

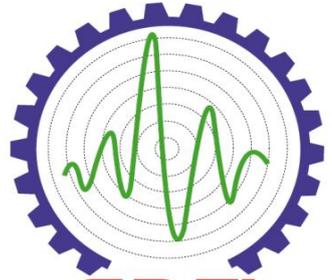
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



CRTI
Centre de Recherche en Technologies Industrielles

Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie des Matériaux

Mise en œuvre de l'essai de fatigue sur des alliages d'aluminium

Réalisé Par

BENRABAH Salima

Composition du jury :

Président	K. ABADLI	Docteur ENP
Examineur	M.KASSER	Docteur ENP
Examineur	L.HEMMOUCHE	Docteur EMP
Promoteur ENP	M. L. DJEGHLAL	Professeur ENP
Promoteur CRTI	S. OUALLAM	Attaché de Recherche CRTI

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie
Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie des Matériaux

Mise en œuvre de l'essai de fatigue sur des alliages d'aluminium

Réalisé Par

BENRABAH Salima

Composition du jury :

Président	K. ABADLI	Docteur ENP
Examineur	M.KASSER	Docteur ENP
Examineur	L.HEMMOUCHE	Docteur EMP
Promoteur ENP	M. L. DJEHLAL	Professeur ENP
Promoteur CRTI	S. OUALLAM	Attaché de Recherche CRTI

ملخص

مشكلة التعب الهيكلي شائعة في جميع قطاعات الصناعة البحرية والطيران والهندسة وغيرها الكثير. من أجل فهم هذه الظاهرة الضارة بشكل كامل، يتم إجراء اختبارات لأنواع مختلفة من الإجهاد على مستوى المختبر، وهذا يتطلب فهمًا جيدًا لبروتوكول الاختبار. يتيح تحليل النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذه الاختبارات دراسة سلوك المادة.

تتكون دراستنا من تنفيذ وتحديد ظروف التشغيل لاختبار التعب أحادي المحور مع اختبار نوعين من العينات المصنوعة من سبائك الألومنيوم ذات السماكات المختلفة. يتم إجراء اختبار الشد لتحديد السلوك الميكانيكي للعينات وللحصول على المعلمات اللازمة لإجراء اختبار التعب، دراسة ميتالوغرافية لتوصيف العينات قبل إجراء اختبار التعب. جميع النتائج التي تم الحصول عليها من الاختبار هي في شكل منحنيات وحلقة التباطؤ.

الكلمات الرئيسية: اختبار الإجهاد والتعب لسبائك الألومنيوم والألمنيوم

Abstract:

The problem of fatigue of structures is commonly present in all sectors of the maritime, aeronautical, and mechanical and many other industries. In order to fully understand this harmful phenomenon, tests of different types of stresses are carried out at the laboratory level. This requires a good mastery of the test protocol. The analysis of the results obtained by these tests allows to study the behavior of the material.

Our study consists in the implementation and the determination of the operating conditions of a uniaxial fatigue test with two types of specimens made of aluminum alloys of different thicknesses are tested. A tensile test is carried out to determine the mechanical behavior of the specimens and to have the necessary parameters to carry out a fatigue test, a metallographic study to characterize the specimens before carrying out the fatigue test. All the results obtained from the test are in the form of curves and a hysteresis loop.

Key words: Fatigue test-fatigue of aluminum- aluminum's alloys.

Résumé :

Le problème de la fatigue des structures est communément présent dans tous les secteurs d'industrie maritime, aéronautique, mécanique et bien d'autres encore. Afin de bien comprendre ce phénomène néfaste, des essais de différents types de sollicitations sont réalisés au niveau des laboratoires, Ceci nécessite une bonne maîtrise du protocole d'essai. L'analyse des résultats obtenus par ces essais permet d'étudier le comportement du matériau.

Notre étude consiste à la mise en œuvre et la détermination des conditions opératoires d'un essai de fatigue uniaxial avec deux types d'éprouvettes en alliages d'aluminium de différentes épaisseurs sont testées. Un essai de traction est effectué pour déterminer le comportement mécanique des éprouvettes et avoir les paramètres nécessaires pour réaliser un essai de fatigue, une étude métallographique pour caractériser les éprouvettes avant d'effectuer l'essai de fatigue. L'ensemble des résultats obtenus de l'essai sont sous forme des courbes et une boucle d'hystérésis.

Mots clés : Essai de fatigue-la fatigue des alliages d'aluminium- aluminium.

Remercîment

En premier lieu je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la force et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Je tiens d'abord à remercier le Directeur du centre Pr. BADJI Ryad, de m'avoir accueillie dans le Centre.

Je remercie Dr.OUALLAM Seddik, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, sans lui ce travail n'aurait pas été fait.

Je remercie chaleureusement Pr.DJEGHLAL, qui a assuré l'encadrement de cette étude et pour ces orientations et ces conseils.

J'adresse mes plus profonds remerciements à Messieurs Dr. HEMMOUCHE et Dr. BELLOULA pour leurs aides et orientations.

Je voudrai également remercier toutes les personnes qui m'ont aidée au niveau de ce centre M.Boudjana abderezak et M.Kormani Hanni.

Je remercie vivement Monsieur Dr.K. ABADLI d'avoir accepté de présider ce jury.

Nous exprimons nos reconnaissances à Messieurs Dr.L.HEMMOUCHE et Dr.M.KASSER, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour avoir accepté de l'examiner et de faire partie de ce jury.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Latifa, Nadia, Lamia, Yasmien, Leyla, pour leurs aides dans la réalisation de ce mémoire.

Je dédie ce travail :

A mes chers parents, ils m'ont dotée d'une éducation digne, leur amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui ;

A la mémoire de mes grands-parents ;

A mes chers grands-parents ;

A ma moitié Leyla ;

A celui que j'aime le plus au monde Ahmed ;

A mes aimables Mira, Djamila, Latifa ;

A toutes mes tantes et leurs familles ;

A tous mes oncles et leurs familles ;

A mes chères cousines ;

A mes cousins spécialement Hichem ;

A ma chérie Sara qui a été toujours là pour moi ;

A mes copines : Sabrine, Noussaiba, Asma ;

A tous ceux qui me sont chers

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	12
1 Chapitre 1 : L'essai de fatigue	15
1.1 Introduction :.....	16
1.2 Essai de fatigue :	16
1.2.1 Essai de flexion rotative :.....	16
1.2.2 Essai de traction – compression :	17
1.2.3 Essai de torsion :	17
1.3 Les contraintes appliquées :	17
1.3.1 Les types de contraintes :	19
1.4 Termes et symboles relatifs à l'essai de fatigue :.....	19
1.5 Le comportement du matériau lors d'un essai de fatigue:	20
1.5.1 La boucle d'hystérésis :.....	20
1.5.2 La courbe de Wöhler :.....	21
1.5.2.1 Dispersion des résultats :.....	23
1.6 La fatigue à faible cycle :	24
1.7 La fatigue à grand nombre de cycle :	25
1.8 Les facteurs influençant les résultats de l'essai :.....	25
1.8.1 L'effet de l'entaille :	25
1.8.2 L'influence de la fréquence :.....	26
1.8.3 L'influence de la température :	27
1.8.4 L'influence de la corrosion :	27
1.8.5 L'effet de concentration des contraintes :	27
1.8.6 L'effet de la contrainte moyenne :	27
1.9 La rupture par fatigue :.....	29
1.9.1 La période d'amorçage :.....	29
1.9.2 La période de propagation :.....	30
1.9.3 La rupture brutale :.....	31
2 Chapitre 2 : L'aluminium et ses alliages.....	25
2.1 Introduction :.....	37
2.2 Fabrication de l'aluminium et de ses alliages :	37
2.3 Propriétés de l'aluminium :	38
2.3.1 Propriété physiques :.....	38
2.3.2 Propriétés électriques et magnétiques :	38

2.3.3	Propriétés optiques :.....	38
2.3.4	Propriétés mécaniques:	38
2.3.5	Résistance à la corrosion :.....	39
2.4	Les alliages d'aluminium :.....	39
2.4.1	Les alliages corroyés :.....	40
2.4.2	Les alliages de moulage :.....	42
2.5	Influence des éléments d'addition :.....	43
2.6	La métallurgie de l'aluminium et ces alliages :	45
2.6.1	Durcissement par écrouissage :.....	45
2.6.2	Durcissement structural :	46
2.6.3	Traitement thermiques d'adoucissent, restauration recuit :	46
2.7	Application des principaux alliages d'Al :.....	47
2.8	Généralités sur les alliages d'aluminium de la série 2000 :	48
2.8.1	La nuance 2017 A :.....	49
3	Chapitre03 : La fatigue des alliages d'aluminium	38
3.1	Introduction :.....	52
3.2	Ténacité:.....	39
3.3	La fatigue des alliages d'aluminium :	53
3.3.1	La fissure par fatigue des alliages d'aluminium :	56
3.3.2	Le comportement du matériau lors de l'essai :	57
3.3.3	L'étude sur la durée de vie des alliages d'aluminium :.....	59
4	Chapitre 4 : Techniques expérimentales	47
4.1	Introduction :.....	62
4.2	Caractérisation mécanique :.....	62
4.2.1	Préparation des éprouvettes :	62
4.2.2	Essai de traction :	63
4.2.3	Microdureté :.....	65
4.2.4	Essai de fatigue :	66
4.3	Caractérisation métallographiques :.....	68
4.3.1	Découpe à jet d'eau.....	68
4.3.2	Prélèvement :.....	69
4.3.3	Enrobage des échantillons :.....	69
4.3.4	Polissage :	70
4.3.5	Solution d'attaque :.....	71
4.3.6	Microscopie :.....	71
4.3.7	La microscopie électronique à balayage (MEB) :.....	72
5	Chapitre 5 : Résultats et discussions	59
5.1	Matériau de base	74
5.2	Les résultats de la caractérisation mécanique :	81

5.3	Les résultats de la caractérisation métallographique :.....	85
5.4	Les résultats des essais de fatigue :.....	91
5.5	Analyse des faciès de rupture :.....	100
	Conclusion générale.....	102
	Références bibliographique.....	103

Liste des figures

Figure 1-1 La machine essai de flexion rotative.....	17
Figure 1-2 Cycle de contrainte de fatigue.....	18
Figure 1-3 Types de cycles de contrainte.....	19
Figure 1-4 La courbe d'hystérésis.....	21
Figure 1-5 Courbe de consolidation cyclique typique.....	21
Figure 1-6 Courbe de Wöhler (courbe S-N).....	22
Figure 1-7 La contrainte en fonction de log du nombre de cycle à la rupture.....	23
Figure 1-8 Dispersion des résultats des mesures de fatigue.....	24
Figure 1-9 Le cycle d'adoucissement et le cycle de durcissement.....	25
Figure 1-10 Effet de l'entaille en fatigue (E360, Barres cylindriques lisses entaillées, soumises à un moment fléchissant).....	26
Figure 1-11 Diagramme de Haigh.....	27
Figure 1-12 Différentes présentations de la courbe AB.....	28
Figure 1-13 Diagramme de Goodman-Smith.....	29
Figure 1-14 La formation des intrusions et des extrusions lors de la période d'amorçage d'une fissure de fatigue.....	30
Figure 1-15 Initiation d'une fissure de fatigue (la flèche) à la frontière d'une PSB dans du cuivre.....	30
Figure 1-16 Croquis schématique en coupe transversale montre une fissure qui saute d'une petite distance (une striation) qui augmente à la contrainte.....	31
Figure 1-17 Plans de fracture à 45 ° par rapport à la direction de chargement. (a) Plan à cisaillement unique. b) Plan à double cisaillement.....	32
Figure 1-18 Fracture oblique d'une éprouvette en traction d'un acier inoxydable de type 302.....	32
Figure 1-19 Cupules observées dans un acier doux (répliqué au MET).....	33
Figure 1-20 Formation des cupules.....	33
Figure 1-21 Surface d'une rupture fragile dans un acier 1035 étiré à froid et détendu, la fracture provient d'un défaut de soudure (flèche) pendant les tests.....	34
Figure 1-22 Clivage dans un acier doux.....	34
Figure 1-23 Observation par métallographie optique de ruptures transgranulaire (clivage).....	35
Figure 2-1 Influence de l'érouissage sur les caractéristiques mécaniques de traction de l'aluminium 1200 et des alliages 3003, 5050 et 5052.....	46
Figure 3-1 Comparaison des bandes de résistance à la fatigue pour les alliages d'aluminium 2014-T6, 2024-T4 et 7075-T6 pour les essais de poutre rotative.....	53
Figure 3-2 Rapports de fatigue (limite d'endurance / résistance à la traction) pour les alliages d'aluminium et autres matériaux.....	54
Figure 3-3 Comparaison des résistances à la fatigue axiale de la feuille d'alliage d'aluminium de 0,81 mm (0,032 po) dans l'eau de mer et l'air.....	55
Figure 3-4 Effet de la densité d'inclusion sur le comportement à la durée de vie de deux alliages 7xxx: alliage à haute densité d'inclusion 7075 et alliage à faible densité d'inclusion 7475.....	55
Figure 3-5 Influences mineures de microstructures différentes sur les courbes de taux de croissance des fissures de fatigue: données de douze alliages d'aluminium 2xxx et 7xxx avec différents traitements thermiques.....	56
Figure 3-6 Bénéfice de l'alliage 7475 à haute ténacité à une intensité de contrainte intermédiaire et élevée.....	57
Figure 3-7 Comportement limite des structures soumises à des chargements cycliques à contraintes imposées.....	58

