affinage:***

L'affinage du grain au moyen d'agents d'affinage s'est développé depuis les années 1950. Il consiste à introduire des produits chimiques qui favorisent la germination de l'aluminium par deux mécanismes : la germination hétérogène et la restriction de croissance. L'agent d'affinage le plus utilisé est le titane-bore (Ti+B). Il est introduit soit sous forme de flux soit, et c'est le cas le plus fréquent, comme alliage-

mère ou sous forme de fil. Généralement, la taille des particules d'affinage (TiB<sub>2</sub>) est comprise entre 2 et 10 µm. Au-delà, les particules ont un effet néfaste notamment sur la ductilité. Aujourd'hui, les fournisseurs proposent des alliages Pré-affinés et les fondeurs n'ajoutent, si nécessaire, qu'une faible quantité d'agent d'affinage.



**Figure II.2.** L'affinage du grain des alliages d'aluminium.

L'agent d'affinage est introduit afin d'obtenir une teneur en Ti comprise entre 0,10% et 0,25% selon l'alliage. L'efficacité des agents d'affinage dépend de leur nature (flux, alliage-mère, fil, etc) et du ratio Ti/B. D'autres agents d'affinage ont été étudiés, tels que les Ti+C, Ti+N ou même le bullage d'un gaz inerte. Mais le Ti+B reste le plus efficace et le plus utilisé. Plus récemment, des agents d'affinage nanométriques ont été développés. Ces agents d'affinage permettent de réduire de moitié environ la quantité d'agents à utiliser.

### **b) Influence de l'affinage sur les propriétés mécaniques:**

L'influence de l'affinage du grain sur les propriétés mécaniques a fait l'objet de nombreuses discussions et controverses mais il semble que l'affinage du grain n'a pas d'effet direct sur les propriétés mécaniques. La dégradation des propriétés mécaniques dont il est question parfois, est probablement due à l'influence de l'affinage du grain sur la porosité. En effet, dans les alliages affinés, les porosités sont plus fines et dispersées et donc nuisent moins aux propriétés mécaniques. L'affinage du grain réduit la dispersion des propriétés mécaniques des alliages présentant une forte tendance à la crique.

**c) L'affinage du grain, un moyen de traitement important des alliages d'aluminium:**

Même si l'affinage du grain n'influence pas directement les propriétés mécaniques, il demeure un moyen important pour traiter les alliages d'aluminium. En effet, il garantit des pores de petite taille, un contrôle radiographique plus facile, un meilleur comportement à l'alimentation des pièces et enfin une meilleure résistance à la crique. [31]

**II.5.3) Durcissement par écrouissage:**

L'écrouissage est également appelé écrouissage ou travail à froid. Il s'agit d'une méthode de renforcement souvent utilisée dans les matériaux dont la résistance ne peut être augmentée par un traitement thermique, par exemple par des changements dans leur composition de phase.

L'endurcissement au travail peut être souhaitable, indésirable ou sans conséquence, selon le contexte. C'est ce qu'on appelle le travail à froid car la déformation plastique doit se produire à une température suffisamment basse pour que les atomes ne puissent pas se réorganiser ; La façon la plus simple de travailler à froid consiste à battre une pièce de métal chauffée au rouge sur une enclume.

Le travail à froid est un processus qui consiste à rendre un métal plus dur et plus résistant par déformation plastique. Lorsqu'un métal est déformé plastiquement, les dislocations mouvement et des dislocations supplémentaires sont générées.

Les dislocations peuvent se déplacer si les atomes de l'un des plans environnants rompent leurs liaisons et se recollent avec les atomes au bord de terminaison.

La densité de dislocations dans un métal augmente avec la déformation ou le travail à froid en raison de la multiplication des dislocations ou de la formation de nouvelles dislocations. Plus il y a de dislocations dans un matériau, plus elles interagissent et s'épinglent ou s'emmêlent.

Il en résultera une diminution de la mobilité des luxations et un renforcement du matériau. Le travail à froid consiste à réduire l'épaisseur d'un matériau, Les tôles et tôles d'épaisseurs différentes sont produites par laminage à froid.

Les fils et les tubes de différents diamètres et épaisseurs de paroi sont produits par étirage. Tous les alliages d'aluminium peuvent être renforcés par travail à froid.

Les alliages qui ne se prêtent pas au traitement thermique, y compris l'acier à faible teneur en carbone, sont souvent écrouis. Certains matériaux ne peuvent pas être écrouis à basse température, comme l'indium, mais d'autres ne peuvent être renforcés que par écrouissage, comme le cuivre pur et l'aluminium.

L'écrouissage est l'une des étapes de la courbe contrainte-déformation est la région d'écrouissage. Cette région commence lorsque la déformation dépasse la limite d'élasticité et se termine au point de résistance ultime, qui est la contrainte maximale indiquée sur la courbe contrainte-déformation. Dans cette région, la contrainte augmente principalement à mesure que le matériau s'allonge, sauf qu'il y a une région presque plate au début. [32]

#### ***II.5.4) Durcissement structurale (durcissement par précipitation):***

##### ***II.5.4.1) Définition de la précipitation:***

Durcissement par précipitation, également appelé durcissement par vieillissement ou durcissement des particules, est une technique de traitement thermique basée sur la formation de particules extrêmement petites et uniformément dispersées (précipités) d'une seconde phase dans la matrice de phase d'origine pour améliorer la résistance et la dureté de certains alliages métalliques. Les particules de deuxième phase présentent un autre type d'obstacles au mouvement des dislocations, bien que les particules ne soient pas nécessairement des atomes uniques. La présence d'une particule de deuxième phase représente une distorsion dans le réseau matriciel. Par conséquent, les obstacles qui entravent le mouvement de dislocation sont soit le champ de contrainte autour des particules de seconde phase, soit les particules de seconde phase elles-mêmes, soit les deux. Le durcissement par précipitation est utilisé pour augmenter la limite d'élasticité des matériaux malléables, y compris la plupart des alliages structuraux d'aluminium, de magnésium, de nickel, de titane et de certains aciers et aciers inoxydables. Dans les superalliages, il est connu de provoquer une anomalie de la limite d'élasticité offrant une excellente résistance à haute température [33]

##### ***II. 5.4.2) Principe de durcissement par précipitation:***

Le traitement de précipitation consiste à faire subir à l'alliage trois traitements successifs. On pratique en premier lieu un traitement de mise en solution qui a pour objectif de mettre en solution le maximum d'éléments d'alliage à la température considérée pour le traitement. Ensuite, on réalise une trempe généralement à l'eau qui permet de conserver à température ambiante, une solution solide sursaturée. Enfin, on

complète le traitement par un vieillissement à une température assez basse (160°C – 200°C) qui a pour objectif la formation contrôlée de précipités de taille submicronique. Ces précipités vont constituer des obstacles au mouvement des dislocations et ainsi durcir le matériau. En fonction de la température et de la durée du traitement, les précipités vont prendre différentes formes métastables pour aboutir finalement à une forme stable. [34]

#### ***II.5.4.3) Traitements thermiques des alliages d'aluminium:***

L'aluminium et les alliages d'aluminium couvrent un domaine étendu de caractéristiques mécaniques. Certaine gamme est obtenue non seulement en agissant sur la composition des alliages, mais aussi et pour une partie très importante, en effectuant des traitements thermiques qui permettent soit :

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

Dans la métallurgie, on a tendance de définir des traitements thermiques spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage déterminé. [35]

#### ***II.5.4.4) Principaux types de traitements thermiques:***

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

- les traitements dits d'homogénéisation généralement pratiqués sur les produits coulés avant leur transformation ou également sur les produits déjà corroyés;
- les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation ; Ces traitements ont pour but principal d'améliorer ou de régénérer la plasticité d'un alliage donné.
- les traitements de trempe structurale comprenant :
  - Une mise en solution;

- Une trempe;
- Une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement.

**a) Les traitements d'adoucissement:**

Les traitements d'adoucissement 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 les traitements de restauration ou des recuits de recristallisation.

- Le traitement de restauration est effectué à 200-300 °C pendant de 1 à 8 heures;
- Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400 °C pendant de 30mn à 3 heures. [36]

**b) Les traitements d'homogénéisation:**

Les traitements dits d'homogénéisation consistent à maintenir à une température assez élevée (le plus souvent entre 450 et 610 C) et pendant des temps prolongés (en général durant 6 à 48 h) les plaques ou billettes coulées, afin de faciliter leur transformation ou d'améliorer les propriétés des produits obtenus.

Ces traitements ont pris depuis ces dernières années une ampleur considérable, si bien qu'à l'heure actuelle ils sont extrêmement répandus et tendent à se généraliser non seulement dans le cas des alliages d'aluminium mais également dans le cas de l'aluminium non allié. [37]

**c) Traitement de durcissement structural :**

Le durcissement structural se réalise à l'aide de trois traitements thermiques, ou on peut dire que pour déclencher une réaction de précipitation il faut effectuer les trois étapes suivantes :

- une mise en solution pendant un temps de maintien à une température d'environ 540°C ;
- une trempe à l'eau avec une température de bain d'environ 60°C ;
- un revenu entre 100- 200°C pendant un temps de maintien.
- un refroidissement à l'air ambiant.

II.5.4.5) Les étapes de traitement thermique:

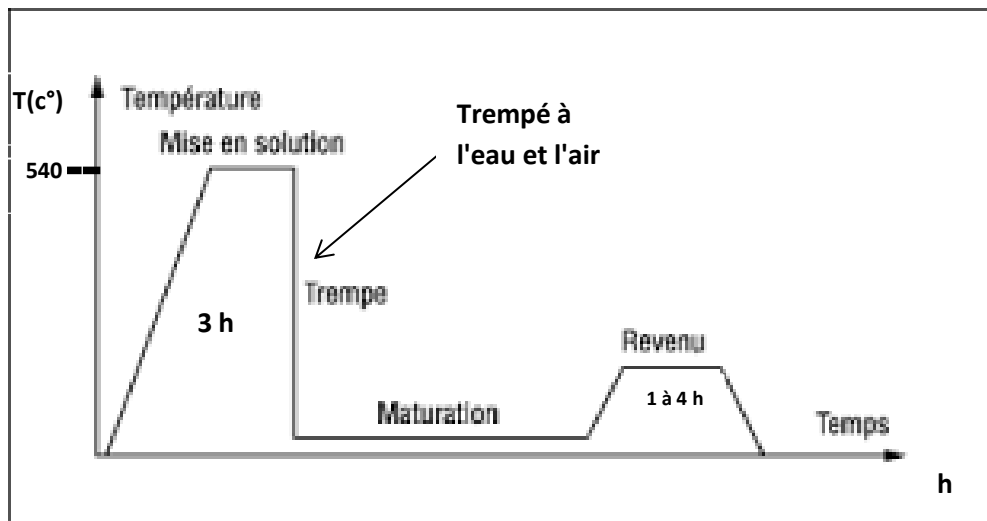


Figure II.3. Les étapes de traitement thermique en durcissement structural de l'alliage 7075t6.

a) Mise en solution:

Durant la première étape, lorsque l'alliage est chauffé suffisamment longtemps à une température aussi proche que possible de la température de fusion, les différentes phases métalliques en excès sont dissoutes. Le but est d'obtenir la solution solide la plus homogène possible. Ainsi, la température doit être suffisamment élevée pour que les précipités de l'alliage puissent entrer en solution solide sans que la température de fusion de l'alliage, qui induit la formation d'une phase liquide à l'origine de porosités et d'oxydations internes, soit atteinte à l'inverse une température trop faible ne permettra pas aux précipités présents d'entrer en solution et les caractéristiques mécaniques ne seront alors pas au final, optimales.

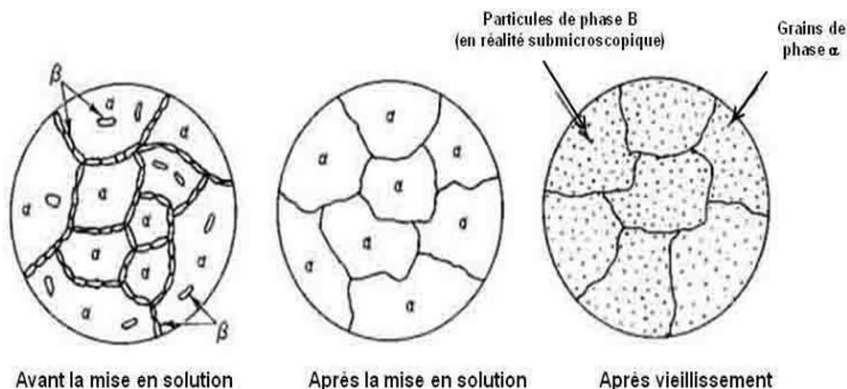


Figure II.4. La mise en solution.

b) La trempe:

La trempe fige ensuite la microstructure dans un état métastable donne.

Le refroidissement violent à la température ambiante de l'alliage permet de maintenir désormais en état de sursaturation la solution solide existante.

La trempe a pour fonction de figer la microstructure de l'état homogène mis en solution lors du retour de l'alliage à la température ambiante.

En effet lors d'un refroidissement suffisamment lent pour lequel l'équilibre thermodynamique est vérifié à tout instant, il ya séparation de l'alliage en deux phases distinctes  $\alpha$  et  $\beta$  (Figure II.5).

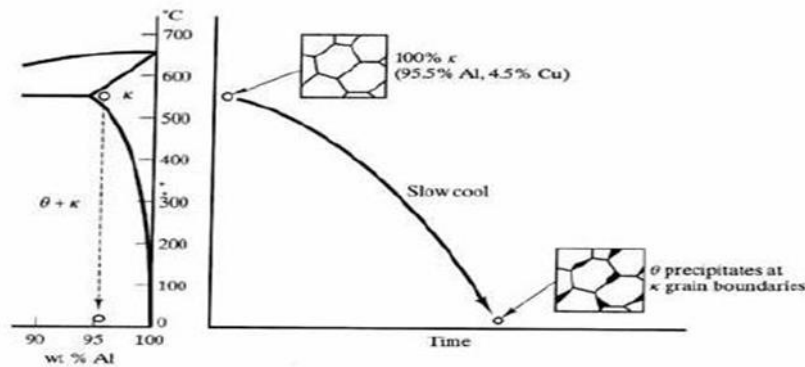


Figure II.5. Evolutions métallurgiques lors du refroidissement lent d'un alliage Al - Cu ( $\kappa$  remplaçant  $\alpha$  et  $\theta$  se substituant à  $\beta$ ).

A l'opposé, si le refroidissement est violent et que l'équilibre ne peut pas s'établir la solution solide  $\alpha$  obtenue lors de l'étape de mise en solution va être maintenue à l'ambiante en état de sursaturation (Figure II.6).

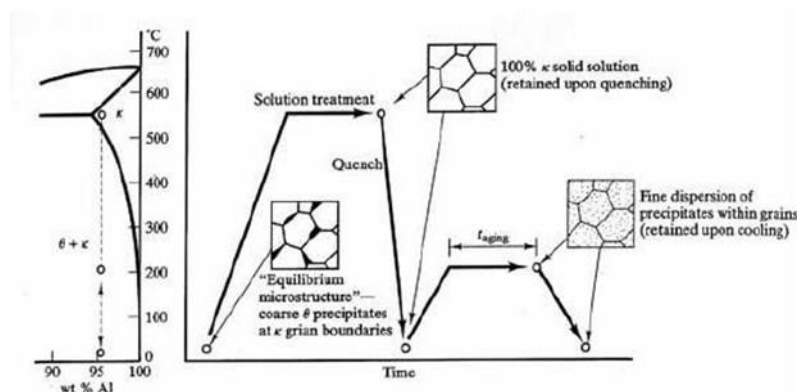


Figure II.6. Non- évolution métallurgique lors de l'étape de trempe d'un alliage Al - Cu ( $\kappa$  remplaçant  $\alpha$  et  $\theta$  se substituant à  $\beta$ ).

Une vitesse minimale de trempe, appelée vitesse critique, est donc à respecter si l'on veut obtenir à la température ambiante, l'état homogène  $\alpha$ .

On obtient une solution solide sursaturée en soluté Cu et en lacunes où les atomes de soluté sont positionnés de manière aléatoire aux nœuds du réseau cubique à faces centrées de l'aluminium (figure II.7) et forment une solution solide de substitution.

