

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGÉNIERIE - ANNABA

Département

Génie Minier Métallurgies et Matériaux

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : ST

Filière : Métallurgie

Présenté par

Ahlem DOUIABIA

Spécialité : Mécanique et physique de mise en forme

Soumia KHALED

Spécialité : ingénierie de surface

Analyse expérimentale et simulation de l'effet d'anisotropie mécanique sur les alliages d'aluminium

Encadré par

Pr. Nadjoua MATOUGUI

ENSTI Annaba

Dr. Brahim MEHDI

USTHB Alger

Membres du jury :

- | | | |
|--------------------------|--------------|-------|
| ▪ Pr. Mohamed RETIMA | Président | ENSTI |
| ▪ MCB. Nacira DJELLAL | Examinatrice | ENSTI |
| ▪ MCA. Louiza BENDJEDDOU | Examinatrice | ENSTI |

Année 2024

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude à toutes les personnes

qui ont contribué à la réalisation de mon mémoire d'ingénieur et qui ont été présentes à nos côtés tout au long de ce parcours.

Tout d'abord, nous souhaitons remercier chaleureusement nos encadrants, **Nedjoua MATOUGUI** Professeur à l'**ENST** Annaba et **Brahim MEHDI** Maître de Conférences à l'**USTHB**, pour leur précieuse guidance, leur expertise et leur soutien constant. Leurs conseils éclairés, leur enthousiasme et leur dévouement ont été d'une importance capitale dans la réussite de ce travail de recherche. Nous remercions notre Co-encadrant **Dr. Nabil KHERROUBA** Maître de recherche au **CRTI** Cheraga et **Dr. Oualid CHAHAOUI** Maître de Conférences à **Khenchla** pour sa disponibilité, ses conseils et surtout sa contribution dans la réalisation des travaux expérimentaux.

Nous remercions le Pr. **Mohamed RETIMA**, la Dr. **Nacira DJELLAL** et la Dr. **Louiza BENDJEDDOU**, enseignants à l'**ENST** Annaba, d'avoir accepté de juger ce travail.

Monsieur **Malek DOUAIBIA** pour son leadership inspirant et son engagement envers le développement de l'excellence. Nous n'oublions pas Madame **Salima ABERKANE**, doctorante à l'**USTHB**, pour sa disponibilité, son soutien et ses encouragements constants.

Nous adressons également nos remerciements à toute la famille du **CRTI** pour l'accueil chaleureux et le soutien collectif. Votre collaboration et votre esprit d'équipe ont créé un environnement propice à l'innovation et à la réussite.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur pierre à l'édifice de ce mémoire, nous vous adressons nos remerciements les plus sincères. Sans votre aide et votre dévouement, ce travail n'aurait pas été possible. Merci infiniment.

Dédicace

À mes très chers parents, Je dédie ce mémoire à vous, pour l'amour constant que vous m'avez prodigué, vos encouragements et l'aide précieuse tout au long de mes études. Aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement mon respect, ma considération et mon amour pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et mon bien-être.

À mon cher grand-père, que Dieu ait son âme, qui m'a enseigné par ses actes bien avant ses paroles.

À mon fiancé Zahreddine, mon partenaire de vie et ami fidèle, toujours présent pour me soutenir et m'encourager dans les moments de joie et de tristesse.

À mes chers frères, Mohamed et Oussama, pour les moments précieux de notre enfance et pour tout le soutien inestimable que vous m'avez apporté. Vous m'avez toujours soutenu, réconforté et encouragé, que nos liens fraternels continuent à se renforcer.

À mes chères sœurs, Fatiha et Amina, pour leur affection sincère et leur soutien constant. Que Dieu les comble de bonheur, réalise tous leurs vœux et leur offre un avenir plein de succès.

À mon neveu Isaac, dont la présence est le plus beau cadeau qu'une sœur puisse recevoir. Tes petites mains, ton envie de découvrir le monde, ton enthousiasme, tes sourires et tes yeux pétillants sont uniques. Tu as apporté tant de bonheur à notre famille. Je t'aime profondément.

À mes enseignants, depuis l'école primaire jusqu'à l'université, qui m'ont non seulement transmis des connaissances académiques, mais aussi des valeurs telles que la morale, l'amour, la tolérance, le dévouement et la rigueur. Vous avez illuminé nos vies en nous permettant de voir le monde sous un nouvel angle.

À mes cousins(e) et mes amis(e), mes frères et sœurs de cœur, sur qui je peux toujours compter. En témoignage de notre amitié et des souvenirs précieux que nous avons partagés, je vous dédie ce travail et vous souhaite une vie remplie de santé et de bonheur.

À toute ma famille, aucune parole ne peut exprimer pleinement mon respect et ma gratitude pour votre soutien constant et vos encouragements. Je vous offre ce travail en reconnaissance de l'amour que vous me témoignez chaque jour et de votre bonté exceptionnelle. Que Dieu vous protège et vous comble de santé et de bonheur.

Soumia khaled

Dédicace

À moi-même, pour avoir cru en mes capacités, pour ne jamais avoir abandonné, et pour avoir travaillé dur chaque jour pour atteindre mes objectifs.

À mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leur amour, et leurs encouragements constants. Votre confiance en moi m'a donné la force de persévérer.

À mes frères, Chouaib et Zakaria, pour leur camaraderie et leur soutien. Vous avez été mes piliers et mes compagnons de route dans ce voyage.

À ma sœur Meriam, pour son amour et ses encouragements. Ta présence a été une source de réconfort et de motivation.

À toutes mes tantes et tous mes oncles, pour leur affection et leur soutien tout au long de mon parcours. Vous avez tous joué un rôle précieux dans ma réussite.

Merci à chacun d'entre vous pour votre soutien indéfectible et votre croyance en moi. Ce succès est autant le vôtre que le mien.

Douaibia Ahlem

Résumé :

Cette étude examine l'effet de l'anisotropie mécanique sur les propriétés de l'alliage d'aluminium AA2024-T3, largement utilisé dans l'industrie aéronautique. Des essais de traction uniaxiale et des analyses microstructurales ont été réalisés pour comprendre l'influence des directions de traction et le taux de déformation sur les propriétés mécaniques et la microstructure. Les résultats montrent une anisotropie significative des propriétés mécaniques, influencée par la direction de la sollicitation et la déformation appliquée. Les observations microstructurales révèlent des variations importantes dans la distribution et l'orientation des précipités, qui jouent un rôle clé dans le durcissement de l'alliage. Ces analyses fournissent des recommandations pour optimiser les procédés de fabrication et de traitement thermique afin d'améliorer les performances de l'alliage dans des applications industrielles.

Mot clé : Anisotropie, AA2024-T3, Microstructure, Essai de traction, Image j, distributions des grains.

Abstract:

This study examines the effect of mechanical anisotropy on the properties of the AA2024-T3 aluminum alloy, which is widely used in the aerospace industry. Uniaxial tensile tests and microstructural analyses were conducted to understand the influence of tensile directions and strain rates on the mechanical properties and microstructure. The results show significant anisotropy in the mechanical properties, influenced by the direction of loading and the applied strain. Microstructural observations reveal significant variations in the distribution and orientation of precipitates, which play a key role in the hardening of the alloy. These analyses provide recommendations for optimizing manufacturing and heat treatment processes to improve the alloy's performance in industrial applications.

Keyword: Anisotropy, AA2024-T3, Microstructure, Tensile test, ImageJ, Grain distributions.

المخلص

تبحث هذه الدراسة في تأثير تباين الخواص الميكانيكية على خصائص سبيكة الألومنيوم AA2024-T3 ، والتي تُستخدم بشكل واسع في صناعة الطيران. تم إجراء اختبارات الشد أحادي المحور وتحليلات البنية المجهرية لفهم تأثير اتجاهات الشد ومعدلات التشوه على الخصائص الميكانيكية والبنية المجهرية. أظهرت النتائج وجود تباين كبير في الخصائص الميكانيكية، يتأثر باتجاه التحميل والتشوه المطبق. كشفت الملاحظات المجهرية عن تفاوتات مهمة في توزيع وترتيب المترسبات، التي تلعب دوراً رئيسياً في تقسية السبيكة. توفر هذه التحليلات توصيات لتحسين عمليات التصنيع والمعالجة الحرارية بهدف تحسين أداء السبيكة في التطبيقات الصناعية ..

الكلمات المفتاحية: التباين الاتجاهي، AA2024-T3، البنية المجهرية، اختبار الشد، ImageJ، توزيع الحبوب

LISTE DES FIGURES

Figure II.1 (a) Diagramme d'équilibre du système d'alliages Al-Cu (b) Zoom de la partie Al-10%Cu du diagramme Al-Cu.....	09
Figure II.2 Diagramme d'équilibre du système d'alliages Al-Cu-Mg.....	09
Figure II.3 Schéma des différentes étapes du traitement T3.....	12
Figure III .1 Géométrie des éprouvettes de traction.....	17
Figure III .2 Prélèvement des échantillons de caractérisation en Traction uniaxiale.....	17
Figure III .3 Machine de traction MTS 100 KN.....	18
Figure III .4 microscope optique.....	19
Figure III.5 fenêtre de logiciel ImageJ.....	20
Figure IV.1 Courbes expérimentales d'écrouissage suivant les 03 directions.....	23
Figure IV.2 Coefficients de Lankford en fonction de 0°, 45° et 90°/DL.....	24
Figure IV.3 Distribution des tailles des grains.....	30

Liste des Tableaux

Tableau II.1 Composition chimique en % massique d'un alliage AA2024.....	8
Tableau II.2 Propriétés mécaniques de l'alliage d'AA2024-T3.....	8
Tableau II.3 Nomenclature et description des principaux traitements thermiques et mécaniques des alliages d'aluminium.....	12
Tableau III .1 Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024-T3 (% en poids).....	16
Tableau IV.1 Propriétés mécaniques de l'alliage AA2024-T3 selon les directions 0°, 45° et 90°/DL.....	23
Tableau IV.3 Les valeurs de coefficient de Lankford normalisées.....	24
Tableau IV.4 Tableau recapitulatif des Analyse Quantitative des Microstructures à Différents Niveaux de Déformation.....	25

