



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة عناية

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département
Génie Minier Métallurgies et Matériaux

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Spécialité:

Science et Génie des matériaux

Présenté par

Ahlem DOUAIBIA
Soumia Khaled

**Corrélation entre les mécanismes de durcissement
et l'anisotropie dans les alliages d'Aluminium**

Encadré par

Pr. Nadjoua MATOUGUI
ENSTI Annaba

Dr. Brahim MEHDI
USTHB Alger

Membres du jury :

- | | | |
|-------------------------|-----------|-------|
| ▪ Dr. Tarek TAHRAOUI | Président | ENSTI |
| ▪ Dr. Tarek TAHRAOUI | Examineur | ENSTI |
| ▪ Dr. Louiza BENDJEDDOU | Examineur | 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, **Nedjoud 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 Chéraga 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 d'avoir accepté de juger ce travail .

Nous remercions aussi : Monsieur **Djamal BASSAID**, Directeur Général de l'ECA, pour avoir ouvert les portes de cette institution et offert les ressources nécessaires à la concrétisation de ce projet. Monsieur **Malek DOUAIBIA**, pour son leadership inspirant et son engagement envers le développement de l'excellence. À notre Co-encadrant, le Colonel **KHEMACHE**, pour sa disponibilité et son soutien, qui ont été essentiels à chaque étape de ce parcours. Sans oublier Madame **Khedra HEDDOU** Ingénieur, pour sa précieuse assistance technique et ses encouragements constants. À toute la famille de l'ECA, 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 ont, de près ou de loin, 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 parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien sans faille, et pour m'avoir inculqué les valeurs de persévérance et de travail acharné. Votre encouragement constant a été la lumière qui m'a guidé à travers les moments les plus difficiles.

*À ma petite sœur, ma princesse **Meriem**, et à mes deux frères, **Chouaib** et **Zakaria**, pour leur affection et leur présence réconfortante. Vous êtes tous une source d'inspiration et de joie dans ma vie.*

*À mon oncle **Malek**, son épouse et ma tante **Balinda**, dont la sagesse et les conseils avisés ont toujours été une source d'inspiration. Merci pour votre générosité et votre confiance en moi.*

À ma famille entière, pour votre affection et vos encouragements. Vous avez tous joué un rôle indispensable dans mon parcours.

*À mes chères amies, **AYA**, **Tesnim**, **Rahma**, et **Nessrin**, Iman pour les moments partagés, les rires, et les conversations profondes. Votre amitié a été une source inestimable de soutien et de motivation.*

À tous ceux qui ont cru en moi, qui ont partagé ce voyage et qui m'ont aidé à réaliser ce rêve, je vous dédie ce travail avec une gratitude immense et un profond respect.

Merci à chacun d'entre vous pour avoir rendu cette réalisation possible.

Ahlem DOUAIBIA

Dédicace

À mes très chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

À mon grand-père

Que Dieu ait pitié de lui.

À mes très chers frères Mohamed et Oussama

Dont la présence et l'encouragement m'ont toujours portée.

À mes chères sœurs Fatiha et Amina pour leur affection et leur soutien.

À mon fiancé Zahreddine pour sa patience, son amour, et son soutien indéfectible.

À ma tante Nedjma et sa famille pour leur chaleur et leur soutien.

À toute mes amis(e) pour les moments partagés et les rires, pour leur soutien et leur amour.

À toute ma famille pour votre affection et vos encouragements. Vous avez tous joué un rôle indispensable dans mon parcours.

*Merci pour vos encouragements et votre soutien. Qu'Allah vous garde.
Je vous souhaite tout le bonheur et le plus grand succès du monde.*

Soumia khaled

Résumé:

Cette étude examine le comportement mécanique et la formabilité de l'alliage d'aluminium 2017A, largement utilisé dans l'aéronautique. Des essais de traction uniaxiale et des analyses microstructurales ont été réalisés pour comprendre l'influence de la microstructure sur les propriétés mécaniques. Les résultats montrent une anisotropie significative des propriétés mécaniques, influencée par les orientations des échantillons et les traitements thermiques. Les observations par microscopie électronique révèlent des phases de précipitation et des dispersoïdes clés 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 aéronautiques critiques.

Mot clé : Alliage d'aluminium 2017A, Duralumin, anisotropie, Industrie aéronautique, Propriétés mécaniques, Microstructure , Essais de traction uniaxiale .

Abstract:

This study examines the mechanical behavior and formability of aluminum alloy 2017A, widely used in aerospace. Uniaxial tensile testing and microstructural analysis were carried out to understand the influence of microstructure on mechanical properties. The results show significant anisotropy in mechanical properties, influenced by sample orientations and heat treatments. Electron microscopy observations reveal precipitation phases and dispersoids key to alloy hardening. These analyses provide recommendations for optimizing manufacturing and heat treatment processes to improve alloy performance in critical aerospace applications.

Keyword: 2017A aluminum alloy, Duralumin, anisotropy , Aerospace industry , Mechanical properties , Microstructure , Uniaxial tensile testing .

المخلص

تدرس هذه الدراسة السلوك الميكانيكي وقابلية التشكيل لسبائك الألمنيوم 2017A ، التي تُستخدم على نطاق واسع في الطيران. تم إجراء اختبارات الشد أحادية المحور والتحليلات المجهرية لفهم تأثير البنية المجهرية على الخصائص الميكانيكية. تُظهر النتائج وجود تباين كبير في الخصائص الميكانيكية، يتأثر باتجاهات العينات والمعالجات الحرارية. تكشف الملاحظات بالمجهر الإلكتروني عن مراحل الترسيب والعناصر المشتتة الرئيسية في تقسية السبيكة. توفر هذه التحليلات توصيات لتحسين عمليات التصنيع والمعالجة الحرارية بهدف تحسين أداء السبيكة في التطبيقات الحرجة في الطيران.

الكلمات المفتاحية: سبيكة الألمنيوم 2017A، دورالومين، التباين، صناعة الطيران، الخصائص الميكانيكية، البنية المجهرية، اختبارات الشد أحادية المحور.

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Listes des abréviations	
Listes des tableaux	
Listes des figures	
Introduction Générale	01
Chapitre 1 : Description de l'Entreprise du Stage	
1- Description de l'Entreprise	04
1-2- Historique de l'Établissement	04
1-3- Missions de l'Établissement	04
1-4- Motivation	05
Problématique	05
Chapitre II Etat de l'art et recherche bibliographique	
I-Introduction	07
II-1 Les alliages Aluminium / Cuivre	07
II-2 Alliage d'aluminium 2017A (duralumin)	07
II-3 Composition chimique de l'alliage 2017A	07
II-4 Influence des éléments d'addition	08
II-4-1 Le cuivre	08
II-4-2 Le magnésium	08
II-4-3 Le manganèse	08
II-5 Propriété mécanique	09
II-6 Diagramme des phases de l'alliage Al-Cu	09
II-7 Traitements thermiques des alliages d'aluminium	09
II-7-1 Les principaux traitements thermiques d'alliages d'aluminium	10
II-8 Classification des alliages d'aluminium	10
II-8-1 Alliages à durcissement structural	11
II-8-2 Alliages sans durcissement structural	11

II-8-a Durcissement par écrouissage	11
II-8-b Durcissement par addition en solution.....	11
II-8-c Durcissement par l'effet de phases dispersées	11
II-9 Microstructure des Duralumins	11
II-9-1 Phases de précipitation.....	11
II-9-2 Dispersoïdes.....	12
II-9-3 Phases intermétalliques grossières.....	13
CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales	
Introduction.....	14
III-1 Choix de matériau	14
III-2 Préparation métallographique.....	14
II-3 L'analyse micrographique (MO)	16
II-4 Microscope électronique à balayage (MEB)	16
III-5 Diffraction des rayons X.....	17
III-6 Essai de dureté.....	17
III-7 essai de traction uniaxiale.....	18
Chapitre IV : Résultat et discussions	
IV-1 microstructure de l'alliage d'aluminium 2017A dans l'état dur et doux.....	21
IV-1-1 analyse métallographie par microscope optique.....	21
IV-1-2 analyse par MEB	22
IV-1-3 Caractérisation des échantillons par diffraction des rayons X.....	23
IV-2 étude des propriétés mécanique.....	24
IV-2-1 micro dureté	24
IV-2-3 essai de traction	25
IV-2-4 corrélation entre l'anisotropie mécaniques et microstructure	29
IV-2-5 simulation du comportement mécanique en traction en fonction des directions DL, DT et 45 °	29
Conclusion Générale	32
Références bibliographique	
Annexe	

LISTE DES FIGURES

FIGURE II-1 : DIAGRAMME D'EQUILIBRE D'UN ALLIAGE AL-CU ENTRE 0% ET 60% DE MASSE DE CUIVRE	09
FIGURE III-1 DIRECTION DE DECOUPAGE 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ET 90° /DL	18
FIGURE III-2 GÉOMÉTRIE DES ÉPROUVETTES DE TRACTION	18
FIGURE III-3 PHOTOGRAPHIE DES EPROUVETTES DE TRACTION EN A2017AVANT LA TRACTION	13
FIGURE III-5: SCHEMA RECAPITULATIF DES INSTRUMENTS.....	19
FIGURE IV -1 : les microstructures optiques de l'alliage a2017a : (a) état dur, (b) état doux.....	21
FIGURE IV-2 : MICROGRAPHIE MEB CORRESPONDANTES DE 2017A DE 2 ETATS.....	23
FIGURE IV-3 : LES FACIES DE RUPTURE CORRESPONDANTE DE 2017A DE 2 ETATS.....	23
FIGURE IV-4 : DIFFRACTOGRAMMES DE L'2017A : (A) ETAT DURE, (B) ETAT DOUX.....	24
FIGURE IV-5MICROGRAPHIES DES INDENTATIONS DANS DEUX ETATS DIFFERENTS : (A) ETAT DUR, (B) ETAT DOUX	25
FIGURE IV-6 COURBE DE TRACTION RATIONNELLE DE 2017 A SELON LES DIRECTIONS 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °/DL POUR L'ETAT DURE	26
FIGURE IV-7 COURBE DE TRACTION RATIONNELLE DE 2017 A SELON LES DIRECTIONS 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °/DL POUR L'ETAT DOUX	27
FIGURE IV-8 COEFFICIENTS DE LANKFORD EN FONCTION DE 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °/DL POUR LES 2 ETAT (DURE ET DOUX).....	28
FIGURE IV-9COURBES DE TRACTION SIMULEE APRES L'IMPLEMENTATION DU POTENTIEL DE HILL SELON LES DIRECTIONS 0°, 45° ET 90°/DL	30
FIGURE IV-10 EPROUVETTE DE TRACTION EN AA2017-O SIMULEE A UNE DEFORMATION SELON DL	31

Liste des Tableaux

tab ii.1 : Composition chimique de l'alliage 2017A.....	08
tab ii-2 : propriétés mécaniques de l'alliage 2017A.....	09
tab iii-1 :composition chimique de l'alliage d'aluminium 2017a (% en poids).....	14
Tab iv-1: taille des grains de l'alliage d'2017A.....	22
tab iv -2: les résultats de la microdureté.....	25
tab iv -3 propriétés mécaniques de l'alliage 2017A selon les directions 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °/dl pour l'état dure.....	26
tab iv -4 propriétés mécaniques de l'alliage 2017A selon les directions 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °/dl pour l'état doux.....	27
tab iv-5 coefficients de lankford R en fonction des sept directions pour 2 etat.....	28

Annotations

ECA	Entreprise de construction aéronautique
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
M _O	Microscope optique
MEB	Microscope électronique à balayage
DRX	Diffraction des rayons X
$R_{0.2}$	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 de laminag

Introduction générale

Dans un monde de plus en plus axé sur l'efficacité et la sécurité, l'industrie aéronautique joue un rôle crucial en repoussant constamment les limites de l'innovation technologique. L'alliage d'aluminium 2017A, aussi connu sous le nom de duralumin, est un matériau largement utilisé dans cette industrie en raison de sa légèreté et de ses excellentes propriétés mécaniques. Ce mémoire se propose d'étudier en profondeur le comportement mécanique et la formabilité de cet alliage, en mettant l'accent sur la corrélation entre la microstructure et les propriétés mécaniques.

L'objectif principal de cette étude est de fournir une compréhension détaillée des mécanismes de durcissement et de l'anisotropie de l'alliage d'aluminium 2017A. En utilisant des techniques expérimentales avancées telles que les essais de traction uniaxiale et l'analyse microstructurale par microscopie électronique, cette recherche vise à optimiser les procédés de fabrication. Ces optimisations sont essentielles pour améliorer les performances de l'alliage dans des applications critiques, assurant ainsi une meilleure fiabilité et une plus grande efficacité des structures aéronautiques.