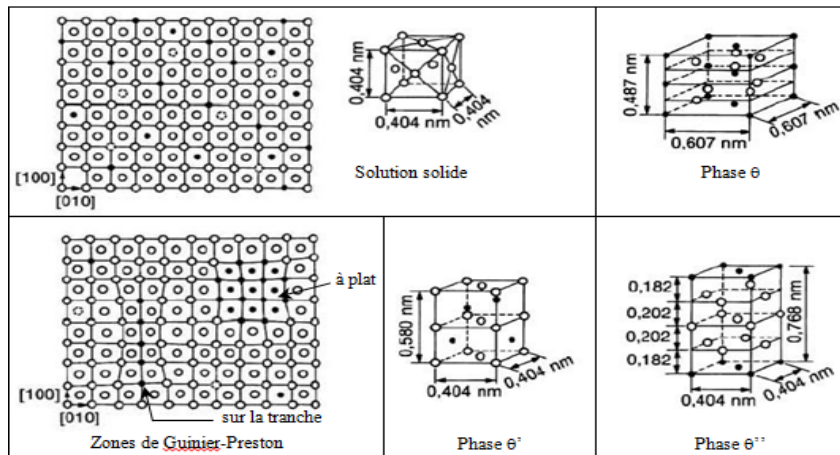


Figure II.7. On obtient une solution solide sursaturée.

**c) le revenu:**

Le revenu permet enfin d'améliorer les caractéristiques mécaniques par formation d'une multitude de petits précipités très fins à l'origine du durcissement structural. Ceux-ci sont le résultat de la décomposition de la solution solide sursaturée de fin de trempe. C'est la présence de ces Petits précipités qui s'opposent aux mouvements des dislocations, contrairement à de plus gros pour lesquels il y a contournement, qui est à l'origine de l'amélioration des propriétés mécaniques. [30]

## **Chapitre III:**

### **Techniques expérimentale**



Dans l'industrie de la mise en forme, comme celle de l'extrusion de l'aluminium, le traitement thermique joue un rôle très important, cependant qu'un mauvais traitement augmente d'une manière significative le coût de production du profilé extrudé, le retraitement engendre une perte énergétique et temporelle.

L'objet de ce travail est l'étude de l'effet de traitement thermique et le refroidissement (trempe) sur propriétés mécaniques et la microstructure de l'alliage d'aluminium 7075. Dans ce travail on a étudié seulement la propriété mécanique de dureté et traction, afin de réaliser cette dernière, nous avons conçu sept échantillons pour chaque type de traitement. Ces échantillons ont subi différents traitements thermiques et ils ont été testés sur un testeur de micro dureté nommé (testeur de micro dureté pour alliage d'aluminium.)

Ce chapitre décrit les différents traitements thermiques réalisés au cours de notre travail de mémoire de fin d'étude, préalablement, en commence par une brève présentation sur le matériau étudié et ses compositions chimiques, puis nous citons les différents traitements thermiques suivis. Ensuite, afin de réaliser une étude microscopique, on a fait des traitements de surface par polissage sur tout d'éprouvettes on a également décrit les techniques d'analyse utilisée pour la caractérisation d'échantillons tels que le microscope optique et leurs essais mécaniques de dureté et traction.

### **III.1) Présentation du matériau à étudier:**

Notre matériau d'étude est un alliage commercial d'aluminium 7075 t6 (ALZn5, 5MgCu(AZ5GU)) de haute résistance, délivré par CRTI (Centre de Recherche en Technologie Industriel- Cheraga- Alger) sous forme de tôles d'épaisseur 4mm et de surface 170\*110 mm<sup>2</sup>, ayant la composition chimique suivante:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	autre	Al
0.4	0.5	1.2-2	0.30	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.2	0.2	Reste

**Tableau III.1.** Composition chimique de l'alliage 7075 t6 (w. %)

**III.2) Propriétés mécaniques et physiques :**

Le tableau suivant montre les propriétés mécaniques et physiques de l'alliage d'aluminium 7075t6:

<b>Désignation</b>	<b>Matériau : 7075t6</b>
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2,80
Intervalle de fusion	630-475
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (°C <sup>-1</sup> ,106)	23,5
Module d'élasticité (MPa) (1)	72000
Coefficient de Poisson	0,33
Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C)	État T6 : 130
Résistivité à 20°C (μΩcm)	État T6 : 5.2
Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C)	915
Limité élastique RP0.2 (MPa)	470
Limité à la rupture Rm (MPa)	535
Allongement (%)	8
Limité élastique RP0.2 (MPa)	390
Limité à la rupture Rm (MPa)	475
Allongement (%)	7

**Tableau III.2.** Les propriétés mécaniques et physiques des 7075t6

- Cette Image représenté la tôle de l'alliage 7075t6 délivré par CRTI (Centre de Recherche en Technologie Industriel- Cheraga- Alger), sous forme de tôles d'épaisseur 4 mm et de surface 170\* 110 mm<sup>2</sup>.

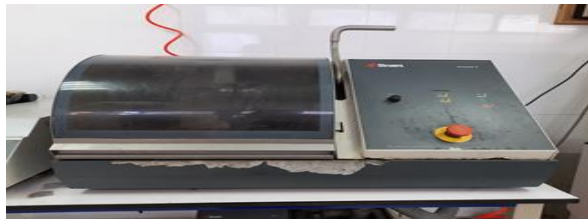


**Figure III.1.**La tôle de l'alliage 7075t6

### **III.3) Découpage des pièces:**

Le découpage a été automatiquement fait à l'aide d'une tronçonneuse à métaux

(Figure 2) dans laboratoire avec une vitesse lente et sous une coulée d'eau pour le refroidissement.



**Figure III. 2.** Appareille découpée les tôles

- Cette tôle a été découpée en 7 échantillons de 20\*20 mm<sup>2</sup>.

- Nous avons laissé un échantillon d'alliage d'aluminium 7075 t6 et ne l'avons pas traité pour être une référence pour nous de comparer les résultats obtenus plus tard.



**Figure III. 3.**Les chantillons de l'alliage 7075t6

**III.4) Traitement thermique de l'alliage 7075 T6:**

L'alliage 7075-T6 est un alliage d'aluminium très résistant utilisé dans de nombreuses applications aérospatiales et industrielles. Le traitement thermique de cet alliage permet d'améliorer ses propriétés mécaniques. Voici les étapes typiques du traitement thermique de l'alliage 7075-T6:

**a) Mise en solution :** les 6 échantillons ont été chauffés à une température d'environ 540 °C pendant 3 heures dans le four en laboratoire de CRTI (figure III.4 ). Afin de dissoudre les précipités de phases intermétalliques présents dans la structure de l'alliage. Cette étape permet de rendre l'alliage plus malléable et facilite la mise en forme.



**Figure III.4.** Four utilisé pour la mise en solution

**b) Trempe (Refroidissement):**

-Après la phase de mise en solution, nous avons refroidi 5 échantillons dans l'eau et un échantillon à l'air. Ce processus de refroidissement est appelé trempe et permet de figer la structure de l'alliage dans un état métastable.

-Nous avons laissé l'échantillon refroidi à l'air et un échantillon refroidi à l'eau dans le but d'étudier l'effet du milieu de refroidissement sur les propriétés mécaniques.



**Figure III. 5.** L'échantillons après trempe

c) **Le revenu (Vieillessement artificiel)** : Une fois refroidi, l’alliage passe par une phase de vieillissement artificiel. Nous avons mis 4 échantillons refroidis à l’eau dans le four à une température inférieure à la température de la solution, environ 180 ° C, pendant 4 heures. Chaque heure, nous prélevons un échantillon. Cette étape favorise la formation de dépôts de phase parmi les métaux désirés, tels que la phase de renforcement de l’alliage. Les dépôts améliorent les propriétés mécaniques de l’alliage, y compris sa résistance et sa ténacité.



**Figure III. 6.** Les 4 Échantillons après revenu.

-Le tableau suivant présente Nomenclature et les différents traitements des pièces d’alliage d’aluminium 7075-T6 réalisées.

Echantillons	Température De Traitement (540°C)	Temps de maintien (h)	Refroidissement (à l'air et à l'eau)	Revenu (180°C)	Temps de revenu(h)
Ech:1(non traité) Reference	-	-	-	-	-
Ech:2	Oui	3h	l'air	Non	-
Ech:3	Oui	3h	l'eau	Non	-
Ech:4	Oui	3h	l'eau	Oui	1h
Ech:5	Oui	3h	l'eau	Oui	2h
Ech:6	Oui	3h	l'eau	Oui	3h
Ech:7	Oui	3h	l'eau	Oui	4h

**Tableau III. 3.** Nomenclature et les différents traitements des pièces d’alliage d’aluminium 7075-T6 réalisées.

**III.5) Enrobage à froid:**

L'objectif de l'enrobage est de protéger les matériaux fragiles ou revêtus au cours de leur préparation et d'obtenir une netteté des bords parfaite. L'enrobage permet également de manipuler plus soigneusement et facilement les échantillons petits, à bords vifs ou de forme irrégulière.

-Cette image montre les échantillons après leur enrobage à froid.



**Figure III. 7.** Les échantillons après l'enrobage

**III.6) 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:

**a) Pré-polissage:**

Polissage grossier ou abrasion cette opération consiste à obtenir la planéité de la surface d'examen de l'échantillon. On commence le polissage par le papier abrasif de grande granulométrie pour enlever le maximum de matière, puis on dégrade la granulométrie de plus en plus finement. Le refroidissement de la surface à polir est assuré par un lubrifiant (eau).

L'échantillon est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible taille de grain.

-Le tableau suivant présente les différents Paramètres de pré-polissage.

Ordre d'opération de polissage	Granulométrie utilise	Durée (min)	Vitesse de polissage (tr/min)
1	320	6	250
2	500	6	250
3	800	6	250
4	1000	6	250
5	1200	6	250
6	2400	6	250

**Tableau III.4.** Illustration des ordres d'usinage effectués

-Cette image représentée l'appareille utilisée dans le polissage.



**Figure III. 8.** Polisseuse utilisé

-Échantillon de l'alliage d'aluminium 7075t6 durant le processus Pré-polissage.



**Figure III.9.** Opération de Pré-polissage.

### ***b) Polissage de finition:***

Le polissage de finition permet d'obtenir une surface miroir. Cette opération consiste à utiliser un papier feutre arrosé à l'aide d'une suspension diamanté plus le lubrifiant à la fine avec l'alumine.

-Échantillon de l'alliage d'aluminium 7075t6 durant le processus polissage de finition.



**Figure III.10.**Opération de polissage de finition

Le Tableau IV.5 montre les Paramètres du polissage de finition.

Ordre d'opération de polissage	Granulométrie Utilise ( $\mu\text{m}$ )	Durée (min)	Vitesse de polissage (tr/min)
7	1	10	50

**TableauIII.5.** Paramètres du polissage de finition.

**III.7) Attaque métallographique:**

Le réactif utilisé dans l'attaque chimique dépend du domaine d'application, pour les alliages d'aluminium les réactif utilisés sont présentés dans le (Tableau 6):

Métaux	Réactif (solution Keller), (composition)	Durée De l'attaque	Effet
Alliage d'aluminium 7075t6	1ml ( HF) 1.5ml ( HCl) 2.5 ml (HNO <sub>3</sub> ) 95ml (H <sub>2</sub> O)	90 s	Microstructure

**Tableau III. 6.** Réactifs d'attaque chimique utilisée.

La Figure IV.11 représenté le réactif d'attaque chimique utilisé (solution Keller).



**Figure III.11.** Réactif d'attaque chimique utilisé (solution Keller).

**IV.8) Observation microscopique:**

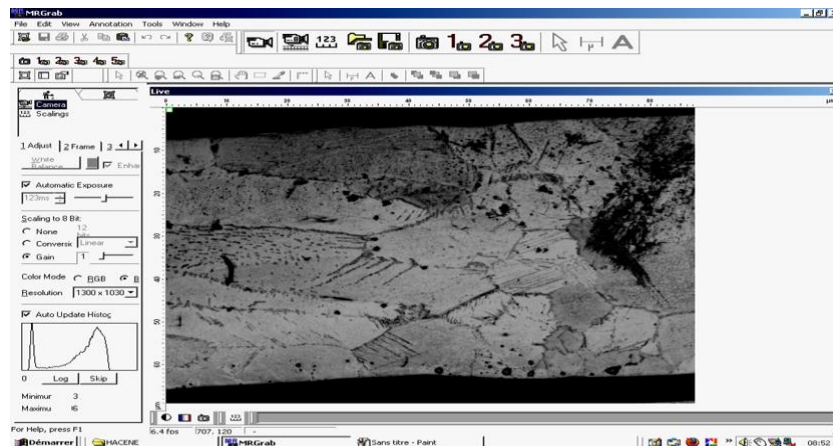
Comme son nom l'indique, le microscope est un instrument permettant l'observation visuelle de petits objets ou détails d'objets, usuellement indiscernables à l'œil nu. Une des propriétés de cet appareil est son agrandissement angulaire, c'est-à-dire la possibilité de fournir une image agrandie d'un objet à étudier. Cependant, ce paramètre ne suffit pas à lui seul à caractériser les performances du dispositif. Il faut en effet que cette propriété s'applique à tous les détails de l'objet, y compris les plus fins.

La seconde propriété du microscope est donc sa résolution, dont découlent d'importantes conséquences pratiques, puisque cela implique de travailler avec des optiques de grande ouverture numérique, mais limitée par la diffraction. Les bons microscopes sont donc des systèmes optiques et mécaniques complexes et coûteux.



**Figure III. 12.** Microscope optique.

La figure suivante illustre le programme utilisé pour l'analyse de micrographie de l'alliage 7075t6.



**Figure III.13.** Photographie de logiciel d'analyse d'image

**III.9) Caractérisation mécanique:****III.9.1) Essai de micro dureté:**

La micro dureté est l'une des propriétés mécaniques qui caractérisent les matériaux.

Elle exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique localisée. L'essai de micro dureté est réalisé à l'aide du micro- duromètre, le principe est de mesurer les diagonales des empreintes laissées par un cône, et avec une charge de 200g

La dureté Vickers s'exprime par la mesure de la moyenne des diagonales, à l'aide de la formule suivante:

$$HV = 1,8544 \cdot 103 \cdot F/d^2.$$

Tel que:

D ( $\mu\text{m}$ ) : La moyenne des diagonales;

F : La force appliquée en Kilo-Newton.

#### **a) Micro-duromètre utilisé:**

Le duromètre micro-Vickers ZHV $\mu$  couvre les essais de dureté Vickers et Knoop d'après ISO 6507, ISO 4545 et ASTM E384 dans la plage des forces d'essais de HV0,01 à HV2. Pour des applications plus larges ou automatisées, la variante commandée par PC du duromètre ZHV $\mu$  Micro-Vickers vous est proposée sous forme entièrement automatique avec un logiciel HD. [41]



**Figure III.14.**Micro duromètre utilisé.

#### **III. 9.2) Essais de traction:**

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à la rupture, la contrainte maximale, les limites d'élasticité, etc.....



Figure III.15. Machine utilisée pour la traction.

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette normalisée (figure III.16) à un effort de traction et généralement jusqu'à sa rupture. Sauf indications contraire, l'essai est réalisé à température ambiante .L'essai est réalisé sur une machine qui enregistre simultanément les efforts (F) et les allongements (L-Lo). [42]

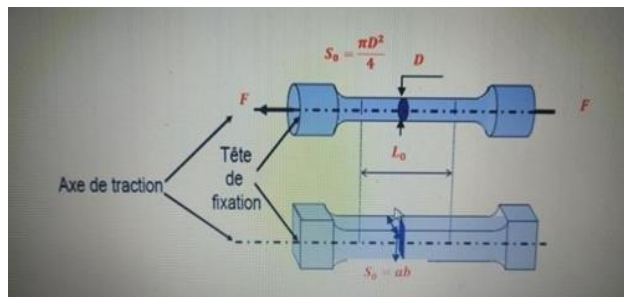


Figure III. 16. Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique.

Pour pouvoir présenter nos résultats, on utilise une courbe de traction conventionnelle appelée courbede Contrainte – Déformation.

L'exploitation de cette courbe nous permet de déterminer les paramètres caractéristiques relatifs à l'échantillon soumis à l'essai de traction. On reporte ci-dessous (Figure III.17) une illustration explicative.

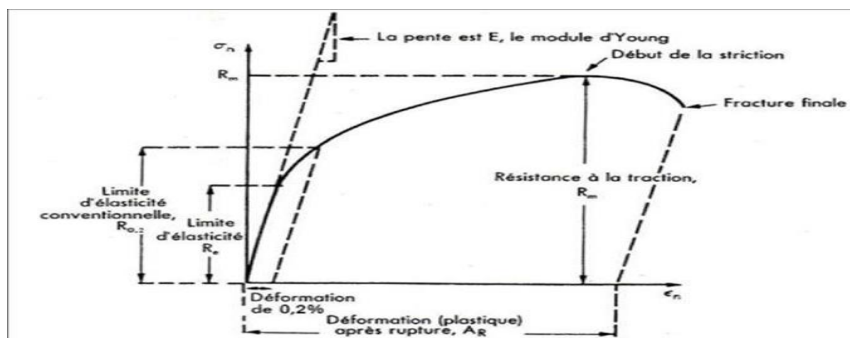


Figure III. 17. Courbe de traction conventionnelle et définition de quelques grandeurs classiques.