Figure 3-8 Propagation de la fissure en fonction du nombre des cycles pour des différentes valeurs de R (6063 - T6).....	58
Figure 3-9 Vitesse de fissuration de l'alliage d'aluminium 2618 Sous l'effet de rapport de charge	59
Figure 3-10 Effet de la fréquence de fatigue sur la vitesse de fissuration d'alliage 2618 à R=0.1	59
Figure 4-1 Les éprouvettes avant la préparation.....	62
Figure 4-2 Les éprouvettes après la préparation.....	63
Figure 4-3 La machine utilisée est de Marque : MTS Criterion Model 45 avec une charge de 100 KN disponible au CRTI Chéraga.....	64
Figure 4-4 la géométrie des éprouvettes	64
Figure 4-5 l'éprouvette placée	65
Figure 4-6 Principe de l'essai de dureté Vickers	66
Figure 4-7 Microduro-mètre (CRTI)	66
Figure 4-8 La machine d'essai de fatigue au laboratoire du CRTI.....	67
Figure 4-9 éprouvette placée sur la machine.	68
Figure 4-10 Schéma explicatif du fonctionnement de la découpe au jet d'eau.....	69
Figure 4-11 Photo de la micro tronçonneuse utilisée au CRTI.....	69
Figure 4-12 Enrobeuse à chaud du CRTI.	70
Figure 4-13 L'échantillon enrobé.	70
Figure 4-14 Polisseuse automatique du CRTI.	71
Figure 4-15 Figure: microscope optique du CRTI.....	71
Figure 4-16 Le microscope électronique à balayage (CRTI).....	72
Figure 5-1 Une micrographie de l'éprouvette e=4mm analysée avec le MEB.....	60
Figure 5-2 Analyse EDS de la mucographie.....	75
Figure 5-3 Micrographie de l'analyse instantanée (e=4mm).....	76
Figure 5-4 Analyse EDS du précipité Al ₂ Cu (EDS spot 3).	76
Figure 5-5 Analyse EDS du (selected area 1).....	78
Figure 5-6 Analyse EDS du (selected area 2).....	79
Figure 5-7 Micrographie d'un échantillon d'éprouvette e=6mm	80
Figure 5-8 Analyse EDS de l'échantillon (e=6mm).	80
Figure 5-9 Micrographie de l'analyse instantanée de l'échantillon (e=6mm).....	82
Figure 5-10 Analyse EDS du précipité Al(Mn,Cr,Fe)Si (spot 2).	82
Figure 5-11 Analyse EDS du précipité AlFeSi.....	83
Figure 5-12 Courbe de traction d'éprouvette e= 6mm.	68
Figure 5-13 Courbe de traction d'éprouvette e= 4mm.	85
Figure 5-14 La faciès de l'éprouvette rompue.....	69
Figure 5-15 Fractographie de l'éprouvette e=6mm	85
Figure 5-16 Diagramme des phases du système Al-Cu.....	86
Figure 5-17 La microstructure de l'échantillon e=4mm avec G×200.....	86
Figure 5-18 La microstructure de l'échantillon e=6mm avec G×200.....	87
Figure 5-19 micrographie de l'éprouvette e=4mm	88
Figure 5-20 micrographie de l'éprouvette e=6mm.....	73
Figure 5-21 Micrographie du mapping	89
Figure 5-22 Analyse du mapping.....	89
Figure 5-23 Mg K_ZAF Wt (8%).....	75
Figure 5-24 Al K_ZAF Wt (100%)	75
Figure 5-25 Si K_ZAF Wt (26%).....	75.
Figure 5-26 : Fe K_ZAF Wt (32%)	90

Figure 5-27 Mn K_ZAF Wt (23%).....	91
Figure 5-28 : Cu K_ZAF Wt (39%).....	92
Figure 5-29 Analyse de la partie selectionnée	93
Figure 5-30 La boucle d'hystérésis du premier cycle.....	93
Figure 5-31 les boucles d'hystérésis du premiers cycles	78
Figure 5-32 les boucles d'hystérésis des quelques cycles	78
Figure 5-33 les boucles d'hystérésis de F1 (2017A e=4mm)	79
Figure 5-34 les boucles d'hystérésis de F2 (2017A e=4mm)	94
Figure 5-35 les boucles d'hystérésis de F1 (Al-Mg-Si e=6mm).....	79
Figure 5-36 les boucles d'hystérésis de F2 (Al-Mg-Si e=6mm).....	79
Figure 5-37 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F1 (2017A e=4mm)	96
Figure 5-38 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F2 (2017A e=4mm)	97
Figure 5-39 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F2 (Al-Mg-Si e=6mm).....	97
Figure 5-40 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F1(Al-Mg-Si e=6mm).....	98
Figure 5-41 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F1 (2017A e=4mm)	82
Figure 5-42 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F2 (2017A e=4mm)	99
Figure 5-43 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F2 (Al-Mg-Si e=6mm)	100
Figure 5-44 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F1 (Al-Mg-Si e=6mm).....	97
Figure 5-45 La force en fonction du nombre de cycle à la rupture.....	98
Figure 5-46 Faciès de la rupture de l'éprouvette F2 (2017A e=4mm)	85
Figure 5-47 Faciès de la rupture de l'éprouvette F2 (Al-Mg-Si e=6mm).....	99

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Propriétés physiques de l'aluminium pur.	38
Tableau 2-2 Désignation des séries principales des alliages d'aluminium.	40
Tableau 2-3 Tableau simplifié des traitements thermiques et / ou mécaniques courants avec leurs symboles respectifs.	41
Tableau 2-4 Familles d'alliages d'aluminium corroyés.	42
Tableau 2-5 Familles d'alliages d'aluminium moulés.	42
Tableau 2-6 Désignation des états métallurgiques des produits moulés.	42
Tableau 2-7 Composition chimique de 2017A.	49
Tableau 2-8 Propriétés mécaniques de 2017A.	50
Tableau 4-1 Les conditions d'essai de fatigue.	68
Tableau 5-1 Composition chimique obtenue d'EDS.	75
Tableau 5-2 Composition chimique du précipité Al_2Cu	76
Tableau 5-3 Composition chimique de selected area 1.	79
Tableau 5-4 Composition chimique de selected area 2.	80
Tableau 5-5 Composition chimique de l'alliage.	81
Tableau 5-6 Composition chimique du précipité $Al(Mn,Cr,Fe)Si$	83
Tableau 5-7 Composition chimique du précipité $AlFeSi$	67
Tableau 5-8 Les résultats de l'essai de la microdureté.	67
Tableau 5-9 Les caractéristiques mécaniques de l'alliage.	69
Tableau 5-10 La Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2017A.	70
Tableau 5-11 Composition chimique de la partie sélectionnée.	77
Tableau 5-12 Les résultats des essais de fatigue.	80

Introduction générale

Sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps, une succession de mécanismes modifie les propriétés locales d'un matériau. Ces dernières peuvent entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure ce qui limite la durée de vie des composants de la plupart des pièces mécaniques et des installations industrielles, ce qui est appelé phénomène de fatigue.

Le problème de la fatigue des structures est présent dans les domaines maritime, aéronautique, mécanique et bien d'autres encore. Les premières études systématiques de ce phénomène, furent effectuées en 1869 par l'ingénieur des chemins de fer bavarois A. Wöhler, dans le cadre de recherches sur la rupture des essieux de wagon. Il supposa que, comme dans un organisme vivant, la répétition de contraintes fatiguait le matériau en diminuant ses capacités de résistance. L'étude de la fatigue des matériaux fait l'objet, aujourd'hui encore, de nombreux travaux de recherche, pour les métaux essentiellement.

Notre étude consiste à mettre en œuvre un essai de fatigue dans le Centre de Recherche Scientifique en Technologie Industriel (CRTI). Dans notre cas on a choisi de faire un essai de fatigue uniaxial avec une contrainte ondulée de traction.

Les essais de fatigue uni-axiaux sont à la fois les plus simples et les plus couramment utilisés pour mettre en évidence, à travers des observations macroscopiques, les caractéristiques du comportement mécanique d'un matériau métallique. Le principe de base est de soumettre une éprouvette de longueur initiale et de section initiale à un effort cyclique et ainsi de choisir les paramètres à imposer et ceux que nous allons suivre au cours du chargement cyclique.

Le matériau choisi pour cette étude est l'aluminium à cause sa disponibilité de son importance dans l'industrie surtout l'aéronautique, des éprouvettes de différents alliages sont caractérisées et testées sous sollicitations de contraintes périodiques à amplitude constante.

C'est dans ce contexte de mise en œuvre et de compréhension de l'essai de fatigue uniaxial que nous présentons ce travail.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre consiste à présenter la partie théorique de l'essai de fatigue, les différents types d'essai, les termes et symboles relatif à l'essai, les contraintes appliquées et la réponse du matériau lors de l'essai qui se présente sous forme des courbes et les trois stades d'une rupture en fatigue, le premier est l'amorçage des fissures après la propagation de la fissure et le dernier qui est la rupture brutale soit une rupture ductile ou une rupture fragile.

Le deuxième chapitre présente une recherche bibliographique sur l'aluminium, ses propriétés, ses états métallurgiques, les désignations des séries de ce métal et leurs différentes propriétés et leurs applications dans l'industrie.

La troisième partie consiste à faire l'état de l'art de la fatigue des alliages d'aluminium, l'étude sur la durée de vie de ces derniers, leurs comportements lors de l'essai de fatigue et aussi la ténacité des différentes séries et la combinaison de résistance-ténacité spécialement les séries 2xxx et 7xxx les alliages de durcissement structural les plus étudiés et les plus utilisés dans les structures aéronautiques.

Le chapitre quatre est la partie expérimentale de notre mémoire il se compose de deux parties :

La première partie est la caractérisation mécanique de nos éprouvettes par : essai de traction, la microdureté et l'essai de fatigue.

La deuxième partie est la caractérisation métallographique des éprouvettes où on a cité les étapes utilisées pour l'observation de la structure pour mieux comprendre le comportement de ces matériaux.

Les résultats des essais et les tests effectués sont présentés et interprétés dans le cinquième chapitre.

Une conclusion générale finalise le travail.

Partie théorique

Chapitre 1 : L'essai de fatigue

1.1 Introduction :

En science des matériaux, la fatigue est le processus de détérioration, progressive, permanente, structurelle, et localisée d'un matériau soumis aux charges et contraintes variables dans un ou plusieurs sites, pouvant donner lieu à des fissures ou même à une rupture totale après un nombre suffisant de fluctuations [1]. L'historique des travaux réalisés dans le domaine de la fatigue des matériaux depuis 1837 jusqu'à 1994 est réalisé par Schütz, Mann a recensé plus de 21000 travaux traitant les problèmes de fatigue depuis August Wöhler en 1838 jusqu'à 1969 dans des collections d'ouvrage [2].

La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte qui peut être bien inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Les étapes principales de la ruine par fatigue d'un assemblage sont l'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau), la propagation de fissures et la rupture finale.

1.2 Essai de fatigue :

Ce sont des essais qui caractérisent la capacité d'un matériau à résister à une sollicitation cyclique, le matériau rompt au bout d'un certain nombre de cycles. L'endommagement du matériau au cours de l'essai est appelé "fatigue" ce qui caractérise la capacité d'un matériau à résister à ce type de sollicitation. La contrainte appliquée, approximativement sinusoidale, varie en fonction du temps. La fréquence ici est donnée par le nombre de cycles par seconde. Notons également que les cycles de déformation (ou de contraintes) peuvent être plus ou moins compliqués. Ils peuvent par exemple présenter un plateau (déformation constante), de sorte qu'à chaque cycle, il se produit un phénomène de relaxation des contraintes [3].

Il existe plusieurs modes de sollicitations possibles : flexion, efforts axiaux (traction et/ou compression) et torsion, et des modes combinés, statiques et dynamiques (torsion / flexion, tension / torsion, etc.) [4].

1.2.1 Essai de flexion rotative :

Dans l'essai de flexion rotative l'éprouvette utilisée est de forme cylindrique est sollicitée par un moment fléchissant (fig1-1), chaque point d'une section quelconque est soumis à une contrainte variable avec le temps [5].

$$\sigma = \frac{M}{I} r \sin(\omega t)$$

M : moment fléchissant par rapport à la section considérée.

I : moment d'inertie de la section de l'éprouvette par rapport à l'axe neutre.

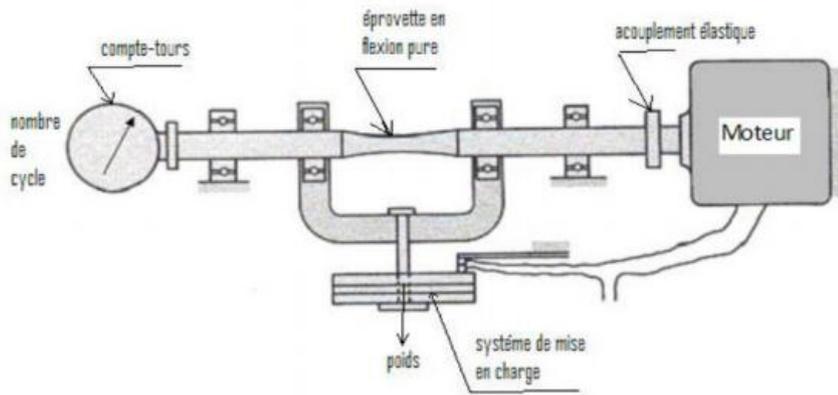


Figure 1-1 La machine essai de flexion rotative.

1.2.2 Essai de traction – compression :

Les plus courants sont ceux de traction-compression, L'objectif de ces essais est d'obtenir la loi de comportement "cyclique" du matériau, qui caractérise son évolution au fur et à mesure des cycles de sollicitation. Les essais de traction-compression peuvent être réalisés à déformation ou à contrainte imposée suivent une loi harmonique [5].

$$F = F_m + F_0 \sin(\omega t).$$

F_m : force statique constante.

$F_0 \sin(\omega t)$: force variable suivant une loi harmonique a amplitude maximale F_0 .

1.2.3 Essai de torsion :

Le principe de fonctionnement de la machine d'essai de fatigue en torsion est d'imposer à la pièce ou l'éprouvette un couple variable suivant la loi [5] :

$$M = M_m + M_0 \sin(\omega t).$$

M_m : moment de torsion statique constante.