Annotations

CRTI	Centre de Recherche des Technologies Industrielles
USTHB	Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene
ENSTI	École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie
$R_{0.2}$	Limites d'élasticité
R_m	Résistance maximale
S-Al ₂ CuMg	Phase stable de Al ₂ CuMg
SSS	Solution solide sursaturée
Zone GP	Zones de Guinier-Preston
GPB	Zones de Guinier-Preston-Bagaryatsky
θ -Al ₂ Cu	Phase stable de Al ₂ Cu
DL	direction

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Listes des abréviations	
Listes des tableaux	
Listes des figures	
Introduction Générale.....	01
Chapitre I : CRTI	
Introduction.....	04
I-1 Définition du CRTI.....	04
I-2 Les missions du CRTI.....	04
I-3 Motivation	04
I-4 Problématique.....	05
Chapitre II: Etat de l’art et recherche bibliographique	
Introduction.....	07
II -1Généralistes sur l’alliage d’aluminium AA2024.....	07
II-1-1Alliage d’aluminium série 2000	07
II -1-2Rôles des éléments d’addition.....	08
II-1-3Propriétés mécaniques de l’alliage AA2024.....	08
II-1-4Diagramme d’équilibre Al-Cu et Al-Cu-Mg.....	09
II-1-5 Séquences de la précipitation dans l’alliage AA2024.....	10
II-1-6 Traitements thermiques des alliages d'aluminium 2024.....	10
II-1-7 durcissement structural.....	11
II-2 Anisotropie.....	13
II-2-1 Causes et origine de l’anisotropie.....	13
II-2-2 coefficients d'anisotropie.....	13
II-2-3 Coefficient moyen d’anisotropie $r_m(\theta)$	14
Chapitre III : Choix de matériaux et techniques expérimentales	

Introduction.....	16
III-1 Choix de matériau.....	16
III -2 Déformation plastique à froid par essai de traction uniaxiale.....	16
III -2-1 Préparation des Échantillons.....	16
III -2-2 Essais de Traction.....	17
III -3 Observation Microstructurale.....	18
III -4 Traitement des microstructures par le logiciel ImageJ.....	20
III -4-1 Quelques définitions et principes de l'image J.....	20
Chapitre IV : Résultats et discussion.....	22
IV-1 résultats de caractérisation expérimentale des essais de traction.....	22
IV-1-1 Caractérisation mécanique de l'AA2024-T3.....	22
IV-1-2 Coefficient de Lankford $r(\theta)$	23
IV.2 Effet de l'anisotropie et du taux de déformation en traction uniaxiale sur les microstructures de l'alliage AA2024-T3.....	25
IV.2.1 Caractérisation microstructurale.....	25
IV.2.2 Analyse quantitative des microstructures.....	25
Conclusion Générale.....	31
Références bibliographique	

Introduction générale

Le développement et l'optimisation des matériaux utilisés dans des applications industrielles critiques, telles que l'industrie aéronautique, nécessitent une compréhension approfondie de leurs propriétés mécaniques et microstructurales. Les alliages d'aluminium, et en particulier l'alliage AA2024-T3, sont très prisés dans ce domaine en raison de leur légèreté, leur résistance mécanique élevée, et leur bonne tenue à la corrosion. Toutefois, comme tous les matériaux, les propriétés de ces alliages peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la direction de sollicitation et le taux de déformation appliqué. Cette variation directionnelle des propriétés, connue sous le nom d'anisotropie, peut avoir des impacts significatifs sur la performance et la durabilité des composants fabriqués à partir de ces matériaux.

L'anisotropie mécanique des alliages d'aluminium AA2024-T3 se manifeste par des différences notables dans la réponse du matériau lorsqu'il est soumis à des charges dans différentes directions. Cette étude vise à quantifier et à analyser ces différences à travers une série d'essais expérimentaux. Les essais de traction uniaxiale sont réalisés sur des échantillons découpés selon trois directions principales : 0° (direction de laminage), 45° (direction diagonale) et 90° (direction transverse), et soumis à différents taux de déformation (4%, 8%, et 10%). Les propriétés mécaniques telles que le module de Young, la limite élastique, la résistance maximale et l'allongement à la rupture sont déterminées pour chaque configuration.

En complément des essais de traction, des observations microstructurales sont effectuées pour étudier l'évolution de la microstructure de l'alliage en fonction des directions de traction et des taux de déformation. Ces observations permettent de comprendre les mécanismes à l'origine des variations des propriétés mécaniques, notamment la distribution et l'orientation des précipités, ainsi que la formation de microfissures.

En somme, cette étude contribue à une meilleure compréhension de l'anisotropie mécanique des alliages AA2024-T3, en mettant en lumière les relations complexes entre la direction de sollicitation, le taux de déformation et les propriétés microstructurales. Elle ouvre également la voie à des améliorations potentielles dans la conception et la fabrication de composants en alliages d'aluminium, particulièrement dans le secteur aéronautique où la fiabilité et la performance sont primordiales.

Composition du Manuscrit :

Le manuscrit est structuré de la manière suivante :

Chapitre 1 : Présentation du CRTI

Ce chapitre introduit le CRTI. Il couvre son historique, ses missions principales, et son rôle dans le développement des technologies industrielles en Algérie. La motivation derrière le choix de ce thème de recherche, centré sur l'anisotropie mécanique des alliages d'aluminium AA2024, est également expliquée.

Chapitre 2 : État de l'Art et Recherche Bibliographique

Ce chapitre fournit une revue de la littérature sur les alliages d'aluminium, en particulier l'alliage AA2024. Il aborde les propriétés mécaniques, les rôles des éléments d'addition, les traitements thermiques et les processus de durcissement structural. L'anisotropie des matériaux et ses causes sont également discutées, ainsi que les coefficients d'anisotropie utilisés pour mesurer cette propriété.

Chapitre 3 : Matériaux et Techniques Expérimentales

Ce chapitre décrit le choix du matériau (alliage AA2024-T3) et les techniques expérimentales utilisées pour l'étude. Il inclut la préparation des échantillons, les essais de traction uniaxiale, et les observations microstructurales. Le traitement des microstructures à l'aide du logiciel ImageJ est également expliqué.

Chapitre 4 : Résultats et Discussions

Ce chapitre présente et discute les résultats expérimentaux obtenus lors des essais de traction et de la caractérisation microstructurale. Les effets de l'anisotropie et du taux de déformation sur les microstructures de l'alliage AA2024-T3 sont analysés en détail, en mettant en évidence les variations des propriétés mécaniques selon les différentes directions et taux de déformation.

Conclusions et Perspectives

La conclusion résume les principales conclusions de l'étude et propose des recommandations pour optimiser les procédés de fabrication et de traitement thermique afin d'améliorer les performances de l'alliage AA2024-T3 dans des applications industrielles critiques

CHAPITRE I

Présentation du CRTI

CHAPITRE I : présentation du CRTI

Introduction

Le Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (CRTI) joue un rôle essentiel dans le développement des technologies industrielles en Algérie. Ce chapitre fournit un aperçu général du CRTI, en détaillant son historique, ses missions principales et son rôle dans l'innovation industrielle. La motivation pour l'étude de l'anisotropie mécanique des alliages d'aluminium 2024-T3 est également expliquée, ainsi que la problématique centrée sur l'effet de l'anisotropie sur les microstructures et les propriétés mécaniques de ces alliages.

I-1- Définition du CRTI

Le CRTI, ou Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle, a été créé pour répondre aux besoins croissants en technologies d'assemblage et de contrôle non destructif dans le secteur industriel algérien. Son histoire remonte à 1985 avec la création du Laboratoire de Soudage et de Contrôle Non Destructif. Au fil des années, il s'est développé pour inclure plusieurs unités et filiales spécialisées dans différents aspects des technologies industrielles. [8]

I-2- Les missions du CRTI

- Mener des projets de recherche pour le développement des technologies industrielles, en se concentrant sur les techniques d'assemblage, le contrôle non destructif et la corrosion.
- Organiser et promouvoir l'assurance qualité ainsi que le contrôle qualité des installations industrielles.
- Élaborer et standardiser les normes relatives aux technologies d'assemblage et de contrôle non destructif.
- Perfectionner et utiliser les équipements de soudage et de contrôle non destructif.
- Réaliser des recherches appliquées dans la sidérurgie, y compris l'élaboration et la caractérisation des aciers et alliages spéciaux.
- Maîtriser et développer la mécatronique et la maintenance appliquée aux installations industrielles.
- Développer des recherches sur les matériaux non métalliques, tels que les composites et les céramiques.
- Explorer les technologies de traitement de surface des matériaux et leurs applications.
- Assurer le transfert de savoir-faire et soutenir la mise à niveau du secteur industriel. [8]

I-3- Motivation

La motivation derrière le choix de ce thème de recherche, "Analyse expérimentale et simulation de l'effet d'anisotropie mécanique sur les alliages d'aluminium 2024", repose sur plusieurs facteurs essentiels :

- **Utilisation dans l'industrie aéronautique** : Les alliages d'aluminium 2024 sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur légèreté.
- **Optimisation des performances** : Comprendre l'anisotropie mécanique de ces alliages est crucial pour optimiser leur performance dans des applications critiques.
- **Fiabilité et durabilité** : L'anisotropie mécanique peut avoir un impact significatif sur la fiabilité et la durabilité des composants fabriqués à partir de ces alliages. En étudiant cet effet, il est possible de développer des méthodes pour améliorer les procédés de fabrication et de traitement thermique, conduisant ainsi à des gains substantiels en termes de performance et de sécurité.
- **Approche intégrée** : La combinaison de méthodes expérimentales telles que les essais de traction, la microscopie optique, et la nanoindentation avec des simulations permet d'obtenir une compréhension approfondie et multifacette des matériaux étudiés. Cette approche intégrée est essentielle pour développer des modèles prédictifs fiables qui peuvent être utilisés pour concevoir des matériaux et des composants de meilleure qualité.

I-4- Problématique

L'anisotropie mécanique des alliages d'aluminium, particulièrement l'alliage 2024-T3, joue un rôle crucial dans leurs performances sous contraintes mécaniques. Cependant, la compréhension complète des effets de cette anisotropie sur la microstructure et les propriétés mécaniques locales restent limitée. Comment les différentes directions de déformation (0° , 45° , 90°) et les taux de déformation (4%, 8%, 10%) au cours d'un essai de traction influencent-ils les caractéristiques microstructurales et les propriétés mécaniques locales de l'alliage 2024-T3, et comment ces influences peuvent-elles être modélisées et visualisées efficacement en 3D pour optimiser les applications industrielles ?