Comme le montre la figure 1, les courbes de traction présentent 3 domaines :

- **Domaine élastique** : c'est la partie linéaire de la courbe, allant du point de départ à la limite d'élasticité. Ce domaine est dit réversible parce que le matériau peut retrouver sa forme initiale après avoir été déformé. Sa déformation est faible. Les phénomènes mis en jeu sont des phénomènes élastiques uniquement.
- **Domaine plastique** : c'est la partie suivante de la courbe, allant de la limite d'élasticité au maximum global (correspondant à la résistance mécanique). Le début du domaine plastique caractérise le moment à partir duquel la déformation n'est plus réversible. La déformation du matériau est plus importante que dans le domaine élastique. Mais la contrainte augmente moins que dans le domaine élastique, car l'allongement ne se fait pas en étirant les liaisons mais en introduisant des dislocations, ce qui demande moins de force. Dans ce domaine il y a une consolidation ou durcissement : des dislocations sont créées et accumulées, augmentant la limite d'élasticité du matériau. L'échantillon peut se déformer : il s'allonge et sa section diminue, mais il n'est pas endommagé ou fragilisé.
- **Domaine d'endommagement** : c'est la dernière partie de la courbe, allant du maximum au point de rupture du matériau. Dans ce domaine, des dommages physiques.[43]

# **Chapitre IV:**

## **modélisation numérique**



L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle ; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs.

La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique. Ainsi elle simule et améliore les performances.

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...). Et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O. se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation (crash test).

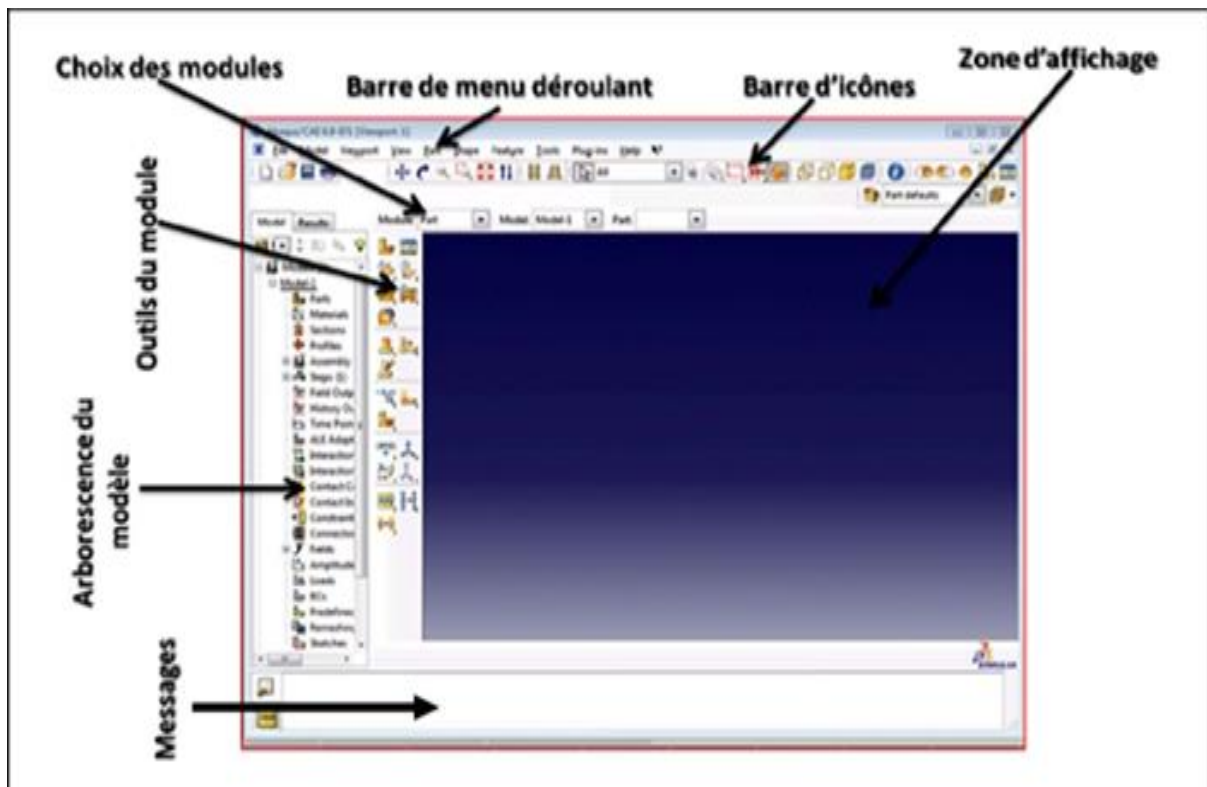
D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle. [38]

#### ***IV.1) Définition d'ABAQUS:***

**ABAQUS** est un logiciel de calcul en éléments finis développé par DASSAULT. Il est composé de trois produits qui sont : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour analyse par éléments fini, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

**IV.2) Description des possibilités d'ABAQUS :**

ABAQUS est un solveur (Standard, Explicit, Implicit, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier (entrée) ou fichier de données d'extension (inp) et qui écrit la solution dans un fichier (de sortie) ou fichier de résultats d'extension (odb) .



**Figure IV.1.** Organisation d'abaqus.

ABAQUS couvre presque tous les domaines de la physique et tous les types de problèmes:

**-Domaines physiques:** Mécanique, Thermique, Electrique (piézo et thermique), Problèmes couplés.

**-Problèmes :** Statique et dynamique, Linéaires et non linéaires.

ABAQUS offre un très large choix d'éléments (plus de 100) avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard) (Figure.IV.2).

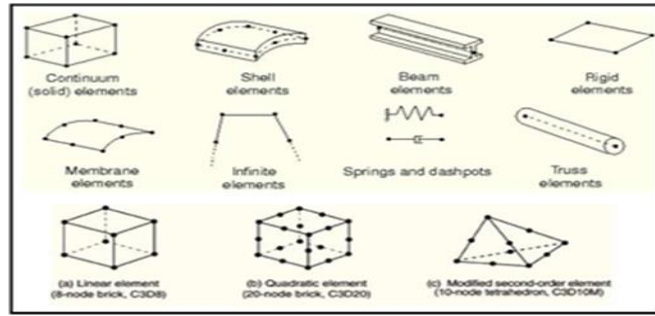


Figure.IV.2. Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'Abaqus.

**-Les unités:**

Avant de commencer de définir n'importe quel modèle sous ABAQUS, on doit décider quel système d'unités on emploie. ABAQUS n'a aucun système d'unités intégré. Toutes les données doivent être spécifiées dans un système d'unités conforme. [39]

<b>Longueur</b>	Mètres	mm
<b>Force</b>	Newton	Newton
<b>Pression/contrainte</b>	Pascal	MPa
<b>Densité</b>	Kg/m <sup>3</sup>	Tonnes/mm <sup>3</sup>
<b>Masse</b>	Kg	Tonnes
<b>température</b>	Kelvin	Kelvin

Tableau IV.1. Les unités utilisées en ABAQUS.

**IV.3) Pourquoi utiliser la simulation numérique dans le milieu de l'ingénierie mécanique?**

Tout d'abord, définissons la simulation numérique. Il s'agit d'une représentation de phénomènes physiques complexes. C'est donc un moyen de simuler le comportement d'un produit dans son environnement final, tout cela de manière virtuelle

La simulation numérique permet donc de répondre à de multiples enjeux industriels.

Tels que:

- L'anticipation des écueils de conception;
- La réduction des prototypes (et donc des coûts);
- L'accroissement de l'innovation.

Pour que la simulation numérique soit effective et qu'elle puisse prédire convenablement le comportement des conceptions d'un bureau d'étude, la simulation doit être la plus réaliste possible. La simulation numérique devient alors une sorte de prototype à part entière.

Rendre une simulation réaliste est une tâche difficile tant le monde réel est complexe et jonché de variables parfois imprévisibles. Ce dernier est, en effet, non-linéaire et multi-physique, ce qui rend la conception d'un logiciel de simulation numérique extrêmement ardue. [40]

#### **IV.4 ) Simulation numérique:**

Nous proposons dans cette étude l'analyse numérique de l'effet des milieux de refroidissement sur la distribution de température et de contrainte en fonction de temps de refroidissement durant la trempe d'un alliage d'aluminium 7075t6 .

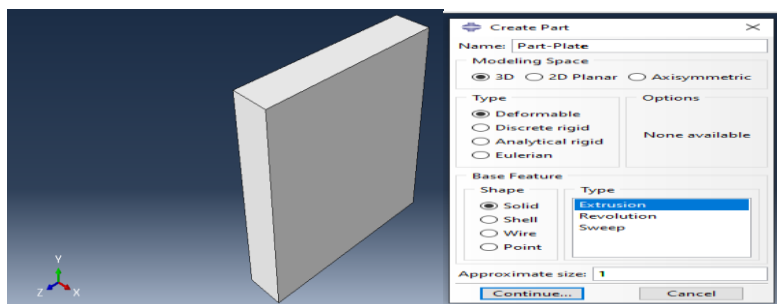
La plaque de l'alliage 7075t6 a été chauffée à 540 ° C en un temps de chauffage de 3 h. . Après cela, il a été immergé dans un fluide à une température de 30 °C jusqu'à ce qu'il soit refroidi à une température uniforme. Deux milieux de trempe ont été adoptés dans ce travail: l'air et l'eau.

##### **IV.4.1)Réalisation du modèle sous ABAQUS:**

-La plaque est modélisée sous ABAQUS .

##### **a)Module PART:**

-Dans l'arbre du modèle cliquer deux fois sur **Parts**, Dans la boîte de dialogue **Create Part** ,Nommer la pièce **Plate**, Sélectionner **3D/Déformable /Solid/Extrusion**, Mettre **Approximate size** : mettre 1et Cliquer **Continue**. Créer un rectangle de **0.02 x 0.004 mm<sup>2</sup>**.(Fig IV.3).



**Figure IV.3.** création de la géométrie de la plaque.

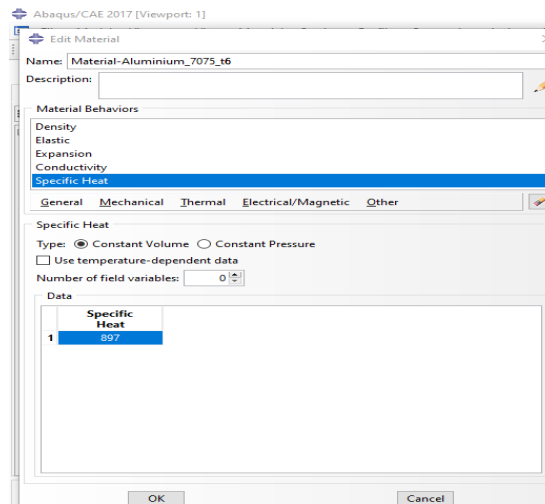
**b) Module PROPRETY :**

-Définition du matériau : **Aluminium 7075t6.**

-on définit les caractéristiques thermiques et mécaniques du matériau. La plaque est supposée fabriquée en matériau de conductivité thermique suivant :

<b>Aluminium specific heat c</b>	<b>897 J/Kg.K</b>
<b>Thermal conductivity K</b>	<b>247 W/mk</b>
<b>Aluminium expansion coefficient <math>\alpha</math></b>	<b><math>23 \times 10^{-6} 1/K=2.3 E^{-5} 1/K</math></b>
<b>Young's modulus E</b>	<b>70000 MPa</b>
<b>Poisson's ratio <math>\nu</math></b>	<b>0.33</b>
<b>density</b>	<b>2710 Kg/m<sup>3</sup></b>

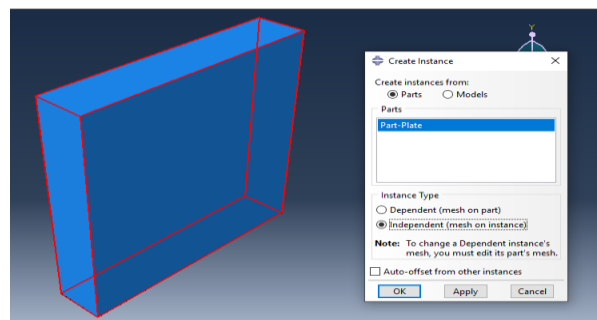
**Tableau IV.2.** les propriétés thermiques et mécaniques de l'alliage 7075t6



**Figure IV.4.** Les propriétés thermiques de l'alliage d'aluminium7075t6.

**c)Module ASSEMBLY :**

- Dans l'arbre modèle développer la base Assembly , Double clique sur **Instances** dans la liste qui apparait , Dans la boite de dialogue **Create Instance** sélectionner **independent( mesh on instance)** et cliquer OK (Fig.IV.5)



**Figure IV.5.**Pièce 3D de l'alliage 7075t6.

**d) Module STEP - Creation du pas d'analyse:**

- On crée un pas d'analyse qui suit le pas initial de l'analyse. (**Step heating et Step cooling**). ajouter conditions des limites de :

-Step heating (15s);

-Step cooling [ L'eau 190 (s), l'air 5400 (s)].

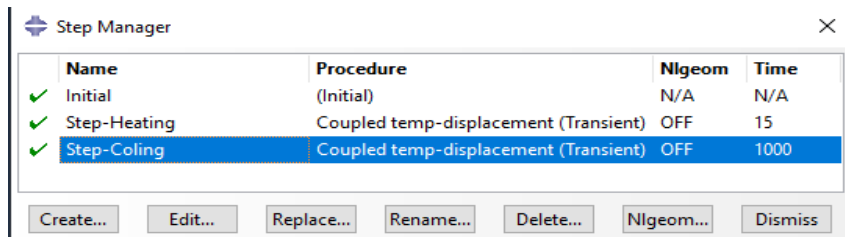


Figure IV.6. Création du pas d'analyse.

**e) Module Interaction-LOAD:**

Pour appliquer les conditions aux frontières : le champ de la température imposée et le refroidissement:

- Dans l'arbre modèle choisir **Interaction**, double cliquer sur l'icône (**creat Interaction**).. puis choisir (**Step-Cooling**) et (**Service film condition**), Dans le Viewport, sélectionner la face à encastrée et cliquer sur Done, La boîte de dialogue **Edit Interaction** s'affiche, puis saisir les données suivantes :

-Film coefficient ( L'eau :400 W/m<sup>2</sup> .K );(L'air 15 W/m<sup>2</sup> .K ).

-Sink temperature (30°).

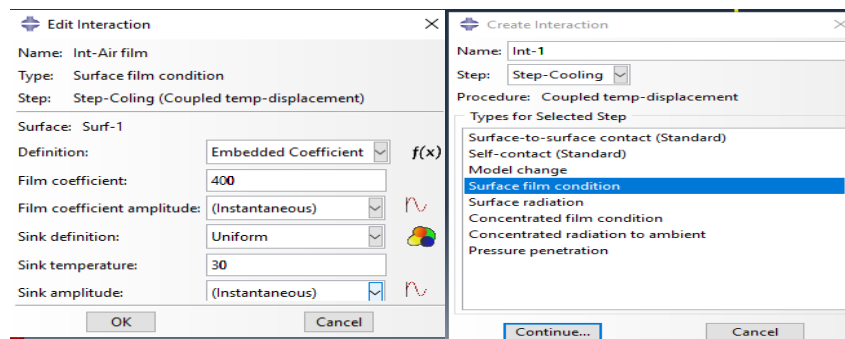
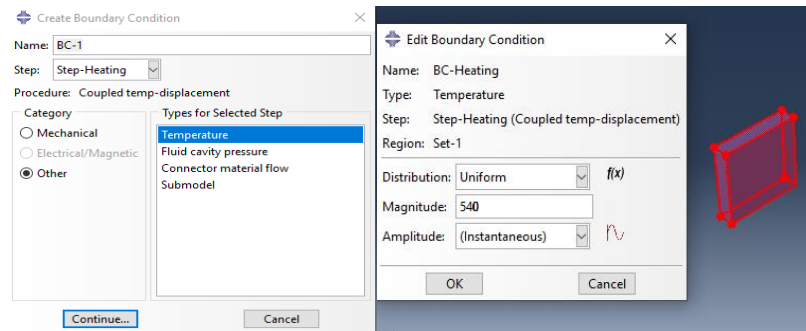


Figure IV.7.les conditions de l'interaction.