$M_0 \sin(\omega t)$: moment variable suivant une loi harmonique a amplitude maximale M_0 .

1.3 Les contraintes appliquées :

Au cours des essais de fatigue, les contraintes appliquées sont généralement sinusoïdales constantes en fonction du temps, de type traction –compression, flexion ou torsion ou une combinaison entre deux types [6][7].

Elles sont décrites par les paramètres suivants :

Contrainte maximale (σ_{max}) : plus grande valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte. Elle est considérée comme positive en traction et négative en compression.

Contrainte minimale (σ_{min}) : plus petite valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte. - Elle est considérée comme positive en traction et négative en compression.

Contrainte moyenne σ_m : est la moyenne algébrique des contraintes maximales et minimales dans un cycle : $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

L'étendue de variation de contraintes σ_r : la différence algébrique entre les contraintes maximales et minimales dans un cycle : $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

L'amplitude de la contrainte : $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ [8].

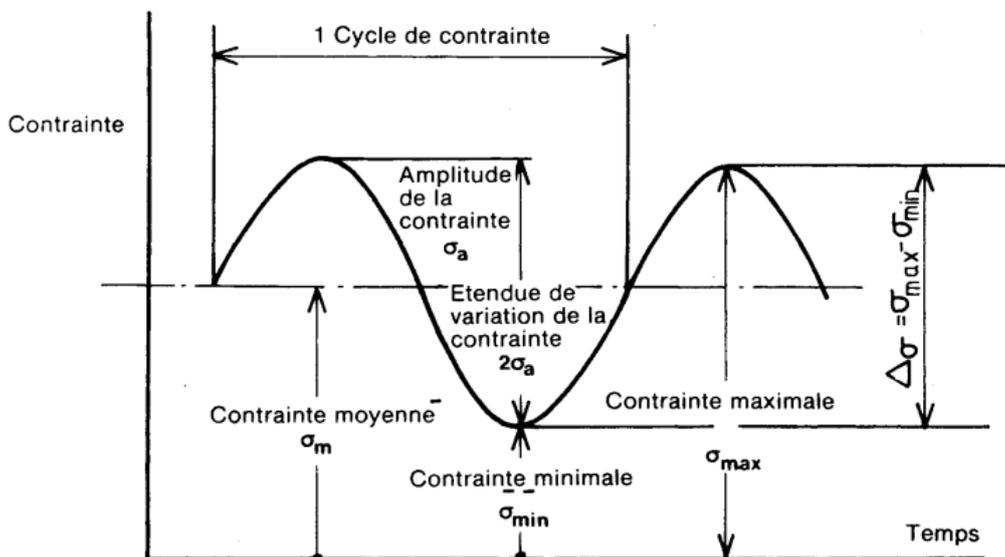


Figure 1-2 Cycle de contrainte de fatigue [8].

Les rapports : ils relient entre les contraintes, le rapport A relie la contrainte moyenne et l'amplitude de contrainte et le R relie la contrainte maximale et la contrainte minimale c'est le plus utilisé dans les essais il sert à déterminer une en fonction de l'autre.

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \qquad R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Dans le cas de tester des éprouvettes entaillées ou bien de comparer entre ces dernières et celles non entaillées pour savoir leurs comportements et l'influence de l'entaille d'autres facteurs sont utilisés :

Le facteur de concentration de contrainte K_T : c'est rapport entre la contrainte maximale de la région de l'entaille et la contrainte nominale (la contrainte comme s'il n'y a pas d'entaille).

Le facteur d'entaille de fatigue K_f : c'est le rapport entre la résistance à la fatigue de l'éprouvette non entaillée et la résistance à la fatigue d'une éprouvette entaillée.

La sensibilité de l'entaille de la fatigue q : $q = \frac{K_f - 1}{K_T - 1}$ [9].

1.3.1 Les types de contraintes :

Plusieurs types de fatigues sont réalisés en fonction des types de contraintes. Ces dernières sont définies par [9] :

- Contrainte ondulée de compression : $1 < R < +\infty$ et $0 > \sigma_{\max} > \sigma_{\min}$
- Contrainte répétée de compression : $R \rightarrow \infty$ $\sigma_{\max} = 0$ $\sigma_{\min} < 0$
- Contrainte alternée dissymétrique : $-\infty < R < -1$ $\sigma_{\max} > 0 > \sigma_{\min}$
- Contrainte alternée dissymétrique : $-\infty < R < 0$ $\sigma_{\max} > 0 > \sigma_{\min}$
- Contrainte alternée : $R = -1$ $\sigma_m = 0$
- Contrainte répétée de traction : $R = 0$ $\sigma_{\min} = 0$
- Contrainte ondulée de traction $0 < R < 1$ $\sigma_{\max} > \sigma_{\min} > 0$

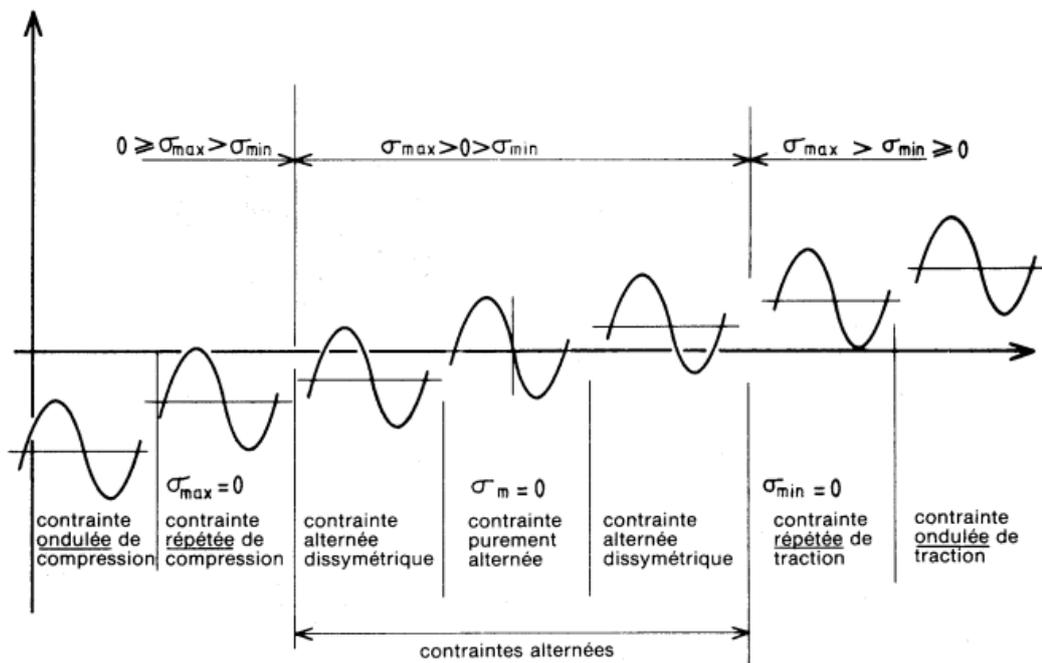


Figure 1-3 Types de cycles de contrainte [9].

1.4 Termes et symboles relatifs à l'essai de fatigue :

- **Limite de fatigue** : C'est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycle , elle est pour une contrainte moyenne σ_m donnée mais elle reste théorique et sans intérêt à cause de l'usure, la corrosion donc ils utilisent une autre grandeur qui est la limite d'endurance [10].

- **La limite d'endurance** : C'est la partie horizontale de la courbe, elle représente la contrainte maximale que peut supporter le métal sans rompre pour une infinité de cycle avec une probabilité de 50 % de rupture [8], s'écrit :

$$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_A$$

Ou σ_A est l'amplitude de contrainte à la limite d'endurance pour une valeur particulière de σ_m [8].

- **Le rapport d'endurance** $\frac{\sigma_D(N)}{R_m}$
- **La durée de vie** : c'est le nombre le cycle au bout duquel l'éprouvette rompt [6].
- **La résistance à la fatigue** : Lorsque l'éprouvette atteint sans rupture un nombre de cycle fixé à l'avance [8].
- **L'endommagement** : est le rapport appliqué (n) à la durée de vie (N) il s'écrit $D = n/N$ quand $D = 1$ il y a la rupture de la pièce [8].

1.5 Le comportement du matériau lors d'un essai de fatigue :

Lors d'un essai de fatigue l'ensemble de contrainte-déformation représentées sous forme de diagrammes tels que :

1.5.1 La boucle d'hystérésis :

La figure (1-4) montre le type de résultats obtenus en déformation imposée (traction-compression par exemple), lors de la sollicitation Lorsque l'amplitude de contrainte n'évolue plus sur plusieurs cycles, on dit que l'on a atteint le "cycle stabilisé". Pour obtenir la loi de comportement cyclique du matériau, on effectue plusieurs essais à déformation imposée. Pour chaque essai, on note l'amplitude de contrainte aux cycles stabilisés, que l'on trace en fonction de l'amplitude de déformation. La figure (1-5) montre le type de courbe obtenu, appelé "courbe de consolidation cyclique" [3].

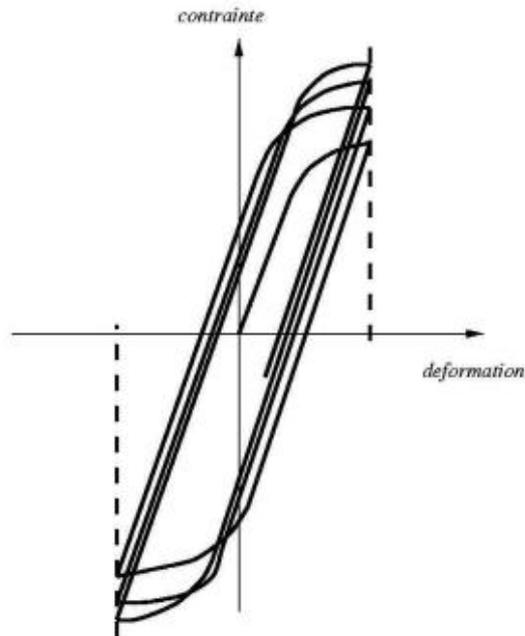


Figure 1-4 La courbe d'hystérésis [3].

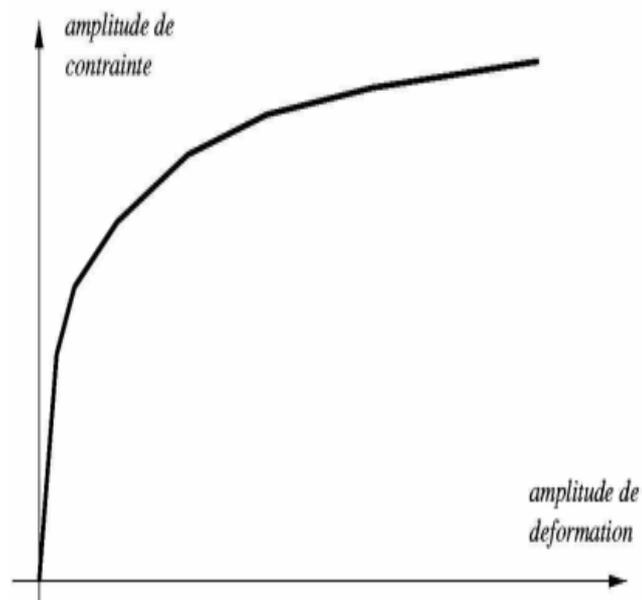


Figure 1-5 Courbe de consolidation cyclique typique [3] .

1.5.2 La courbe de Wöhler :

La courbe de Wöhler est la courbe de la contrainte en fonction du nombre de cycle, elle permet d'étudier la tenue, le comportement du matériau en fatigue. On réalise des essais sur des éprouvettes à une contrainte et fréquence constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette à un certain nombre de cycle N_R (nombre

de cycle à la rupture). Pour plus de commodité, le cycle (N) est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire (figure 1-6) [6][7].

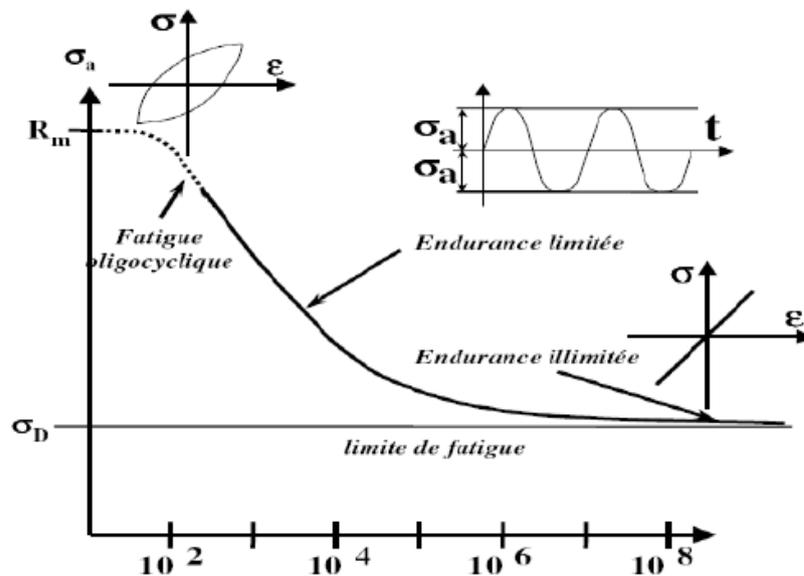


Figure 1-6 Courbe de Wöhler (courbe S-N) [7].

La courbe de Wöhler comprend trois domaines :

Le domaine oligocyclique : La rupture est précédée d'une déformation plastique sous une forte contrainte et un nombre de cycle $N_R \leq 10^5$.

Le domaine d'endurance limitée : La rupture est atteinte après un nombre limité de contrainte $N > 10^5$ croissant quand la contrainte décroît.

Le domaine d'endurance illimitée : La rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles supérieur à la durée de vie de la pièce [7].