CHAPITRE II

Etat de l'art et recherche bibliographique

CHAPITRE II : Etat de l'art et recherche bibliographique

Introduction

Les alliages d'aluminium sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique en raison de leur légèreté et de leur excellente résistance mécanique. Ils sont essentiels pour la fabrication de pièces structurelles critiques telles que les ailes et les fuselages.

Ce Chapitre présente une revue de la littérature sur les alliages d'aluminium, en particulier l'alliage AA2024. Il couvre leur composition, les rôles des éléments d'addition, les propriétés mécaniques, les traitements thermiques, les séquences de précipitation, et l'anisotropie.

II-1- Généralistes sur l'alliage d'aluminium AA2024

II -1-1- Alliage d'aluminium série 2000

Les alliages d'aluminium de la série 2000 sont des alliages structuraux présentant d'excellentes propriétés mécaniques grâce à l'addition de cuivre comme principal élément d'alliage. Leur teneur en cuivre varie généralement de 2 à 8% en masse, conférant à ces alliages une résistance mécanique élevée qui peut encore être améliorée par traitements thermiques. Au-delà de leurs performances mécaniques remarquables, les alliages 2000 se distinguent également par leur bonne tenue à la corrosion dans de nombreux environnements ainsi que par leurs bonnes aptitudes à la mise en forme telles que la coulabilité et la soudabilité. Ces caractéristiques en font des alliages de choix pour des applications structurelles exigeantes dans des domaines variés comme l'aéronautique, l'automobile ou encore les équipements sous pression. Parmi les nuances les plus répandues de cette série figurent le 2014, le 2017, le 2024 et le 2219.

Parmi la série 2000 des alliages d'aluminium, la nuance 2024(AA2024) se distingue par ses performances mécaniques de premier ordre qui lui valent son utilisation privilégiée dans les secteurs les plus exigeants en termes de résistance, à l'instar de l'aéronautique. Son excellente résistance mécanique en fait en effet un matériau de choix pour la conception de pièces structurelles critiques telles que les ailes, les fuselages, les réservoirs ou les trains d'atterrissage. Faisant partie de la famille des alliages 2000 dont les éléments d'alliage principaux sont le cuivre, le magnésium et le manganèse (composition détaillée au Tableau II.1), le 2024 doit ses remarquables propriétés au durcissement structural apporté par des précipités nanométriques formés par ces éléments d'addition. La majeure partie de la résistance mécanique élevée de ces alliages provient de la présence de ces précipités de taille nanométrique finement dispersés dans la matrice d'aluminium. [1]

Tableau II.1 Composition chimique en % massique d'un alliage AA2024

Elément	Cu	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Ti	Zn	AL
Min	3.8	1.2	0.3	-	-	-	-	-	90.7
Max	4.9	1.8	0.9	0.5	0.1	0.5	0.5	0.25	93.7

II -1-2- Rôles des éléments d'addition

Dans l'alliage d'aluminium AA2024, les éléments d'addition jouent des rôles cruciaux dans le développement de ses propriétés mécaniques remarquables :

- **Le cuivre** : Il est essentiel dans l'alliage 2024, améliorant significativement la résistance et la dureté. Cependant, des quantités excessives peuvent réduire la ductilité et augmenter la sensibilité à la fissuration à chaud, nécessitant une distribution uniforme pour éviter ces problèmes. Il retarde la recristallisation et peut réduire la résistance à la corrosion, nécessitant parfois un revêtement protecteur. [4]
- **Le magnésium** : Il contribue au durcissement de l'alliage et à sa résistance à la corrosion, en plus de faciliter les opérations de soudage. [4]
- **Le manganèse** : Il augmente la tenue mécanique à haute température et la résistance au fluage en formant des précipités intermétalliques. Il compense également l'effet fragilisant du fer résiduel présent dans l'alliage. [4]

II -1-3- Propriétés mécaniques de l'alliage AA2024

L'alliage d'aluminium 2024 se distingue par un ensemble remarquable de propriétés mécaniques qui en font un matériau incontournable pour les applications structurales exigeantes en termes de résistance mécanique et de légèreté. Dans le cas des structures aéronautiques, les caractéristiques prépondérantes de l'alliage 2024 sont son Module d'Young (E), sa limite d'élasticité ($R_{0.2}$), sa résistance maximale (R_m), son allongement (A) et, sa ténacité, ainsi que ses Résistances à la fatigue et au fluage. Le Tableau I.2 répertorie les principales caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium 2024 déterminées par essais de traction à température ambiante. [1]

Tableau II.2 Propriétés mécaniques de l'alliage d'AA2024-T3

E (GPa)	$R_{0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
73	345	485	18

Les données du Tableau I.2 sont des valeurs de référence indicatives, les propriétés mécaniques réelles de l'alliage 2024 étant fortement dépendantes de ses caractéristiques microstructurales

finement liées aux conditions de mise en œuvre, notamment la population de précipités durcissants et la texture cristalline développées.

II -1-4- Diagramme d'équilibre Al-Cu et Al-Cu-Mg

Les diagrammes de phases Al-Cu et Al-Cu-Mg constituent des représentations graphiques essentielles pour appréhender les liens existant entre la composition chimique, la température et les phases en présence au sein des alliages aluminium-cuivre et aluminium-cuivre-magnésium. La figure I.1 illustre le diagramme d'équilibre des phases binaire pour le système Al-Cu, tandis que la figure I.2 dépeint le diagramme d'équilibre ternaire pour l'alliage Al-Cu-Mg. [1]

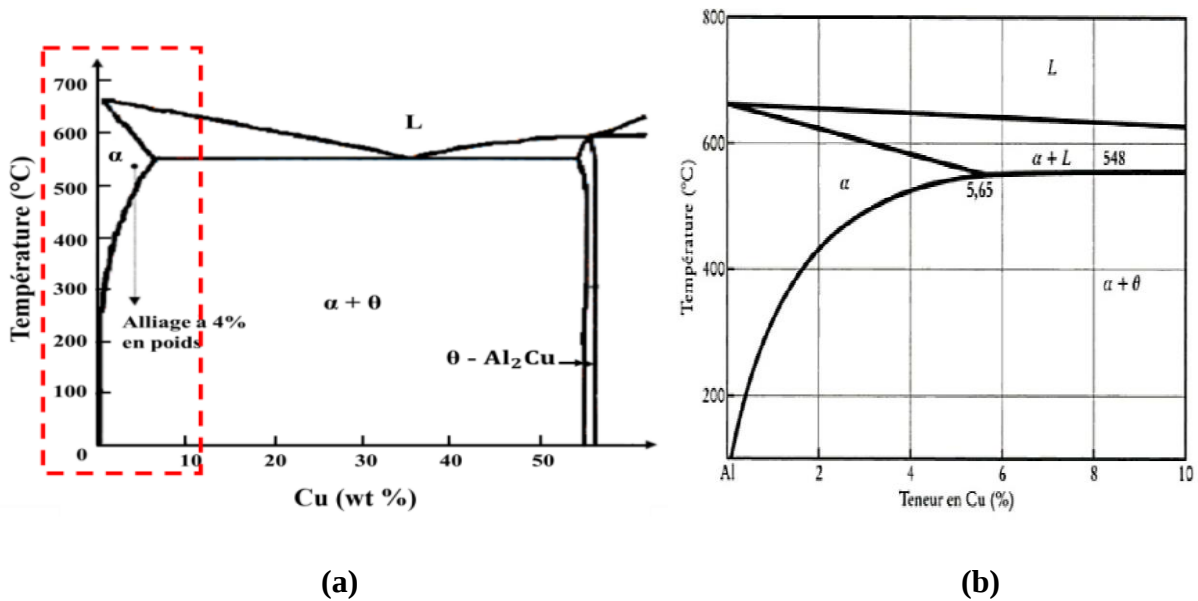


Figure II.1 (a) Diagramme d'équilibre du système d'alliages Al-Cu **(b)** Zoom de la partie Al-10%Cu du diagramme Al-Cu

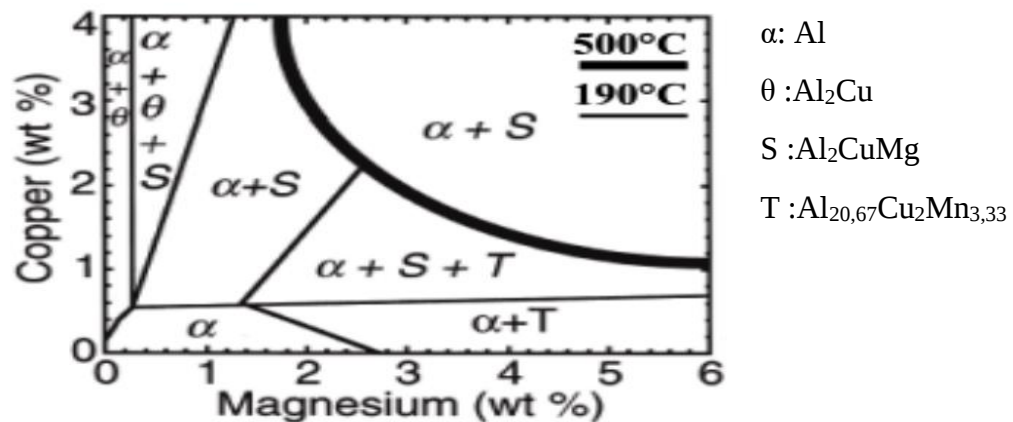


Figure II.2 Diagramme d'équilibre du système d'alliages Al-Cu-Mg

II -1-5- Séquences de la précipitation dans l'alliage AA2024

Ainsi qu'il a été mentionné précédemment, le cuivre est incorporé à l'aluminium dans le but de former une phase durcissante, permettant d'améliorer les propriétés mécaniques résultantes. De plus, l'ajout de magnésium aux alliages Al-Cu entraîne également un gain significatif des caractéristiques mécaniques lors de l'étape de vieillissement structural. L'introduction de silicium et de manganèse favorise quant à elle la formation de composés quaternaires. Dispersés au sein de la matrice, ces derniers contribuent à renforcer davantage les propriétés de l'alliage. Ainsi, suite au traitement de durcissement structural, l'alliage 2024 T3 présente une séquence de Co précipitation mixte impliquant différents types de phases durcissantes. [3]