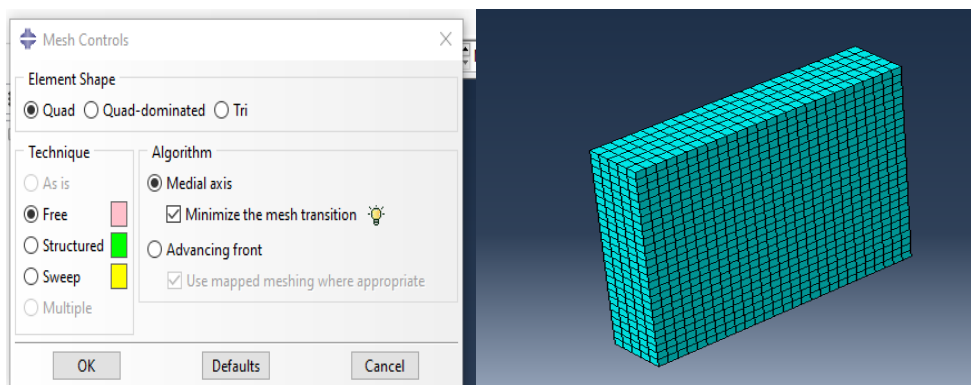
- Dans l'arbre modèle double cliquer sur la base **BCs** . ABAQUS/CAE passe au module **LOAD** et la boîte de dialogue **Create Boundary Condition** s'affiche. Dans la liste des pas Steps, sélectionner **Step Heating**. Dans la liste Category, accepter **Other** comme catégorie par défaut. Dans la liste Types for Selected Step, sélectionner **Temperature** et cliquer sur Continue. Dans le Viewport, sélectionner la face à encastrée et cliquer sur Done , La boîte de dialogue **Edit Boundary Condition** s'affiche , puis saisir la température (540°).



**Figure IV.8.** Les conductions de Boundary condition.

**f) Module MESH - Attribution du type d'élément:**

- La plaque est modélisée avec des éléments de type ;
- Dans le module **MESH** cliquer sur Mesh/Part;
- En utilise **number de mesh** egale 0.00075;
- En **mesh controls** choisir **Quad/Sweep-Medial axis** ; et cliquer sur OK.



**FigureIV.9.** Miallage de la piece.

j) Module JOB -Créer et soumettre le job:

-Double cliquez sur **Jobs** et créer un nouveau Job. Nommez ce fichier et cliquer sur Continue pour créer le job. L'Edit Job apparaît. Pour soumettre le travail, Cliquer sur **Submit**. Pour visualiser les résultats, cliquer sur Results pour accéder au module VISUALISATION.

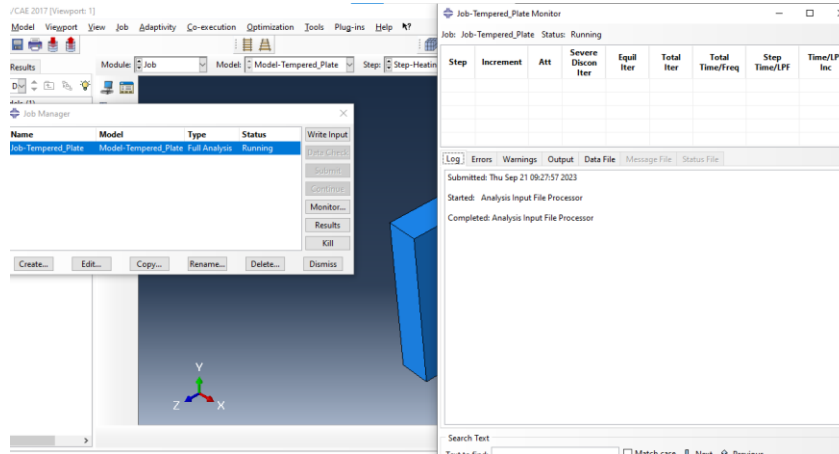


Figure IV.10. la Boite de job manager

IV.4.2) Résultats numériques -Simulation 1:

a) Nous choisissons deux points pour calculer la distribution de la température et de la contrainte en fonction de temps de trempe à l'eau sur la plaque comme illustré dans la figure suivant :

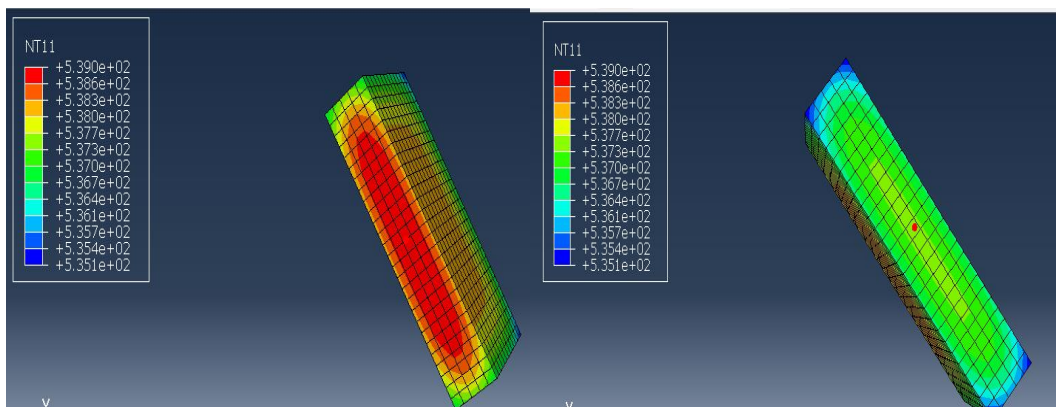
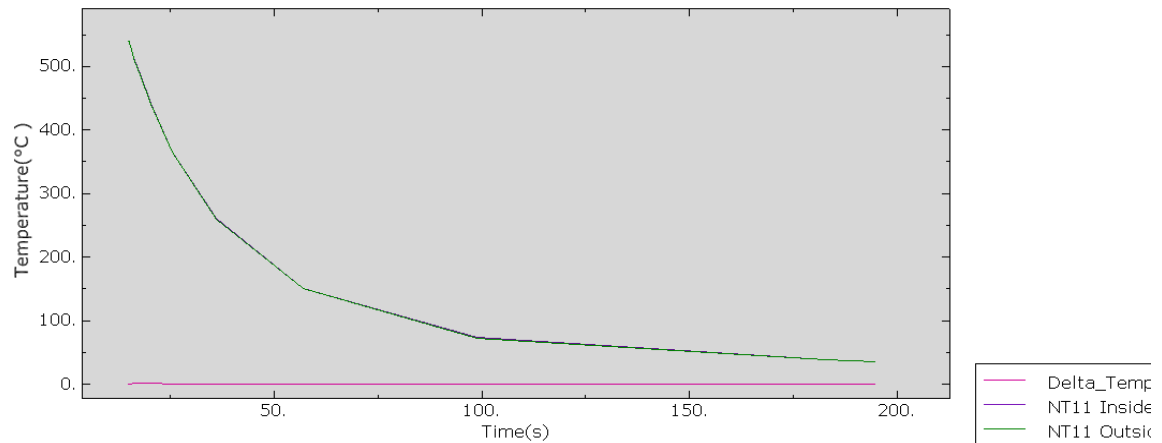
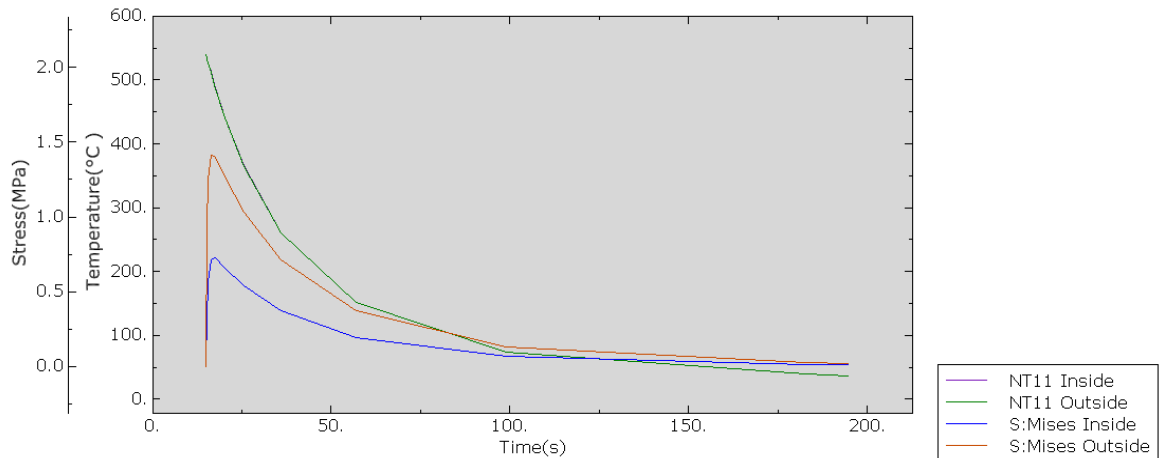


Figure IV.11. Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température.

- Les deux graphiques ( IV.13 Et IV.14 ) illustrent la distribution de la température et de la contraint sur la plaque immédiatement après son refroidissement à l'eau. On remarque que la température a chuté à 36° après 195 secondes. De plus, on observe également une différence de contraint entre le centre de la plaque et son côté, avec une valeur de contraint de 0,723 MPa au centre de la plaque et de 1,409 MPa sur le côté de la plaque.



**Figure IV.12.** la distribution de la température lors trempé à l'eau.



**Figure IV.13.** la distribution de la contrainte lors trempé à l'eau.

**b)** Cette fois, nous avons pris une mesure à partir du point médian (au centre de la plaque) et une autre à la surface de la plaque pour effectuer les mêmes calculs précédents, comme illustré dans la figure suivant:

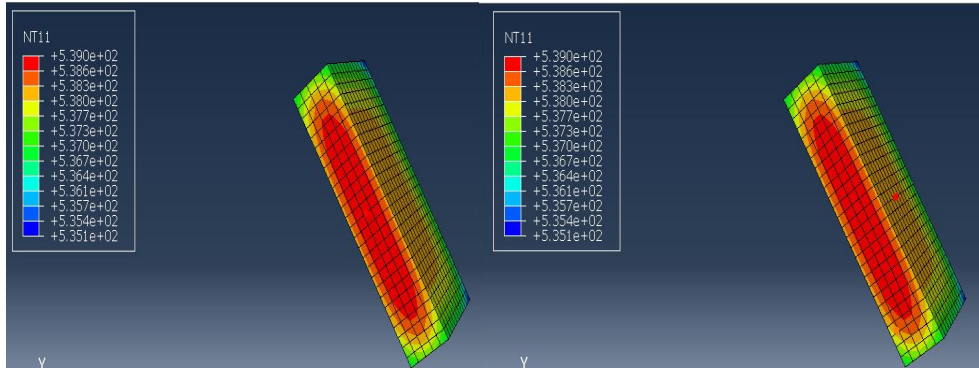


Figure IV.14. Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température.

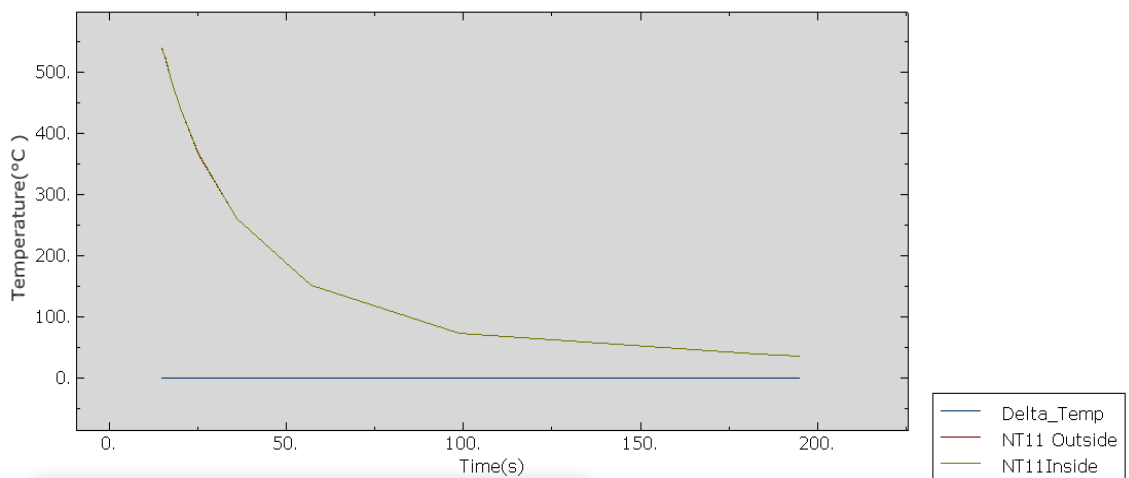


Figure IV.15. la distribution de la température lors trempe à l'eau.

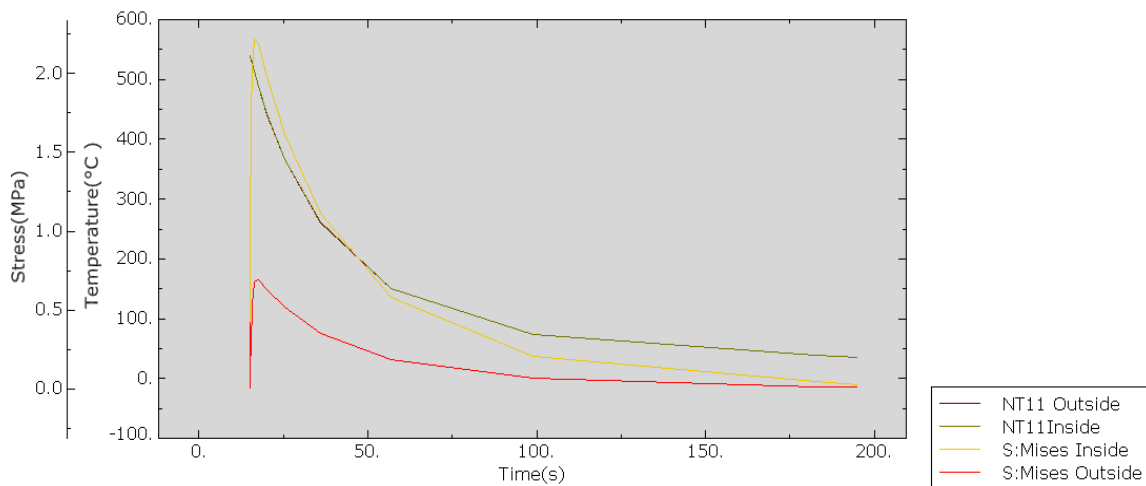


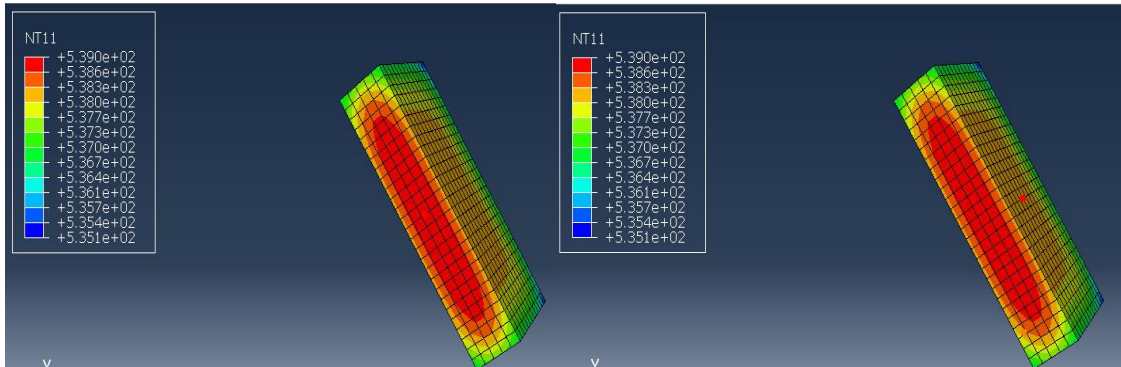
Figure IV.16. la distribution de la contrainte lors trempe à l'eau.

- À partir des courbes, nous avons observé que la température a chuté à 36° après 195 secondes. De plus, nous avons remarqué une augmentation significative de la contrainte à la surface de la plaque par rapport à la contrainte au milieu, atteignant

2.158 MPa. Cela est dû au fait que la surface de la plaque est exposée à une concentration plus élevée de chaleur Par rapport de l'intérieur.