Dans le cas des aciers, la courbe de Wöhler présente une asymptote horizontale correspondant à une contrainte dont la valeur est par définition est la limite d'endurance [11].

Pour les matériaux non-ferreux, la courbe de Wöhler n'a pas cette partie horizontale (figure 1-7), on parle de la résistance à la fatigue [9].

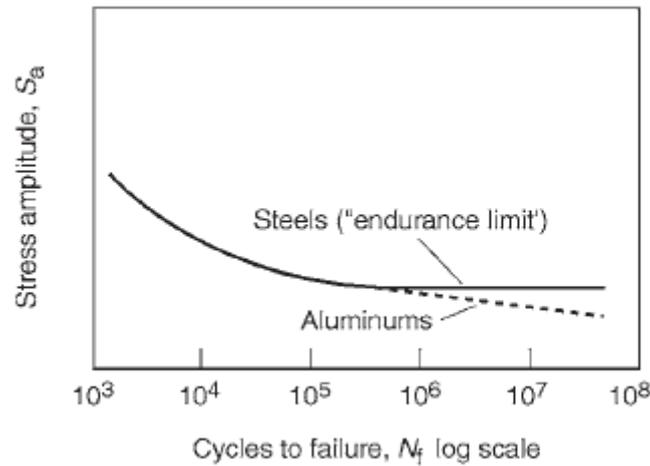


Figure 1-7 La contrainte en fonction de log du nombre de cycle à la rupture [7].

Plusieurs équations sont proposées pour représenter le domaine d'endurance limité, elles permettent de calculer le nombre moyen de cycle à la rupture en fonction de l'amplitude de contrainte [6]. La plus ancienne est celle proposée par Wöhler [12].

$$\text{Log } N_R = \alpha - b \log \alpha$$

$$N_R \sigma^b = A$$

N_R = Nombre de cycles à rupture

a et b sont des constantes déterminées expérimentalement.

Pour représenter la dernière partie de la courbe qui l'endurance illimitée Stromeyer a proposé en 1914.

$$\text{Log } N_R = \alpha - b \log(\sigma - \sigma_D)$$

$$N_R ((\sigma - \sigma_D))^n = A$$

σ_D = Limite de fatigue, en dessous de laquelle la probabilité de rupture est quasi-nulle

Avec n compris entre 1 et 2, puis Bastenaire a proposé en 1971

$$(N_R + B) (\sigma - \sigma_D) e^{[n(\sigma - \sigma_D)]} = C$$

Avec A, B, C des constantes déterminées à partir des données expérimentales [12].

1.5.2.1 Dispersion des résultats :

En pratique les essais de fatigue présentent une dispersion importante (Figure 1-8), c'est-à-dire qu'il y a rupture, pour un même niveau de charge, à un nombre de cycles variable selon les éprouvettes, en raison :

- Du matériau (inclusions, hétérogénéités de structure...).
- Des éprouvettes (état de surface variable, tolérance dimensionnelles...).
- Des conditions d'essai (centrage des éprouvettes, fréquence des cycles, effets d'environnement...).

Ainsi, pour un nombre de cycles fixé, on peut déterminer la probabilité de rupture en fonction de la contrainte. Il est possible de définir la courbe d'équiprobabilité de rupture en fonction du nombre de cycles à partir des sigmoïdes normales (probabilité).

En général, chaque courbe d'équiprobabilité de rupture possède une asymptote et en particulier, la courbe d'équiprobabilité 0,5 tend vers σ_D la limite d'endurance. Cette limite est inaccessible en pratique et on la remplace par une limite d'endurance conventionnelle pour un nombre de cycles donnés (10^7 , 10^8 ...).

En pratique, il est possible d'estimer la résistance à rupture à partir d'un essai de traction, grâce à des relations telles que : $0,4R_m \leq \sigma_{D8} \leq 0,5R_m$ pour des alliages d'aluminium corroyés, σ_{D8} correspondant à la limite à 10^8 cycles. Il existe différentes méthodes statistiques pour déterminer σ_D par des séries d'essais de fatigue : la méthode de l'escalier ou la méthode d'itération (figure 1-8).

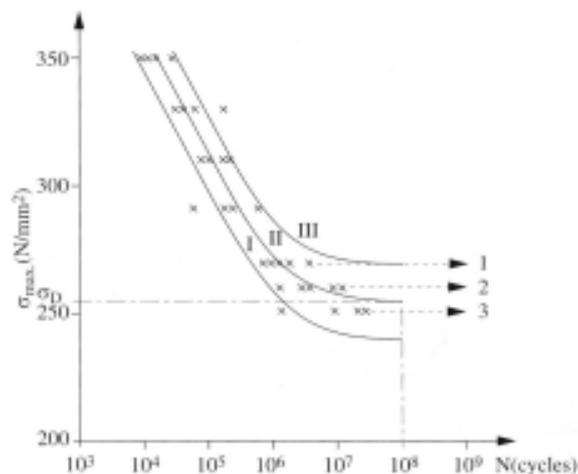


Figure 1-8 Dispersion des résultats des mesures de fatigue [8].

Ces méthodes sont nécessaires pour gagner du temps, un seul essai pouvant durer jusqu'à plusieurs mois, lorsque le matériau ne casse pas avant 10^7 voire 10^8 cycles, en fonction, de la fréquence de sollicitation [4].

Les essais de la méthode de l'escalier permettent de définir la limite d'endurance d'un matériau. Une quinzaine d'éprouvettes est nécessaire. La courbe de Wöhler (courbe S-N) permet de visualiser la contrainte à rupture pour un nombre de cycles compris entre 10 000 et 1 million. Elle peut être complétée avec une estimation de la limite d'endurance. Une vingtaine d'éprouvettes est nécessaire à son établissement.

1.6 La fatigue à faible cycle :

Le test est effectué à une déformation contrôlée à faible nombre de cyclique $N \leq 10^4$, permet de présenter la réponse contrainte-déformation par la boucle d'hystérésis citée dessus.

A un taux de déformation fixé le matériau peut subir un durcissement ($R_m/R_e \geq 1.4$) ou un adoucissement ($R_m/R_e \leq 1.2$). Lorsque le métal est fortement écroui et que la densité de dislocations est élevée, la déformation cyclique permet le réarrangement des dislocations réduisant la contrainte à laquelle se produit la déformation plastique mais lorsque la densité de dislocation initiale est faible. La déformation cyclique augmente la densité de dislocations en augmentant la contrainte sur le matériau (figure 1-9)[13].

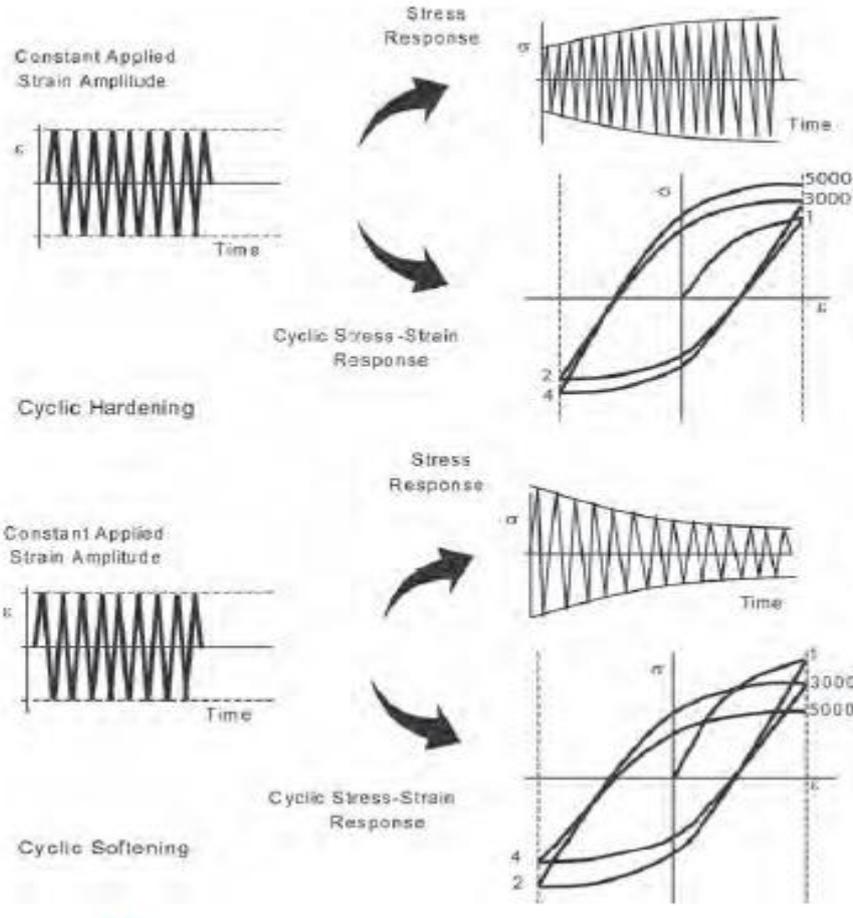


Figure 1-9 Le cycle d'adoucissement et le cycle de durcissement [13].

1.7 La fatigue à grand nombre de cycle :

Le test est effectué à une contrainte contrôlée inférieure à la limite élastique et dans le domaine élastique avec un grand nombre de cycle, les résultats de ce test sont représentés sous forme de la courbe S-N ce qui permet de déterminer la limite d'endurance et la durée de vie [13].

1.8 Les facteurs influençant les résultats de l'essai :

1.8.1 L'effet de l'entaille :

L'entaille est une discontinuité imposée ou accidentelle de la pièce ou une inhomogénéité du matériau qui le constitue, elle peut être métallurgique, chimique, corrosion ... l'entaille conduit à la création des concentrations de contrainte par la modification de contrainte.

La figure (1-10) montre l'effet d'entaille par rapport à une barre lissée, la courbe de barre d'entaille est au-dessus de la barre référence avec une durée de vie inférieure [6].

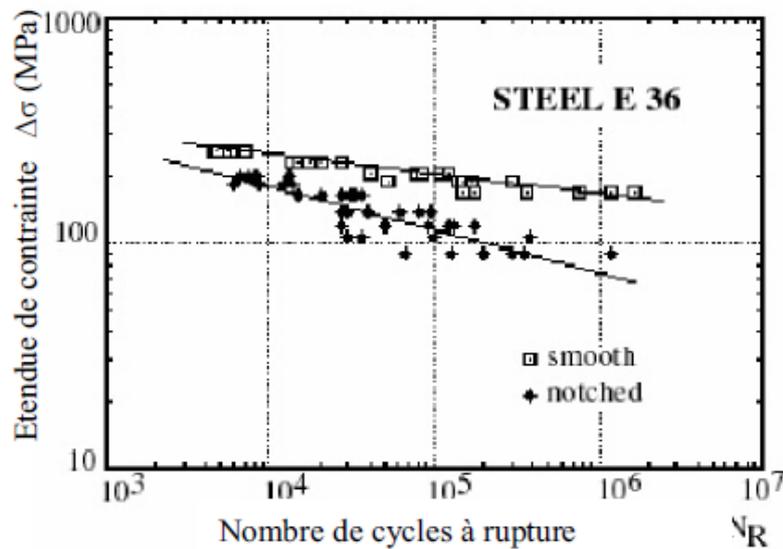


Figure 1-10 Effet de l'entaille en fatigue (E360, Barres cylindriques lisses entaillées, soumises à un moment fléchissant) [6].

L'effet de l'entaille se mesure par :

$$K_f = \frac{\text{limite d'endurance de l'éprouvette lisse}}{\text{limite d'endurance de l'éprouvette entaillée}}$$

Et le facteur de sensibilité $q = \frac{K_f - 1}{K_b - 1}$ $K_b = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{normal}}$

σ_{Normal} : la contrainte appliquée sans entaille

Lorsque $q=0$ ($K_f=1$) le matériau n'est pas sensible à l'effet de l'entaille.

Lorsque $q=1$ ($K_f=K_t$) il n'y a pas d'adaptation et l'effet obtenu est égale à l'effet théorique .

1.8.2 L'influence de la fréquence :

L'essai se fait à des fréquences entre 5 à 100 Hz en absence d'échauffement ou de corrosion la fréquence n'a pas l'influence sur les résultats de l'essai, elle permet de savoir la durée de l'essai pour un nombre de cycle fixé [7].

1.8.3 L'influence de la température :

Dans les essais à la température élevée à une contrainte moyenne différente de zéro un fluage peut apparaître dans l'éprouvette sous l'influence de σ_m et d'autres phénomènes métallurgiques peuvent devenir selon le type du matériau (vieillessement et durcissement structuraux), à basse température la limite d'endurance augmente [8].

1.8.4 L'influence de la corrosion :

Si la pièce est corrodée et soumise à une charge dynamique sa rupture est amorcée sur une pique de corrosion avec la présence d'une limite d'endurance par rapport à la pièce non corrodée. Dans la fatigue à l'air on a la fatigue et corrosion en même temps, la courbe de Wöhler ne présente pas la partie horizontale donc on ne peut pas déterminer la limite d'endurance. [7]

1.8.5 L'effet de concentration des contraintes :

La concentration des contraintes détermine la résistance à la fatigue pour montrer son effet, il étudie le comportement d'une pièce entaillée, cette concentration peut survenir de la rugosité de surface et des contraintes métallurgiques (porosité, inclusion) [9].

1.8.6 L'effet de la contrainte moyenne :

Lorsque $R \neq 0$ l'essai est réalisé à une contrainte moyenne σ_m constante à chaque contrainte moyenne correspondait à une limite d'endurance σ_a . Ces limites sont représentées sous formes des diagrammes déduits directement.

- Diagramme de Haigh :

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte σ_a est en fonction de la contrainte moyenne à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue (figure 1-11) [7].