SSS $\rightarrow$ zones GP $\rightarrow$ Θ'' $\rightarrow$ Θ' $\rightarrow$ Θ $\rightarrow$ Al_2Cu

SSS $\rightarrow$ zones GPB $\rightarrow$ S'' $\rightarrow$ S' $\rightarrow$ S (Al_2CuMg)

Les zones GP, ou zones de Guinier-Preston, sont constituées de disques plans parallèles aux plans (100) de la matrice d'aluminium. La phase Θ'' est une phase cohérente avec la matrice qui précipite sous forme de plaquettes parallèles aux plans {100}. La phase Θ' , semi-cohérente avec la matrice, précipite également en plaquettes. Le composé d'équilibre Al_2Cu , connu sous le nom de phase Θ , est totalement incohérent avec la matrice. [3]

L'alliage tend naturellement vers l'état d'équilibre, mais selon le traitement de revenu appliqué, la décomposition de la solution solide sursaturée sera plus ou moins complexe. Pour des températures inférieures à 200°C, cette décomposition s'arrête aux phases Θ'' ou Θ' . Au-delà, la phase Θ' peut se former directement. Un vieillissement à température ambiante ne produit que les zones GP. [2]

II -1-6- Traitements thermiques des alliages d'aluminium 2024

Les traitements thermiques des alliages d'aluminium 2024 (Al-Cu-Mg) visent à optimiser leurs propriétés mécaniques, notamment leur résistance et leur dureté, en contrôlant la précipitation des phases durcissantes. [2] Les différentes étapes d'un traitement thermique sont :

1. Mise en solution : Cette étape consiste à porter l'alliage à une température élevée (typiquement 490-500°C) pour dissoudre les phases durcissantes présentes et obtenir une solution solide sursaturée. Cette opération est suivie d'une trempe rapide, généralement à l'eau, pour figer la solution solide à température ambiante.

2. Maturation : Après la trempe, l'alliage subit un revenu naturel ou une maturation à température ambiante pendant plusieurs jours. Cela permet la formation de zones de Guinier-Preston (zones GP) qui sont des amas d'atomes de cuivre et de magnésium dans la matrice d'aluminium, constituant les premières étapes du durcissement structural.
3. Revenu : Un traitement de revenu est ensuite réalisé en portant l'alliage à une température intermédiaire (généralement entre 120 et 200°C) pendant plusieurs heures. Ceci favorise la précipitation successive de phases de transition semi-cohérentes (S'' et S') puis incohérentes (S - Al₂CuMg) dans la matrice, responsables du durcissement maximal de l'alliage.
4. Sur-revenu (optionnel) : Dans certains cas, un sur-revenu à plus haute température (autour de 200°C) peut être appliqué pour obtenir un compromis entre résistance mécanique et ductilité en faisant croître les précipités durcissant

La présence de magnésium induit la précipitation de nouvelles phases. Les zones GPB (Guinier-Preston-Bagaryatsky), différenciées des zones GP, correspondent à un arrangement à courte distance d'atomes de cuivre et de magnésium. Les phases S'' et S', respectivement cohérente et semi-cohérente, sont des phases transitoires. Enfin, Al₂CuMg ou phase S, incohérente avec la matrice, est la phase d'équilibre précipitant sous forme de plaquettes. [2]

II -1-7 -Durcissement structural

Le durcissement structural dans l'alliage d'aluminium 2024-T3 est un processus clé qui permet d'améliorer ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance à la traction et à la fatigue.

L'alliage d'aluminium 2024, un composant des alliages à durcissement structural, subit un processus de mise en forme suivi de traitements de durcissement structural pour favoriser la précipitation des principaux éléments d'alliage, notamment le cuivre et le magnésium, afin d'améliorer ses propriétés mécaniques, tels que sa résistance à la traction et à la fatigue. Ces traitements, thermiques et/ou mécaniques, sont essentiels pour moduler l'histoire thermomécanique de l'alliage. Une nomenclature, débutant par la lettre "T" suivie d'un chiffre, est utilisée pour qualifier ces traitements, comme indiqué dans le **Tableau II-3**. Parmi ces traitements, le T3 est largement employé pour renforcer l'alliage d'aluminium 2024. Il comprend quatre étapes décrites dans le **Tableau II-3** et la figure II-3. [3]

Tableau II.3 Nomenclature et description des principaux traitements thermiques et mécaniques des alliages d'aluminium

Désignation	Série de traitements thermiques et mécaniques
T3	Mise en solution-Trempe-Écrouissage-Maturation
T4	Mise en solution-Trempe-Maturation
T6	Mise en solution-trempe-Revenu
T7	Mise en solution-Trempe-Sur revenu
T8	Mise en solution-Trempe-Écrouissage-Revenu
T9	Mise en solution-Trempe-Revenu-Écrouissage

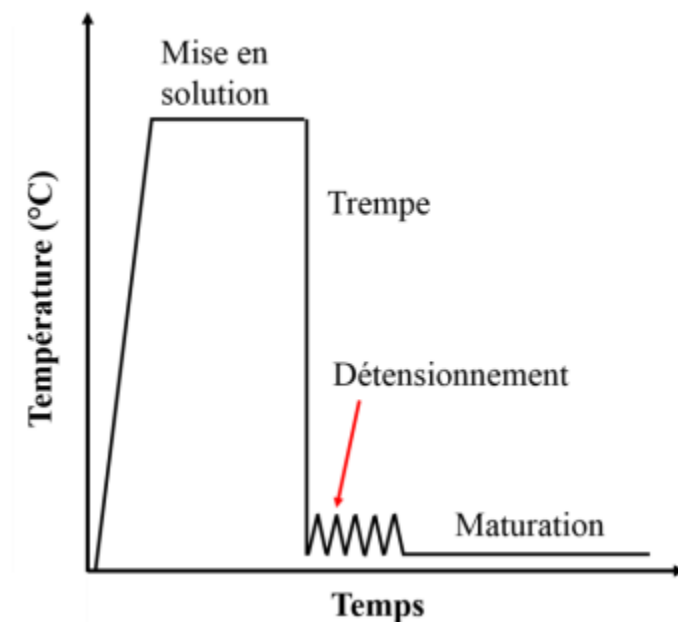


Figure II.3 Schéma des différentes étapes du traitement T3

Le processus de durcissement structural des alliages AA2024 conduit à la formation de précipités lors de la trempe à l'eau ou du traitement de maturation. Outre ces précipités, la microstructure de ces alliages présente d'autres classes de particules, telles que les particules intermétalliques grossières et les dispersoïdes, caractérisées par leur taille et leur formation distinctes. Ces particules intermétalliques, émergentes lors de la fusion ou de la solidification,

restent peu influencées par les traitements thermiques, mais peuvent être fragmentées, influençant ainsi la structure de l'alliage lors de déformations ultérieures. Les dispersoïdes, quant à eux, se forment pendant les traitements d'homogénéisation, mais leur taille et leur distribution peuvent être ajustées par des traitements thermomécaniques. Ces phases de seconde phase jouent un rôle crucial dans les propriétés mécaniques des alliages AA2024-T3, influant significativement sur leur processus de mise en forme. [3]

II -2- Anisotropie de comportement

L'anisotropie se caractérise par des variations des propriétés mécaniques et physiques en fonction de la direction de sollicitation. [6]

II -2-1- Causes et origine de l'anisotropie

Parmi les causes de l'anisotropie, on cite :

- L'hétérogénéité chimique, plus prononcée dans de grandes pièces.
- La distribution orientée d'inclusions et de fissures.
- Les contraintes internes post-déformation, trempe, ou volontairement induites.
- La forme des grains non-équiaxe, affectant les propriétés liées aux joints de grains.
- La répartition des défauts cristallins. [6]

II -2-2- Coefficients d'anisotropie

Pour mesurer l'anisotropie, on utilise un coefficient exprimant la déformation en largeur par rapport à celle en épaisseur. [6]

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{l_f - l_0}{l_0} \\ \varepsilon_2 = \frac{b_f - b_0}{b_0} \\ \varepsilon_3 = \frac{e_f - e_0}{e_0} \\ r(\theta) = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} = - \frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \end{array} \right.$$

Avec :

ϵ_3 : Déformation en épaisseur ;

ϵ_2 : Déformation en largeur.

II-2-3- Coefficient moyen d'anisotropie $r_m(\theta)$: [6]

Le coefficient moyen d'anisotropie se calcule en considérant plusieurs directions,

$$r(\Theta) = [r(0) + 2r(45) + r(90)] / 4$$

CHAPITRE III

Matériau et techniques expérimentales

Chapitre III : Matériau et techniques expérimentales

Introduction

Pour comprendre l'effet de l'anisotropie sur les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium AA2024-T3, il est essentiel d'utiliser des techniques expérimentales rigoureuses et adaptées. Ce chapitre décrit les matériaux et les techniques expérimentales utilisés pour analyser l'alliage d'aluminium AA2024-T3. Il explique le choix de ce matériau et détaille les méthodes de préparation métallographique, les essais de traction uniaxiale, et l'observation microstructurale à l'aide de microscopes optiques et électroniques. La caractérisation mécanique par nanoindentation et le traitement des microstructures avec le logiciel ImageJ sont également abordés. Ces méthodologies fournissent une base solide pour l'analyse des résultats présentés dans le chapitre suivant.

III -1- Choix de matériau

La tôle d'alliage d'aluminium AA2024-T3 considérée dans cette étude est fournie par l'entreprise de construction aéronautique d'Oran en Algérie destinée à la fabrication des ailes de l'avion Zlin-142 (ECA). Le matériau est sous forme de plaques d'environ 0.6 mm d'épaisseur dans l'état brut de laminage à froid. La composition chimique nominale de l'alliage est répertoriée dans le Tableau II.1.

Tableau III .1 Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024-T3 (% en poids)

Elément	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Al
Wt(%)	3.98	1.23	0.283	0.318	0.224	0.0340	0.0025	Balance

III -2- Déformation plastique à froid par essai de traction uniaxiale

III -2-1 -Préparation des Échantillons

Les échantillons d'alliage d'aluminium 2024 ont été découpés conformément à la norme EN 10002-1 tel qu'elle est représentée sur **la Figure III-1**, qui spécifie les dimensions et la forme des éprouvettes pour les essais de traction. La découpe des échantillons a été réalisée chez l'entreprise des Tracteurs Agricoles ETRAG en Algérie, utilisant une machine de découpe laser "OMADA LCG 3015AJ". Cette machine assure une découpe précise et propre, minimisant les défauts de bord qui pourraient influencer les résultats des essais de traction.