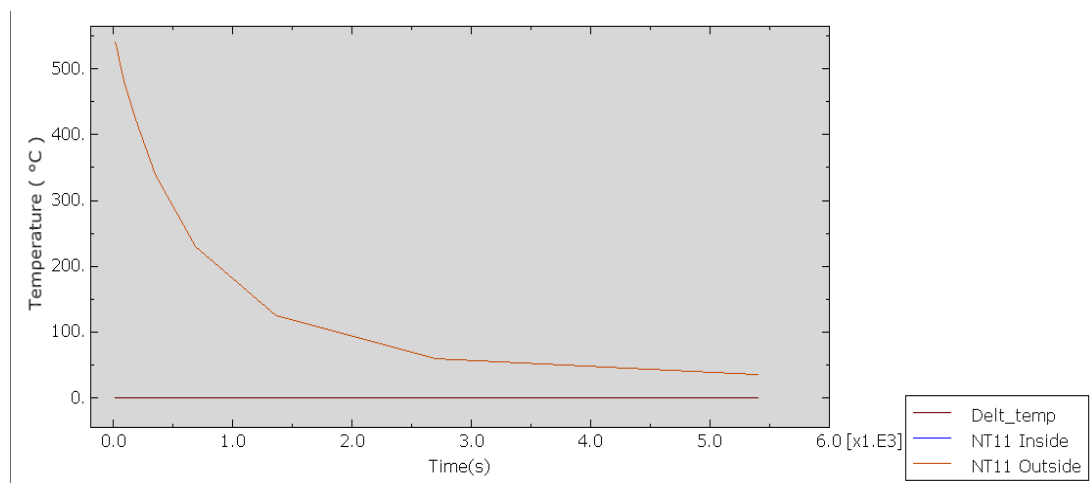
**IV.4.3) Résultats numériques -Simulation 2:**

a) Nous choisissons deux points pour calculer la distribution de la température et de la contrainte en fonction de temps de trempe à l'air sur la plaque comme illustré dans la figure suivant:



**Figure IV.17.** Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température

-Des courbes, nous avons observé que la température est chuté de 540° à environ 30 degrés en une heure et demie. De plus, nous avons remarqué que la contrainte a diminué dans l'air par rapport au refroidissement dans l'eau, atteignant une valeur maximale de 0,09 MPa à la surface de la plaque, comparée à 0,04 MPa au centre.



**Figure IV.18.** la distribution de la température lors trempe à l'air.

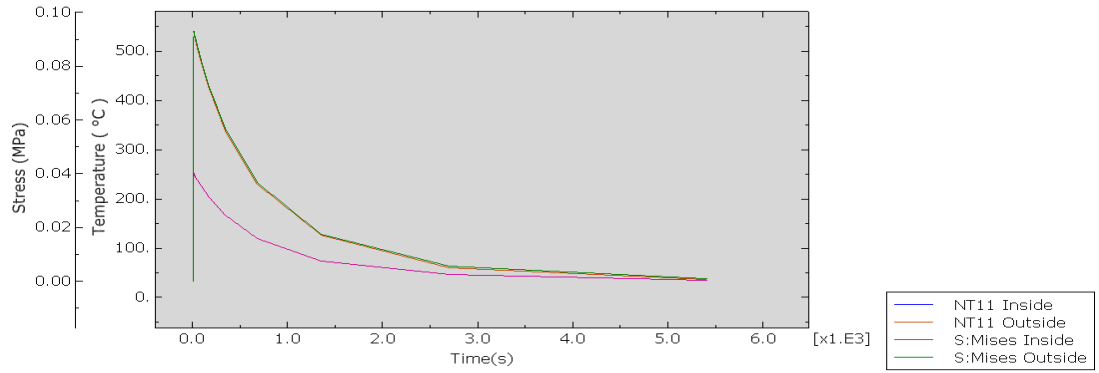


Figure IV.19. la distribution de la contrainte lors trempe à l'air

b) Cette fois, nous avons pris une mesure à partir du point médian (au centre de la plaque) et une autre sur le côté de la plaque pour effectuer les mêmes calculs précédents, comme illustré dans la figure suivant:

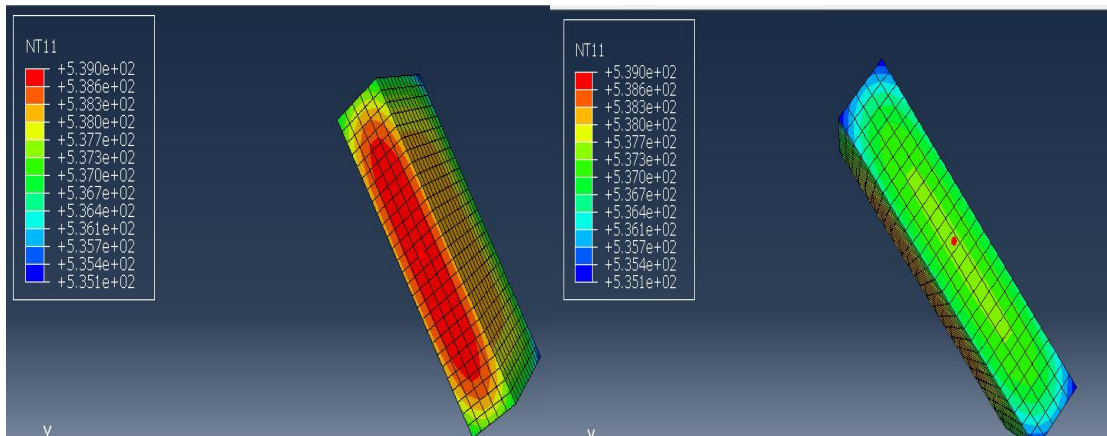


Figure IV.20. Les points sélectionnés pour le calcul de la distribution des contraintes et de la température.

- En se basant sur les courbes, on remarque que la température a chuté à environ 30° après environ une heure et demie. De plus, on observe que les valeurs de contrainte sont similaires entre le centre de la plaque et sa surface. La contrainte au centre de la plaque était de 0,0542 MPa, tandis qu'elle était de 0,059 MPa sur le coté de la plaque.

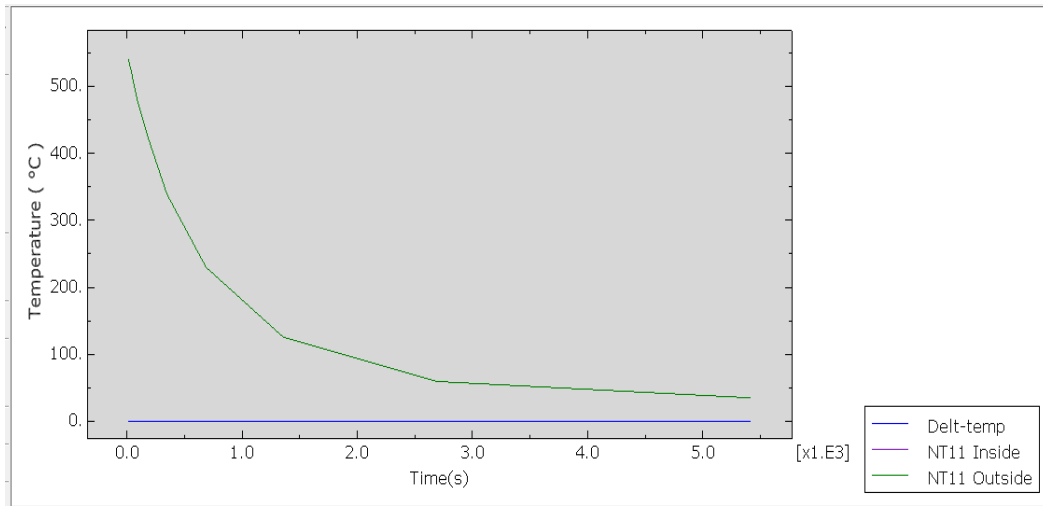


Figure IV.21. la distribution de la température lors trempe à l'aire

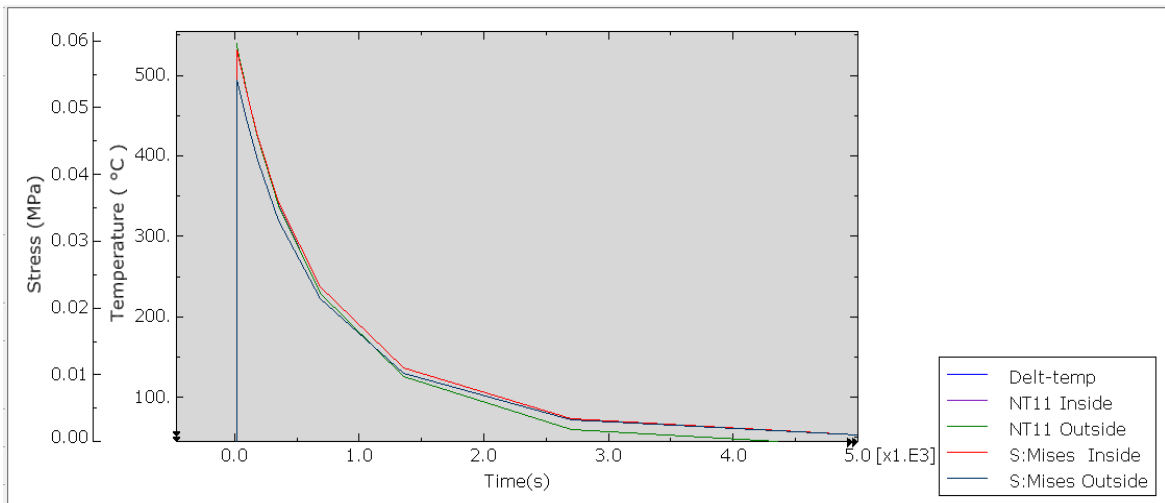


Figure IV.22. la distribution de la contrainte lors trempe à l'air

#### IV.4.4) Interprétation de résultats:

-Au début du refroidissement l'extrémité et la surface de la plaque se refroidit plus vite que le centre. Elle exerce donc des contraintes de compression sur le centre qui la mettent elle-même en traction. Les contraintes augmentent tant que l'écart de température entre le centre et l'extrémité s'accroît.

-quand l'écart de température atteint sa valeur maximale, la vitesse de refroidissement du centre devient plus élevée que celle de l'extrémité et les contraintes se diminuent.

-On remarque que les contraintes évoluent très lentement en fin de refroidissement puisque l'écart de température entre centre et extrémité varie peu. Les contraintes résiduelles ne sont atteintes que si le refroidissement est complètement achevé.

-On note que l'extrémité et le centre de la pièce sont soumis dès le début de la trempe à une déformation plastique.

-Ces étapes sont les mêmes pour les deux milieux de trempe sauf que le refroidissement à l'air prend beaucoup de temps pour le passage d'une étape à une autre (après 3 minutes trempe à l'eau et une heure et demie trempe à l'air) ; et les contraintes introduites par une trempe à l'eau sont plus importante que celle introduites par une trempe à l'air ; la différence du niveau de contrainte et température entre l'extrémité basse et l'extrémité haute est due au différence du valeur de coefficient d'échange thermique entre les deux extrémités .

## **Chapitre V:**

### **Résultats et Discussion.**



**V.1) Micrographie :**

Les micrographies suivantes de certains échantillons montrent certains changements de structures observées du au traitement thermique, au refroidissement et revenu :

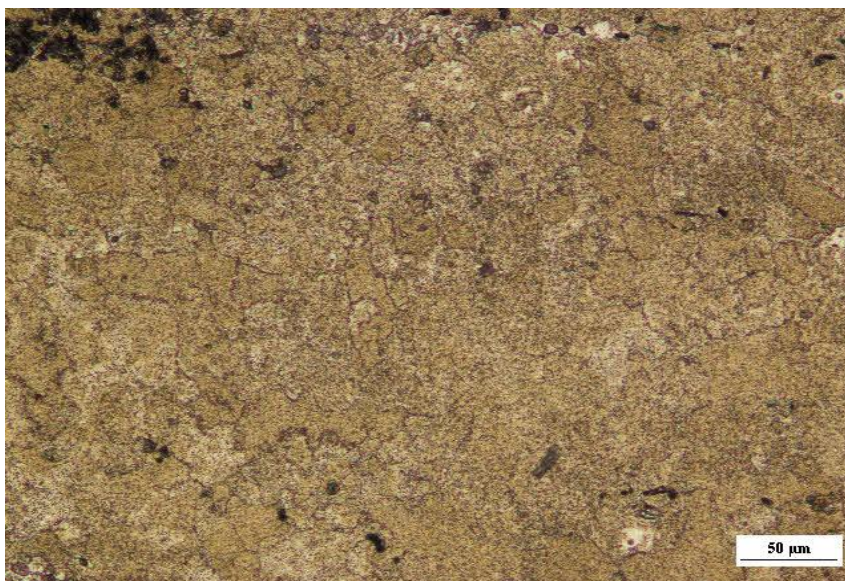
- Micrographie de l'alliage 7075 T6 à l'état brut.



**Figure V.1.** Micrographie d'échantillon1 (x10)

**V.1.1) Après trempe (le refroidissement) :**

-Micrographie d'échantillon (2) Après le traitement thermique à (540C) pendant 3h, Ensuite le refroidissement à l'air ambiant.



**Figure V.2.** Micrographie d'échantillon 2 (x10)

-Micrographie d'échantillon (3) Après le traitement thermique à (540C) pendant 3h, Ensuite le refroidissement à l'eau



**Figure.V.3.** Micrographie d'échantillon 3 (x10)

### ***V.1.2) Interprétation de résultats :***

#### ***a) Échantillon (2) trempé à l'aire:***

L'augmentation légère de la taille des grains que nous avons observée après le refroidissement de l'alliage d'aluminium 7075 à l'air peut être attribuée à plusieurs facteurs, que je vais vous expliquer ci-dessous:

**1- Vitesse de refroidissement modérée :** Comparé au refroidissement rapide dans l'eau, le refroidissement à l'air offre une vitesse de refroidissement plus modérée. Cette vitesse plus lente permet aux grains de croître légèrement pendant le refroidissement, ce qui entraîne une augmentation de la taille des grains dans la structure métallurgique de l'alliage.

**2- Formation de précipités de phases secondaires :** L'alliage d'aluminium 7075 est connu pour sa tendance à la précipitation de phases secondaires pendant le refroidissement. Les précipités peuvent se former à partir des éléments d'alliage présents dans la matrice d'aluminium. Ces précipités peuvent influencer la croissance des grains et entraîner une augmentation de leur taille

**-Relaxation des contraintes résiduelles** : Pendant le refroidissement à l'air, les contraintes résiduelles internes dans l'alliage peuvent se relaxer. Cette relaxation peut entraîner une légère restructuration des grains, conduisant à une augmentation de leur taille.

-Il convient de noter que l'augmentation légère de la taille des grains après le refroidissement à l'air peut être contrôlée en ajustant les paramètres de refroidissement, tels que la vitesse de refroidissement et les conditions ambiantes. De plus, d'autres facteurs tels que la composition chimique de l'alliage et les conditions de traitement thermique peuvent également avoir une influence sur la taille des grains

- L'augmentation légère de la taille des grains que nous avons observée après le refroidissement de l'alliage d'aluminium 7075 à l'air est principalement due à la vitesse de refroidissement modérée, à la formation de précipités de phases secondaires et à la relaxation des contraintes résiduelles. Ces facteurs contribuent à une légère augmentation de la taille des grains dans la structure métallurgique de l'alliage.

### ***b) Échantillon (3) trempé à l'eau:***

La taille des grains plus importante que nous avons observée après le refroidissement de la pièce en aluminium 7075 dans l'eau peut être expliquée par plusieurs raisons, que je vais vous présenter ci-dessous:

**-Vitesse de refroidissement élevée** : Le refroidissement rapide dans l'eau entraîne une vitesse de refroidissement élevée, ce qui peut empêcher la formation de nucléé de grains fins et favoriser la croissance rapide des grains existants. Cela peut conduire à une augmentation de la taille des grains dans la structure métallurgique de l'alliage.

**-Formation de zones de recristallisation** : Lors du refroidissement rapide, il est possible que des zones de recristallisation se forment dans la structure de l'alliage. Ces zones peuvent être le résultat d'une déformation plastique précédente ou d'une activation des mécanismes de recristallisation pendant le refroidissement. Ces zones peuvent présenter des grains de taille plus importante que les grains non recristallisés.