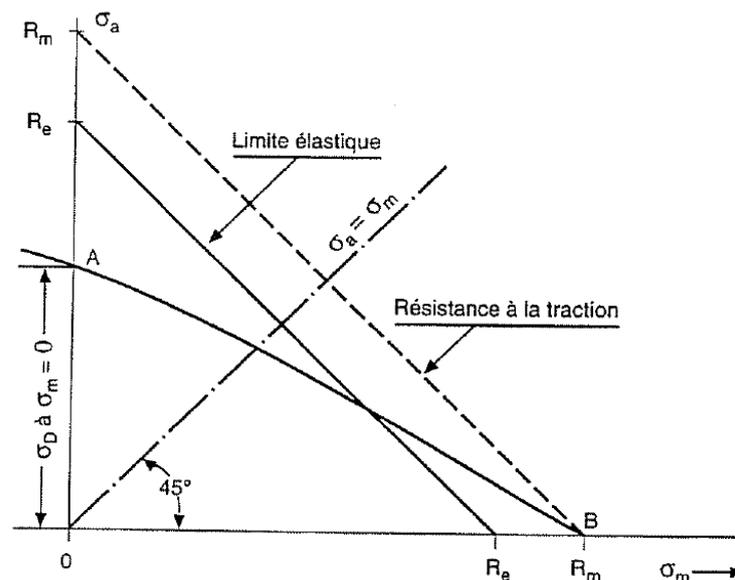


Figure 1-11 Diagramme de Haigh [7].

Le point A représenté la limite d'endurance σ_D à $\sigma_m = 0$.

Le point B représente le comportement limite de contrainte pour $\sigma_m = R_m$ (essai statique)

L'ensemble de limites d'endurance observée pour divers valeurs de σ_m se place le long de la courbe AB, le domaine limité par cette courbe et les deux axes de coordonnées représentent le domaine de fonctionnement autorisé avec le matériau pour avoir une durée de vie supérieure ou égale aux nombres de cycle pour lequel a été déterminé la limite d'endurance [7].

Il est limité par la droite représentant la limite élastique pour que $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_{max} < R_e$

Plusieurs présentations de la courbe AB a été proposées :

- Droite de Goodman $\sigma_a = D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right)$
- Droite de Soderberg $\sigma_a = D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_e} \right)$
- Parabole de Gerber $\sigma_a = D \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right)$

Dans le cas de $\sigma_m > 0$ la parabole de Gerber est plus intéressante car dans ce cas la limite d'endurance chute et la complexité des calculs à cause du flambage (figure 1-12) [7].

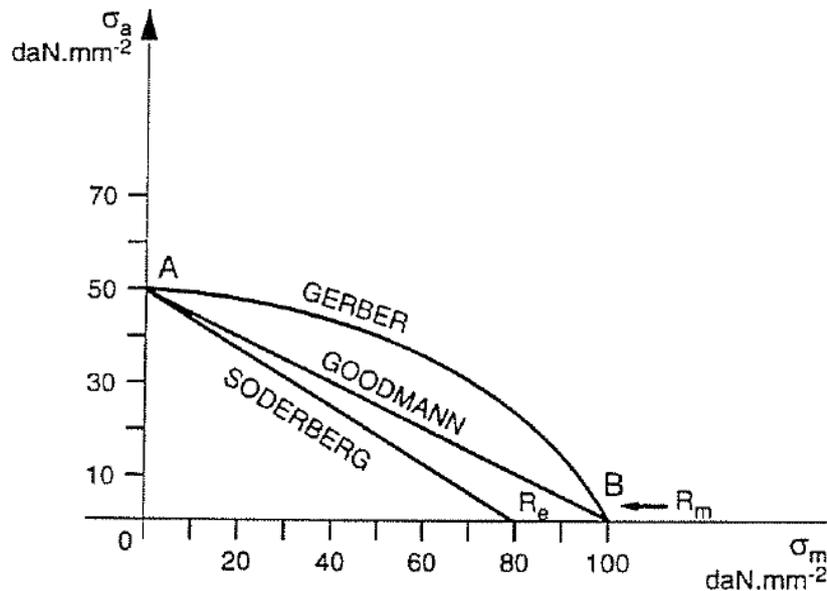


Figure 1-12 Différentes présentations de la courbe AB [7].

- **Diagramme de Goodman – Smith :**

Les contraintes maximales (σ_{max}) et minimale (σ_{min}) sont représentées en fonction de la contrainte moyenne (σ_m) [8].

Le point A ou $\sigma_m = 0$ (contrainte permet alternée).

Le point B ou $\sigma_a = 0$ (contrainte de rupture dans un essai de traction statique).

Le point C ou $\sigma_{min} = 0$ (contrainte répétée).

Différentes formes de courbes peuvent relier ces points particuliers.

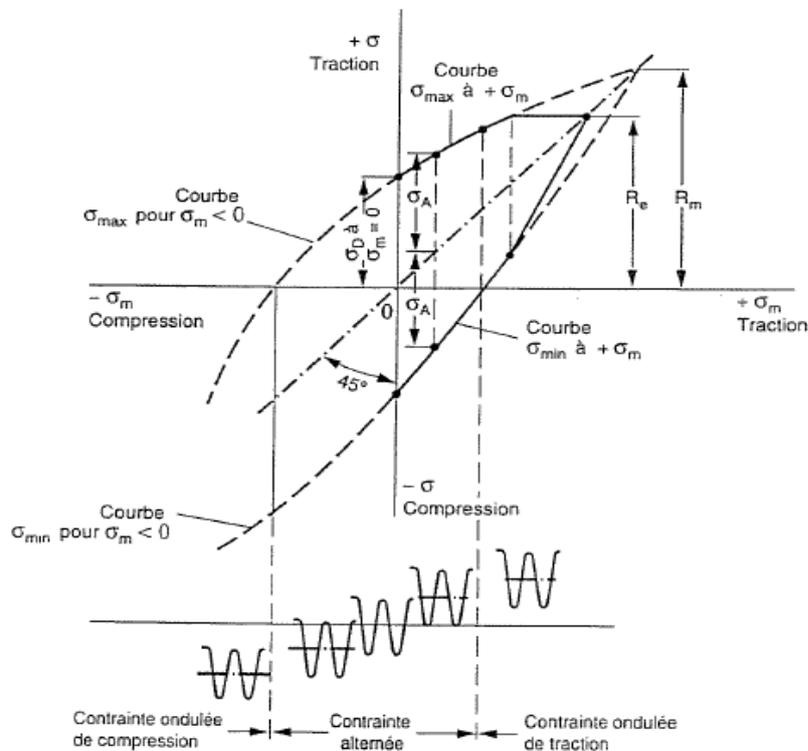


Figure 1-13 Diagramme de Goodman-Smith [7].

1.9 La rupture par fatigue :

- Le période d'amorçage.
- La période de propagation.
- La rupture brutale.

1.9.1 La période d'amorçage :

La fissure de fatigue est amorcée dans la région la plus déformée généralement sont les défauts ou bien une zone plastique de haute déformation. Ces défauts sont soumis à une forte sollicitation à l'extrémité [13].

L'amorçage peut se produire :

- A la surface par la formation des intrusions et des extrusions (figure 1-14) par le mouvement des bandes de glissement persistantes (persistent slip bands PSB). Les (PSB) sont des plaques situées le long d'un plan de glissement se caractérisent par une localisation de déformation cyclique et une structure de dislocation différente de celle de la matrice environnante, elles se forment quand les

dislocations déjà existantes ne supportent pas la déformation plastique de la charge cyclique, la fissure initiale se propage avec un faible taux parallèlement aux (PSB) le long des bandes de glissement de 45° à la direction de la contrainte principale [13].

- A partir de l'interaction des PSB et les inclusions et les inhomogénéités.
- Dans les grains et les macles : L'interaction entre les PSB et le joint de grain est l'origine de l'amorçage d'une fissure dans les joints des grains [20], la nucléation de la fissure aux macles est causée par le glissement actif des plans cristallographiques parallèles aux macles [13].

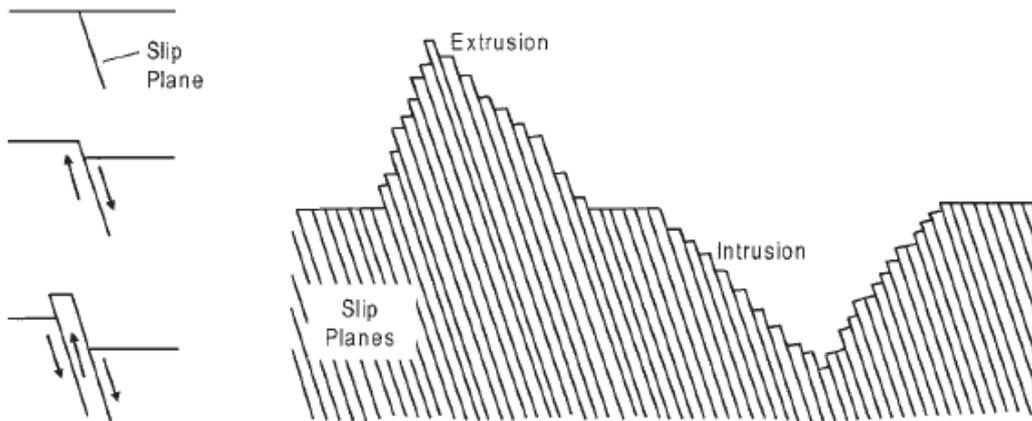


Figure 1-14 La formation des intrusions et des extrusions lors de la période d'amorçage d'une fissure de fatigue [13].

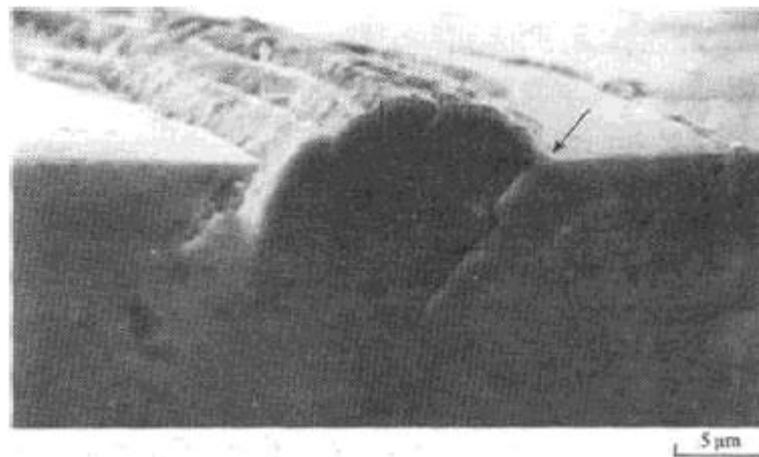


Figure 1-15 Initiation d'une fissure de fatigue (la flèche) à la frontière d'une PSB dans du cuivre [13].

1.9.2 La période de propagation :

La fissure se propage dans direction normale à la contrainte de traction maximale [13] avec une vitesse de quelque μm par cycle [8]. Pendant cette période, les contraintes décalent la fissure [7] et des stries apparaissent (une strie par cycle). La propagation de la fissure se produit suivant une série de coalescence dans vide avant le joint de fissure.

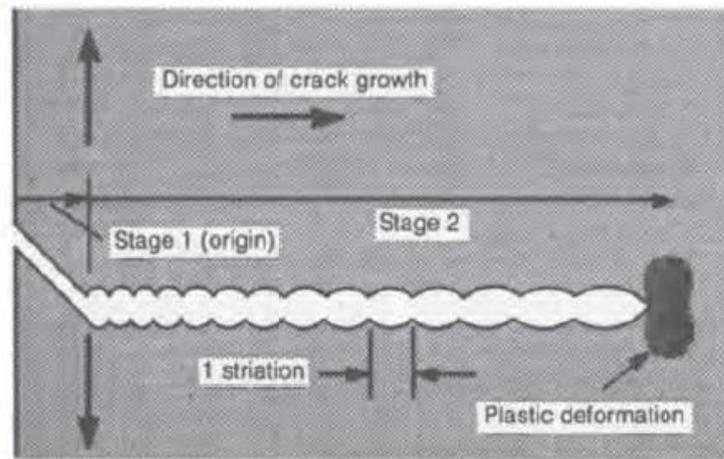


Figure 1-16 Croquis schématique en coupe transversale montre une fissure qui saute d'une petite distance (une striation) qui augmente à la contrainte [13].

1.9.3 La rupture brutale :

L'échec ultime se produit quand la section résiduelle est trop faible pour supporter la charge appliquée et la fissure devient suffisamment longue, la taille de la zone de rupture finale dépend de l'amplitude des charges et l'aspect macroscopique de la fracture dépendra de la géométrie de la pièce, du type de chargement et du niveau de contrainte.

La fatigue prend généralement naissance à la surface et, par conséquent, l'origine de la fatigue n'est pas incluse dans les zones de lèvres de cisaillement de la région de surcharge. Dans les matériaux résistants, avec des sections épaisses ou rondes, la zone de rupture finale consistera en une fracture selon deux modes distincts : rupture en traction (mode de déformation plane) au centre et rupture en cisaillement (mode de contrainte plane) à 45° de la surface de la pièce bordant la rupture par traction, tandis dans les tôles minces ayant une ténacité suffisante, la fissure se propage à partir de la zone de fatigue, le plan de fracture tourne autour d'un axe dans le sens de la propagation de la fissure jusqu'à former un angle d'environ 45° avec la direction de chargement et la surface de la feuille sur un plan de cisaillement simple ou double (figure 1-17) [13].