Pour quantifier les paramètres mécaniques répartis dans le plan de la tôle, des prélèvements ont été effectués à partir d'une tôle brute selon trois directions principales : 0° , 45° et 90° par rapport à la direction de référence (DL), comme illustré dans la Figure III-2. Pour quantifier les paramètres microstructuraux en fonction de la direction et du taux de déformation, trois taux de déformation (4%, 8%, et 10%) ont été appliqués pour chaque orientation.

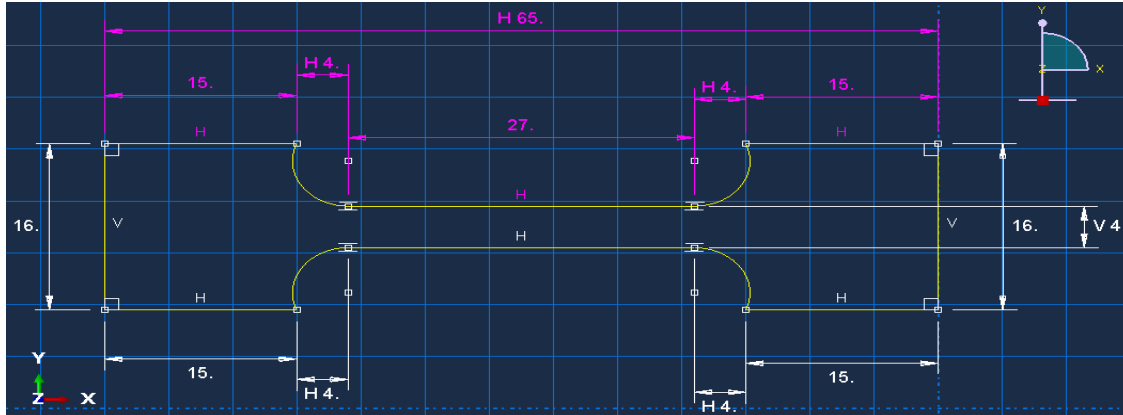


Figure III .1 Géométrie des éprouvettes de traction

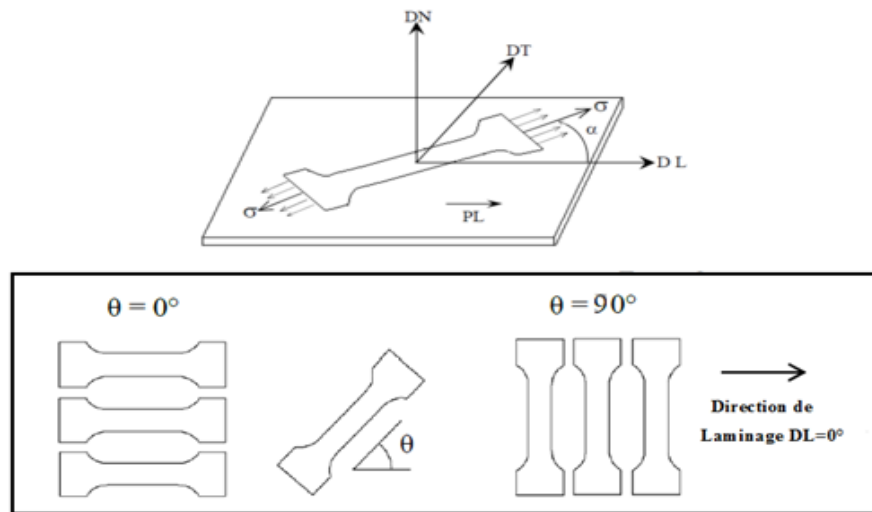


Figure III .2 Prélèvement des échantillons de caractérisation en Traction uniaxiale

III -2-2- Essais de Traction

Les essais de traction ont été réalisés au CRTI Cheraga, utilisant une machine de traction MTS® de 100 kN illustré dans la Figure III -3. Les essais ont été effectués à température ambiante pour reproduire les conditions standards de fonctionnement et à une vitesse de déformation de

5.10^{-4} s^{-1} . Les essais ont été conduits jusqu'à la rupture des échantillons, permettant de déterminer les propriétés mécaniques suivantes :

- Limite d'élasticité (R_e)
- Résistance à la traction (R_m)
- Allongement à rupture ($A\%$)



Figure III.3 Machine de traction MTS 100 KN

III -3- Observation Microstructurale

Après les essais de traction, les échantillons ont été préparés pour l'observation microstructurale. Les sections transversales des échantillons ont été polies et attaquées chimiquement pour révéler la microstructure. La préparation a suivi les étapes suivantes :

1. **Découpage** : Les échantillons ont été découpés en petites sections transversales à l'aide d'une scie de précision pour minimiser les déformations induites par la découpe.

2. **Enrobage** : Les sections découpées ont été enrobées dans une résine époxy pour faciliter la manipulation et assurer une surface uniforme pour le polissage.
3. **Polissage** : Les échantillons enrobés ont été polis en plusieurs étapes :
 - **Polissage grossier** : Utilisation de papiers abrasifs de grain décroissant (de 8000 à 4000).
 - **Polissage fin** : Utilisation de suspensions diamantées (0,3µm) pour obtenir une surface parfaitement lisse.
4. **Attaque Chimique** : Les échantillons polis ont été attaqués chimiquement avec la solution de Keller pour révéler la microstructure. La solution de Keller est composée de :
 - 95 ml d'eau distillée
 - 2,5 ml d'acide nitrique (HNO_3)
 - 1,5 ml d'acide chlorhydrique (HCl)
 - 1 ml d'acide fluorhydrique (HF)

Les échantillons ont été immergés dans la solution de Keller environ 20 à 45 secondes, puis rincés à l'eau distillée et séchés à l'air.

5. **Observation** : Les échantillons attaqués ont été observés à l'aide d'un microscope optique nikon eclipse LV100ND à l'ENSTI Annaba (**figure III -4**), avec des grossissements allant de 100x à 1000x. Les images des microstructures ont été capturées à un grossissement de 200x et 500x offrant un bon équilibre entre le champ de vision et la résolution des détails microstructuraux. Les micrographies exposées dans le chapitre IV.



Figure III .4 Microscope optique

III -4- Traitement des microstructures par le logiciel ImageJ

Les images capturées ont été analysées quantitativement avec le logiciel ImageJ pour déterminer la **taille des grains** mesurée en micromètres (μm) pour quantifier la granulométrie.

III -4-1-Quelques définitions et principes de l'image J

ImageJ est un logiciel de traitement d'images et d'analyse scientifique, apprécié pour ses fonctions puissantes et faciles d'accès. Utilisé dans divers domaines scientifiques, il est particulièrement employé en imagerie biomédicale. Déposé dans le domaine public, ImageJ permet la création simple de plugins. Sa fenêtre contient une barre de menu standard, une barre d'outils, et une barre d'état affichant les coordonnées et caractéristiques des pixels ainsi que l'avancement des tâches en cours.

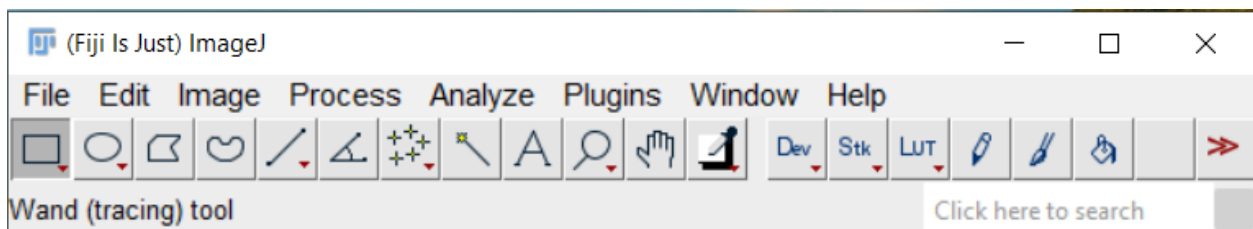


Figure III .5 Fenêtre de logiciel ImageJ

Chapitre IV

Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV-1- résultats de caractérisation expérimentale des essais de traction

IV-1-1- Caractérisation mécanique de l'AA2024-T3

Les courbes d'écrouissage expérimentales dans les 03 directions et dans la configuration rationnelle sont présentées dans (**Figure IV.1**) ci-dessous. Le passage entre les 2 présentations est assuré par les formules suivantes :

$$\varepsilon_r = \ln(\varepsilon_c + 1)$$

$$\sigma_r = \sigma_c(\varepsilon_c + 1)$$

Les indices 'c' et 'r' désignent les notations 'Conventionnelle' et 'Rationnelle' respectivement.

Le palier élastique et le palier plastique. Les paramètres mécaniques des essais de traction réalisés sur les éprouvettes prélevées dans les directions 0°, 45°, et 90° par rapport à la direction de laminage sont résumés dans le Tableau IV.1.

Les paramètres mécaniques obtenus à partir des essais de traction réalisés sur les éprouvettes prélevées dans les trois directions (0°, 45° et 90° par rapport à la direction de laminage) sont présentés dans le Tableau IV.1. Les résultats sont comparables à ceux trouvés dans la littérature [1].

D'après les résultats du Tableau IV.1, le module de Young montre une variation très faible en fonction des trois angles de prélèvement des éprouvettes dans le plan de la tôle. Cette variation peut être attribuée à l'incertitude expérimentale, comme le glissement des éprouvettes pendant les essais de traction. On peut donc conclure que le module de Young est constant, de même pour la limite élastique. En conséquence, le module de Young et la limite élastique sont indépendants de la direction, indiquant que le comportement élastique de l'AA2024-T3 est isotrope.

En revanche, la courbe de traction de l'éprouvette prélevée selon la direction de laminage présente un allongement à la rupture plus faible comparé à celle des éprouvettes prélevées selon les directions 45° et 90° par rapport à DL. Cela est dû à des propriétés microstructurales telles que la présence de précipités, l'hétérogénéité de l'écrouissage et la microtexture. Le palier plastique des trois courbes de traction évolue par ordre décroissant comme suit : 0°, 45°, puis 90° par rapport à DL. Ces résultats indiquent un caractère anisotrope du matériau, car le seuil de la plasticité dépend de la direction de sollicitation.