**-Précipitation tardive** : L'alliage d'aluminium 7075 est connu pour avoir une tendance à la précipitation de phases secondaires pendant le refroidissement. Cependant, en raison de la vitesse de refroidissement élevée, il est possible que les précipités de

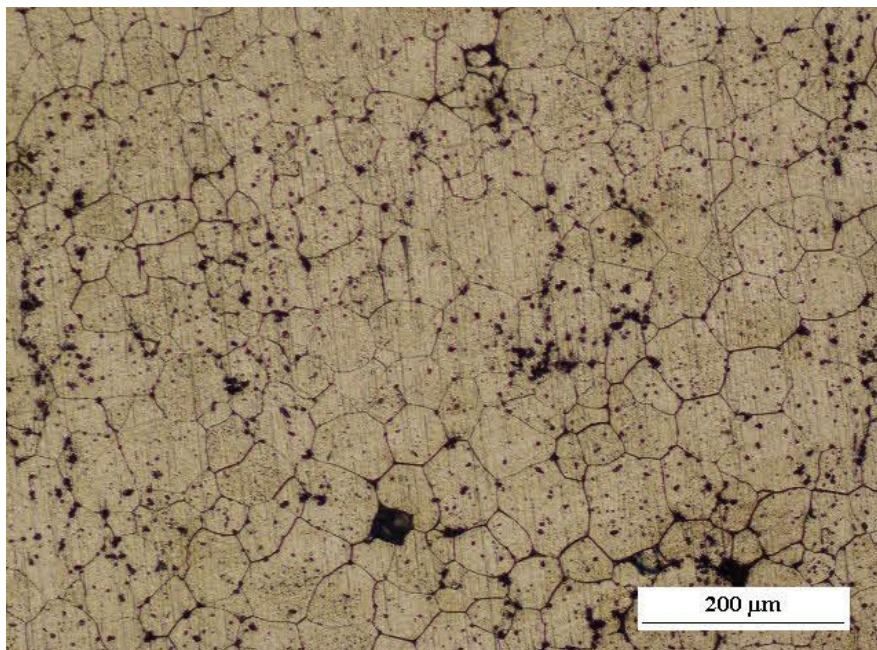
phases secondaires ne se forment pas de manière uniforme ou complète. Cela peut entraîner une distribution inégale des précipités, ce qui peut influencer la taille des grains.

-Il est important de noter que la taille des grains peut également être affectée par d'autres facteurs tels que la composition chimique de l'alliage, les conditions de traitement thermique et les paramètres de refroidissement. Il est donc essentiel de contrôler précisément ces paramètres afin d'obtenir la structure métallurgique souhaitée.

- La taille des grains plus importante que nous avons observée après le refroidissement de l'alliage d'aluminium 7075 dans l'eau peut être due à la vitesse de refroidissement élevée, à la formation de zones de recristallisation et à une précipitation incomplète des phases secondaires. Ces facteurs peuvent influencer la structure métallurgique et la taille des grains dans l'alliage.

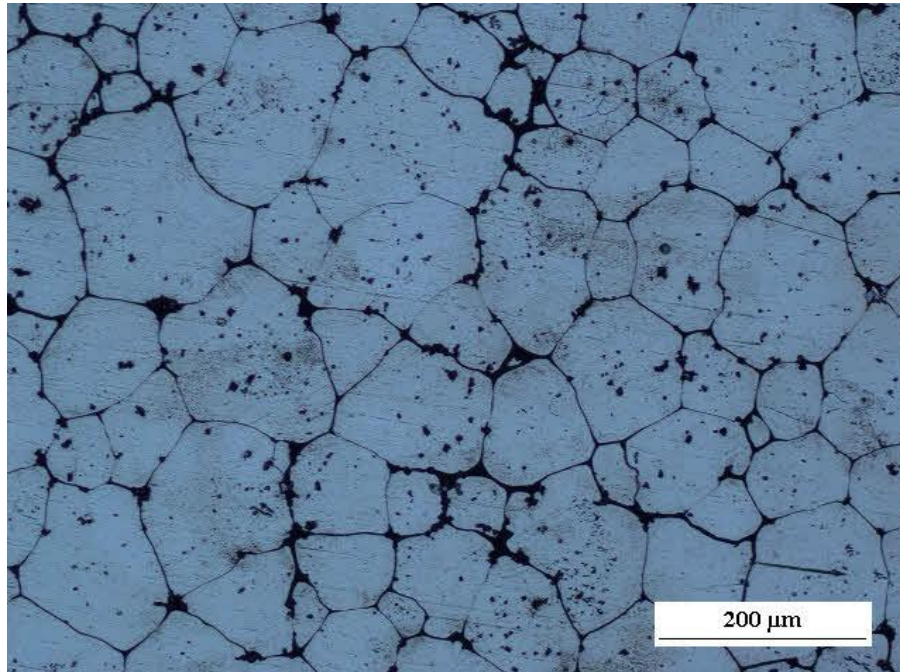
### ***V.1.3) Après le revenu (vieillessement artificiel) :***

-Micrographie d'échantillon (4) Après le traitement thermique à (540C°) pendant 3h, Ensuite le refroidissement à l'eau, puis vieillissement artificiel à (180C°) pendant 1h.



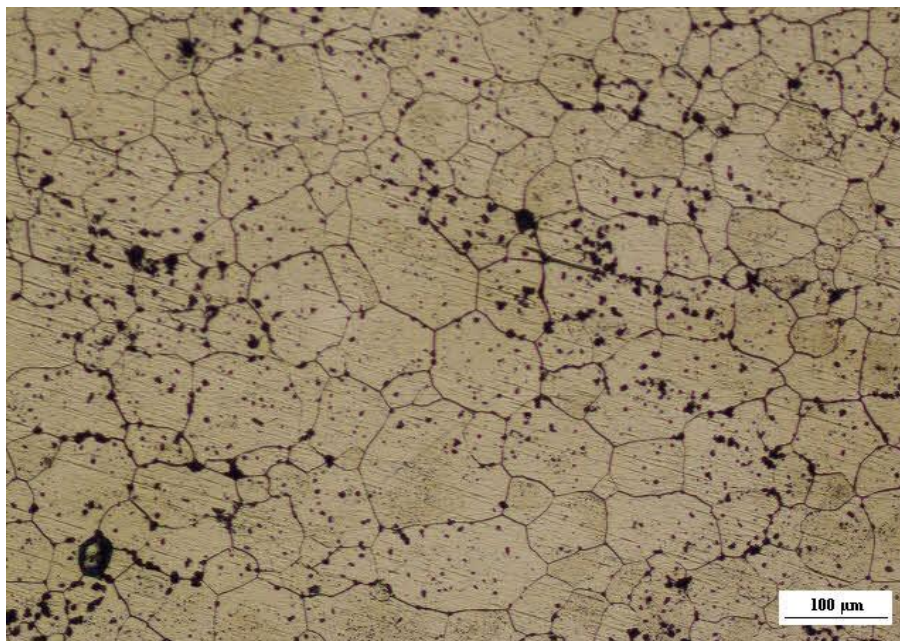
**Figure V.4.** Micrographie d'échantillon 4 (x10)

-Micrographie d'échantillon (5) Après le traitement thermique à (540C°) pendant 3h, Ensuite le refroidissement à l'eau, puis vieillissement artificiel à (180C°) pendant 2h.



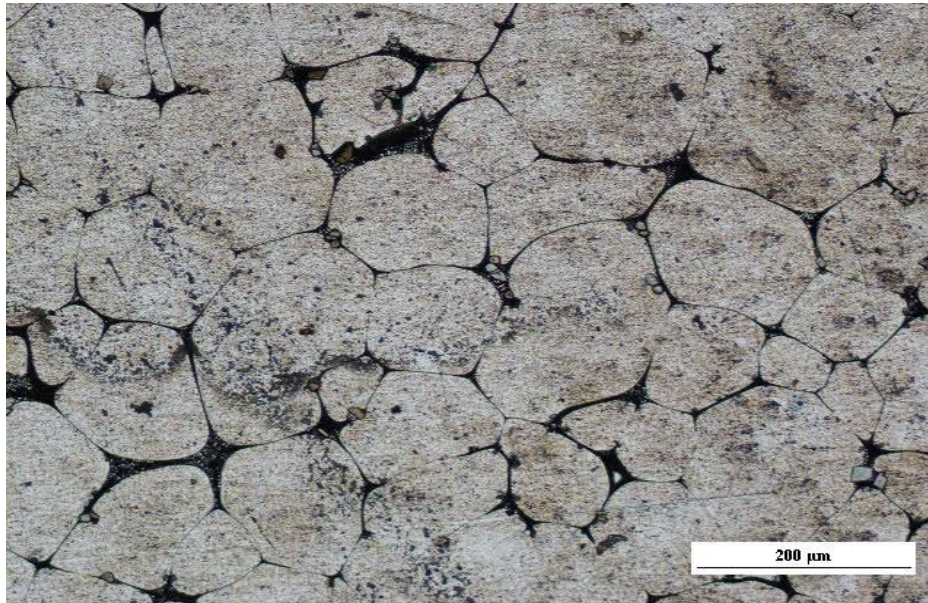
**Figure V.5.** Micrographie d'échantillon 5 (x10).

-Micrographie d'échantillon (6) Après le traitement thermique à (540C°) pendant 3h, Ensuite le refroidissement à l'eau, puis vieillissement artificiel à (180C°) pendant 3h.



**Figure V.6.** Micrographie d'échantillon 6 (x10).

-Micrographie d'échantillon (7) Après le traitement thermique à (540C°) pendant 3h, Ensuite le refroidissement à l'eau, puis vieillissement artificiel à (180C°) pendant 4h.



**Figure V.7.** Micrographie d'échantillon 7 (x10).

#### ***V.1.4) Interprétation de résultats:***

Lors du traitement thermique des alliages métalliques tels que l'alliage d'aluminium 7075, l'objectif du Revenu est d'améliorer et de renforcer les propriétés du matériau. Ce processus consiste à exposer le matériau à des températures et des durées spécifiques dans un four, ce qui entraîne des modifications de la structure microscopique du matériau.

Lorsque le temps de traitement est augmenté d'une heure à quatre heures, cela a un effet sur la taille des grains de la structure microscopique. Ce phénomène peut être expliqué par plusieurs facteurs.

Une explication possible est que l'augmentation du temps de traitement permet aux éléments constitutifs de l'alliage de réagir et de se mélanger de manière plus efficace. Dans le cas de l'alliage d'aluminium 7075, cet alliage contient une proportion élevée de zinc et de magnésium, et ces éléments peuvent se regrouper en certaines régions de la structure microscopique du matériau lors d'un temps de traitement plus court. Lorsque le temps de traitement est prolongé, une réaction plus efficace se produit entre ces éléments, ce qui entraîne la désintégration de ces agrégats et une répartition plus

homogène des éléments dans le matériau. Cette meilleure répartition des éléments peut entraîner une augmentation de la taille des grains de la structure microscopique.

De plus, d'autres facteurs tels que la vitesse de refroidissement et la température peuvent également affecter la taille des grains de la structure microscopique. Le temps prolongé de traitement peut également entraîner la formation de composés différents ou des réactions entre les éléments constitutifs de l'alliage, ce qui contribue à la formation de grains plus grands.

Il est important de noter que l'augmentation de la taille des grains de la structure microscopique ne signifie pas nécessairement une amélioration des propriétés mécaniques du matériau. Dans certains cas, il peut y avoir un compromis entre l'augmentation de la taille des grains et l'amélioration de la dureté ou de la résistance. Par conséquent, il est essentiel de choisir le temps de traitement approprié en fonction des propriétés souhaitées du matériau.

-lors de l'augmentation du temps de traitement pour l'alliage d'aluminium 7075, il peut y avoir une augmentation de la taille des grains de la structure microscopique. Cela est dû à plusieurs facteurs tels que la réaction entre les éléments constitutifs de l'alliage, la formation de composés et d'autres réactions. Le temps de traitement approprié doit être choisi en fonction des propriétés recherchées du matériau et de la compatibilité entre la dureté et les grains microscopiques.

## ***V.2) Résultats Métallurgique:***

### ***V.2.1) Essai de micro dureté:***

La micro dureté est la technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau.

La vitesse de trempe contrôle à la fois la concentration d'éléments d'addition restant en solution solide, susceptible de donner lieu à une précipitation durcit.

Ce dernier effet a des répercussions directes sur la dureté observée directement après la période de maturation à température ambiante, Les tests de micro-dureté de type (Vickers) L'essai a pour but de confirmer les observations micrographiques, par suite

d'apprécier l'importance des transformations que peut subir un matériau lors même temps de maintiens à une même température.

Le test de micro dureté a pour but de caractériser les pièces de faible dimensions et même les composants structuraux des alliages.

-Les mesures de micro dureté effectuées sous une charge de 200g pendant (10s) sont représentées selon le tableau suivant:

Echantillons	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur moyen
Ech1: non traité	218 HV	240 HV	192 HV	243 HV	223.25 HV
Ech2:traité et trempé à l'aire	141 HV	134 HV	125 HV	133 HV	133.25 HV
Ech3:traité et trempé à l'eau	154 HV	154 HV	154 HV	147 HV	152.25 HV
Ech4:traité et trempé à l'eau+ revenu (1h)	139 HV	107 HV	149 HV	149 HV	136 HV
Ech5:traité et trempé à l'eau+ revenu (2h)	137 HV	139 HV	134 HV	140 HV	137.5 HV
Ech6:traité et trempé à l'eau+ revenu (3h)	132 HV	144 HV	133 HV	145 HV	141.25 HV
Ech7:traité et trempé à l'eau+ revenu (4h)	106 HV	146 HV	121 HV	120 HV	123 HV

**Tableau V.1.** Micro-dureté des échantillons d'alliage d'aluminium 7075t6

***Interprétation de résultats :***

La variation de la micro dureté en fonction du traitement thermique pour les échantillons étudiés explique comment agir la valeur de la température sur la structure de l'échantillon et sur le type de traitement.

A travers la figure et le tableau ci-dessus, nous observons qu'après le traitement de mise en solution en température de 540°C et pendant 3h, les échantillons perdent leurs propriétés mécaniques (la dureté).

Après le traitement de la trempe nous observons une diminution de la valeur de la micro- dureté, on trouve qu'elle variera en fonction du type de milieu de refroidissement. Nous avons trouvé la plus grande valeur de dureté est qui obtenue par le refroidissement à l'eau, puis à l'air.

Aussi, après avoir appliqué le revenu, nous observons diminution de la valeur de micro dureté.

***V.2.2) Essais de traction:***

Nous avons procédé au traitement thermique de quatre échantillons d'alliage d'aluminium 7075t6 (120\*10 mm<sup>2</sup>) en suivant les mêmes étapes précédentes. Dans ce qui suit. Les résultats que nous avons obtenus après les expériences.



**Figure V.8.** Les éprouvettes d'alliage d'aluminium 7075t6 pour l'essai de traction.

***V.2.2.1) Les résultats de l'essai de traction:***

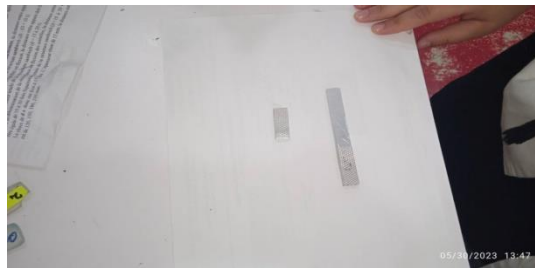
Les figures (V.10;V.12;V.14;V.16) montrent les courbes graphiques de l'essai de traction à la fraction des éprouvettes.

- Grâce à les courbes, nous pouvons extraire les « E » et « Rm » dont Elasticité (E) : Une déformation élastique est une déformation réversible, c'est-à-dire qui disparaît quand ses causes (les contraintes) disparaissent;

- Résistance mécanique (Re) : La résistance à la traction (tensile strength) est la contrainte de traction mécanique maximale avec laquelle une éprouvette peut être chargée. Lorsque la résistance à la traction est dépassée, le matériau défaille: L'absorption des forces diminue jusqu'à ce que l'échantillon de matériau se déchire.