Composition du Manuscrit :

Le manuscrit est structuré de la manière suivante :

Chapitre 1 : Description de l'Entreprise du Stage

Ce chapitre présente l'Entreprise de Construction Aéronautique (ECA) à Oran, Algérie, incluant son historique, ses missions principales et les raisons pour lesquelles nous avons choisi de réaliser notre stage dans cette entreprise.

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 2017A. Il aborde les propriétés mécaniques, les traitements thermiques, et les différentes phases de précipitation de l'alliage, ainsi que l'influence des éléments d'addition comme le cuivre, le magnésium et le manganèse.

Chapitre 3 : Matériaux et Techniques Expérimentales

Ce chapitre décrit les matériaux utilisés et les techniques expérimentales appliquées pour analyser l'alliage 2017A. Il inclut des méthodes de préparation métallographique, des essais de dureté, des essais de traction uniaxiale, et l'analyse microstructurale à l'aide de microscopes optiques et électroniques.

Chapitre 4 : Résultats et Discussions

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'alliage 2017A, incluant les micrographies, les courbes de traction et les mesures de dureté. Les résultats sont discutés en termes de leur signification et de leur implication pour l'utilisation de l'alliage dans des applications aéronautiques.

Conclusions et Recommandations

Ce chapitre 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 2017A dans des applications aéronautiques.

CHAPITRE I

Description de l'Entreprise du Stage

I-1- Description de l'Entreprise

L'Entreprise de Construction Aéronautique (ECA) à Oran joue un rôle essentiel dans l'industrie aéronautique en Algérie. Fondée pour répondre aux besoins de développement et de production d'aéronefs, ECA Oran se distingue par son expertise dans la conception, la fabrication et la maintenance d'avions. Fort de plusieurs décennies d'expérience, l'entreprise s'est bâti une solide réputation de fiabilité et d'innovation dans le domaine de l'aviation.

I-2- Historique de l'Établissement

L'Entreprise de Construction Aéronautique (ECA) trouve son origine dans le protocole de coopération signé en 1987 entre l'Algérie et la Tchécoslovaquie. Cet accord portait sur l'installation d'une chaîne de montage pour des monomoteurs biplaces et quadriplaces, les Zlin-142 et Zlin-43. En 1993, l'Armée nationale populaire (ANP) a repris le projet.

L'ECA a débuté en fabriquant le Zlin 142, renommé « Firnas-142 » en hommage au scientifique andalou Abbas Ibn Firnas, qui a tenté des vols planés en 852 et 880 en se lançant du minaret de la grande mosquée de Cordoue. Le Firnas-142 est utilisé par l'armée algérienne pour des missions d'entraînement de base, de formation à la navigation, de surveillance et d'évacuation sanitaire. [21]

I-3- Missions de l'Établissement

L'Établissement de Construction Aéronautique (ECA) a pour missions principales :

- La fabrication des avions de type Firnas-142 et Safir-43.
- La révision générale et la réparation moyenne des cellules des avions Firnas-142 et Safir-43.
- La révision et la réparation des moteurs de type TV3-117 et des turbodémarrateurs AI-9V.
- La réalisation d'opérations de conception, d'études et d'ingénierie relatives aux aéronefs et matériels aéronautiques.
- La régénération des aéronefs et de leurs composants.
- La promotion et la participation à la normalisation et au contrôle de qualité des matières premières, des semi-produits et des produits finis.
- La conclusion de conventions de partenariat dans les domaines de ses activités.
- L'assistance technique sur le site du client.
- La fabrication et la réparation des matériels de l'environnement technique des aéronefs.
- La réalisation de toute opération commerciale ou financière, ainsi que l'acquisition de tous droits et biens mobiliers et immobiliers nécessaires à l'activité de l'établissement. [22]

I-4- Motivation

Nous avons choisi de réaliser notre stage au sein de l'ECA Oran pour plusieurs raisons :

- **Expérience Pratique** : Travailler sur des projets réels au sein d'une entreprise de premier plan nous a permis de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises durant nos études, enrichissant ainsi notre apprentissage.
- **Développement de Compétences** : Nous avons acquis des compétences spécifiques en conception et fabrication aéronautique, tout en comprenant les défis techniques et les solutions innovantes utilisées dans l'industrie.
- **Réseautage Professionnel** : Collaborer avec des professionnels expérimentés nous a permis d'établir des contacts précieux pour notre future carrière, tout en apprenant des experts du domaine.

I-5 Problématique

La problématique abordée lors de ce stage porte sur l'étude approfondie des mécanismes de durcissement et de l'anisotropie dans l'alliage d'aluminium 2017, à la fois dans ses états doux et durcis. Cet alliage est largement utilisé dans l'industrie aéronautique en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa légèreté, qui sont essentielles pour la construction d'avions.

Question centrale : Comment les mécanismes de durcissement influencent-ils l'anisotropie de l'alliage d'aluminium 2017 dans ses différents états ?

Pour répondre à cette question, les objectifs spécifiques suivants ont été définis :

- **Comprendre la Corrélation** : Analyser la relation entre les mécanismes de durcissement et l'anisotropie de l'alliage. Cela implique d'étudier comment différents traitements thermiques et mécaniques affectent la structure interne et les propriétés mécaniques.
- **Analyser l'Influence** : Étudier comment ces mécanismes affectent les propriétés mécaniques et structurales de l'alliage dans différentes orientations. L'objectif est de déterminer comment la direction de la charge appliquée peut modifier la performance de l'alliage.
- **Identifier les Facteurs** : Déterminer les facteurs spécifiques qui contribuent à l'anisotropie et au durcissement de l'alliage. Ces facteurs peuvent inclure la texture cristallographique, la distribution des précipités, les dislocations, et d'autres aspects microstructuraux.
- **Optimiser les Procédés** : Fournir des recommandations pour améliorer les processus de fabrication et de traitement de l'alliage afin d'optimiser ses performances dans diverses applications industrielles. Cela peut inclure des ajustements dans les techniques de traitement thermique et mécanique pour obtenir des propriétés optimales dans les directions critiques.

CHAPITRE II

Etat de l'art et recherche bibliographique

CHAPITRE II : Etat de l'art et recherche bibliographique

Introduction

L'étude des alliages d'aluminium, en particulier l'alliage 2017A, est essentiel en raison de ses applications étendues dans l'industrie aéronautique. Ce chapitre présente une revue de la littérature concernant les caractéristiques métallurgiques, les propriétés mécaniques, et les traitements thermiques des alliages d'aluminium, avec un accent particulier sur l'alliage 2017A.

II-1-Les alliages Aluminium / Cuivre

Les alliages Aluminium/Cuivre appartiennent à la série 2000 et sont connus pour leur durcissement structural. Ils présentent une large gamme de caractéristiques distinctives :

- Une bonne résistance thermique.
- Efficacité de soudage généralement mauvaise pour les procédés conventionnels.
- Résistance à la corrosion relativement faible dans les environnements corrosifs. [7]

II-2-Alliage d'aluminium 2017A (duralumin)

L'alliage 2017A, aussi connu sous le nom de duralumin, est l'un des plus anciens alliages d'aluminium et marque le début du développement de l'aluminium aéronautique. Cet alliage provient du phénomène de durcissement structural découvert par Alfred Wilm à Berlin en 1906. Ses recherches ont conduit à la création du duralumin (Al - 3,5% Cu - 0,5% Mg - 0,5% Mn), qui a été le précurseur de nombreux alliages de la série 2000, notamment les alliages 2017 et 2024. Le duralumin, en particulier l'alliage 2017A, est encore largement utilisé à l'état T4. C'est un alliage à durcissement structural, reconnu pour sa très haute résistance mécanique, ce qui le rend idéal pour les structures aéronautiques, les véhicules et les pièces de machines soumises à de fortes contraintes. [6]

II-3-Composition chimique de l'alliage 2017A

L'alliage 2017 est un alliage Al-Cu avec des additions secondaire de Fe et de Mg, il contient également du Si, du Cr, et du Mn. La gamme de composition de cet alliage est présentée dans le tableau II.1 [8]

Tab II.1 Composition chimique de l'alliage 2017A

Elément	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ni	Zn	Autres indiv	Al
Min	3,8	1,2	0,3	—	—	—	—	—	Reste
Max	4,9	1,8	0,9	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	

II-4-Influence des éléments d'addition

II-4-1-Le cuivre

Le cuivre améliore considérablement les propriétés mécaniques des alliages ainsi que leur usinabilité. Cela augmente la résistance au fur et à mesure que la teneur en cuivre augmente. Cela augmente également la dureté, mais la ductilité dépend de la manière dont le cuivre est réparti. En revanche, il retarde le début de la recristallisation et augmente fortement la susceptibilité à la fissuration à chaud. Ainsi, les alliages aluminium-cuivre ne sont pas soudables à l'arc sauf si la teneur en cuivre atteint 6 %, comme les alliages de la famille 2219. Le cuivre dans les alliages d'aluminium est souvent défavorable en termes de résistance à la corrosion. Par conséquent, une protection de surface par peinture ou anodisation est souvent nécessaire en fonction de l'application dans laquelle ce type d'alliage est utilisé. [8]

II-4-2-Le magnésium

Le magnésium améliore les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium. Il facilite également le soudage des alliages d'aluminium. [8]

II-4-3-Le manganèse

Le manganèse est ajouté aux alliages pour augmenter la résistance mécanique à haute température et la résistance au fluage, formant des le précipité tel que $T-Al_{20,67}Cu_2Mn_{3,33}$ et des composés plus complexes contenant du chrome et du nickel. Le manganèse est utilisé pour corriger l'effet fragile du fer dans les alliages d'aluminium. [8]

II-5-Propriété mécanique

En sciences des matériaux, plusieurs propriétés mécaniques des alliages métalliques peuvent être distinguées en fonction de leur utilisation prévue. Dans le développement des structures

aéronautiques, ce sont : Module d'Young (E), limite d'élasticité ($R_{0,2}$), résistance maximale (R_m) allongement (A) et, et la ténacité, Résistance à la fatigue et au fluage. Le tableau II.2 présente quelques propriétés mécaniques obtenues par l'essai de traction à froid de l'alliage 2017A.

Tab II.2 Propriétés mécaniques de l'alliage 2017A [11]

E (GPa)	$R_{0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
74 000	260	390	9

II-6-Diagramme des phases de l'alliage Al-Cu

Le diagramme de phase Al-Cu est représenté dans la figure II.1 suivante. Il est indiqué aux températures :

- 500 - 580 °C, l'alliage Al-4%Cu est monophasé : le cuivre forme une solution solide désordonnée de substitution α avec l'aluminium
 - En dessous de 500 °C, l'alliage devient biphasé. $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$.
 - au fur et à mesure la température diminue, la proportion d' Al_2Cu augmente.
 - A température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de phase α et 7% Al_2Cu .
- [6]

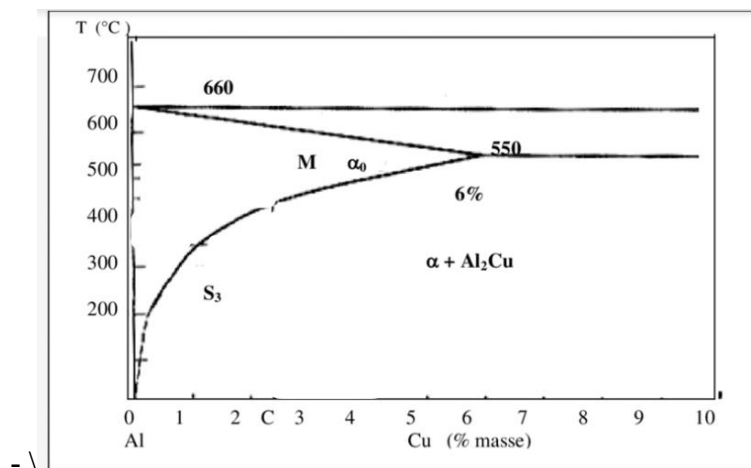


Figure II.1 Diagramme d'équilibre d'un alliage Al-Cu entre 0% et 60% de masse de cuivre

II-7-Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Les traitements thermiques consistent en un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement visant à :

- A) Améliorer les propriétés des matériaux pour les rendre mieux adaptés à leur utilisation finale, en procédant aux modifications suivantes :
 - Augmenter la résistance à la rupture (R_m), la limite élastique (R_e) et l'allongement à la rupture (A%) pour accroître la tenue mécanique des éléments.
 - Accroître la dureté pour permettre aux pièces de mieux résister à l'usure et aux chocs en service.
- B) Régénérer la structure d'un métal présentant initialement un grain grossier afin de l'affiner, d'homogénéiser la microstructure, notamment dans le cas de matériaux ayant subi des opérations de forgeage.
- C) Éliminer les contraintes résiduelles internes générées par écrouissage dans les matériaux ayant préalablement subi une déformation plastique à froid, comme lors d'opérations d'emboutissage ou de fluotournage. [2]

II-7-1 Les principaux traitements thermiques d'alliages d'aluminium

Les traitements thermiques des alliages d'aluminium se classent en trois catégories :

Traitements d'homogénéisation : Appliqués aux produits de fonderie avant transformation ou aux produits corroyés, ils visent à homogénéiser la structure. [1]

Traitements d'adoucissement : réalisés pendant ou après transformation afin d'adoucir le matériau comprenant : [3]

- Restauration
- Recristallisation

Traitements de trempe structurale comprenant : [4], [5]

- Mise en solution
- Revenu

II-8- Classification des alliages d'aluminium

Il existe deux catégories principales d'alliages d'aluminium déformés plastiquement :

- Les alliages à durcissement structural

- Les alliages sans durcissement structural.