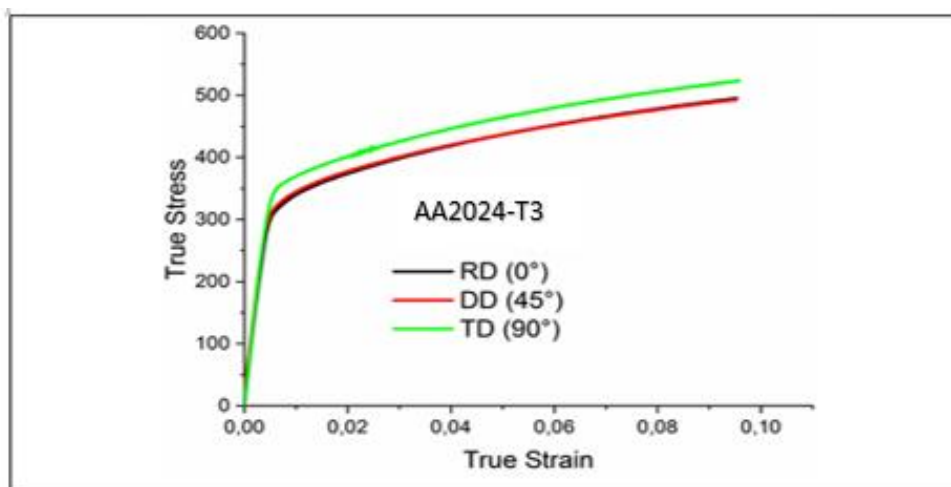


Figure IV.1 Courbes expérimentales d'écrouissage suivant les 03 directions

Tableau IV.1 Propriétés mécaniques de l'alliage AA2024-T3 selon les directions 0°, 45° et 90°/DL

Direction (°/DL)	Module de Young <i>E</i> (GPa)	Limite élastique <i>Re0.2%</i> (MPa)	Résistance maximale <i>Rm</i> (MPa)	Déformation à la rupture <i>A</i> %
0	75	324	488	13,6
45	79	319	483	14,3
90	76	312	491	15,5

IV-1-2- Coefficient de Lankford $r(\theta)$

L'anisotropie est caractérisée par le coefficient de Lankford (R), qui mesure le degré d'emboutissabilité d'un matériau.

Lors des essais de traction, les coefficients de Lankford ont été déterminés pour chaque déformation dans les directions 0° , 45° , et 90° par rapport à la direction de laminage (DL). La Figure IV.2 illustre la variation des coefficients de Lankford dans ces directions.

Les résultats montrent que le coefficient de Lankford atteint sa valeur maximale à 45° /DL et son minimum à 90° /DL. Dans les directions 0° et 90° /DL, les valeurs de R sont inférieures à 1, indiquant que la déformation en largeur est plus faible qu'en épaisseur. En revanche, à 45° /DL, la valeur de R est supérieure à 1, signifiant que la déformation en largeur est plus importante qu'en épaisseur. Ces résultats confirment que la tôle AA2024-T3 présente une anisotropie plastique marquée dans le plan de la tôle.

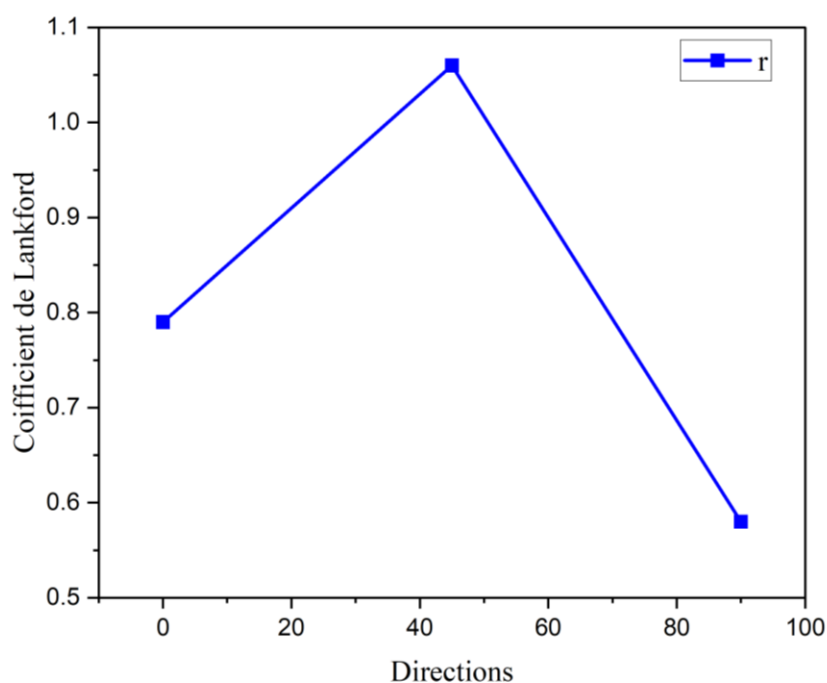


Figure IV.2 Coefficients de Lankford en fonction de 0° , 45° et 90° /DL

Tableau IV.2 Les coefficients de l'anisotropie de Lankford

r_0	r_{45}	r_{90}
0.78	1.06	0.58

Tableau IV.3 Les valeurs de coefficient de Lankford normalisées

r_0/r_0	r_{45}/r_0	r_{90}/r_0
1	1.36	0.74

IV-2- Effet de l'anisotropie et du taux de déformation en traction uniaxiale sur les microstructures de l'alliage AA2024-T3

IV-2-1- Caractérisation microstructurale

L'étude des microstructures de l'alliage AA2024-T3 illustré dans le tableau IV.4 montre des comportements anisotropes distincts selon la direction de traction (0°, 45°, et 90°) et le taux de déformation (4%, 8%, et 10%). En direction de laminage (0°), les grains sont allongés (texture morphologique) avec une distribution uniforme des précipités, mais à des taux de déformation élevés (10%), des microfissures peuvent apparaître. La direction diagonale (45°) présente une anisotropie marquée. Comme nous l'avons discuté précédemment, avec des déformations significatives des grains et des précipités, surtout à des taux élevés. En direction transverse (90°), les grains et précipités sont alignés perpendiculairement à la traction, qui se traduit par une anisotropie de comportement. À 4% de déformation, les grains subissent une déformation légère à modérée avec des précipités homogènes. À 8%, la déformation est plus prononcée, les précipités se coalescent, augmentant les contraintes locales. À 10%, les grains sont plus au moins allongés, les précipités grossissent, entraînant des microfissures et une perte de cohésion structurale.

IV-2-2- Analyse quantitative des microstructures

Des analyses quantitatives des microstructures ont été faites à l'aide du logiciel « Image J » sur une série de cartographies, et ce pour les différents états déformés. L'objectif est d'analyser quantitativement la taille des grains vis-à-vis des états déformés. Pour une meilleure lecture, les résultats ont été présentés sous forme d'histogrammes (Tableau IV.4).

Interprétation

En se basant sur des études ultérieures au sein de notre équipe de recherche, nous avons pu déterminer la nature des phases existantes. [1]

La distribution des phases pour les différents taux déformations montre la nature anisotrope du matériau. Les principales observations sont

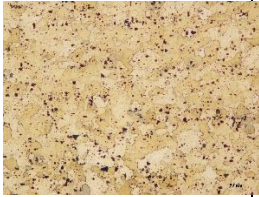
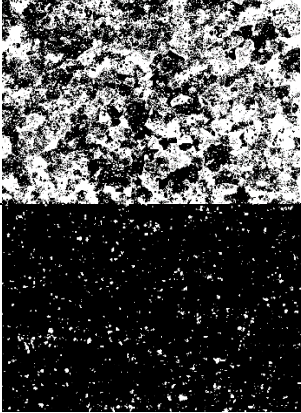
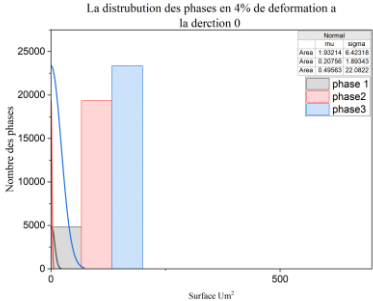
- **Augmentation de la Déformation :**