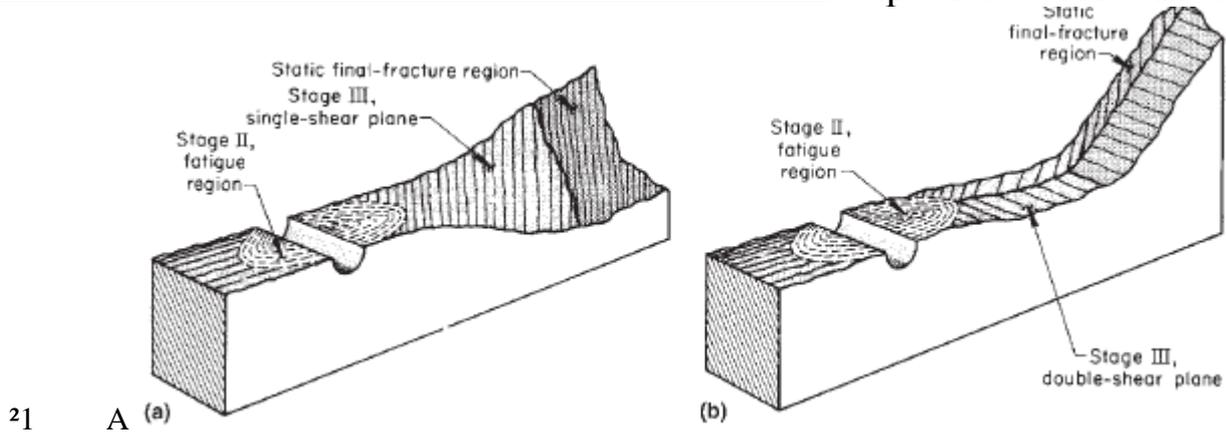


Figure 1-17 Plans de fracture à 45 ° par rapport à la direction de chargement. (a) Plan à cisaillement unique. b) Plan à double cisaillement [13].

Deux types de ruptures sont possibles la rupture ductile, la rupture fragile ou bien mixte.

- **La rupture ductile :**

Elle résulte de l'application d'une charge excessive à un matériau ductile, elle commence près du centre de la section réduite après elle change de direction transversale à environ 45° donnant une fracture oblique (figure 1-18) [13]. La zone centrale de la fracture est constituée d'une multitude de cupules adjacentes (creuse amorcée sur les précipitations et les résidus d'inclusion) (figure 1-19) [7] [14].



Figure 1-18 Fracture oblique d'une éprouvette en traction d'un acier inoxydable de type 302 [14].



Figure 1-19 Cupules observées dans un acier doux (répliqué au MET) [14].

Ces cavités sont formées à cause de la déformation plastique localisée entre les inclusions et la matrice, l'interaction de ces cavités entre elle localise la déformation et elles se développent et s'allongent peu à peu

réduisent la zone qui les séparent (figure 1-20), sous une certaine charge la zone ne tient plus, conduisant à la rupture complète de la pièce [15].

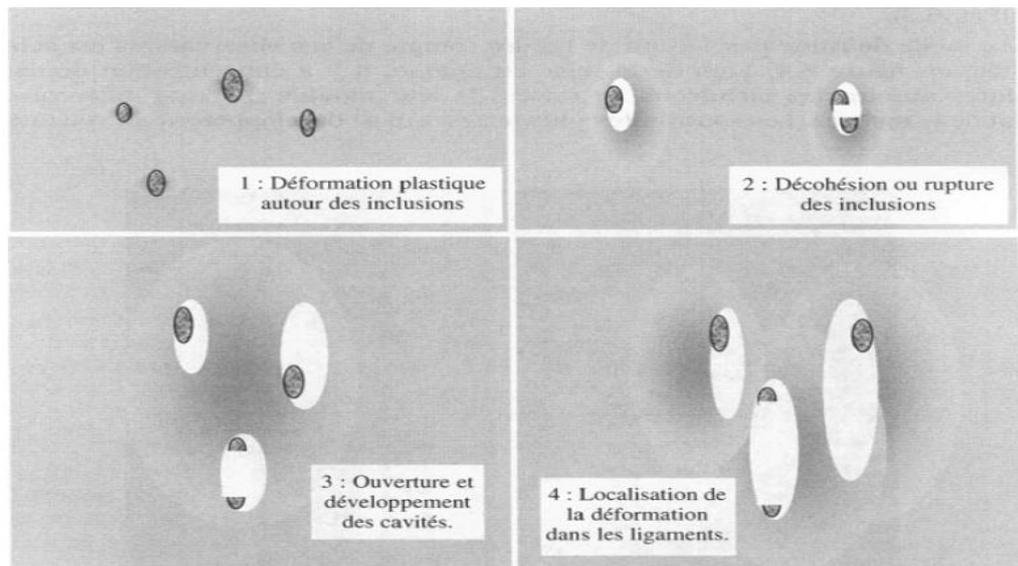


Figure 1-20 Formation des cupules [15].

- **La rupture fragile :**

La fracture résultante est de résistance élevée et sans déformation plastique à cause des contraintes de traction résiduelles. La surface de la rupture est perpendiculaire à la contrainte de traction principale [13], la rupture est due à la séparation des plans atomique sans déformation plastique qui est le clivage. Ce mécanisme est observé dans les matériaux en particulier les cubiques centrés et hexagonaux. L'observation de la surface de la rupture par le microscope à balayage montre une propagation transgranulaire [7] [15]

(figure 1-23). Une autre caractéristique est observée de ce mécanisme, des lignes parallèles à la direction de propagation (rivières) différentes des lignes de glissement. Ces rivières sont réamorçées lors du passage des joints de grains ou des clivages à languettes suivant des plans cristallographiques proche à forte densité [7].



Figure 1-21 Surface d'une rupture fragile dans un acier 1035 étiré à froid et détendu, la fracture provient d'un défaut de soudure (flèche) pendant les tests [13].

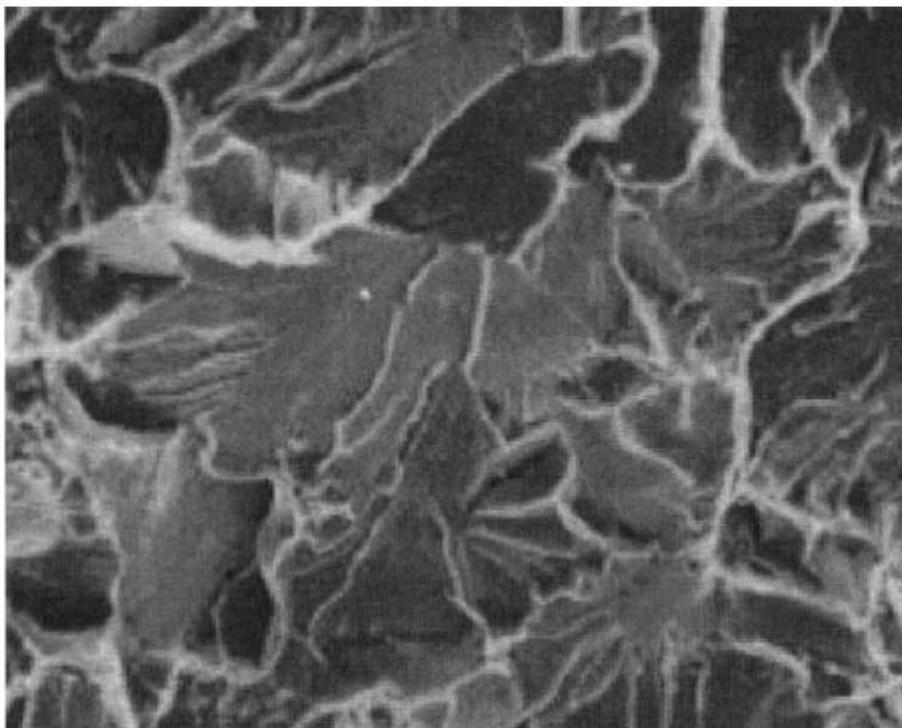


Figure 1-22 Clivage dans un acier doux [13].

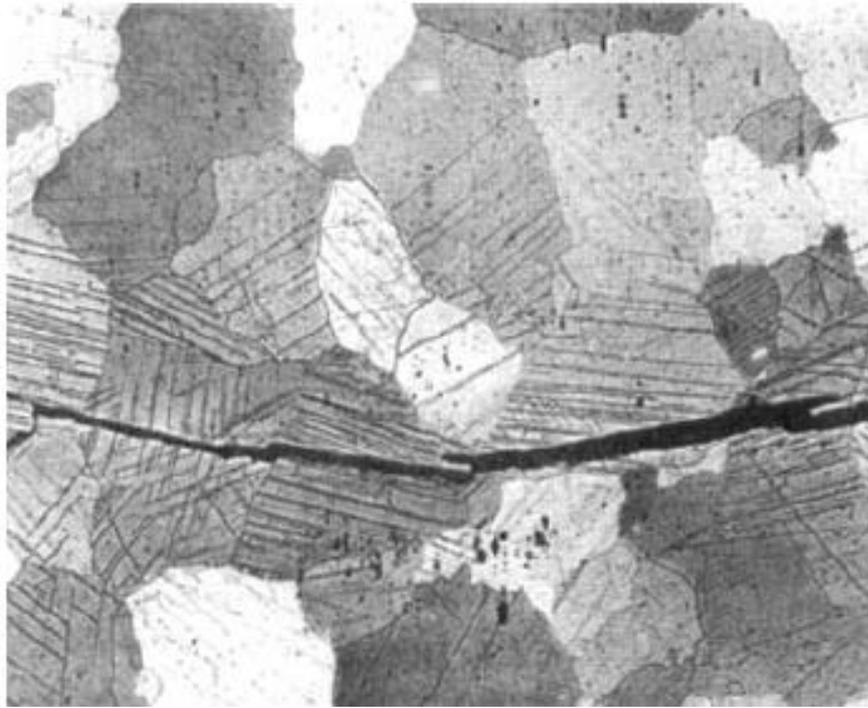


Figure 1-23 Observation par métallographie optique de ruptures transgranulaire (clivage)[13].

Chapitre 2 : L'aluminium et ses alliages

2.1 Introduction :

L'aluminium est après l'oxygène et le silicium, le troisième élément de l'écorce terrestre. C'est le matériau le plus utilisé après le fer [16]. Il a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854. Il est aujourd'hui le premier métal non ferreux en tonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940, le zinc puis le cuivre dans les années 1950.

Un tel développement repose bien évidemment sur les propriétés particulières de l'aluminium : léger, résistant à la corrosion, conducteur de la chaleur et de l'électricité, décoratif ; les alliages d'aluminium se prêtent également à tous les processus de transformation : laminage, filage, matriçage, moulage... Ceci explique qu'ils soient aujourd'hui utilisés dans la plupart des grands marchés industriels : transports terrestres, maritimes ou aérospatiaux, emballage, bâtiment, électricité, mécanique... [17].

2.2 Fabrication de l'aluminium et de ses alliages :

L'aluminium constitue 8% de la lithosphère sous forme de silicates à teneur faible en aluminium mais dans certaines régions, sous l'action prolongée de l'eau, l'élimination d'une partie importante de la silice a donné des roches riches en alumine (45 à 60 %) donnant la bauxite qui constitue actuellement la source quasi exclusive d'aluminium.

Le procédé utilisé pour obtenir l'alumine à partir de la bauxite est le procédé Bayer. Après broyage, la bauxite est attaquée à chaud, sous pression, par de la soude, ce qui permet d'obtenir une liqueur d'aluminate de soude avec insolubles en suspension. Cette liqueur est ensuite décantée : les oxydes de fer et de silicium forment une boue rouge, chimiquement inerte, qui est évacuée vers un site de déversement approprié, la liqueur restante est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine, qui est ensuite récupérée par filtration et calcinée.

L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé mis au point par Héroult et Hall en 1886, qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ 1 000 °C, dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone-cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone de l'anode pour former de l'oxyde de carbone et du gaz carbonique [17].

Pour obtenir une tonne d'aluminium Pour obtenir une tonne d'aluminium il faut :

- 1 900 kg d'alumine
- 380 kg de coke.
- 100 kg de brai.
- 15 kg de produits cryolithiques.
- 13 000 kWh d'énergie électrique.

2.3 Propriétés de l'aluminium :

2.3.1 Propriété physiques :

L'aluminium est le métal le plus léger autre que le magnésium, avec une densité d'environ un tiers de celle de l'acier. La résistance des alliages d'aluminium rivalise cependant avec celle de l'acier au carbone doux.

Cette combinaison de haute résistance et de poids léger rend l'aluminium particulièrement bien adapté aux véhicules de transport tels que les navires, les wagons, les avions, les fusées, les camions... [11].

Il a une structure cristalline à face centrée stable à toutes températures de paramètre de maille $a=4,049\text{Å}$ et diamètre atomique de $2,86 \times 10^{-10}\text{ m}$ [17].

2-1 Propriétés physiques de l'aluminium pur [17].

Propriétés physiques	
Structure cristalline	CFC
Point de fusion	660°C
Point d'ébullition	2500°C
Masse volumique à 20 °C	$2\,699\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
Coefficient de dilatation	$23,0 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (20 à 300 °C).
Chaleur massique	$900\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductibilité thermique à 20°C	$237\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

2.3.2 Propriétés électriques et magnétiques :

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs. La résistivité électrique généralement admise pour l'aluminium pur à la température ambiante est de $2,6548 \cdot 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}$ et devient supraconducteur près du zéro absolu : La température de transition est alors comprise entre 1,14 et 1,20 K [17].

2.3.3 Propriétés optiques :

L'aluminium poli présente un excellent pouvoir réflecteur qui varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre visible, il est de l'ordre de 85 à 90 % et n'est dépassé que par l'argent. Ce pouvoir réflecteur, qui peut être amélioré par des traitements de surface tels que le polissage et le brillantage [17].

2.3.4 Propriétés mécaniques :

Module d'élasticité :

Il est égal à 66,6 GPa pour l'aluminium pur. Pour les alliages, le module est généralement compris entre 69 et 72 GPa ; il est particulièrement sensible à la teneur en silicium et passe de 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium augmente de 2 à 18 %.

Module de torsion :

Il est égal à 25 GPa pour l'aluminium pur titré à 99,9 % et à 26 GPa pour l'aluminium commercial.