II-8-1 Alliages à durcissement structural

Le durcissement structural obtenu par un processus comportant :

- Mise en solution : Dissoudre les éléments d'alliage à haute température.
- Trempe : Refroidir rapidement pour conserver une solution solide sursaturée.
- Revenu : Vieillissement naturel ou artificiel pour précipiter les phases durcissantes

Les principales familles des alliages de ce type sont : Al Cu (2XXX), Al Mg Si (6XXX), Al Zn Mg (7XXX). [9]

II-8-2 Alliages sans durcissement structural

Différents mécanismes de durcissement interviennent dans ces alliages pour ajuster les propriétés mécaniques, notamment

II-8-a Durcissement par écrouissage

La déformation par laminage, l'étirage ou le tréfilage permet d'accroître la limite élastique tout en réduisant l'allongement. Les propriétés initiales des alliages peuvent être restaurées par des traitements thermiques appropriés.

II-8-b Durcissement par addition en solution

L'ajout d'éléments en solution dans la structure cristalline de l'aluminium crée des obstacles à la déformation, conférant à l'alliage des propriétés de résistance mécanique. Ce durcissement peut être complété par un processus d'écrouissage.

II-8-c Durcissement par l'effet de phases dispersées

Lorsque les concentrations en éléments d'addition dépassent leur limite de solubilité, ces éléments se séparent de la matrice d'aluminium pour former une seconde phase. Cette phase dispersée renforce l'alliage, particulièrement lorsque les particules sont finement dispersées et de petite taille. Les principales familles des alliages de ce type sont : Al Cu (2XXX), Al Mg Si (6XXX), Al Zn Mg (7XXX). [9]

II-9-Microstructure des Duralumins

II-9-1-Phases de précipitation

Séquence de précipitation :

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

SSS $\rightarrow$ clusters Mg-Cu $\rightarrow$ GPB $\rightarrow$ S (Al_2CuMg)

Durcissement : À température ambiante, la SSS se décompose en zones GP/GPB, durcissant le métal. Chauffage (100-200°C) améliore encore le durcissement par formation de phases métastables semi-cohérentes (Θ' et/ou S'). [12]

II-9-2-Dispersoïdes

Formation : Se forment durant les longs traitements thermiques (homogénéisation des lingots).

Fonction :

- Améliorent les propriétés mécaniques sans être des agents durcissants.
- Limitent la taille des grains et augmentent la température de recristallisation, favorisant une structure fibreuse.

II-9-3-Phases intermétalliques grossières

Formation : Se forment durant la solidification du lingot.

Caractéristiques :

- Ne participent pas au durcissement. -
- Leur taille dépend de la vitesse de solidification, du taux de fer et silicium, et de la déformation subie par l'alliage.
- Peuvent se transformer durant les traitements à haute température. [12]

CHAPITRE III

Matériau et techniques expérimentales

Chapitre III : Matériau et techniques expérimentales

Introduction

Ce chapitre est consacré à la description des matériaux et des techniques expérimentales utilisés dans l'étude de l'alliage d'aluminium 2017A. L'alliage 2017A, choisi pour ses applications dans l'industrie aéronautique, a été fourni par ECA d'Oran en Algérie sous forme de plaques laminées à froid. Les sections suivantes présentent les méthodes employées pour analyser la composition chimique, mesurer la dureté, effectuer des essais de traction, et caractériser la microstructure du matériau. Ces analyses visent à fournir une compréhension détaillée des propriétés mécaniques et métallurgiques de l'alliage, essentielles pour évaluer son comportement et ses performances dans des applications critiques telles que la fabrication d'ailes d'avion.

III -1-Choix de matériau

La tôle d'alliage d'aluminium 2017A examinée dans cette recherche est fournie par ECA d'Oran en Algérie, destinée à la fabrication des ailes de l'avion Zlin-142. Ce matériau se présente sous forme de plaques d'environ 1 mm d'épaisseur dans son état initial de laminage à froid. Les caractéristiques de la composition chimique nominale de cet alliage sont présentées dans le Tableau **III.1**

Tab III.1 Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2017A (% en poids)

Elément	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ni	Sn	Ag	Al
Wt(%)	4.31	01	0.12	0.01	0.36	0.08	0.01	0.06	0.02	94.97

La composition chimique, présentée dans le tableau **III.1**, a été obtenue grâce à une analyse chimique réalisée au CRTI Alger à l'aide d'un appareil X-MET8000, comme illustré dans la **Figure III.4.1** Le X-MET8000 est un appareil d'analyse portable qui utilise la fluorescence des rayons X pour déterminer la composition chimique des échantillons. En pratique, il émet un faisceau de rayons X sur l'échantillon, ce qui provoque l'émission de rayons X fluorescents caractéristiques de chaque élément présent. En mesurant l'intensité et l'énergie de ces rayons X fluorescents, l'appareil peut identifier les éléments présents et quantifier leur concentration dans l'échantillon. C'est un outil polyvalent utilisé dans de nombreux domaines, notamment la métallurgie. Sa portabilité en fait un outil particulièrement utile pour les analyses sur le terrain.

III-2-Préparation métallographique

Les échantillons doivent subir une série d'opérations métallographiques minimum nécessaires :

Découpe des échantillons : Pour ce faire nous avons utilisé une cisaille

Enrobages : L'enrobage à froid nécessite l'utilisation de résines thermodurcissables.

Polissage mécanique

- Les échantillons destinés aux analyses métallographiques ont été polis sur des papiers abrasifs au carbure de silicium de différentes granulométries.
- Les granulométries utilisées étaient de 800, 1000, 1200, 2400 et 4000.
- Pour le polissage de finition, un papier feutre imprégné à suspension d'alumine, de taille des grains de $3\mu\text{m}$, et imbibé avec de l'eau distillée.

Les opérations de polissage ont été faites à l'aide d'une polisseuse de type Mecatech Z64 , présentée sur la **Figure III-5-4**.

Attaque chimique

Réactif de Keller, composé de :

- Acide nitrique (p 20) : 2,5 ml
- Acide chlorhydrique (p 20) : 1,5 ml
- Acide fluorhydrique (p 20) dilué à 40% (V/V) : 1 ml
- Eau distillée : 95 ml

Procédure:

- Les échantillons polis ont été attaque par le réactif Keller pendant 15 à 25 secondes, jusqu'à l'observation d'une microstructure satisfaisante.
- Les échantillons ont ensuite été rincés à l'eau du robinet et séchés correctement.

III-3-Analyse micrographique (MO)

Nous avons utilisé la microscopie optique pour observer la structure du matériau à l'état reçu de deux états étudié. Les observations ont été effectuées au microscope optique de type nikon eclipse LV100ND au niveau de ENSTI Annaba (la **Figure III.4.5**), de grossissements allant de 100 à 1000, relié à une caméra. Les micrographies ont été prises par l'intermédiaire du logiciel d'analyse d'image NIS elements qui permet de lire et de sauvegarder les images. Les micrographies exposées dans le chapitre IV, des résultats expérimentaux, ont été prises à un grossissement de 500.

III-4-Microscope électronique à balayage (MEB)

En complément des observations microstructurales réalisées au microscope optique et des essais mécaniques, une étude approfondie des facies de rupture a été réalisée à l'aide de la microscopie électronique à balayage (MEB). De plus, une analyse par spectroscopie dispersive en énergie des rayons X (EDS) a été effectuée pour déterminer la composition chimique locale des phases et des précipités observés. Cette section détaille les protocoles expérimentaux utilisés pour ces analyses. Les observations et analyses ont été effectuées à l'aide d'un microscope électronique à balayage FEI-QUANTA 250 présenté dans la **Figure III.4.6**. Les tests ont été réalisés en mode électrons rétrodiffusé (RE) pour obtenir des images détaillées de la topographie des surfaces de rupture, avec une tension d'accélération de 25 kV. Les facies de rupture des échantillons ont été observés afin de caractériser le mode de fracture (ductile, fragile, mixte) et d'identifier les caractéristiques spécifiques telles que les dimples(cupules), les clivages et les fissures intergranulaires. L'analyse EDS permet de déterminer la composition chimique locale des zones spécifiques de l'échantillon en détectant les rayons X caractéristiques émis par les éléments présents lors de l'interaction du faisceau d'électrons du MEB avec l'échantillon. Les spectres EDS ont été acquis sur différentes zones d'intérêt, incluant les précipités et les grains. Les données obtenues ont été analysées à l'aide du logiciel intégré au MEB (Team EDS) pour quantifier les éléments présents.

III-5-Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse puissante utilisée pour caractériser la structure cristalline des matériaux. Elle fournit des informations sur la disposition des atomes dans un solide, permettant de déterminer des paramètres tels que la phase cristalline, les paramètres de réseau, la taille des cristallites et les défauts cristallins.

Conditions expérimentale

La DRX nous a aidés à identifier les phases présentes dans l'alliage A2017. Elle a été effectuée sur des échantillons à l'état reçu avec un diffractomètre des rayons X de banc de deuxième génération de type BRUKERS D2 Phaser au CRTI (montré sur la **Figure III.4.7**).

L'angle 2 θ (2 θ) a été varié de 20° à 120° avec un pas de 0,02° à 0,5 s/pas, sous une tension de 30 KV et un courant de 10 mA en utilisant une anode de cu-K α d'une longueur d'onde 1,5406 Å. Une géométrie de type Bragg Brentano et une configuration θ -2 θ ont été utilisées (le faisceau incident fait un angle θ avec la surface de l'échantillon et le détecteur est en position 2 θ par rapport au faisceau incident). L'identification des phases a été réalisée par les fiches ASTM 2016, à l'aide du logiciel High Score plus mené du PDF 4+2020.

III-6-Essai de dureté

La dureté d'un matériau, définie par sa résistance à la pénétration, est mesurée en appliquant une force sur la surface du matériau pendant un temps spécifique. La micro dureté, évaluée à l'échelle microstructurale, est couramment mesurée par l'essai de dureté Vickers (HV). Cet essai utilise un pénétrateur en diamant en forme de pyramide à base carrée avec un angle de 136° au sommet. Le test se déroule sous une charge prédéfinie et pendant une durée spécifiée.

La micro dureté Vickers HV est calculée via la relation :

$$HV = \frac{2F \sin(\theta/2)}{d^2} \quad (\text{III-1})$$

D'où:

- d est la diagonale de l'empreinte en mm, moyenne des deux diagonales, d1 et d2
- F est la force appliquée en Kgf

Les mesures de microdureté Vickers (HV_{0.1}) ont été effectuées avec une charge de 100 g et un temps de maintien de 10 secondes. La charge a été choisie afin d'obtenir des empreintes relativement faibles au vu de la taille des grains. Ces caractérisations ont été effectuées avec un microduromètre WILSON TUKONTM1202 (**Figure III.4.2**) au niveau de l'USTHB. Afin d'obtenir une valeur moyenne, trois mesures ont été effectuées sur des grains distincts pour chaque échantillon. Les résultats de ces mesures sont présentés dans le chapitre IV.

III-7-essai de traction uniaxiale

Pour simuler le processus de l'étirement des tôles en alliage d'aluminium A2017, les échantillons ont été soumis à une déformation plastique à froid par des essais de traction uniaxiale. Les éprouvettes de traction, de forme plate, ont été découpées à l'aide de la machine de découpe plasma "ALPHATOME 40 HPI" dans les locaux de l'entreprise Ferroviel à Annaba. Cette opération s'est déroulée à température ambiante, avec un système de refroidissement à l'azote. Les éprouvettes de traction ont été découpées selon différentes orientations angulaires par rapport à la direction du laminage (RD), à savoir 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° et 90°, comme illustré dans la **Figure III.1**. Ensuite, les éprouvettes ont été normalisées conformément à la norme EN ISO 4136 (**Figure III. 2**), sous la supervision d'un tourneur équipé d'une fraiseuse, tel que les éprouvettes de deux états sont représenté sur la **Figure III.3**.