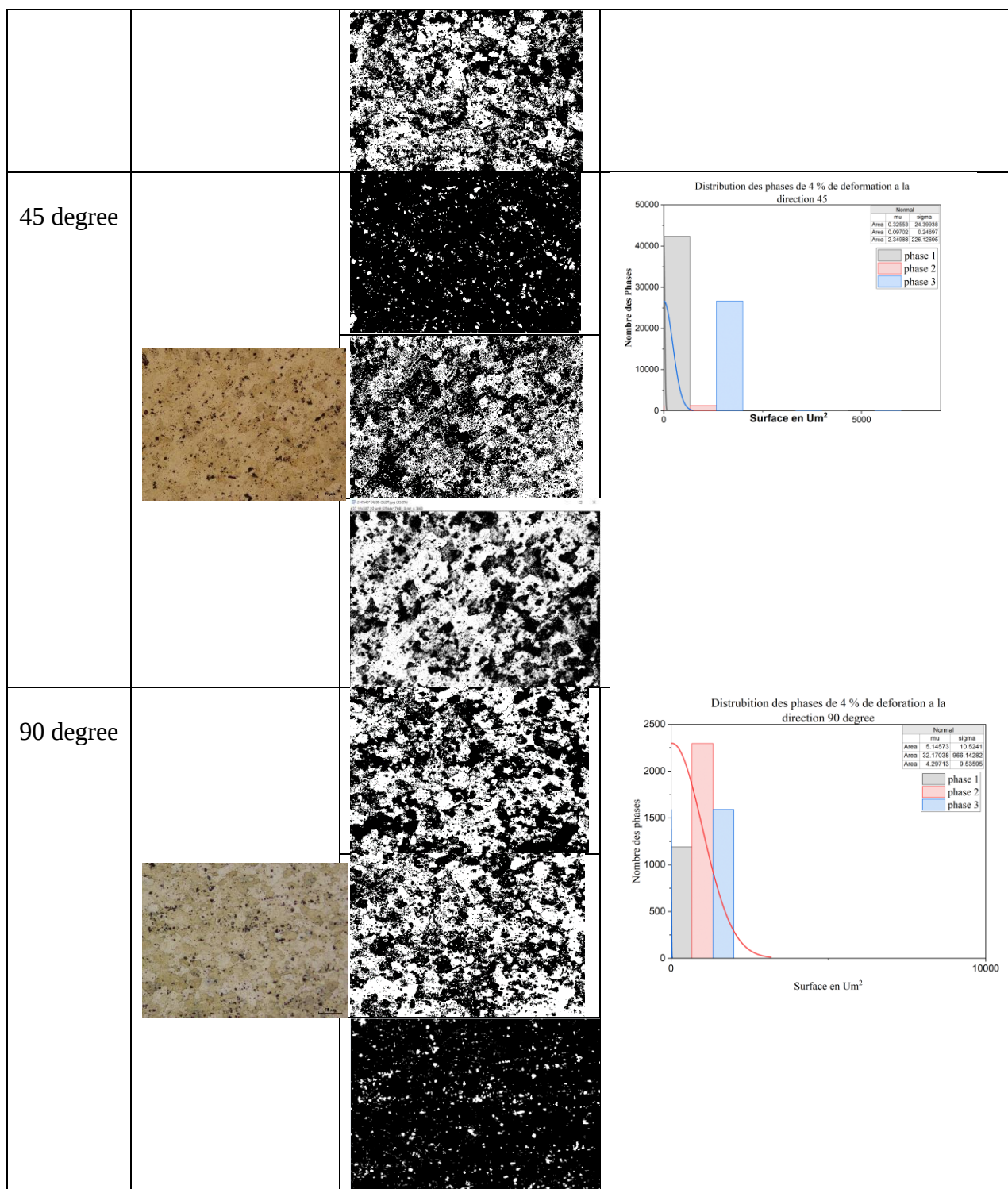
- À mesure que la déformation augmente de 4% à 10%, les statistiques de nombre de phases tendent à diminuer légèrement, mais les surfaces moyennes des phases augmentent.
- Matrice Al (Phase 1) est généralement la plus fréquente à chaque niveau de déformation, en particulier à 0 et 45 degrés, avec des surfaces de taille parfois petites à moyennes. Cela peut être expliqué par la présence de grains de tailles différentes.
- Al_2Cu (Phase 2) et Al_2CuMg (Phase 3) apparaissent facilement avec l'augmentation de la déformation, ce qui peut être expliqué par la déformation des grains de la matrice Al.

- **Influence de la Direction :**

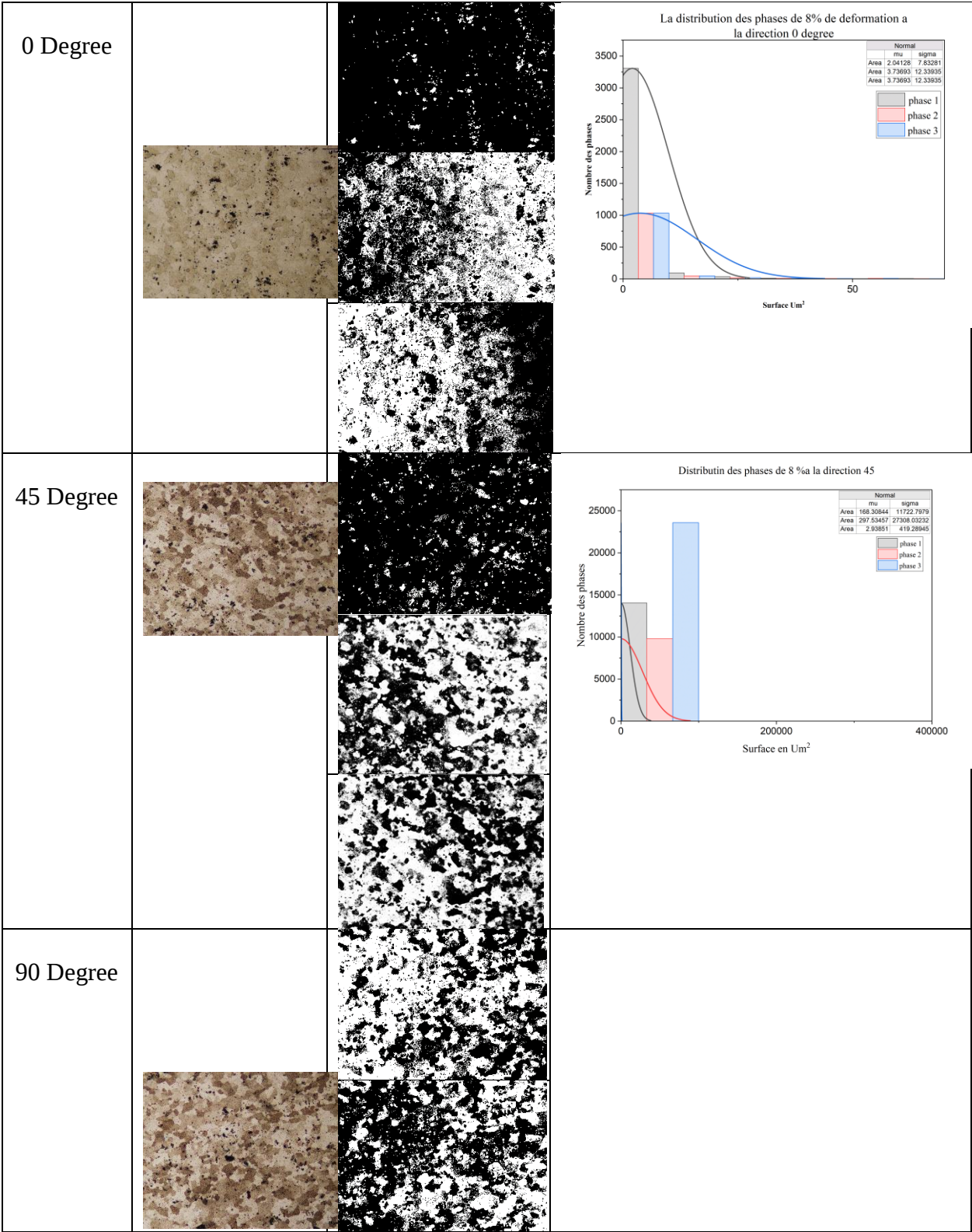
- À 0 degrés, les phases Al_2Cu , $\text{Al}_2\text{Cu Mg}$, ont tendance à avoir des surfaces plus petites, avec Phase 1 dominant en nombre.
- À 45 degrés, Phase 1 reste prédominante avec de nombreuses petites surfaces, tandis que Phase 3, bien que moins fréquente, présente des surfaces significativement plus grandes.
- À 90 degrés, les phases montrent une augmentation de la surface moyenne avec l'augmentation de la déformation, Phase 3 ayant les plus grandes surfaces.

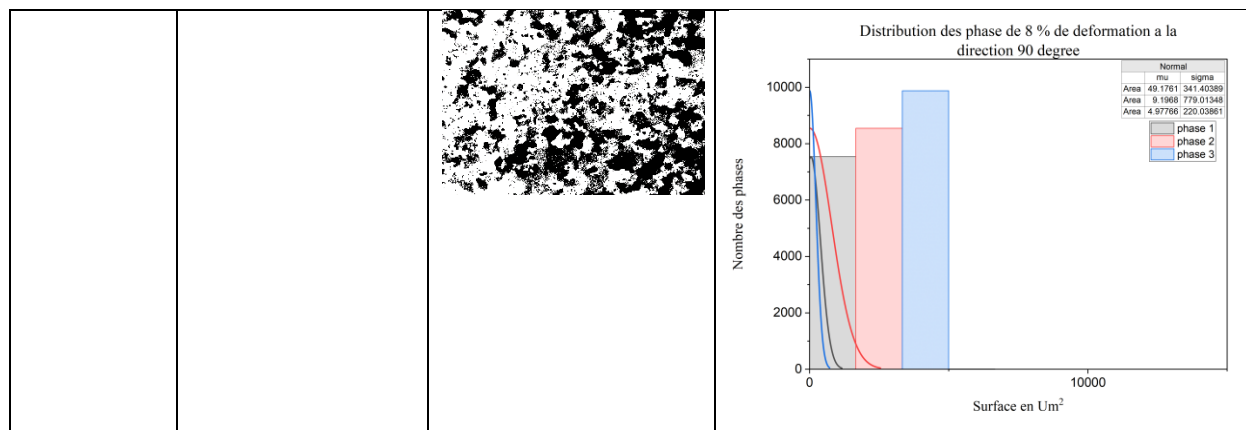
Tableau IV.4 Tableau recupulatif des Analyse Quantitative des Microstructures à Différents Niveaux de Déformation

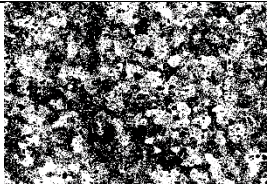
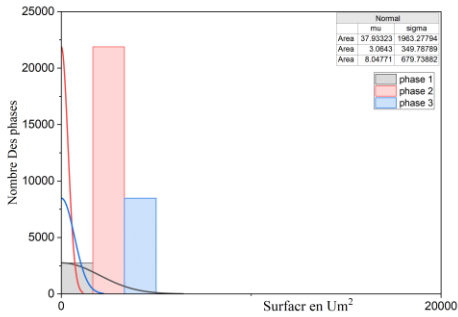
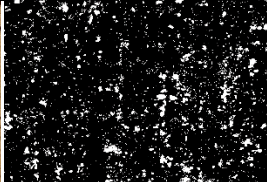
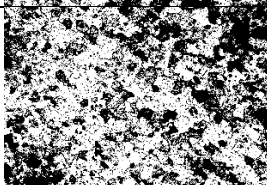
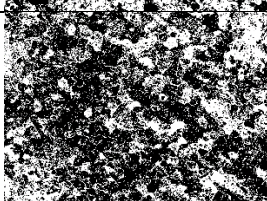
Pour le taux 4%			
Direction	Microstructure	Separation des phases	Distribution des phases
0 Degree			La distribution des phases en 4% de deformation a la derction 0 