Coefficient de Poisson :

Il varie de 0,33 à 0,35

La ténacité :

Pour Les alliages d'aluminium traditionnels à haute résistance présentent les valeurs de K_{Ic} entre 19 à 25 ($\text{MPa}\sqrt{m}$). Des variantes des nuances, à plus faible teneur en impuretés, sont recommandées lorsqu'on désire une ténacité améliorée sans modification des autres propriétés : cas des nuances 2124 ; 2214 et 7175 par rapport aux alliages de base respectifs 2014, 2024 et 7075. Par ailleurs, les nouveaux alliages à haute résistance 7010, 7050 et 7475, à très faibles teneurs en impuretés, de composition spécialement adaptée, présentent des niveaux de K_{Ic} encore supérieurs 44 ($\text{MPa}\sqrt{m}$) [17].

Résistance à la fatigue :

Le rapport entre la limite de fatigue à 10^8 cycles, en contraintes alternées, et la charge de rupture en traction appelé rapport d'endurance est égal à :

- 0,35 – 0,45 dans le cas des alliages sans durcissement structural.
- 0,25 – 0,35 dans le cas des alliages avec durcissement structural.

Ce rapport diminuant lorsque la charge de rupture augmente [17].

2.3.5 Résistance à la corrosion :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications à cause de son film d'oxyde mince tenace qui se forme très rapidement avec l'oxygène, la formation de cette peau empêche l'oxydation supplémentaire du métal [18].

2.4 Les alliages d'aluminium :

Les métaux sont relativement peu utilisés à l'état pur. L'ajout d'un ou plusieurs éléments à un métal donne un alliage qui a souvent des propriétés significativement différentes de celles du matériau non allié. Alors que l'ajout d'éléments d'alliage à l'aluminium dégrade parfois certaines caractéristiques du métal pur (comme résistance à la corrosion ou conductivité électrique), cela est acceptable pour certaines applications car d'autres propriétés (telles que la résistance) peuvent être améliorées de manière si marquée [19].

Les alliages d'aluminium sont divisés en deux catégories :

- les alliages corroyés : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage.
- les alliages de moulage : obtenus directement par fonderie [17].

2.4.1 Les alliages corroyés :

La désignation de ces alliages selon internationales de l'Aluminium Association et la norme Afnor NF EN 573, est numérique à quatre chiffres. Le premier chiffre de l'alliage désigne l'élément d'alliage primaire, qui produit un groupe d'alliages ayant des propriétés similaires. Les deux derniers chiffres sont attribués séquentiellement par l'association. Le deuxième chiffre indique une modification d'un alliage [17].

Par exemple, 6463 est une modification de 6063 avec des limites légèrement plus restrictives sur certains éléments d'alliage tels que le fer, le manganèse et le chrome pour obtenir de meilleures caractéristiques de finition [20] [17].

2-2 Désignation des séries principales des alliages d'aluminium.

Série Désignation	Elément d'alliage principal	Exemples
Série 1000 1XXX	99% d'aluminium au minimum	1050, 1080, 1200
Série 2000 2XXX	Cuivre (Cu)	2007, 2017, 2030
Série 3000 3XXX	Manganèse (Mn)	3003, 3005, 3105
Série 4000 4XXX	Silicium (Si)	4047, 4015, 4925
Série 5000 5XXX	Magnésium (Mg)	5083, 5086, 5754
Série 6000 6XXX	Magnésium et Silicium (Si)	6060, 6061, 6086
Série 7000 7XXX	Zinc (Zn)	7075, 7049, 7020
Série 8000 8XXX	Lithium (Li) et autres	8011, 8019

États de livraison – États métallurgiques [17] :

F : État brut de fabrication.

O : État recuit.

H : État écroui et éventuellement restauré ou stabilisé.

- Le premier chiffre indique le moyen principal d'obtention du produit :
- H1 : Écrouissage.
- H2 : Écrouissage puis restauration.
- H3 : Écrouissage puis stabilisation.

– Le second chiffre indique le niveau de dureté du métal :

2 : État quart dur.

4 : État demi dur. 6 : État trois-quarts dur.

8 : État dur.

9 : État extra-dur.

T : État durci par traitement thermique :

Tableau 2-3 Tableau simplifié des traitements thermiques et / ou mécaniques courants avec leurs symboles respectifs[17].

Traitements généraux (processus de base)			
Traité thermiquement avec mise en solution séparée	Sans	*Muri	T4
	écrouissage	*Revenu	T6
	complémentaire	* Sur- revenu	T17
	Avec	*Ecroi puis muri	T3
	écrouissage	*Ecroi puis revenu	T8
	complémentaire	*Revenu puis écroi	T9
Traité thermiquement sans mise en solution séparée	Sans		
	écrouissage	*Muri	T1
	complémentaire	*Revenu	T5
	Avec		
	écrouissage	*Ecroi puis muri	T2
	complémentaire	*Ecroi puis revenu	T10
Traitements particuliers et complémentaires			
Revenu	Revenu « doux »		T51-T61
	Revenu « dur »		T56-T66
	Sur- revenu		T7
Relaxation	Par traction		Tx51
	Par compression		Tx52
	Par traction et compression		Tx54

Source : norme AFNOR NF EN 515

2.4.2 Les alliages de moulage :

Le système de désignation des alliages moulés de l'Aluminium Association utilise quatre chiffres comme le système d'alliages corroyés, trois chiffres, suivis d'un point décimal, suivi d'un autre chiffre.

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal.
- Les deux deuxièmes chiffres désignent l'alliage ou, dans le cas d'alliages de coulée commercialement purs, le niveau de pureté.
- Le dernier chiffre indique la forme du produit 1 ou 2 pour le lingot (selon les niveaux d'impureté) et 0 pour les pièces moulées.

Une modification de l'alliage d'origine est désignée par une lettre préfixe (A, B, C, etc.) au numéro d'alliage [20].

Tableau 2-4 Familles d'alliages d'aluminium corroyés[17].

Série Désignation	Élément d'alliage principal
Série 1XX.X	99% d'aluminium au minimum
Série 2XX.X	Cuivre (Cu)
Série 3XX.X	Magnésium(Mg),Silicium(Si),Cuivre(Cu)
Série 4XX.X	Silicium (Si)
Série 5XX.X	Magnésium (Mg)
Série 7XX.X	6% Etin (Sn)
Série 9XX.X	Autres éléments

La désignation selon la norme Afnor NF EN 1780-1 :

Tableau 2-5 Familles d'alliages d'aluminium moulés [17].

Élément d'alliage	Famille
Aucun	10000
Cuivre	20000
Silicium	40000
Magnésium	50000
Zinc et cuivre	70000

États de livraison et état métallurgique :

Tableau 2-6 Désignation des états métallurgiques des produits moulés [17].

Etat métallurgique	Désignation
Brut de fonderie	F

Recuit	O
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement naturel (maturation)	T1
Traitement thermique de mise en solution et vieillissement naturel (maturation)	T4
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement artificiel ou sur- revenu (stabilisation)	T5
Traitement thermique de mise en solution et vieillissement artificiel revenu) maximum	T6
Traitement thermique de mise en solution et sous- vieillissement artificiel (sous- revenu)	T64

2.5 Influence des éléments d'addition :

L'aluminium non allié ayant des propriétés très réduites, afin de les améliorer des éléments sont ajoutés : Cuivre, magnésium, silicium, zinc, chrome, manganèse, Lithium.

Ces éléments d'addition peuvent :

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

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

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

Le cuivre :

Il forme avec l'aluminium le composé Al_2Cu souvent au durcissement des alliages, il améliore l'usinabilité, la résistance mécanique, la réduction du retrait lors de la coulée. Toutefois, il diminue la résistance à la corrosion. L'ajout du Cu à 6% répond fortement aux traitements thermiques.

Magnésium :

C'est l'addition essentielle qui améliore la dureté des alliages Al-Si lors du traitement thermique, sa composition habituellement employée pour la série 4000 varie de 0,07 à 0.40%. Il durcit l'alliage en formant la phase Mg_2Si avec une solubilité limitée de 0,7% de Mg [21]. Son inconvénient est qu'il accélère l'oxydation de l'aluminium liquide et les précipités aux frontières des grains rendent l'alliage susceptible à la fissuration intergranulaire. Les alliages Al-Mg sont largement utilisés dans les applications qui requièrent un bon état de surface, une bonne résistance à la corrosion et une combinaison de ductilité usinabilité.

Manganèse :

Il sert à augmenter la résistance mécanique à haute température des alliages de fonderie et à réduire le retrait lors de la solidification [22] il n'a aucun effet négatif sur la résistance à la corrosion. C'est l'élément principal de la série 3xxx, cette série est utilisée pour produire les canettes et les boîtes de conserve sévèrement formées [17].

Silicium :

L'effet remarquable du Si dans les alliages d'aluminium est l'amélioration des caractéristiques de la mise en forme (moulage) et il augmente beaucoup la fluidité, la résistance au craquage à chaud et les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide. La composition la plus utilisée dans les alliages d'Aluminium de fonderie est d'ailleurs celle de la famille Al-Si. Les alliages commerciaux hypoeutectiques et hypereutectiques ont une proportion de silicium qui peut varier jusqu'à environ 25% en poids [23].

Dans les alliages corrigés, le silicium est utilisé avec du magnésium pour produire Mg_2Si dans la série 6xxx. L'ajout du Si de 0,5% à 4% réduit la tendance à la fissuration des alliages Al-Cu-Mg.[17]. Pour les alliages d'Aluminium commerciaux, Le Si est une impureté deux phases ternaires $Al_{12}Fe_3Si$ et $Al_3Fe_2Si_2$ se forme par réaction eutectique. A faible teneur en silicium, tout le fer est présent sous forme d' Al_3Fe . Les phases dans les produits commerciaux peuvent ne pas être celles prédites par les diagrammes d'équilibre en raison des longues périodes à des températures élevées nécessaires pour s'approcher de l'équilibre.

Fer :

Le fer accroît la résistance au craquage à chaud et réduit la tendance de l'alliage à se coller ou à se souder aux parois du moule. Or l'augmentation de la proportion de fer est accompagnée d'une réduction de la ductilité.

Le fer réagit pour former plusieurs phases insolubles dans les alliages d'Aluminium Al_3Fe , $FeMnAl$ et $AlFeSi$. Ces phases insolubles ou intermétalliques améliorent la résistance, spécialement à température élevée. Il réduit la granulométrie des produits corroyés. Les alliages de fer et de manganèse peuvent avoir des combinaisons utiles de résistance et de ductilité à température ambiante et élevée dues à la granulométrie fine stabilisée par la seconde phase riche en fer finement dispersée. Il aussi ajouté au groupe d'alliages Al-Cu-Ni pour augmenter la résistance à des températures élevées [24].

Zinc :

Combiné avec le Mg, cet élément sert plutôt à produire des alliages ductiles à haute résistance mécanique, additionné au cuivre, il donne une microstructure intéressante après traitement thermique, en petite quantité, il améliore l'usinabilité et également le retrait lors du mélange [25].

Chrome :

Il réduit la susceptibilité des alliages Al-Zn-Mg à la corrosion sous tension et il contrôle aussi la structure des grains.

Titane :

Le titane est ajouté pour raffiner la structure des alliages d'aluminium notamment pour les alliages de fonderie. Pour un affinage de grain efficace il est employé en compagnie du Bore TiB_2 . Il contribue aussi à la diminution de la conductivité thermique et de la fluidité, mais il améliore la ductilité, la résistance mécanique et la résistance au craquage à chaud lorsque la quantité utilisée est en excès.

2.6 La métallurgie de l'aluminium et ces alliages :

2.6.1 Durcissement par écrouissage :

L'écrouissage est la déformation mécanique à température ambiante (déformation à froid). Elle permet d'augmenter la dureté ; la résistance mécanique-limité d'élasticité- et la charge à la rupture mais ça diminue son aptitude à la déformation (sa plasticité) figure 2-1. C'est le mécanisme de durcissement des alliages corroyés (1xxx ; 3xxx ; 5xxx ; 4xxx) et les alliages moulés : les alliages Al-Si-Mg(Cu) ; Al-Cu ; Al-Zn-Mg[16] afin améliorer les propriétés mécaniques. La série 5xxx peut être traité thermiquement mais juste pour stabiliser les propriétés, un chauffage à 110-180°C provoque tout l'adoucissement que peut subir l'alliage avec le temps à la fois donc la résistance ne diminue pas à cause d'adoucissement avec le temps (softing age) [17][20].

Les alliages non trempant subissent généralement deux traitements successifs :

- Ils sont soumis à un traitement d'écrouissage qui consiste à écrouir le matériau à froid, cet état n'est pas stable et un vieillissement naturel a généralement lieu à température ambiante.

- Afin d'accélérer le vieillissement naturel et stabiliser l'état écroué le matériau est sous à des traitements d'adoucissement (de restauration et de recristallisation) [21].

Ces alliages à l'état écrouis (H1X) sont utilisés dans les applications industrielles lorsqu'on s'intéresse aux propriétés mécaniques.