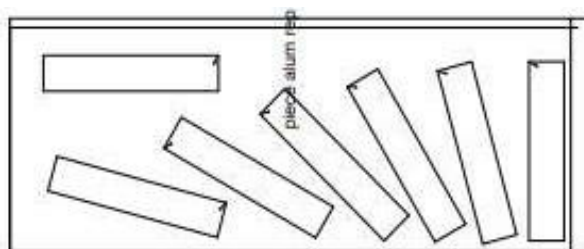


Figure III.1 Direction de découpage 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° et 90° /DL

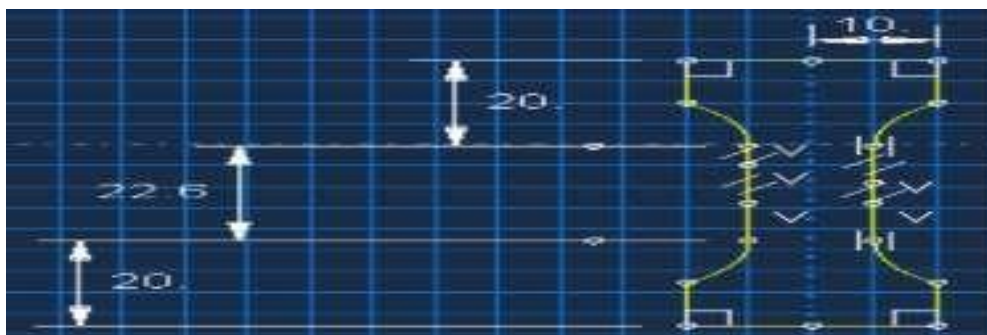


Figure III.2 Géométrie des éprouvettes de traction

Les essais de traction uniaxiale ont été conduits à température ambiante et à une vitesse de déformation de 10^{-1} s^{-1} en utilisant une machine d'essai de traction MTS® de 100 kN, comme illustré dans la **Figure III.4.3**.

Les sept niveaux de déformation pour chaque état de traction ont été déterminés à partir des courbes contrainte-déformation obtenues lors des essais de traction jusqu'à la rupture, Ces essais ont été menés au CRTI et ont été assistés par ordinateur, permettant une gestion automatique des paramètres du moteur. Les données des grandeurs mécaniques ont été enregistrées dans des

fichiers contenant des informations telles que le nombre de points, le temps, le déplacement de l'extensomètre et l'effort axial.



Figure III.3 Photographie des éprouvettes de traction en A2017 avant la traction

			
1-X-MET8000(CRTI)	2- Duromètre (USTHB)	3-Machine de traction (CRTI)	4-Polisseuse (CRTI)
			
5-MO (ENSTI)	6-MEB(ENSTI)	7-DRX (CRTI)	

Figure III.4 Schéma récapitulatif des instruments

Chapitre IV

Résultat et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussion**IV-1-Microstructure de l'alliage d'aluminium 2017A****IV-1-1-Analyse métallographie par microscope optique**

Les micrographies optiques (Figure IV-1) de l'alliage d'A2017A montrent que, dans l'état dur (a), la microstructure présente une matrice fortement consolidée avec des grains fins et uniformes, typiques des matériaux durcis par des traitements thermiques ou mécaniques, et des précipités homogènement distribués, probablement des phases intermétalliques, contribuant à la dureté du matériau. En revanche, dans l'état doux (b), la microstructure révèle des grains plus gros et moins réguliers, caractéristiques des matériaux non durcis ou recuits pour réduire les contraintes internes, avec des précipités moins nombreux et plus gros, suggérant un processus de coalescence typique des traitements thermiques adoucissants. Ces observations indiquent que les propriétés mécaniques de l'alliage 2017A varient considérablement selon son état, l'état dur offrant une meilleure résistance et dureté grâce à des grains fins et des précipités uniformément distribués, tandis que l'état doux présente une ductilité accrue mais une moindre résistance mécanique. Afin d'obtenir une vue d'ensemble sur la variation de la taille des grains, nous avons effectué un calcul à l'aide d'un logiciel d'imagerie. Nous avons quantifié la taille des grains uniquement pour l'état dur, en raison de la difficulté de distinguer les grains dans le deuxième état (doux), causée par une microstructure avec des grains plus gros et moins réguliers.

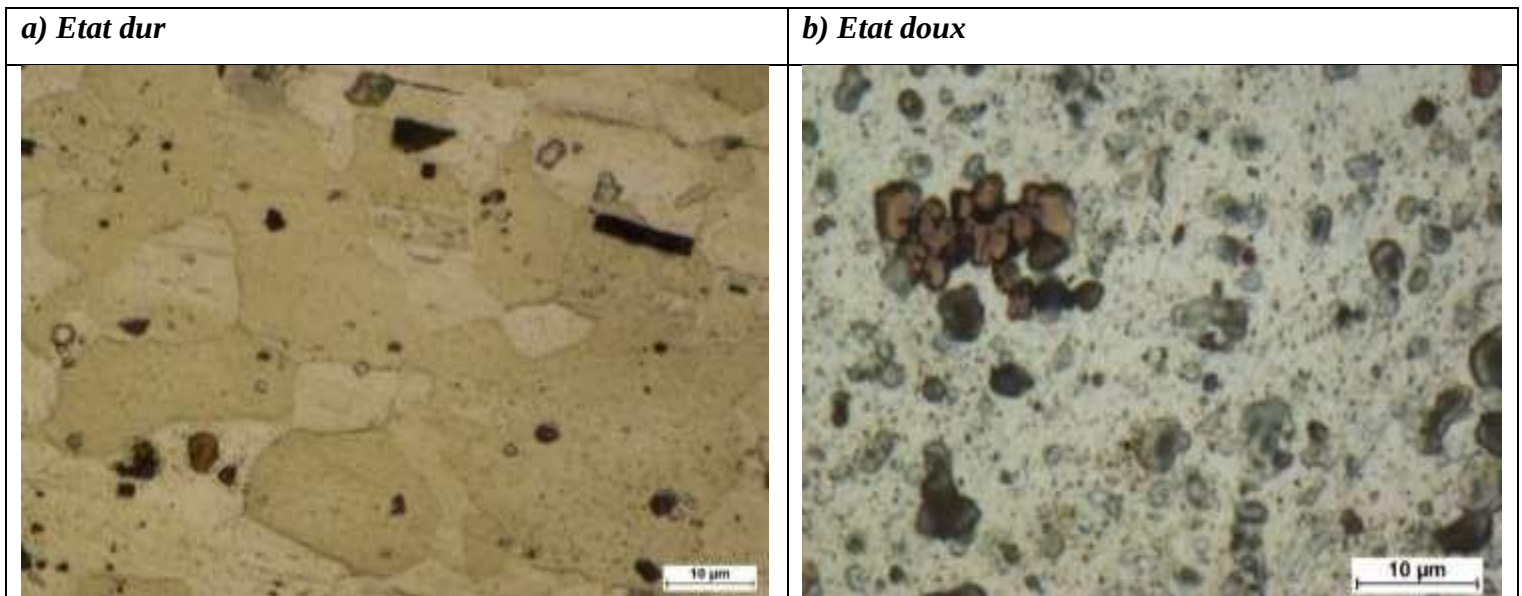


Figure IV.1 Microstructures optiques de l'alliage A2017A : (a) État dur, (b) État doux

Tab IV .1 Taille des grains de l'alliage d'2017A

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area
Clipboard	130	326380	2510.618	80.638

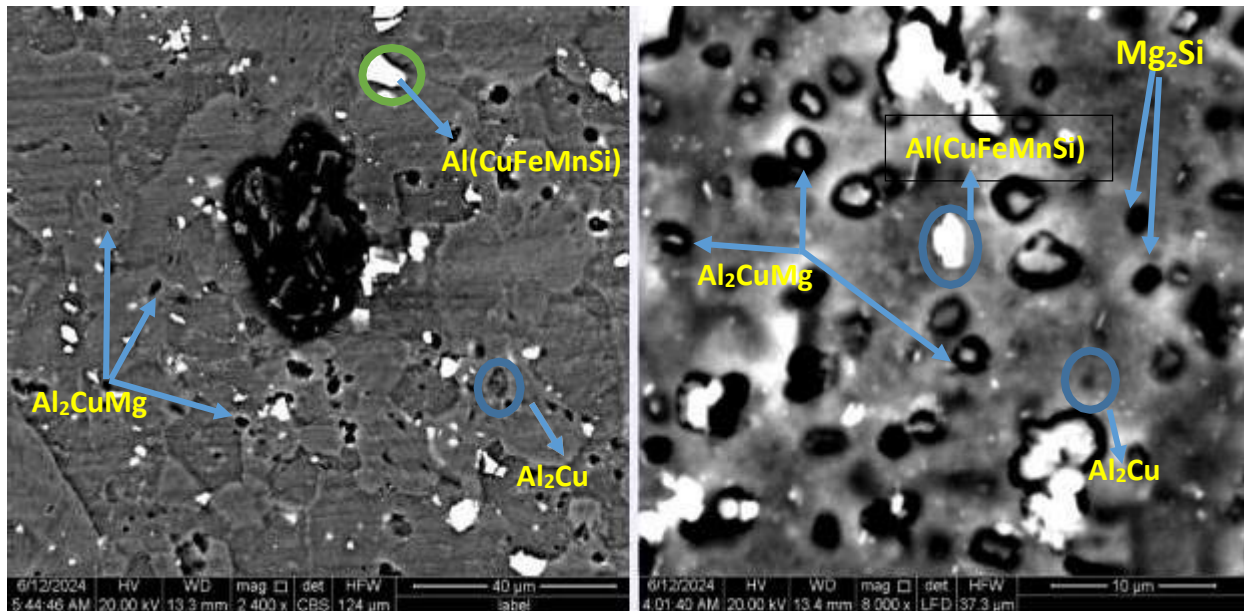
IV-1-2-Analyse métallographie par microscope électronique MEB

La figure IV-2 illustre les résultats obtenus par l'analyse par MEB des différents états de l'alliage 2017A (Al-Cu) pour deux conditions : état dur et état doux. Les images MEB de l'état dur révèlent des phases distinctes et des précipités qui contribuent à la dureté du matériau, notamment S (Al_2CuMg), θ (Al_2Cu), Mg_2Si et $\text{Al}(\text{CuFeMnSi})$. La phase S, augmente la dureté et la résistance par durcissement par précipitation, θ accroît la rigidité, Mg_2Si améliore les propriétés mécaniques dans une moindre mesure, et $\text{Al}(\text{CuFeMnSi})$ indique une redistribution des éléments d'alliage lors du traitement thermique, réduisant la dureté et la résistance. Pour l'état doux, les images montrent une microstructure différente, avec des phases similaires mais en moindre quantité ou distribution différente. Les micrographies des deux états montrent des différences dans la distribution et la morphologie des précipités : l'état dur présente une présence accrue de précipités de renforcement (Al_2CuMg , Al_2Cu , Mg_2Si), expliquant l'augmentation de la dureté, tandis que l'état doux montre une réduction des précipités de renforcement et une possible croissance des grains ou dissolution partielle des phases durcissantes, résultant en une microstructure plus douce. Ces observations sont complétées par des essais mécaniques pour corréler les observations microstructurales aux propriétés mécaniques macroscopiques.

La figure IV-3 représente les faciès de rupture de chaque état de l'alliage 2017A (Al-Cu). Pour l'état dur, les observations montrent des facettes claires et nettes, indiquant une rupture fragile. Les précipités de renforcement tels qu' Al_2CuMg , Al_2Cu et Mg_2Si sont visibles et jouent un rôle crucial en augmentant la dureté mais aussi en créant des sites de nucléation pour les fissures. Les micrographies révèlent peu de signes de déformation plastique, confirmant une rupture fragile dominée par les précipités. Ces précipités agissent comme des obstacles rigides, créant des concentrations de contraintes locales favorisant la formation de fissures, qui se propagent rapidement à travers les grains, suggérant une forte cohésion intergranulaire mais une faible résistance à la propagation des fissures à travers les précipités. En revanche, pour l'état doux, les observations montrent des dimples et cavités, signes caractéristiques d'une rupture ductile formée par la coalescence de vides autour des particules ou des inclusions.