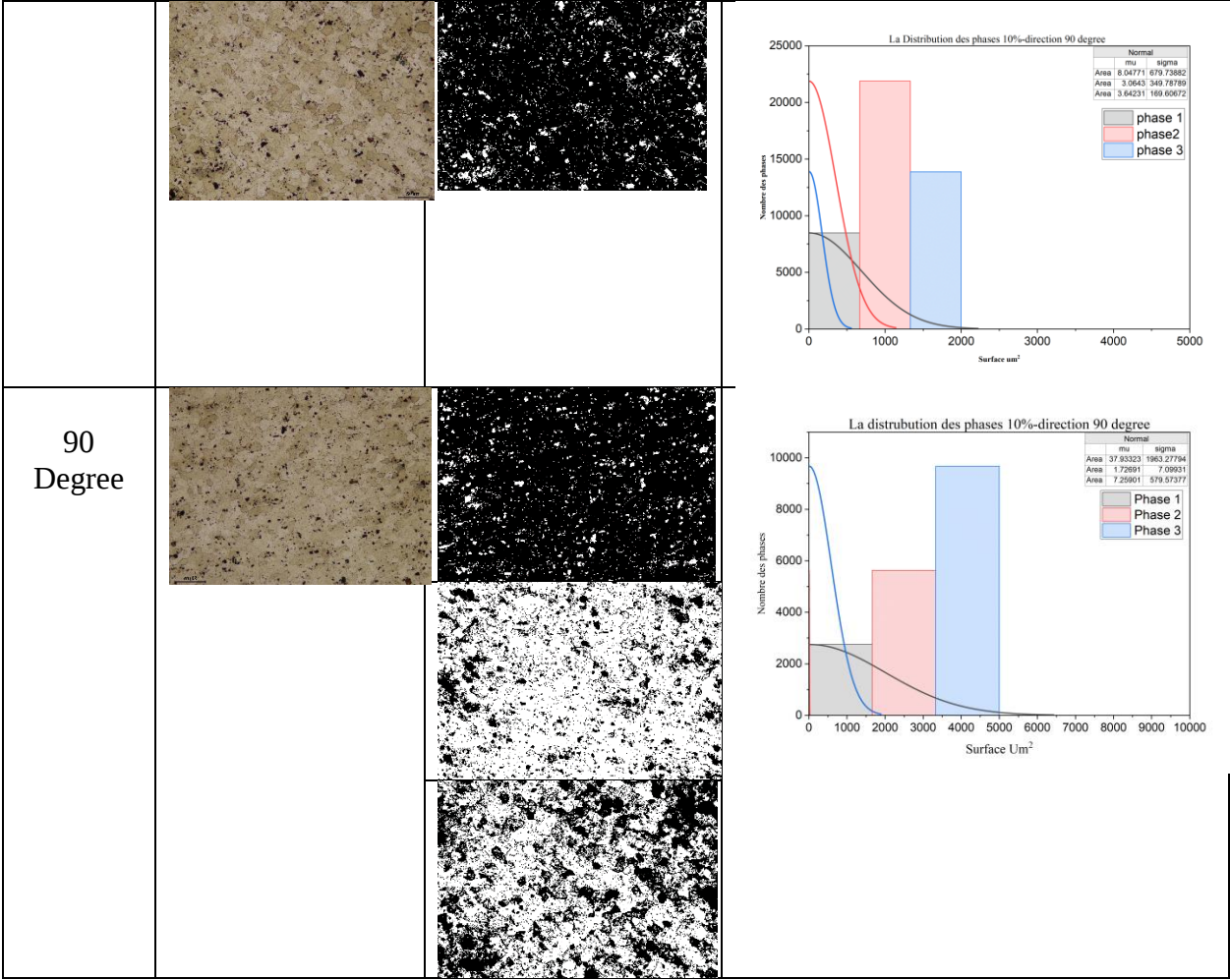


Pour le taux 8%			
Direction	Microstructure	Separation des phases	Distribution des phases





Pour le taux 10%																		
Direction	Microstructure	Separation des phases	Distribution des phases															
0 Degree			 <table><thead><tr><th colspan="3">Normal</th></tr><tr><th></th><th>mu</th><th>sigma</th></tr></thead><tbody><tr><td>Area</td><td>37.83323</td><td>1963.27794</td></tr><tr><td>Area</td><td>3.0843</td><td>349.78799</td></tr><tr><td>Area</td><td>8.58771</td><td>679.75882</td></tr></tbody></table>	Normal				mu	sigma	Area	37.83323	1963.27794	Area	3.0843	349.78799	Area	8.58771	679.75882
		Normal																
				mu	sigma													
Area	37.83323	1963.27794																
Area	3.0843	349.78799																
Area	8.58771	679.75882																
																		
45 Degree																		
																		



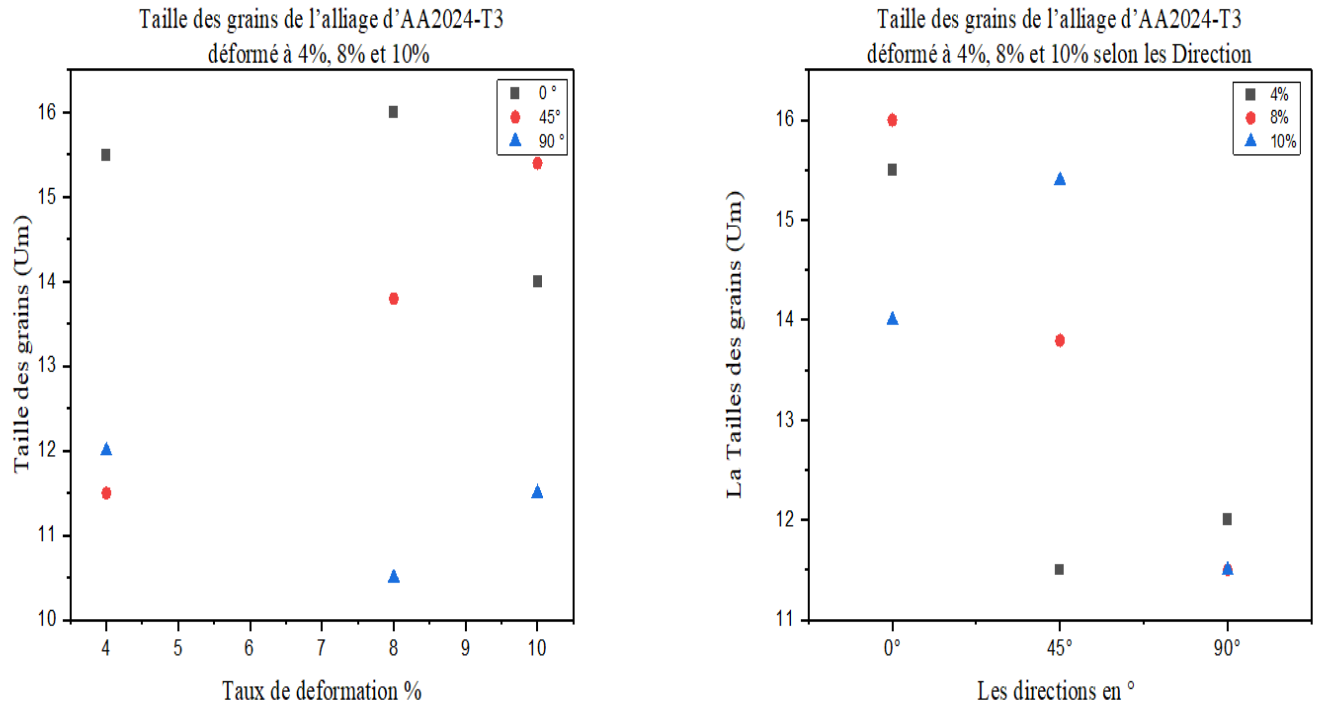


Figure IV.3 Distribution des tailles des grains

Conclusion Générale

Cette étude a examiné l'effet de l'anisotropie mécanique sur les propriétés de l'alliage d'aluminium AA2024-T3, largement utilisé dans l'industrie aéronautique. Grâce à des essais de traction uniaxiale et des analyses microstructurales, nous avons pu comprendre l'influence des directions de traction et des taux de déformation sur les propriétés mécaniques et la microstructure de l'alliage.

Les résultats ont montré une anisotropie significative dans les propriétés mécaniques, influencée par les orientations des échantillons et les taux de déformation appliqués. Les observations microstructurales ont révélé des variations importantes dans la distribution et l'orientation des précipités, qui jouent un rôle clé dans le durcissement de l'alliage. À des taux de déformation plus élevés, les grains deviennent plus allongés et les précipités se coalescent, augmentant les contraintes locales et la probabilité de microfissuration.

Ces analyses fournissent des recommandations précieuses pour optimiser les procédés de fabrication et de traitement thermique afin d'améliorer les performances de l'alliage dans des applications industrielles critiques. En comprenant mieux les effets de l'anisotropie et les mécanismes de déformation dans l'alliage AA2024-T3, il est possible de développer des matériaux plus robustes et plus fiables pour l'industrie aéronautique et d'autres domaines exigeants.

Les perspectives de cette étude incluent l'extension de la recherche à d'autres alliages d'aluminium pour comparer les effets de l'anisotropie, l'optimisation des traitements thermiques pour améliorer la résistance, et l'étude des effets sur la fatigue et la rupture pour des applications de longue durée. De plus, il est prévu d'adapter les résultats pour des applications spécifiques dans l'industrie et d'utiliser les connaissances pour concevoir de nouveaux matériaux composites avec des propriétés améliorées, contribuant ainsi à des avancées technologiques importantes.

Références bibliographique

- [1] Manel HOURIA: Etude expérimentale et modélisation de l'adoucissement induit par restauration et/ou recristallisation dans les alliages d'aluminium, these de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie – Annaba (2022)
- [2] Khawla AMARA: Etude de l'état métallurgique d'un alliage d'aluminium (AU4G1) pré traité thermiquement, laminé à froid puis recuit, Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie, Ecole Nationale Polytechnique – Alger(2013)
- [3] Ines HAMDI: Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000), these de doctorat, U. Mohamed Khider-Biskra (2014)
- [4] S.OUALLAM. Etude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024 T3. Thèse de magistère .ENP, (2009).
- [5] Définition de protocoles rationnels d'identification de lois de comportement élastoplastiques :Application à la simulation éléments finis d'opérations industrielles d'emboutissage Thèse de doctorat 2006.
- [6] Sara REZGOUN. Analyse expérimentale de l'anisotropie mécanique et microstructurale dans les tôles minces de nuance RR ST14-03, Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie – Annaba (2007)
- [8] www.crti