### a) *Éprouvette 1:*

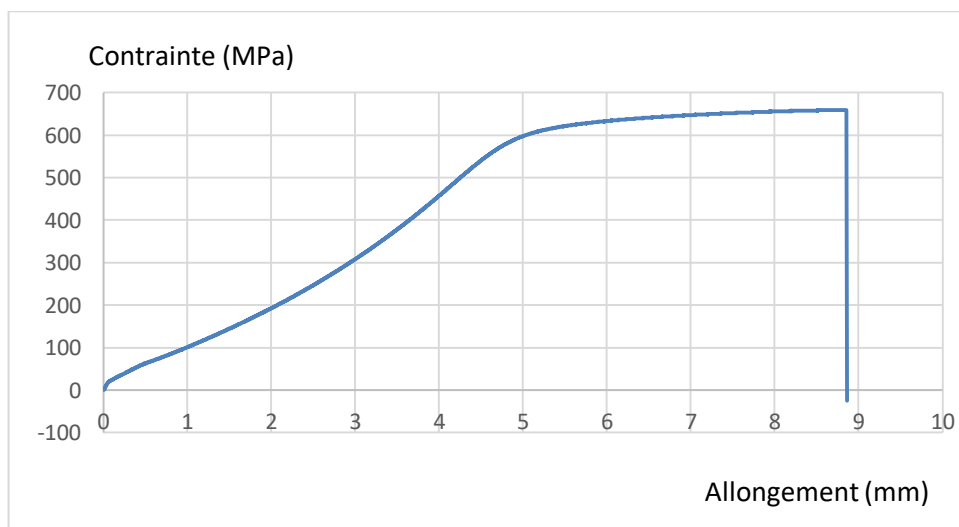
- La Figure V.9. montre l'éprouvette 1 (non traitée) après l'essai de traction.



**Figure V.9.** Éprouvette 1 après l'essai de traction.

-Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par rapport à allongement de courbe de traction d'éprouvette 1:

-La vitesse de traction  $V=0.5$  mm/mn.



**Figure V.10.** L'essai de traction d'éprouvette 1.

**b) Éprouvette 2:**

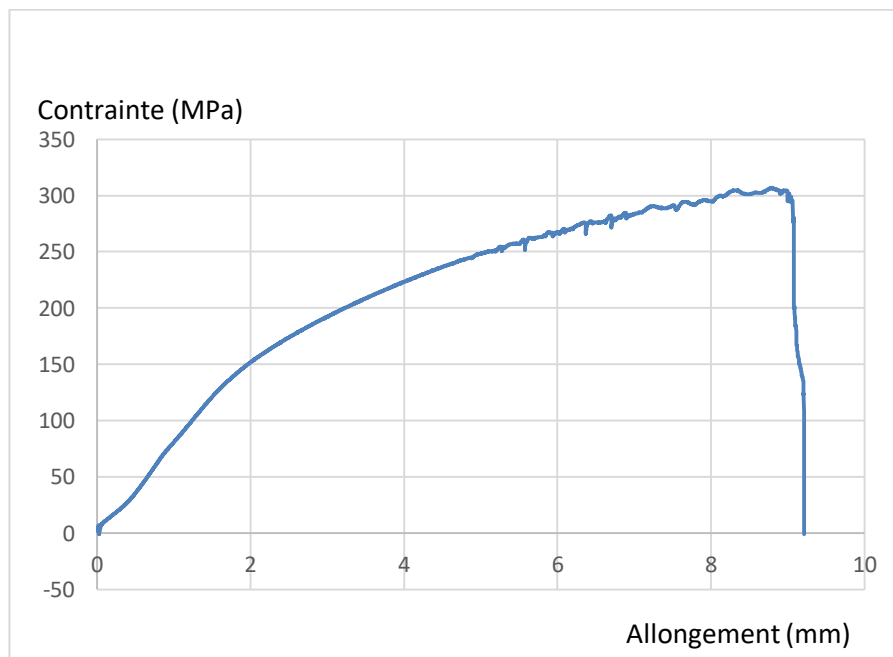
-La Figure V.11 montre l'éprouvette 2 (traitée et trempé à l'aire) après l'essai de traction.



**Figure V.11.** Éprouvette 2 après l'essai de traction

-Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par rapport à allongement de courbe de traction d'éprouvette 2:

-La vitesse de traction  $V=0.5$  mm/mn



**Figure V.12.** L'essai de traction d'éprouvette 2.

**c) Éprouvette 3:**

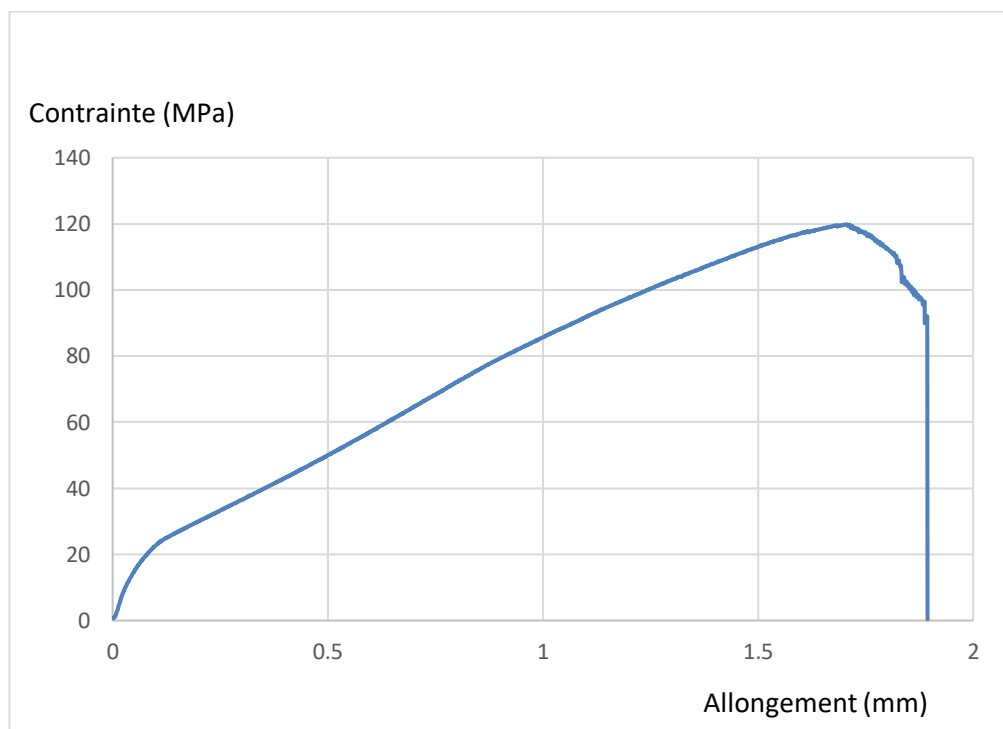
-La Figure V.13 montre l'éprouvette 3 (traitée et trempé à l'eau) après l'essai de traction.



**Figure V.13.** Éprouvette 3 après l'essai de traction.

-Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par rapport à allongement de courbe de traction d'éprouvette 3:

-La vitesse de traction  $V=0.5$  mm/mn.



**Figure V.14.** L'essai de traction d'éprouvette 3.

#### ***d) Éprouvette 4:***

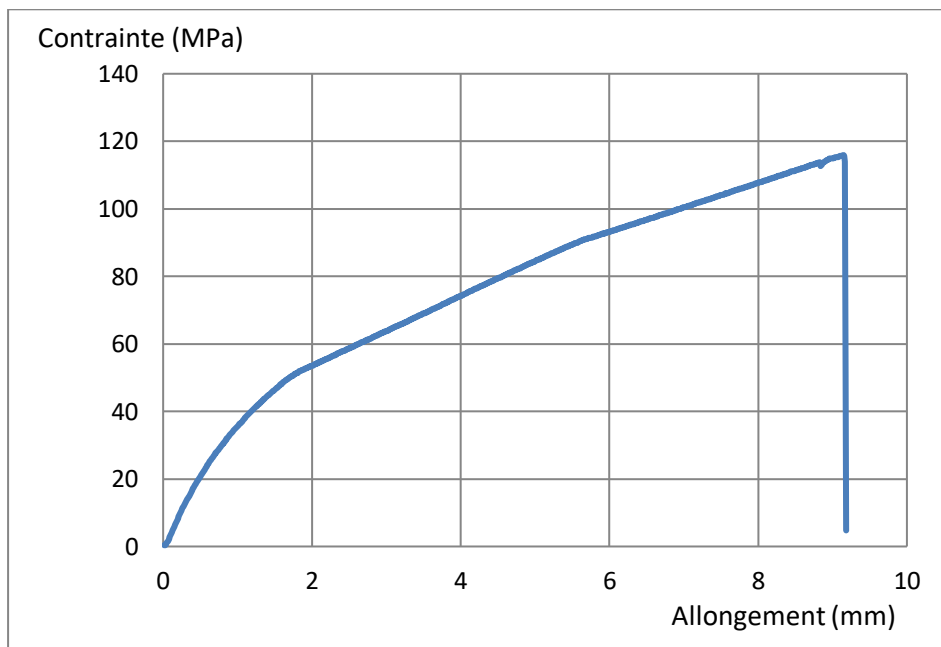
-La Figure V.15 montre l'éprouvette 4 (traitée et trempé à l'eau, puis vieillissement artificiel à  $180^{\circ}\text{C}$  pendant 4h) après l'essai de traction.



**Figure V.15.** Éprouvette 4 après l'essai de traction.

-Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par rapport à allongement de courbe de traction d'éprouvette 4:

-La vitesse de traction  $V=0.5$  mm/mn.



**Figure V.16.** L'essai de traction d'éprouvette 4.

-Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par rapport à allongement des courbes de traction des toute les éprouvettes:

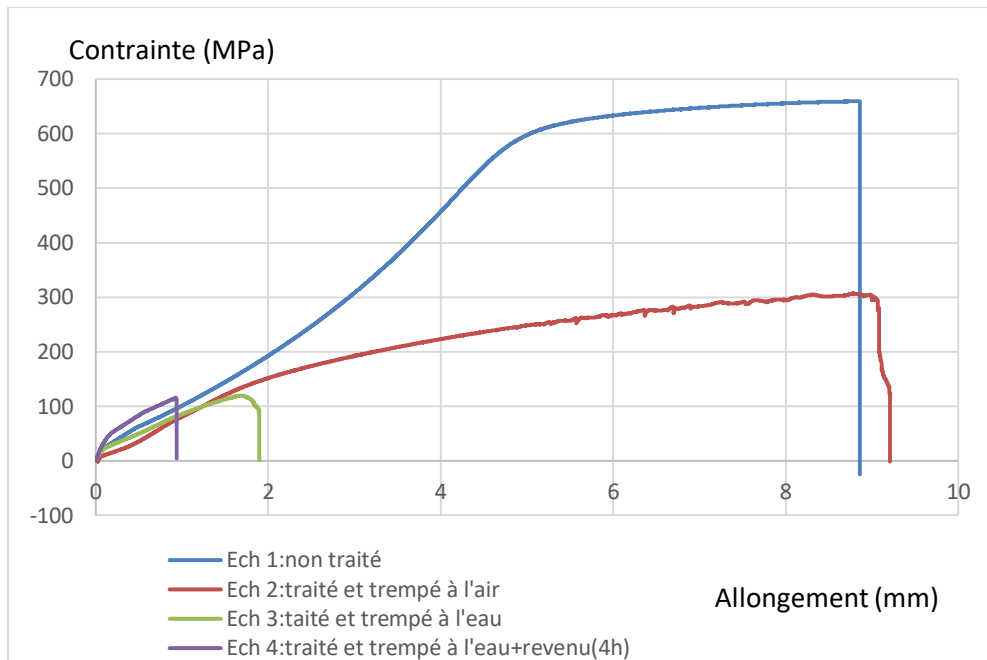


Figure V.17. Graphique d'essai de traction de toutes les éprouvettes.

V.2.2.2) Paramètres mécaniques obtenus à partir des courbes de traction de toute les éprouvettes:

Échantillons	Force maximale (Kn)	Limite D'élasticité Re / MPa	Résistance Mécanique Rmax/ MPa	Module de Young MPa
<b>Ech1: non traité</b>	26.371	118.859	659.282	16677.581
<b>Ech2: traité et trempé à l'aire</b>	12.275	76.363	306.886	9018.455
<b>Ech3: traité et trempé à l'eau</b>	4.795	108.127	119.865	20364.132
<b>Ech4: traité et trempé à l'eau+ revenu (4h)</b>	4.637	34.640	115.932	4313.008

Tableau V. 2. Paramètres mécaniques obtenus à partir des courbes de traction de toutes les éprouvettes.

**V.2.2.3) Interprétation de résultats :**

Nous avons effectué un traitement thermique sur des échantillons d'alliage d'aluminium 7075t6 dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques. Cependant, nous avons remarqué une diminution de la valeur de la limite élastique ( $R_e$ ) et la résistance mécanique ( $R_m$ ). Quelles sont les raisons?

Il peut y avoir plusieurs raisons possibles pour la diminution de la valeur de la limite élastique ( $R_e$ ) et la résistance mécanique ( $R_m$ ) après le traitement thermique des échantillons d'alliage d'aluminium 7075t6. Voici quelques raisons possibles:

**-Modification de la structure cristalline :** La structure cristalline de l'alliage peut être modifiée lors du traitement thermique, ce qui peut affecter les propriétés mécaniques. Des grains plus fins ou des changements dans la distribution des défauts cristallins peuvent se produire, ce qui peut entraîner une réduction de la limite élastique.

**-Corrosion :** Les échantillons peuvent subir une corrosion en raison de leur exposition à l'eau pendant le refroidissement. Si les échantillons ne sont pas correctement traités après le refroidissement dans l'eau, une corrosion de surface peut se produire, ce qui peut réduire la limite élastique.

**-Refroidissement insuffisant :** Le refroidissement peut ne pas être suffisant pour les échantillons refroidis à l'air, ce qui peut entraîner l'absence de précipités nécessaires pour améliorer les propriétés mécaniques. Le refroidissement dans l'eau contribue à réduire la taille des précipités et à améliorer la dureté.

Le processus de refroidissement rapide dans l'eau est appelé trempe et vise à figer rapidement la structure cristalline du matériau. Lorsque l'alliage est chauffé à une température élevée et soumis à une trempe rapide, de petites et homogènes cristallites solides se forment. Ce refroidissement rapide conduit à une augmentation de la dureté de l'alliage et de ses propriétés mécaniques.

Il convient de noter que la trempe est l'un des facteurs cruciaux pour augmenter la dureté de l'alliage d'aluminium 7075t6. Cependant, le refroidissement rapide par l'eau peut entraîner l'apparition de contraintes internes dans l'alliage, ce qui augmente la probabilité

de fissuration et de déformations de la structure cristalline. Cela explique la rupture rapide de l'échantillon refroidi dans l'eau.

En ce qui concerne l'échantillon refroidi à l'air ambiant, le processus de refroidissement est plus lent, ce qui permet aux contraintes internes de se dissiper progressivement et réduit la probabilité de fissuration due aux contraintes. Par conséquent, l'échantillon refroidi à l'air libre est légèrement plus résistant avant de se briser par rapport à celui refroidi dans l'eau.

### ***V.3) Discussion des résultats:***

Le principal objectif du traitement thermique est améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 7075t6, (dureté-tr) ; Dans notre cas, le contraire s'est produit, car nous avons remarqué une diminution des propriétés mécaniques échantillons traités, pour un certain nombre de raisons.

Après appliquant la trempe, Nous avons observé Après avoir testé la microdureté et la traction que le meilleur milieu de refroidissement pourrait améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage est l'eau.

L'alliage d'aluminium 7075-T6 est connu pour ses excellentes propriétés mécaniques, notamment sa résistance élevée. Cependant, après un traitement thermique visant à renforcer sa structure, il peut y avoir des cas où la microdureté de l'alliage diminue. Voici quelques causes possibles de cette baisse de microdureté :

**-Surchauffe** : L'un des facteurs les plus courants qui peut entraîner une baisse de micro dureté est une surchauffe pendant le traitement thermique. Si la température est trop élevée ou si la durée du traitement est trop longue, cela peut provoquer une recristallisation excessive de l'alliage et une croissance anormale des grains. Cela peut entraîner une réduction de la dureté. La taille des précipités a un impact significatif sur les propriétés mécaniques de l'alliage. En général, des précipités plus petits offrent une meilleure résistance et une meilleure dureté à l'alliage, tandis que des précipités plus grands peuvent réduire la résistance et la ductilité

**-Sur-refroidissement** : Un refroidissement excessivement rapide après le traitement thermique peut également affecter négativement la microdureté de l'alliage. Un refroidissement trop rapide peut provoquer une transformation de la structure de l'alliage, conduisant à une diminution de la dureté.

**-Présence d'impuretés :** La présence d'impuretés indésirables, telles que des oxydes ou des inclusions, peut également causer une baisse de la microdureté. Ces impuretés peuvent interférer avec la structure cristalline de l'alliage, perturbant ainsi ses propriétés mécaniques.