Les micrographies révèlent une déformation plastique importante, indiquant que le matériau a absorbé beaucoup d'énergie avant de se rompre. L'état doux présente moins de précipités

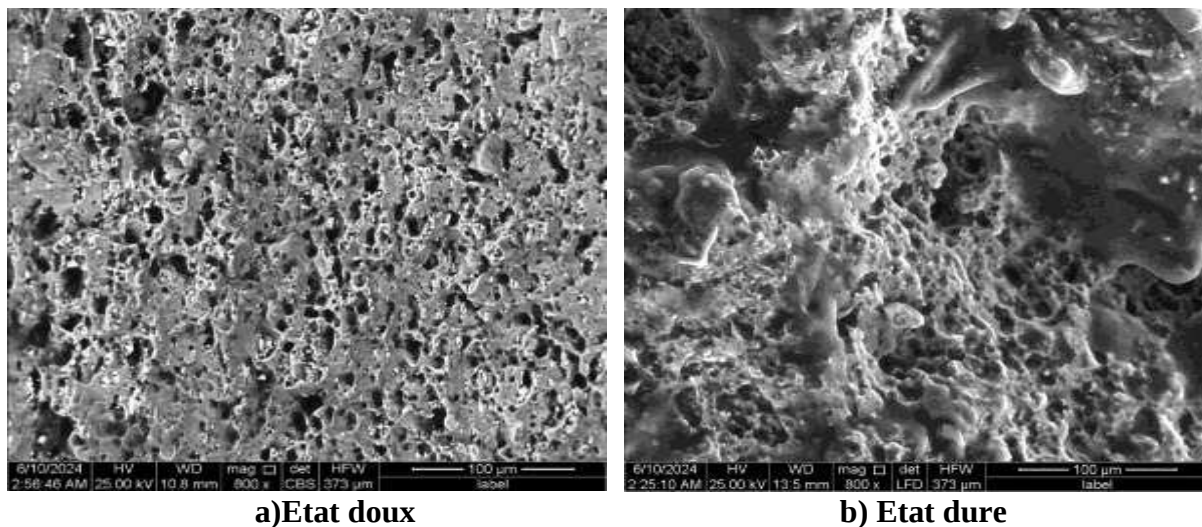
renforçants, permettant une plus grande ductilité. Cette rupture ductile implique une absorption significative d'énergie avant la propagation de la fissure, avec un mécanisme de coalescence de vides et une propagation souvent le long des frontières de grains, où l'énergie de déformation est absorbée.



a) Etat dur

b) Etat doux

Figure IV.2 Micrographie MEB correspondantes de 2017A de 2 états



a)Etat doux

b) Etat dure

Figure IV.3 Les facies de rupture correspondante de 2017A de 2 états

IV-2-Caractérisation des échantillons par diffraction des rayons X

Les Figure IV.4 présentent les diffractogrammes obtenus Des deux états étudié. C'est clair d'après ces résultats il y a présence des cinq pics caractéristiques d'une structure CFC qui sont (111), (200), (220), (311) et (400). Nous remarquons aussi la présence des pics associés à la phase précipités observés précédemment dans la partie métallographie dans le cas des alliages de la famille 2000.

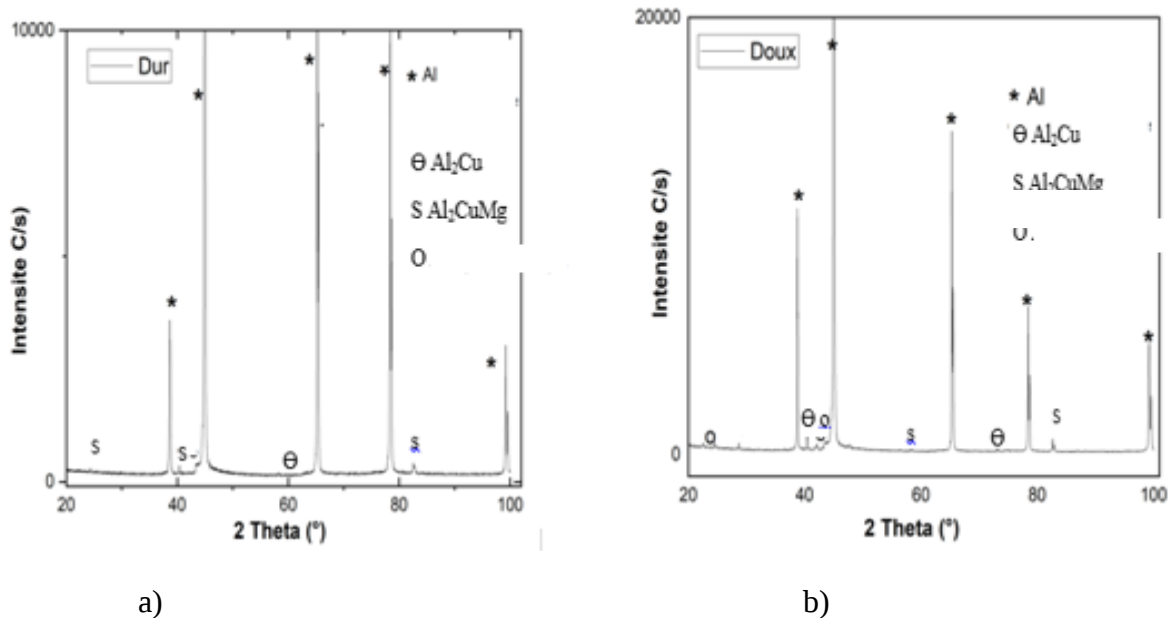


Figure IV.4 Diffractogrammes de l'2017A : (a) état dure, (b) état doux

IV-3- Étude des propriétés mécanique

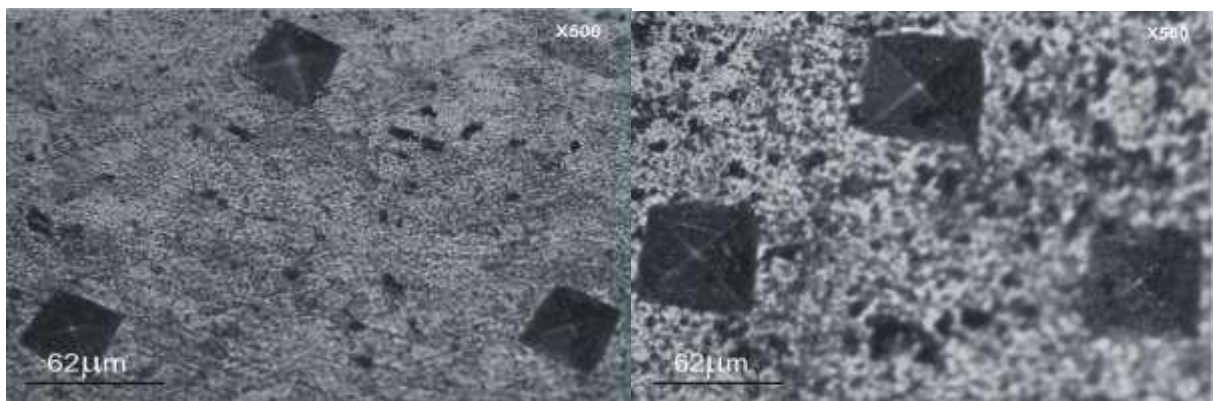
IV-3-1 Micro dureté

L'évaluation de la micro dureté est une étape cruciale pour comprendre les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Les essais de dureté effectués sur les états dur et doux révèlent des différences significatives qui peuvent être attribuées aux variations de traitement thermique des matériaux. Le tableau IV.2 présente les résultats de la microdureté obtenus par un essai de microdureté de Vickers concernant l'état doux, avec une moyenne des valeurs de dureté de 63.7 HV_{0.1}, indiquant un matériau relativement tendre, possiblement en raison d'une microstructure à

grains fins ou d'une phase de matériau moins résistante. En revanche, pour l'état dur, la moyenne des valeurs de dureté est de 144.13 HV_{0,1}, montrant une dureté nettement plus élevée, suggérant une microstructure renforcée, probablement due à un traitement thermique de durcissement ou à une composition riche en éléments d'alliage durcissant. Les différences observées entre les deux états peuvent être expliquées par leurs compositions et traitements thermiques respectifs. L'état doux, avec une dureté moyenne de 63.7 HV_{0,1}, pourrait représenter un matériau dans un état recuit (état O, voir annexe 2), favorisant une structure plus ductile en réduisant les contraintes internes. En revanche, l'état dur, avec une dureté moyenne de 144.13 HV_{0,1}, pourrait correspondre à un matériau trempé ou revenu (état T4, voir annexe 2), visant à augmenter la dureté et la résistance à l'usure.

Tab IV.2 résultat de la dureté

Dureté HV _{0,1} Matériaux	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
État doux	64.7	63.5	63.5	63.7
État dure	150.5	142.2	139.7	144.13



a)

b)

Figure IV.5 Micrographies des indentations dans deux états différents : (a) état dur, (b) état doux

IV-3-2 Essai de traction

Dans cette partie, afin de bien comprendre et corréler les microstructures observées avec le comportement anisotrope des deux états, dur et doux, nous avons adopté une méthodologie prenant en compte l'effet de l'anisotropie. Cette méthodologie inclut la variation de l'angle de prélèvement des éprouvettes par rapport à la direction de laminage (0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °).

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes (Figure **IV.6, 7,8**) de traction, qui permettent d'extraire les valeurs des propriétés mécaniques représentées dans le **Tableau IV.3, 4,5**

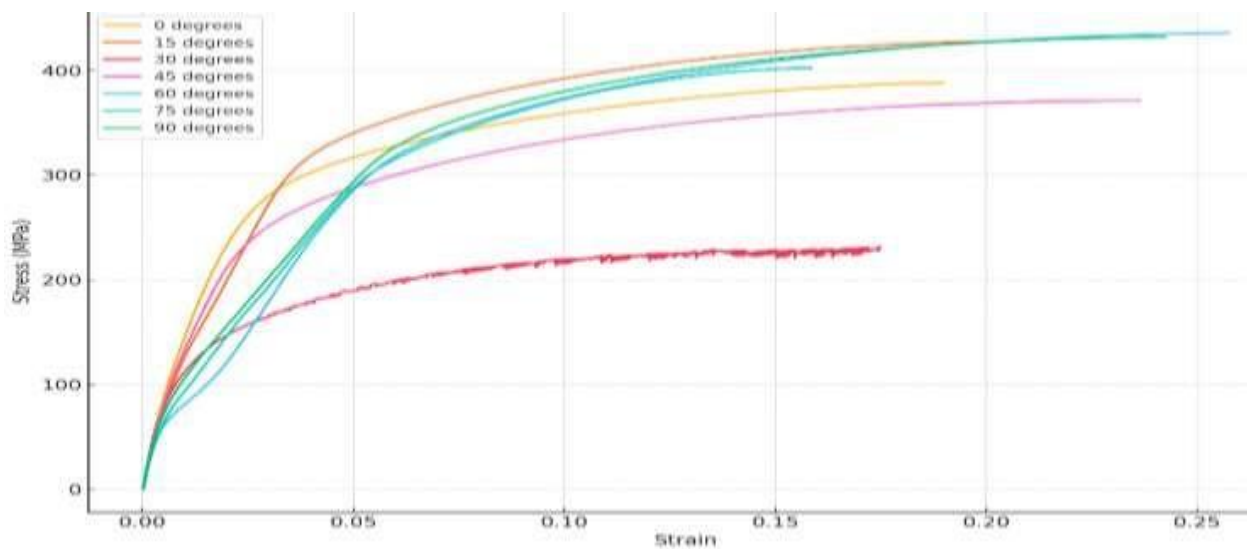
Résultat de l'état dur

Figure IV.6 Courbe de traction rationnelle de 2017 A selon les directions 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60°, 75 °, 90 °/DL pour l'état dure

Tab IV .3 Propriétés mécaniques de l'alliage 2017A selon les directions 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60°, 75 °, 90 °/DL pour l'état dure

Angle(°)	Re (MPa)	Rm (MPa)	E (Gpa)	A moy(%)
0	180	380	63	10
15	220	420	70	
30	160	350	60	
45	160	360	63	
60	200	420	68	
75	200	400	65	
90	180	420	62	

Résultat de l'état doux :

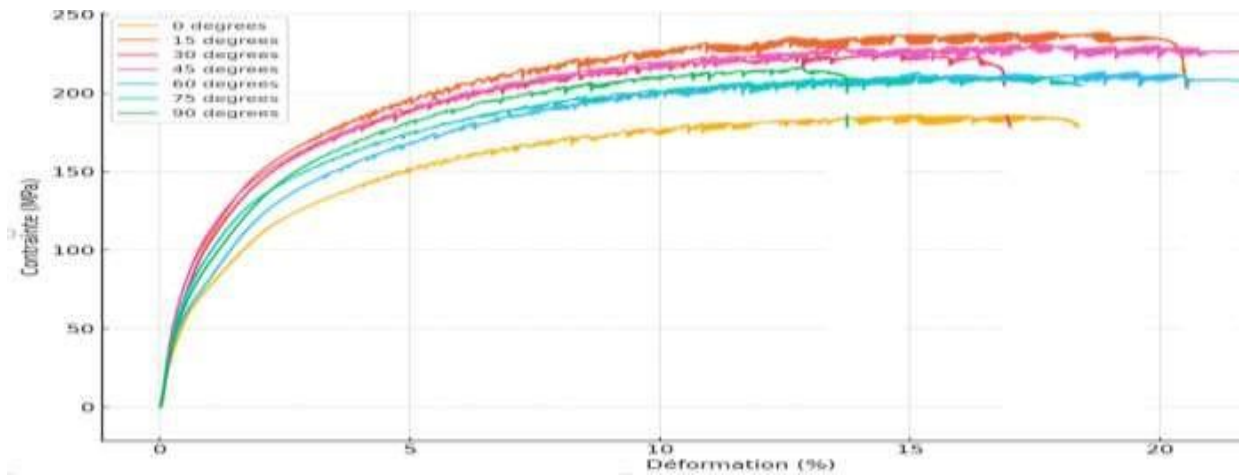


Figure IV.7 Courbe de traction rationnelle de 2017 A selon les directions 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °/DL pour l'état doux