**-Précipitation incomplète :** Le traitement thermique du 7075-T6 implique généralement une étape de vieillissement, au cours de laquelle des précipités de phases de durcissement se forment dans la matrice métallique. Si le vieillissement n'est pas effectué de manière adéquate, une précipitation incomplète peut se produire, entraînant une diminution de la dureté.

**- Le sur-revenu** des alliages d'aluminium 7075 t6 a un impact significatif sur la microstructure et la micro dureté de l'alliage. Lorsque l'alliage 7075 t6 est soumis à un traitement de sur-revenu à des températures spécifiques, Généralement compris entre 120<sup>0</sup>c et 200<sup>0</sup>, des changements se produisent su niveau de la microstructure. La phase de reforment dispasés dans la matrice d'aluminium peuvent subir des modifications, tels que leur peuvent altères la taille et la distribution des grains dans l'alliage. En conséquence, la micro dureté de l'alliage diminue .car les précipités jouent un rôle important dans le renforcement de l'alliage et leur modification affecté directement les propriétés mécaniques; La dureté .ainsi le sur revenu des alliages d'aluminium 7075 t6 conduit à une diminution de la micro dureté et à des changements dans la microstructure de l'alliage.

Il convient de noter que ces causes sont généralement évitables en respectant les procédures de traitement thermique appropriées, en contrôlant soigneusement les paramètres de température, de durée et de refroidissement, ainsi qu'en maintenant une qualité de matière première élevée avec une faible teneur en impuretés. Si la baisse de la microdureté est observée, il est essentiel d'analyser les conditions de traitement thermique et de procéder à des ajustements si nécessaire pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées.

# **Conclusion générale**



# *Conclusion générale*

---

## *Conclusion générale:*

-Nous nous sommes intéressés dans cette thèse à l'étude de matériaux utilisés dans l'industrie aéronautique civile. Dans le cadre aéronautique, le matériau doit offrir à la fois une légèreté et de très bonnes propriétés mécaniques. Les alliages d'aluminium offrent un des meilleurs compromis entre ces deux propriétés.

-Les producteurs d'aluminium cherchent sans cesse à optimiser les alliages existants ou à en développer de nouveaux, plus performants. Actuellement les alliages d'aluminium ayant les meilleures caractéristiques mécaniques appartiennent à la série 7000.

-Certains alliages d'aluminium peuvent recevoir un traitement thermique permettant une amélioration des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté...), Ce traitement s'opère par durcissement structural.

-Dans cette étude, nous avons préparé des échantillons de l'alliage d'aluminium 7075t6. Nous avons ensuite effectué un traitement thermique dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage. De plus, nous avons examiné l'impact du milieu de refroidissement sur les propriétés mécaniques. Après avoir effectué le traitement thermique, nous avons mesuré avec précision la micro-dureté et la résistance à la traction pour confirmer les résultats.

-Après appliquant la trempe, Nous avons observé Après avoir testé la microdureté et la traction que le meilleur milieu de refroidissement pourrait améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage est l'eau. Le refroidissement peut ne pas être suffisant pour les échantillons refroidis à l'air, ce qui peut entraîner l'absence de précipités nécessaires pour améliorer les propriétés mécaniques. Le refroidissement dans l'eau contribue à réduire la taille des précipités et à améliorer la dureté.

-Après appliquant la trempe et le revenu, nous avons remarqué une diminution des propriétés mécaniques d'échantillons traités, pour un certain nombre de raisons.

**-Surchauffe :** L'un des facteurs les plus courants qui peut entraîner une baisse de micro dureté est une surchauffe pendant le traitement thermique. Si la température est trop élevée ou si la durée du traitement est trop longue, cela peut provoquer une recristallisation excessive de l'alliage et une croissance anormale des grains.

## ***Conclusion générale***

---

**-Précipitation incomplète** : Le traitement thermique du 7075-T6 implique généralement une étape de vieillissement, au cours de laquelle des précipités de phases de durcissement se forment dans la matrice métallique. Si le vieillissement n'est pas effectué de manière adéquate, une précipitation incomplète peut se produire, entraînant une diminution de la dureté.

**-Sur-refroidissement** : Un refroidissement excessivement rapide après le traitement thermique peut également affecter négativement la microdureté de l'alliage. Un refroidissement trop rapide peut provoquer une transformation de la structure de l'alliage, conduisant à une diminution de la propriétés mécaniques.

-Après avoir effectué le traitement thermique et analysé les résultats, nous avons effectué une simulation à l'aide du logiciel Abaqus. Cette simulation visait à étudier l'impact du milieu de refroidissement sur la distribution du stress et de la chaleur dans l'alliage d'aluminium 7075 t6. Nous avons mesuré la contrainte dans chaque milieu de refroidissement. Ensuite, nous avons comparé les valeurs de la contrainte avec les valeurs de la résistance mécanique ( $R_m$ ).

Après avoir effectué la simulation et calculé la distribution des contraintes dans l'alliage, nous avons constaté que la valeur maximale dans le milieu de refroidissement à l'eau est de 2.158 MPa, tandis que la valeur de  $R_m$  dans l'essai de traction réel est de 119.875 MPa.

Dans le cas du refroidissement à l'air, nous avons trouvé que la valeur maximale de contrainte est de 0.09 MPa, alors que dans l'essai de traction réel, la valeur de  $R_{max}$  est de 306.886 MPa.

Les différences de valeurs entre les résultats des tests réel et les résultats de la simulation peuvent être expliquées par plusieurs facteurs :

Expérience et simulation : Dans l'expérience réelle et lors de la simulation, il est essentiel d'ajuster précisément les conditions. Si des différences se présentent dans la température, le taux de refroidissement ou la durée de l'exposition au refroidissement entre les deux tests, cela peut entraîner des divergences dans le comportement du matériau.

## ***Conclusion générale***

---

Modèle utilisé dans la simulation : Les logiciels de simulation reposent sur des modèles mathématiques pour décrire le comportement des matériaux. Si un modèle différent est utilisé ou si sa précision dans la représentation du comportement de l'alliage après le traitement thermique varie, cela peut conduire à des différences dans les résultats.

Facteurs non simulés : Les programmes de simulation peuvent ne pas tenir compte de toutes les variables qui peuvent avoir un impact dans la réalité. Par exemple, les déformations mécaniques ou les changements dans la structure du matériau peuvent être difficiles à représenter avec précision dans la simulation.

Erreurs de mesure et d'expérience : Il est également important de considérer qu'il peut y avoir des erreurs possibles dans les processus de mesure et d'expérimentation. Ces erreurs peuvent affecter la précision des résultats réels.

En résumé, les différences de valeurs entre les résultats des tests réels et ceux de la simulation peuvent être dues à des variations dans les conditions, les modèles utilisés, des facteurs non pris en compte ou des erreurs dans les processus de mesure et d'expérimentation.

## Reference

---

### Reference:

- [1] : Les usages de l'aluminium dans l'industrie : une clé de la transition énergétique. [www.ferrosplanes.com](http://www.ferrosplanes.com).
- [2]: Dr. Ghomari Fouad. Science Des Materiaux De Construction. Universite Aboubekr Belkaid.Tlemcen.
- [3]: Données techniques sur l'aluminium et ses alliages [www.almet-metal.com](http://www.almet-metal.com)
- [4]: Propriétés et alliages. Aluminium France <https://www.aluminium.fr>
- [5]: Les différentes utilisations de l'aluminium dans l'industrie. Jan 5, 2023.france industriel. [www.france-industrie.pro](http://www.france-industrie.pro)
- [6]: l'alliage d'aluminium, qu'est-ce que c'est ! AOUT 25, 2021. [www.weerg.com](http://www.weerg.com)
- [7]: Les caractéristiques de l'aluminium structural Par: Denis Beaulie,  
Discipline: Sciences et génie, Parution: 21 mars 2002
- [8]: J.R. Davis. Alloying: Understanding the Basics. , p354- 2001. ASM International.
- [9]: Influence des conditions de fabrication. Traitements d'amélioration L'aluminium.  
Relu et validé le 07 mars 2023, technique de l'ingénieur.
- [10]: The Aluminum Association. (2017). Aluminum Alloys 101. En ligne: [www.aluminum.org](http://www.aluminum.org)
- [11]: Alliage d'aluminium séries 4000. Qinghai Guoxin Aluminum Industry Incorporated Co.Ltd. [www.gxaluminiumprofile.com](http://www.gxaluminiumprofile.com)
- [12]: Aluminium série 5000. [www.staluminiumprofile.fr](http://www.staluminiumprofile.fr)
- [13]: L'aluminium et ses alliages Fabrication - Emploi par K. GULER p 69
- [14]: Aluminium série 2000, sainty. [www.aluminum-doors.com](http://www.aluminum-doors.com)
- [15]: 6000 Series Aluminum Alloys, Taber Extrusions. [www.taberextrusions.com](http://www.taberextrusions.com).
- [16]: ALLIAGES ET APPLICATIONS. [www.aluquebec.com](http://www.aluquebec.com).
- [17]: Désignation Des Etats Des Alliages De Corroyage. Janvier-février-mars 2002. Le Feuillard technique - numéro 2.Page 29.
- [18]: Étude de base. Informations technique sur l'aluminium. [www.alu-stock.es/fr](http://www.alu-stock.es/fr)

## Reference

---

[19]: Désignation des états métallurgiques. Informations Techniques Aluminium.ALMET.P52.

[20]: Les alliages à durcissement par écrouissage. Publié par: CQRDA;  
Le Feuillard technique.

[21]: Understanding The Alloys Of Aluminum, 2012 ESAB, [www.alcotec.com](http://www.alcotec.com)

[22]: Aluminium 6061 VS 7075, quelle est la différence ? Par Austin. 27 octobre 2020.  
[www.dekmake.com](http://www.dekmake.com)

[23]: Aluminium 7075-T6 Propriétés, Alu 7075 Fiche Technique Al-7075-T6 T651-  
By: Matière du monde.

[24]: Etude Des Transformations Structurales Et Des Propriétés Mécaniques Dans Les Soudures d'alliage d'aluminium 7075 Traités Thermiquement Réalisées Par Le Procédé De Soudage TIG. Mémoire de magister. Par SELLAM Mohamed. Université Saad Dahlab de Blida.

[25]: Influence Des Traitements Thermiques Sur La Microstructure Des Alliages D'aluminium 7075 T6 Lors Du Soudage Par Friction –Malaxage. MEMOIRE DE MAGISTER, Par: Y. Satour, UNIVERSITE DE BLIDA 1

[26]:Durcissement Structural, Wikipédia en France, fr-academic.com.

[27]: Durcissement structural : Aciers inoxydables, BODYCOTE.

<https://www.bodycote.com>.

[28]: Durcissement structural, Härterei Blessing AG, [www.blessing.ch.com](http://www.blessing.ch.com).

[29]:Etude du durcissement structural de l'alliage Al-4,6 %Cu-1 %Mg-0,7 %Si (%mass). MEMOIRE DE MAGISTER, Par: FAR DALEL, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 2011/2012.

[30]: Les mécanismes de durcissement des alliages D'AL. Chapitre : 2 (Partie II) Durcissement des alliages D'AL. Université de BATNA 2.

[31]: L'affinage du grain des alliages d'aluminium. By Michel Stucky.Metal blog

Publié le 18 mars 2019.

[32]: Qu'est-ce que l'écrouissage – Travail à froid – Définition, [www.material-properties.org](http://www.material-properties.org)

[33]: Ashby, Michael; Hugh Shercliff; David Cebon (2007). Matériaux: ingénierie, science, traitement et conception (1ère éd.). Butterworth-Heinemann.

[34]: Le durcissement structural des alliages d'aluminium. By Michel StuckyTM,

Publié le 18 mars 2019.

## *Reference*

---

[35]: Evaluation Des Structures Aeronautiques Par Controle Non Destructif Par Courants De Foucault, Memoire De Magister, Par Hayet BOUDJELLAL.

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA. Mars 2005.

[36]: pour les opérateurs en traitement thermique, Chargé de projet : Raymond Langevin, septembre 2015, ISBN 978-2-922946-17-8, Bibliothèque et Archives : nationales du Québec, 2015.

[37]: Traitements thermiques d'homogénéisation, Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Auteur(s) : Roger DEVELAY, Date de publication : 10 janv. 1986. TECHNIQUES DE L'INGENIEUR.

[38]: Modélisation d'une structure en matériaux isotropes par laméthode des éléments finis, MEMOIRE Pour obtenir le Diplôme de Master, par: BERDJI MOHAMED EL BACHIR ;GHERIBI NOUREDDINE. Université Kasdi Merbah Ouargla;2018/2019.

[39]: Logiciel de Simulation en Génie Mécanique Abaqus, By: Deghboudj Samir, Université de Tébessa, Book · November 2021.

[40]: Abaqus : un logiciel de calcul et de simulation performant, Mecaset 2022/01/04, [www.mecaset.fr](http://www.mecaset.fr).

[41]: Essai de dureté avec ZwickRoell, Une gamme unique pour des résultats d'essais fiables, [www.zwickroell.com](http://www.zwickroell.com).

[42]: Essai de traction ! PUBLIÉ LE 14 AOÛT 2017 PAR ROCDACIER

[43]: Durcissement Structural des Alliages Métalliques: Essais de Traction sur des Echantillons Aluminium pur et Alliage Al-Cu 4%, Aymen Labidi, École nationale supérieure de chimie de Paris· October 2022.

## **Résumé:**

*Ce travail de mémoire de master porte sur une étude bibliographique de l'aluminium et des alliages de la série 7xxx, en mettant l'accent sur l'alliage d'aluminium 7075 (ALZn5, 5MgCu ou AZ5GU) qui présente des propriétés mécaniques intéressantes. L'objectif de cette étude est d'examiner l'effet du milieu de refroidissement sur les propriétés mécaniques (dureté et traction) de l'alliage 7075.*

*Ainsi, l'objectif de ce travail est d'étudier l'effet du traitement thermique (mise en solution, trempe, revenu) sur la propriété de dureté de l'alliage d'aluminium 7075. Cette étude est à la fois expérimentale et théorique, en théorie, ont simulé le traitement thermique de l'alliage 7075t6 sur Abaqus; la partie expérimentale se base sur la visualisation microscopique des structures de l'alliage 7075 et la mesure de la dureté, ainsi que des essais de traction. Enfin, nous comparerons les résultats obtenus dans la partie théorique et expérimentale.*

*Les mots-clés de ce travail sont les suivants : alliage d'aluminium de la série 7000, alliage 7075T6, microdureté, traitement thermique, essai de traction. Abaqus .*

## **Summary:**

*This master's thesis focuses on a bibliographic study of aluminum and alloys of the 7xxx series, with an emphasis on the 7075 aluminum alloy (ALZn5, 5MgCu or AZ5GU) which has interesting mechanical properties. The objective of this study is to examine the effect of the cooling medium on the mechanical properties (hardness and traction) of the 7075 alloy.*

*Thus, the objective of this work is to study the effect of heat treatment (solution, quenching, tempering) on the hardness property of 7075 aluminum alloy. This study is both experimental and theoretical, in theory, the heat treatment of alloy 7075t6 was simulated on Abaqus; the experimental part is based on microscopic visualization of the structures of alloy 7075 and the measurement of hardness, and traction tests. Finally, we shall compare the results obtained in the theoretical and experimental part.*

*The keywords of this work are: aluminum alloy of series 7000, alloy 7075T6, microhardness, heat treatment, tensile test, Abaqus.*

## **ملخص:**

*يركز عمل هذه المذكرة على دراسة بيبليوغرافية للألمنيوم وسبائك الألومنيوم سلسلة 7xxx، مع التركيز على سبائك الألومنيوم 7075t6 (ALZn5 أو 5 MgCu أو AZ5GU) التي لها خصائص ميكانيكية مثيرة للاهتمام. الهدف من هذه الدراسة هو فحص تأثير وسط التبريد على الخصائص الميكانيكية (الصلابة والشد) لسبيكة 7075t6.*

*وبالتالي، فإن الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجة الحرارية (المحلول، التبريد، التخفيف) على خاصية الصلابة والشد لسبائك الألومنيوم 7075. هذه الدراسة تجريبية ونظرية، من الناحية النظرية، قمنا بمحاكاة*

المعالجة الحرارية للسبائك 7075 على Abaqus ؛ ويستند الجزء التجريبي إلى تصور مجهري لهياكل السبائك 7075 وقياس الصلابة، فضلاً عن اختبارات الشد. أخيراً، سنقارن النتائج التي تم الحصول عليها في الجزء النظري والتجريبي.

الكلمات الرئيسية لهذا العمل هي: سلسلة سبائك الألومنيوم 7000، سبائك الألومنيوم 7075t6، الصلابة، المعالجة الحرارية، اختبار الشد Abaqus.