Tab IV .4 Propriétés mécaniques de l'alliage 2017A selon les directions 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60°, 75 °, 90 °/DL pour l'état doux

Angle (°)	Re (MPa)	RM (MPa)	E (GPa)	A moy %
0	120	150	62	12
15	200	230	70	
30	160	210	63	
45	190	225	68	
60	120	180	60	
75	120	180	60	
90	155	190	62	

Calcule des coefficients de Lankford

les détails de calcul des coefficients de lankford sont présentés dans l'annexe III . les resultats de ces calculs sont exposes dans la section ci-dessis

Tab IV. 5 Coefficients de Lankford R en fonction des sept directions pour 2 états

Angle	Coefficient de Lankford (r)	
	Doux	Dure
0°	0.80	0.76
15°	0.85	0.78
30°	0.90	0.82
45°	0.95	0.88
60°	0.92	0.84
75°	0.87	0.80
90°	0.85	0.77

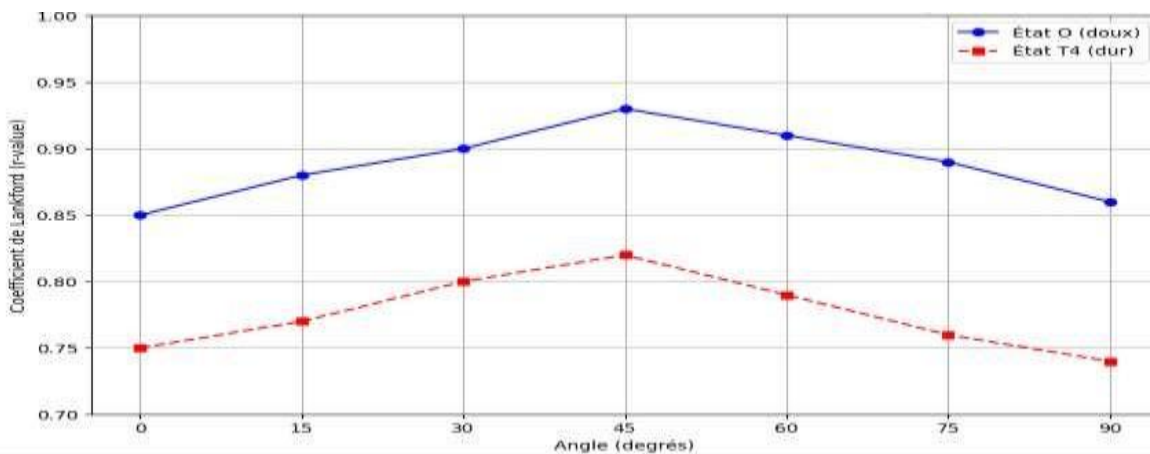


Figure IV.8 Coefficients de Lankford en fonction de 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 °, 90 °/DL pour les 2 états (dure et doux)

Discussion des résultats obtenus :

Nous remarquons clairement la présence de l'anisotropie dans les deux états. En variant l'angle, il y a un changement dans les propriétés mécaniques (R_m , R_e , E). Les tableaux regroupent les différentes constantes extraites de ces courbes en fonction de l'angle de prélèvement. Pour l'état dur, nous observons que la direction à 15° est favorable et que la direction à 30° est défavorable. Pour l'état doux, la direction à 15° est favorable et celle à 0° est défavorable. L'état dur présente des valeurs plus élevées de R_e et R_m comparé à l'état doux, ce qui indique une plus

grande capacité de l'état dur à résister à la déformation et à la rupture. Les valeurs du module de Young sont similaires dans les deux états, indiquant que la rigidité du matériau ne change pas significativement entre les états dur et doux. L'état doux présente généralement un allongement moyen légèrement plus élevé, ce qui indique une plus grande ductilité. Les coefficients de Lankford, qui mesurent la capacité d'un matériau à s'amincir dans la direction perpendiculaire à la direction de la contrainte appliquée, sont importants pour comprendre l'anisotropie plastique du matériau. Pour l'état dur, les coefficients varient de 0,76 à 0,88, tandis que pour l'état doux, ils varient de 0,80 à 0,95. Les coefficients de Lankford sont généralement plus élevés pour l'état doux, suggérant que l'état doux est plus anisotrope que l'état dur.

IV-3 Corrélation entre l'anisotropie mécaniques et microstructure

L'étude des microstructures de l'alliage d'aluminium 2017A permet de mieux comprendre ses propriétés mécaniques et leurs variations entre l'état dur et l'état doux. En analysant les images de microscopie électronique à balayage (MEB) et les faciès de rupture, on peut établir une corrélation directe entre les caractéristiques microstructurales et les performances mécaniques de l'alliage. Pour l'état dur, la présence de grains fins et de précipités homogènes, comme illustré dans la Figure IV.1a, augmente la dureté et la résistance mécanique. Les phases S, θ , Mg_2Si observées par MEB (Figure IV.2) contribuent au durcissement par précipitation. Les faciès de rupture (Figure IV.3a) montrent une rupture fragile, typique des matériaux durcis, où la fissure se propage rapidement à travers les grains, augmentant la dureté mais créant des sites de nucléation pour les fissures. En revanche, pour l'état doux, les grains plus gros et moins réguliers, comme observé dans la Figure IV-1b, réduisent la dureté mais augmentent la ductilité. La réduction des précipités de renforcement (Figure IV.2) explique la diminution de la dureté. Les faciès de rupture ductiles (Figure IV.3b) indiquent une absorption significative d'énergie avant la rupture, caractérisée par des dimples et cavités formées par la coalescence de vides autour des particules ou inclusions, permettant une plus grande déformation plastique et une rupture intergranulaire où l'énergie de déformation est absorbée.

IV-4 Simulation du comportement mécanique en traction

Le critère de Hill est particulièrement adapté pour modéliser l'anisotropie plastique des matériaux. Il utilise des coefficients F, G, H, L, M et N pour dissocier les différentes directions principales.

Abaqus, un logiciel de simulation par éléments finis, intègre ce critère pour analyser le comportement mécanique des matériaux. Dans cette étude, le modèle de Hill d'Abaqus a été utilisé pour valider les résultats expérimentaux sur l'anisotropie de l'alliage d'aluminium 2017A, dans

ses états dur et doux. Les essais de traction sur des éprouvettes en 2017A ont été simulés en utilisant le modèle anisotrope de Hill dans Abaqus. La simulation 3D des éprouvettes a été réalisée en plusieurs étapes : le maillage, puis l'application des conditions aux limites. La partie élastique de l'alliage 2017A a été modélisée en intégrant le module de Young déterminé expérimentalement et le coefficient de Poisson $\nu=0.33$. Ensuite, la partie plastique a été représentée à partir des courbes de contrainte- déformation $[\sigma-\varepsilon]$ expérimentales. Enfin, l'anisotropie a été simulée en appliquant le potentiel de Hill implémenté dans Abaqus.

Les limites élastiques R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} , R_{13} , et R_{23} ont été calculées en utilisant les coefficients de Lankford R_0° , R_{45° , et R_{90° , conformément aux équations appropriées (voir l'annexe III).

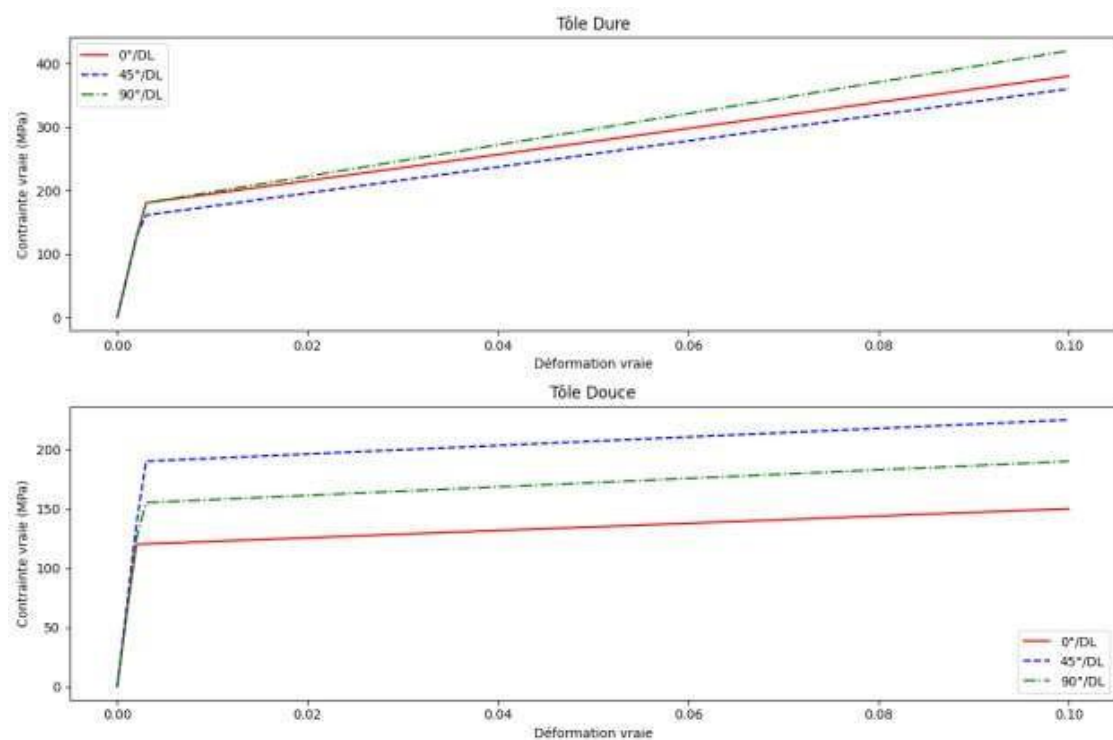


Figure IV.9 Courbes de traction simulée après l'implémentation du potentiel de Hill selon les directions 0°, 45° et 90°/DL

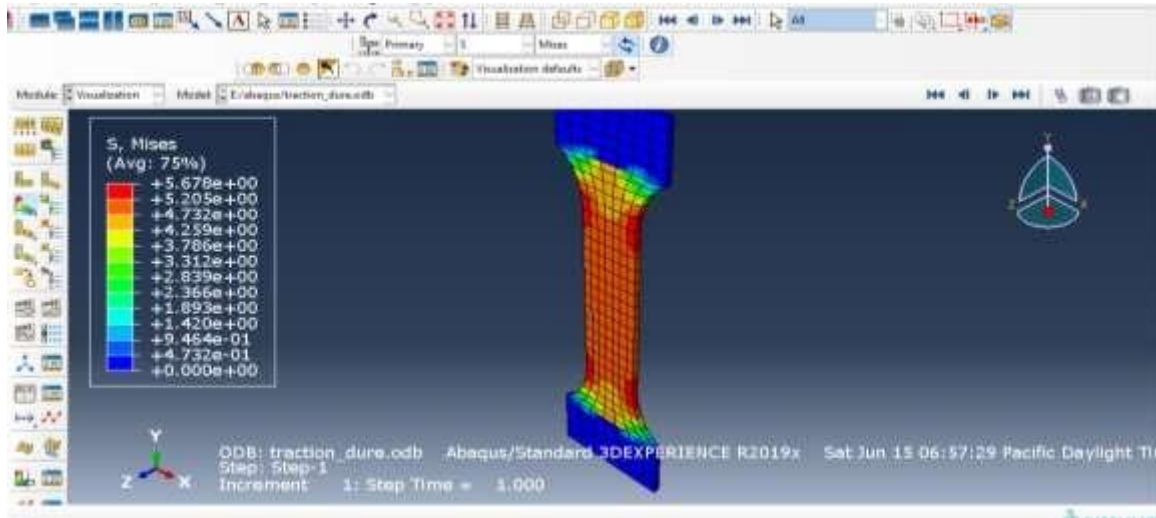


Figure IV.10 Éprouvette de traction en AA2017-O simulée à une déformation selon DL

Interprétation et Comparaison entre Simulation et Expérience

Cette étude compare les résultats expérimentaux et les simulations numériques du comportement mécanique de l'alliage d'aluminium 2017A. Les essais de traction uniaxiale ont été réalisés sur des tôles dures et douces à différentes orientations (0° , 45° , 90°) par rapport à la direction de laminage (DL). Les résultats montrent une anisotropie marquée dans les propriétés mécaniques, avec des variations significatives de la contrainte en fonction de l'orientation. Les simulations numériques ont été effectuées pour les mêmes conditions expérimentales. Les résultats de la simulation montrent une bonne concordance avec les données expérimentales, reproduisant les tendances observées et confirmant l'anisotropie des propriétés mécaniques. La simulation prédit également des variations de la contrainte en fonction de l'orientation, alignées avec les observations expérimentales.

Conclusion Générale

L'étude approfondie de l'alliage d'aluminium 2017A (duralumin) a permis de mettre en lumière ses caractéristiques mécaniques et microstructurales cruciales pour son utilisation dans l'industrie aéronautique. Les essais de traction uniaxiale et les analyses microstructurales ont révélé une anisotropie significative des propriétés mécaniques influencée par les orientations des échantillons et les traitements thermiques appliqués. Les résultats démontrent que les phases de précipitation et les dispersoïdes jouent un rôle clé dans le durcissement de l'alliage.

Principales Conclusions :

Anisotropie des Propriétés Mécaniques :

- Les propriétés mécaniques varient considérablement selon les orientations des échantillons et les traitements thermiques. L'état dur de l'alliage présente une microstructure plus consolidée avec des grains fins et des précipités homogènes, augmentant la dureté et la résistance mécanique.
- En revanche, l'état doux montre des grains plus gros et une réduction des précipités, ce qui se traduit par une plus grande ductilité mais une moindre résistance mécanique.

Rôle des Phases de Précipitation :

- Les phases telles que S (Al_2CuMg), θ (Al_2Cu) sont cruciales pour le durcissement par précipitation, augmentant significativement la dureté et la résistance mécanique de l'alliage.
- La distribution et la morphologie de ces précipités varient entre les états dur et doux, influençant directement les propriétés mécaniques.

Comportement en Rupture :

- L'état dur présente une rupture fragile dominée par les précipités, tandis que l'état doux montre une rupture ductile avec une absorption d'énergie significative avant la rupture.

Recommandations :

Optimisation des Procédés de Traitement Thermique :

- Pour maximiser les performances mécaniques de l'alliage 2017A, il est recommandé d'optimiser les traitements thermiques pour équilibrer la dureté et la ductilité en fonction des applications spécifiques.
- Les traitements de trempe et de revenu doivent être ajustés pour favoriser la formation de précipités renforçant tout en contrôlant la taille des grains.

Applications Spécifiques en Aéronautique :

- Utiliser l'état dur pour des composants nécessitant une haute résistance mécanique, tels que les stabilisateurs et les gouvernails.
- Préférer l'état doux pour les structures nécessitant une meilleure ductilité, comme les cadres de fuselage et les nervures des ailes.

Contrôle Qualité et Inspection :

- Mettre en place des protocoles de contrôle qualité rigoureux pour vérifier la microstructure et les propriétés mécaniques des composants fabriqués en 2017A.
- Utiliser des techniques de diffraction des rayons X et de microscopie électronique à balayage pour une caractérisation détaillée des phases de précipitation et des grains.

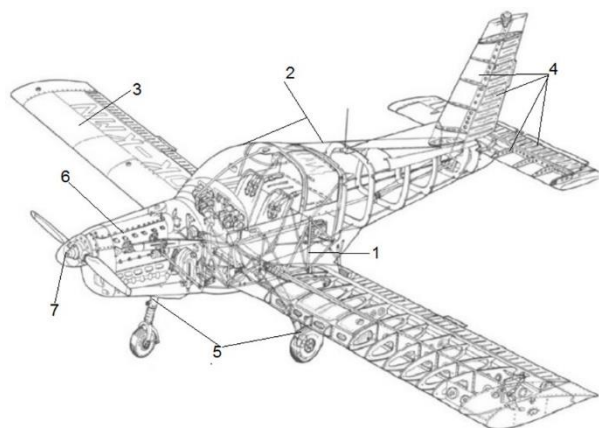
Reference

- [1]: R. DEVELAY Traitements thermiques des alliages d'aluminium. Technique de l'ingénieur, M 1290 (2000).
- [2]: SCIENCE DES MATERIAUX partie1 S.BENSAADA, N.BENDRIHEM et B.BENSAAD ,2010
- [3]: A. Ourabi : Etude du comportement des fils de cuivre et des fils d'alliage d'aluminium déformés industriellement. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Beskra, (2017). [4]:A. BOUCHELAGHEM : Etude des phénomènes de précipitation dans un alliage Al-Mg-Si à excès de Si. Mémoire de Master, Université 8 mai 1945 Guelma,(2019)
- [5]: I. Hamdi : Phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000). Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Beskra, (2014).
- [6]Bourbia Wafa , Kerrouchi Rima . Effet des traitements thermiques sur le comportement microstructural, mécanique et électrochimique de l'alliage d'aluminium 2017A , Mémoire de master , Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel (2021)
- [7]Roger Develay propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés alliages de la série (2000) technique d'ingénieur .
- [8]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)
- [9]yahi sihem , Contribution à l'étude microstructurale des Alliages d'aluminium AlMgSi, Mémoire de master, université Larbi Ben M'hidi – Oum EL Bouaghi (2012)
- [10] AMARA Saci: Contrôle de la corrosion des alliages d'aluminium 2024 T3. Etude de l'influence des éléments d'alliages et de traitements thermiques, Mémoire de Magister, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE(2014)
- [11] BOUGUERRA Ibtihel ,DIABI Djazia :Amélioration de la tenue mécanique des alliages d'aluminium par modification des états métallurgiques : Etude multi-échelles, Mémoire du projet de fin d'étude d'ingénieur d'état , Ecole Nationale Polytechnique(2019)
- [12] Audrey Cochard : microstructures et propriétés mécaniques des alliages de type duralumin du breguet 765 n 504 64-PH , these de doctorat , université de Toulouse (2016)
- [13] J.berrali,G.meader , Precie de metallurgie,
- [14] Handbook of allumium , Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing . George E. Totten , D. Scott MacKenzie

-
- [15] Mémoire :Etude de l'état métallurgique d'un alliage d'aluminium (AU4G1) pré traité thermiquement, laminé à froid puis recuit realise par Amara khawla ,2013
- [16] cours_de_construction_aeronautique (connaissance avion du B.I.A au C.A.E.A)
- [17] A.Bachiri Généralités sur les structures des avions , 2014
- [18] N.matougui mécanique et physique de mise en forme des metaux
- [19] <https://www.euralliage.com/2017A.htm>
- [20] <http://joho.monsite.orange.fr/>
- [21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Entreprise_de_construction_a%C3%A9ronautique
- [22] <https://www.aeronautique.ma/algerie/L-Entreprise-de-Construction-Aeronautique-ECA-de->
- [23] Tafraoui_a124.html
- [24] https://www.mdn.dz/site_cfa/sommaire/fabrication/eca/eca_fr.php
- [25] <https://nabertherm.com/en>

Annexe I : l'avion

1-Structure et construction :



N°	Désignation
01	Châssis
02	Monocoque
03	Demi-Aile
04	Empennage
05	Train d'atterrissage
06	Moteur M337Ak
07	Hélice V500a

Figure 1.structure de l'avion

- La conception d'un avion doit réussir à harmoniser deux exigences en apparence opposées : la légèreté et la rigidité.
- L'ensemble formé par le fuselage, les ailes et les empennages est désigné sous le terme de "cellule".

2- Emplacement de l'Alliage d'Aluminium 2017 dans l'avion :

L'alliage d'aluminium 2017 (2017A) est utilisé dans plusieurs parties critiques d'avion, exploitant ses propriétés à la fois dans ses états doux et durs pour différentes applications :

2-1- État Doux (Avant Durcissement) :

Cadres de Fuselage : Utilisé pour fabriquer les cadres internes du fuselage, l'2017A dans son état doux permet une mise en forme précise et une intégration facile avec d'autres composants avant le durcissement.

Nervures : Les nervures des ailes, qui fournissent la forme et le support structurel pour le revêtement, sont souvent fabriquées en 2017A doux. Cela permet une mise en forme et un assemblage précis avant les traitements thermiques nécessaires.

Cadres de l'Empennage : Dans son état doux, l'2017A est utilisé pour les cadres de l'empennage. Cette phase facilite la mise en forme et l'assemblage initial avant les traitements thermiques de durcissement.

Revêtement de Fuselage : Dans son état doux, l'2017A est utilisé pour le revêtement du fuselage. Cette application profite de la capacité de l'alliage à résister à la fatigue tout en permettant une certaine flexibilité nécessaire pour absorber les vibrations et les chocs mineurs durant le vol.

2-3- État Dur (Après Durcissement) :

- **Stabilisateurs Horizontaux et Verticaux :** Les stabilisateurs, cruciaux pour la stabilité et le contrôle de l'avion, sont fabriqués en 2017A durci. Cela garantit qu'ils peuvent supporter les forces aérodynamiques tout en restant rigides et légers.
- **Gouvernail de Direction et de Profondeur :** Les gouvernails, qui doivent être à la fois légers et résistants pour assurer une manœuvrabilité efficace, utilisent l'2017A durci. Le durcissement du matériau améliore leur durabilité et leur capacité à résister à l'usure et aux contraintes mécaniques.
- **Revêtement des Ailes :** Le revêtement extérieur des ailes est constitué de tôles duralumin (2017A) durcies pour offrir une protection solide et légère. Le durcissement améliore la résistance aux dommages et à la fatigue.
- **Volets et Ailerons :** Les volets et ailerons, également métalliques et soumis à des contraintes aérodynamiques, utilisent l'2017A dur pour garantir une opération fiable et une longue durée de vie.

3-Contraintes mécaniques : Les forces principales agissant sur l'aéronef sont les suivantes :

- La gravité, représentée par le poids de l'appareil.
- Les forces aérodynamiques résultant de chaque aile
- Les forces aérodynamiques exercées sur les gouvernes.
- La traction ou la poussée générée par les moteurs.
- Les forces inertielles, telles que les forces centrifuges ou d'autres types, qui se produisent lors des manœuvres de l'appareil. La contrainte, généralement notée, est définie comme la pression exercée par une force (F) sur une surface donnée (S), calculée selon la formule :

$$= F / S.$$

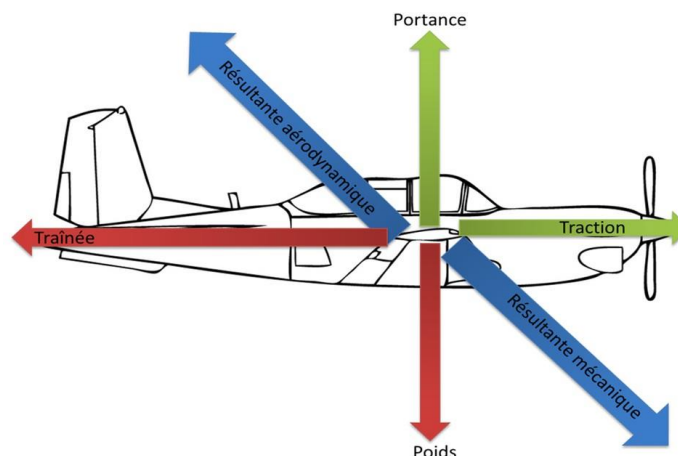
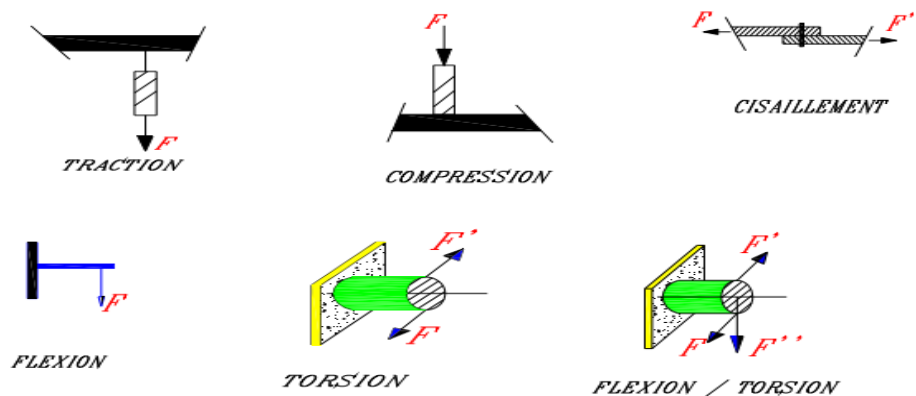


Figure 2-contraintes mécaniques



Des Illustrations sur l'emplacement de AA2017:

Empenage	Cadre de fuselage	Aile	Aile
		1) Nervures. 2) Longeron principal. 3) Longeron arrière. 4) Lisses.	
Structure de l'Aile	Assemblage du stabilisateur	La structure interne des ailes.	Fuselage

Annexe II : alliages d'aluminium 2017A

1-Désignations de l'alliage 2017

Tableau II.1 : désignations de l'alliage 2017

Norme Européenne EN 1706	France AFNOR	Allemagne DIN	U.K BS	Italie UNI	USA ASTM	Japon	Espagne
AU4G	2017A	AlCuMg1	2017A	9002/2	2017A	A2017	L3120

2-Désignation conventionnelle des états de livraison ou états métallurgiques :

Les états métallurgiques sont standardisés. Ils sont indiqués par une lettre (F, O, H, W ou T) suivie d'un ou plusieurs chiffres. Le premier chiffre indique le cycle de traitement thermique ou mécanique, les chiffres suivants montrent les variations possibles du cycle.

États fondamentaux

Tableau II.2 : Désignation conventionnelle des états de livraison fondamentaux

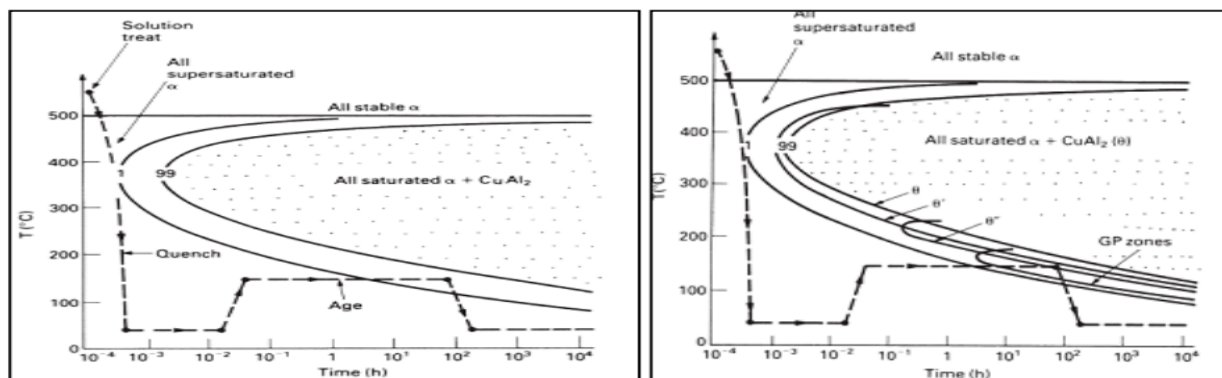
Symbole	Etat	Observations
F	brut de fabrication	cette désignation s'applique aux produits obtenus par déformation plastique sans contrôle particulier les taux de durcissement ou d'adoucissement provoqué par la déformation ou un éventuel traitement thermique.
O	Recuit	C'est l'état le plus ductile. Il est généralement obtenu par un traitement dit de recuit, qui n'est pas suivi d'un écrouissage.
H	Ecroui	ce symbole s'applique aux produits qui ont été écrouis, avec ou sans traitement ultérieur, à une température suffisante pour adoucir partiellement le métal.
W	mis en solution (trempe)	Il s'agit d'un état métallurgique instable : il s'applique aux alliages ayant subi une mise en solution suivie d'une trempe et continuant à se former à température ambiante.
T	traité thermiquement	Les traitements thermiques à traiter sont des combinaisons de mise en solution, de trempe, de vieillissement, de durcissement avec application éventuelle de déformations plastiques.

Subdivisions des états fondamentaux

Tableau II.3 : Désignation conventionnelle des Subdivisions des états fondamentaux

états fondamentaux	Subdivisions		
H	1^{er} chiffre : états	2^{eme} chiffre : dureté et précise le niveau de résistance min	
		X	Niveau de dureté
		2	
	H1X: Ecroui seul	4	2/4 dur
	H2X : Ecroui recuit	6	3/4 dur
	H3X : Ecroui stabilisé	8	4/4 dur
	H4X : Ecroui verni	9	Extra dur
T			
	T1	refroidi * + mûri	
	T2	refroidi* + écroui + mûri	
	T3	mis en solution + écroui + mûri	
	T4	mis en solution + mûri	
	T5	refroidi* + revenu	
	T6	mise en solution + revenu	
	T7	mise en solution + revenu	
	T8	mise en solution + écroui + revenu	
	T9	mise en solution + revenu + écroui	
	T10	refroidi (après transformation à chaud) + revenu + écroui	

3-Diagramme TTT d'alliage 2017



4- Caractéristiques Mécaniques Typiques

Tôles EN AW-2017 A (Etat standard T4 / T451)

Etat	Epaisseur (mm)		Rm (MPa)		Rp0.2 (MPa)		A % min		Rayon de pliage		Dureté HB
	Sup à	jusqu'à	min	max	min	max	A 50	A	180°	90°	
0	> 0,4	1,5		225		145	12			0 e	55
	1,5	3,0		225		145	14			1,0 e	55
	3,0	6,0		225		145	13		0,5 e	1,5 e	55
	6,0	9,0		225		145	13		1,0 e	2,5 e	55
	9,0	12,5		225		145	13			4,0 e	55
	12,5	25,0		225		145		12			55
T4 T 451	> 0,4	1,5	390		245			14	3,0 e	3,0 e	110
	1,5	6,0	390		245			15	5,0 e	5,0 e	110
	6,0	12,5	390		260			13		8,0 e	111
T451	12,5	40,0	390		250			12			110
	40,0	100,0	385		240			10			108
	100,0	120,0	370		240			8			105
	120,0	150,0	350		240			4			101
T42	> 0,4	3,0	390		235		14				109
	3,0	12,5	390		235		15				109
	12,5	25,0	390		235			12			109

Annexe III: La Plasticité

Module de Young (E) : Défini par la pente de la partie linéaire de la courbe $[\sigma - \varepsilon]$, il exprime la relation entre contrainte et déformation dans le domaine élastique selon la loi de Hooke . $E=d\sigma/d\varepsilon$

Limite élastique (Re0.2%) : C'est la contrainte maximale avant que le matériau ne passe du domaine élastique au domaine plastique. Elle correspond conventionnellement à une déformation de 0.2% .
 $Re=Fe/S_0$

Résistance maximale (Rm) : C'est la contrainte maximale que peut supporter un matériau dans le domaine plastique, au-delà de laquelle la déformation devient inhomogène et la striction apparaît .
 $Rm=Fm/S_0$

Allongement (A) : Il mesure la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre, exprimé en pourcentage de la longueur initiale. $A\%=100\times\{(l_f-l_0)/l_0\}$

où l_0 et l_f sont les longueurs initiale et finale, respectivement.

Définition du Coefficient de Lankford (r-value)

Le coefficient de Lankford (r-value) est défini comme le rapport de la déformation plastique dans la largeur de l'éprouvette à la déformation plastique dans l'épaisseur de l'éprouvette, sous une charge de traction uniaxiale. Formellement, il est exprimé par :

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

ε_2 : est la déformation plastique dans la direction de la largeur de l'éprouvette.

ε_3 : est la déformation plastique dans la direction de l'épaisseur de l'éprouvette.

les critères de plasticité Hill48 :

A- Critère de Hill quadratique (1948) et ces Applications :

Le critère de Hill (1948) est un modèle anisotrope de plasticité qui étend le critère de von Mises pour prendre en compte l'anisotropie dans les matériaux métalliques. Ce critère est particulièrement utilisé pour les matériaux qui présentent des propriétés différentes dans différentes directions, comme les tôles

laminées. Le critère de Hill48 s'exprime dans le repère orthotrope sous la forme suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \quad (1)$$

Si : σ_0^1 , σ_0^2 et σ_0^3 sont des contraintes d'écoulement en traction uniaxiale suivant les directions principales d'anisotropie, on voit que :

$$G + H = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^1)^2}, \quad F + H = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^2)^2}, \quad F + G = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^3)^2}$$

Si : σ_0^{23} , σ_0^{13} et σ_0^{12} sont des contraintes en cisaillement simples par rapport aux axes principaux plans d'anisotropie, on obtient :

$$2L = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^{23})^2}, \quad 2M = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^{13})^2}, \quad 2N = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^{12})^2}$$

Selon l'hypothèse de contraintes planes, consistant à négliger toutes les composantes du tenseur des contraintes hors plan de la tôle ($\sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$), ce critère peut se réduire à l'expression suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{11} - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \quad (2)$$

Si l'on pose $F = G = H = 1/2$, $L = M = N = 3/2$, le critère de Hill se réduit au critère de Von Mises correspondant à un matériau incompressible isotrope.

Rappelons tout d'abord les relations classiques relatives à l'essai de traction uniaxiale sur une tôle orthotrope dont le comportement plastique est décrit par le critère de Hill quadratique et la loi d'écoulement associée par le principe de normalité :

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{(F \sin^4 \theta + G \cos^4 \theta + H \cos^2 2\theta + 2N \sin^2 \theta \cos^2 \theta)^{1/2}} \quad (2a)$$

$$r(\theta) = \frac{H \cos^2 2\theta - (F + G - 2N) \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{F \sin^2 \theta + G \cos^2 \theta} \quad (2b)$$

où $\sigma(\theta)$ et $R(\theta)$ désignent respectivement la contrainte de traction et le coefficient de Lankford et F , G , H , N les paramètres du critère de Hill.

II.2.6. Détermination des grandeurs mécaniques.

Nous choisissons une plage de déformation plastique homogène afin d'éviter la zone de striction. Les deux hypothèses de plasticité qui consistent au découplage total de tenseur de contrainte de celui de déformation.

II.2.6.1. Plasticité Associée AFR (Associated Flow Rule)

La détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du mélange entre les contraintes d'écoulement et les coefficients de Lankford issus de l'expérimental.

➤ Les 04 paramètres de Hill48 s'obtiennent par le biais de l'équation suivante

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{2\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \right), \quad G = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2\sigma_0^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \right), \quad H = \frac{1}{2} \left(\frac{2\sigma_0^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \right), \quad N = \frac{1}{2} \left(\frac{4\sigma_0^2}{\sigma_{45}^2} - 1 + \frac{\sigma_0^2(r_{90}-1)}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \right)$$

II.2.6.2. Plasticité Non Associée non-AFR (Non Associated Flow Rule)

La détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du découplage du tenseur des contraintes d'écoulement par rapport à celui des déformations (les coefficients de Lankford) issus de l'expérimental.

➤ Les 04 paramètres de Hill48 s'obtiennent par le modèle d'identification suivant :

1- Soit à partir du tenseur de contraintes $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_b$ uniquement (non-AFR-s).

$$2F = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} - 1 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2G = 1 - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2H = 1 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{90}^2} - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}, \quad 2N = \frac{4\sigma_0^2}{\sigma_{45}^2} - \frac{\sigma_0^2}{\sigma_b^2}$$

2- Soit à partir des coefficients de Lankford r_0, r_{45}, r_{90} uniquement (non-AFR-r).

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, \quad G = \frac{1}{(1+r_0)}, \quad H = \frac{r_0}{(1+r_0)}, \quad N = \frac{(1+2r_{45})(r_0+r_{90})}{2r_{90}(1+r_0)}$$

Tableau III.1 Paramètres d'anisotropie calculés pour l'aluminium AA2017 dans les deux approches.

AFR	F	G	H	N
	0.504	0.707	0.292	1.882
NAFR-s	F	G	H	N
	0.343	0.546	0.453	1.481
NAFR-r	F	G	H	N
	0.755	0.561	0.438	2.055

Les potentiels de HILL :

Nous avons intégré dans la matrice du potentiel les limites élastiques $R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{12}, R_{13}$ et R_{23} calculées à partir des coefficients de Lankford R_0, R_{45} et R_{90}

- $R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1$

- $R_{22} = \sqrt{\frac{R_{90^\circ}(R_{0^\circ} + 1)}{R_{0^\circ}(R_{90^\circ} + 1)}}$

- $R_{33} = \sqrt{\frac{R_{90^\circ}(R_{0^\circ} + 1)}{R_{0^\circ} + R_{90^\circ}}}$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3R_{90^\circ}(R_{0^\circ} + 1)}{(2R_{45^\circ} + 1)(R_{0^\circ} + R_{90^\circ})}}$$

Les valeurs résumées dans ce tableau permettent de décrire les limites élastiques de l'alliage AA2017 dans ses états dur et doux, conformément aux coefficients de Lankford obtenus expérimentalement.

Tableau III.1 Limites élastiques du potentiel de Hill

	R11	R22	R33	R12	R13	R23
Doux	1.000	1.016	0.963	0.979	1.000	1.000
Dure	1.000	1.003	0.941	0.982	1.000	1.000