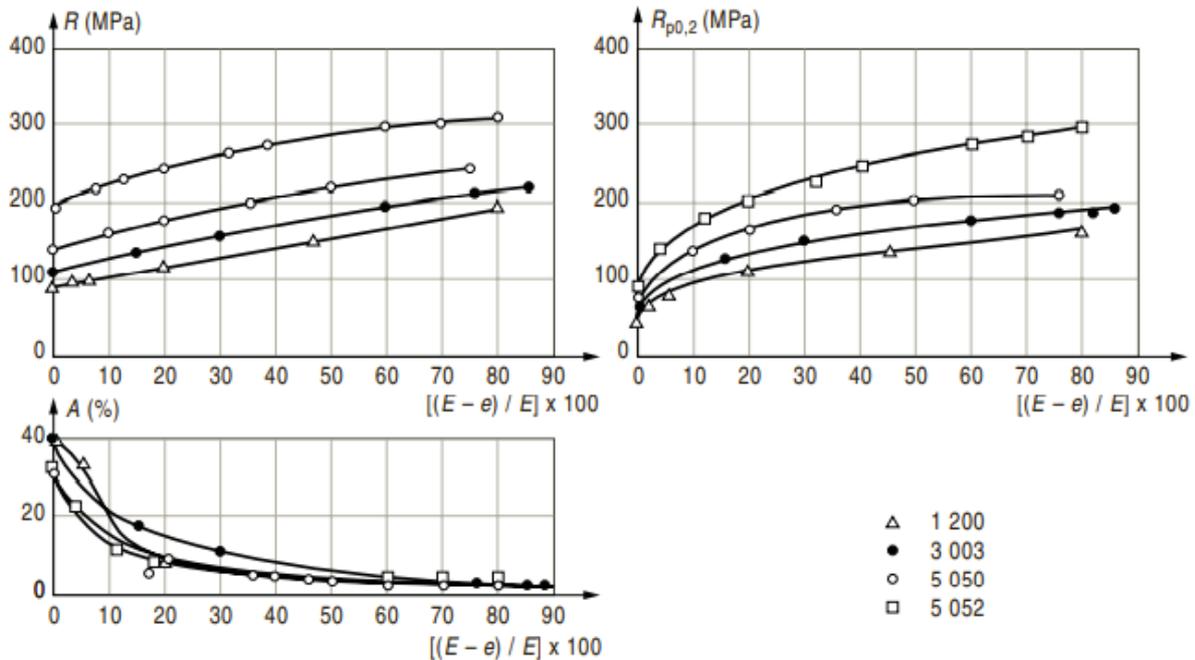


Figure 2-1 Influence de l'érouissage sur les caractéristiques mécaniques de traction de l'aluminium 1200 et des alliages 3003, 5050 et 5052 [17].

2.6.2 Durcissement structural :

Le durcissement structural est le processus de durcissement des alliages (2xxx, 6xxx, 7xxx) [20], il est obtenu par trois phases : mise en solution, trempe, vieillissement.

- La mise en solution : l'alliage est chauffé à une température suffisamment élevée pour mettre en solution solide les éléments d'addition.
- Trempe : après la mise en solution, l'alliage est refroidi rapidement (à l'eau, à l'air) pour interdire la diffusion et d'amener la solution solide dans un état sursaturé métastable.
- Vieillissement : Après trempe l'alliage durcit plus au moins rapidement suivant sa composition chimique par un simple séjour à la température ambiante (vieillissement naturel) ou à une température supérieure (traitement de revenu ou vieillissement artificiel) qui confère une microstructure différente de celle de maturation et un durcissement plus élevé donc caractéristiques supérieures.

2.6.3 Traitement thermique d'adoucissement, restauration recuit :

Lorsqu'on chauffe l'aluminium durci par érouissage à une température suffisante, la structure érouie est progressivement remplacée par une nouvelle structure avec les grains originaux allongés et des

sous-grains équi-axiale. Si la recristallisation est complète, l'alliage est recuit c'est l'état optimal pour réaliser des déformations ou mise en forme à froid importante (plasticité maximale).

Il est aussi possible d'obtenir des états intermédiaires (entre l'état écroui et l'état recuit) dits restaurés par des traitements de restauration réalisés dans des conditions précises de température et de durée [17] [24].

2.7 Application des principaux alliages d'Al:

La série 1000 :

Les nuances de cette série se distinguent par leur titre en Aluminium. Elles présentent une excellente résistance à la corrosion, conduction thermique et électrique élevées, et une excellente aptitude à la déformation à froid et au sondage. L'aluminium 1199 (aluminium raffiné) est utilisé dans les secteurs suivants [17] [26] ::

- La décoration
- La bijouterie fantaisie
- L'électronique

L'aluminium 1080 présente un très bon état de surface, il est utilisé dans l'industriel chimique, alimentaire, décoration. L'aluminium 1370 est réservé spécialement aux applications électriques. L'aluminium 1050 A, 1100 ou 1200 sont les plus couramment utilisés dans [17] [26] :

- Le bâtiment
- L'emballage
- Les ustensiles ménagers
- Chandronage- soudage

La série 3000 :

L'alliage 3003 est utilisé où une légère augmentation de la résistance mécanique est nécessaire, son excellente aptitude à la mise en forme, sondage, brasage le font utilisé dans [17] [26] :

- Echangeurs automobile
- Échangeurs cryogénique et thermique
- Climatiseurs
- Bardage

L'alliage 3004 est utilisé pour l'emballage et broutage et l'alliage 3105 est plus spécialement réservé au capotage [17] [26] .

La série 4000 :

Les alliages Al-Si sont utilisés dans le fil de soudage et comme alliage de brasage pour assembler l'aluminium ou la plage de fusion inférieure à celle du métal de base. Ils sont aussi demandés pour les applications architecturales à cause leurs couleurs (gris foncé à charbon de bois) lorsque des finitions à l'oxyde anodique sont appliquées [17] [26].

La série 5000 :

La résistance mécanique de ces alliages est en fonction de la teneur en magnésium, il a une très bonne résistance à la corrosion à l'état soudé ou non et ceci en particulier en atmosphère marine ou dans l'eau de mer. Les alliages 5086 et 5083 sont les plus performants des alliages Al-Mg ils sont utilisés souvent sous forme de structure soudé dans les secteurs suivant :

- La construction navale : bateaux, superstructures, aménagement du littoral
- Les véhicules industriels.
- Les travaux publics.

La nuance 5283 est spécialement réservée à la fabrication des bouteilles à gaz sous pression (bouteilles de plongée sous-marine).

La série 6000 :

Ils présentent des caractéristiques mécaniques moyennes, inférieures à celles des alliages des séries 2000 et 7000, mais suffisantes pour les applications prévues, une très bonne aptitude à la transformation à chaud : ce sont les alliages de filage par excellence car ils permettent d'obtenir, dans de très bonnes conditions économiques, des profilés de forme pouvant être très complexe, un bon comportement aux agents atmosphériques et une bonne aptitude au soudage et aux traitements de surface et une bonne tenue aux basses températures mais une tenue à chaud limitée au-delà de 150 °C.

Ils sont utilisés dans :

- Structures de véhicules routiers et ferroviaires.
- Structures au sol : pylônes, pare-avalanches, coffrages, candélabres....
- Bâtiment : charpentes.
- Mâts de bateaux, montants d'échelle, garde-corps de balcons...

La série 7000 :

Cette série se divise en deux sous-groupes :

Alliages Al-Zn-Mg : L'alliage représentatif est le 7020 qui se caractérise par sa bonne soudabilité, il est utilisé dans le domaine de l'armement : plaques de blindage, des réservoirs de gaz liquéfiés pour fusés

Alliages Al-Zn-Cu : Ce sont les alliages les plus performants de la série ils se caractérisent par :

- Une résistance mécanique élevée.
- Une faible résistance à la croissance.
- Possibilité de sondage par fuseaux d'électrons uniquement.
- Ils sont utilisés dans le domaine de l'aéronautique de l'armement, les alliages les plus utilisés de cette série sont : 7075, 7019A, 7010, 7050, 7475.

2.8 Généralités sur les alliages d'aluminium de la série 2000 :

La série 2000 dans laquelle le cuivre est l'élément d'addition majeur. Les teneurs en cuivre des alliages de cette série est 70% à l'état liquide. Mais sa solubilité maximum dans l'aluminium à l'état solide était de 5.7% à la température eutectique aluminium/cuivre de 547°C à la température ambiante sa solubilité chute à 0.05%,

il forme des précipités durcissant (Al_2Cu et CuMgAl_2) qui améliorent les caractéristiques mécaniques de l'alliage mais il diminue également très nettement sa résistance à la corrosion et augmente aussi fortement la sensibilité à la fissuration à chaud au point que les alliages de type aluminium-cuivre ne sont pas soudables à l'arc.

L'addition du Mg en tant qu'ajout secondaire (solubilité de 1.7% à température ambiante) est nécessaire afin d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques. La teneur en Mg ne dépasse pas 5% car au-delà de cette teneur et en maintien prolongé en température provoque la précipitation aux joints de grain du composé intermétallique Al_3Mg_2 qui fragilise l'alliage. L'addition de sodium et de manganèse à des teneurs inférieures à 0.8% favorise la formation de composés quaternaires qui, par dispersion améliorent les propriétés de la matrice. Par contre l'ajout du fer diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural (formation de $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Al}_4$) cependant l'ajout du nickel forme le composé (Al_9FeNi) qui confère à l'alliage une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C [27] [28].

Cette série est connue pour sa faible résistance à la corrosion en raison de deux facteurs : grand changement de potentiel dans l'électrode avec les variations de quantité de cuivre en solution solide, sous certaines conditions, une concentration de solution solide est non-homogène. Le fait que ces alliages sont traités thermiquement soit un vieillissement naturel ou artificiel minimise les effets électrochimiques mais pas suffisamment pour qu'ils soient exploités, un traitement de surface d'anodisation est ajouté afin d'apporter une bonne protection contre la corrosion [24].

De point de vue 'fissure' les nuances 2017A, 2014, 2024, 2618A sont plus ou moins sensibles à la fissuration, au contraire de la 2219 qui est peu sensible à la fissuration [29].

La série 2000 est utilisée dans plusieurs domaines, on distingue trois catégories d'alliages :

- Alliages pour structures à résistance mécanique élevée : ce sont les nuances 2017A, 2014, 2024, elles sont utilisées dans les domaines suivants : l'aéronautique, l'armement, la mécanique (poutrelles).
- Alliage pour résistance à chaud : la nuance 2618 A est utilisée dans les disques et les compresseurs, la structure des avions (concorde)
- Alliage pour décolletage : les nuances 2011 et 2030, ils donnent des copeaux courts à l'usage.

2.8.1 L'alliage 2017 A :

Faisant partie de la famille 2000 anciennement appelé en France 'duralumin' cet alliage léger comprend en moyenne 4% de cuivre, 0.5% de Mg et 0.5% de manganèse tableau (2-7,2-8). Il a été découvert par hasard par Willin en 1908, l'excellence de ses propriétés tient au fait que l'alliage, après usinage et trempe, laissé au repos (vieillissement), l'alliage a une charge de rupture qui a doublé alors que les allongements ont très peu diminué dû à un réarrangement structural (atomique) [17].

Tableau 2-7 Composition chimique de 2017A.

L'élément	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Cr	Ni	Zn
pourcentage%	1.0	0.8	1	0.7	4.5	0.1	/	0.25

Le 2017A présente des faibles de niveaux de contraintes résiduelles internes, ce qui peuvent réaliser des pièces de précision, il entre dans la fabrication de toutes les pièces de l'industrie aéronautique : structure de la carlingue et de l'aile, couples, rivets, cadres, longerons, nervures, revêtement, haubans et mats (recouvrement aérodynamique), réservoirs [17].

Tableau 2-8 Propriétés mécaniques de 2017A.

Les modules	E (MPa)	ν	Rm (MPa)	Rp0.2(MPa)	A%
Les valeurs	1.0	0.8	1	0.7	4.5

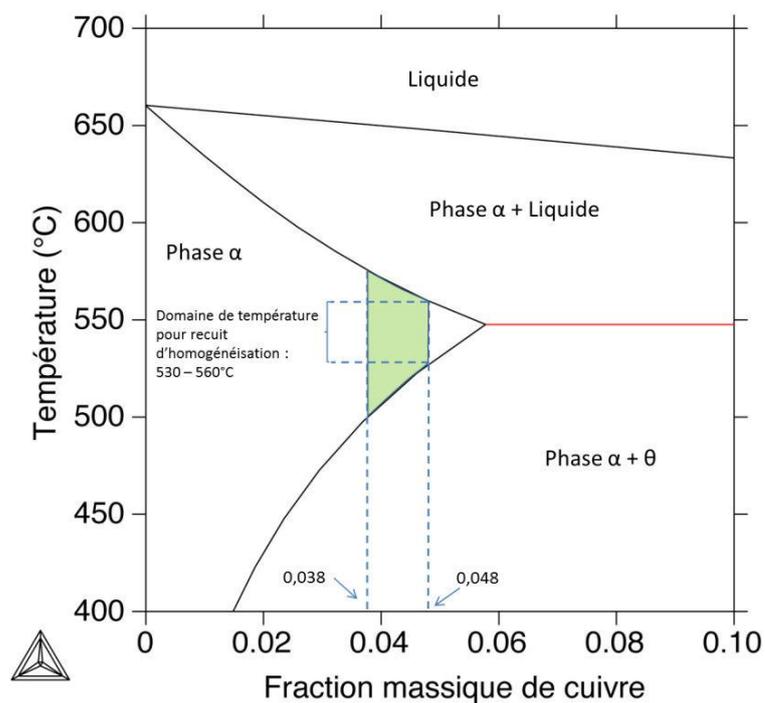


Figure 2-2 Diagramme de phase du système-Al-Cu [16].

Chapitre03 : La fatigue des alliages d'aluminium

3.1 Introduction :

La défaillance causée par la fatigue d'une pièce en service survient généralement de façon soudaine et se produit lorsque la pièce n'arrive plus à supporter les efforts auxquels elle est soumise. Pour l'industrie, ce type de bris peut entraîner des conséquences dramatiques. Le processus d'endommagement par la fatigue se fait selon trois étapes : La première est l'initiation d'une microfissure autour d'un concentrateur de contraintes. Ce concentrateur peut être un défaut situé dans le matériau ou à la surface de la pièce. La seconde étape consiste en propagation cyclique de la fissure ; à ce point, la fissure a atteint une dimension critique et la matière saine restante n'est plus suffisante pour supporter la charge ce qui conduit à la dernière étape qui est la rupture.

Le choix du matériau à utiliser est un paramètre important pour éviter ces défaillances, pour les alliages d'aluminium les séries 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx et 7xxx sont utilisées dans l'industrie aéronautique. La série 2xxx est utilisée dans des environnements à haute température ainsi que ceux nécessitant un haut coefficient de rendement. Les alliages 3xxx, 5xxx et 6xxx sont utilisés dans les systèmes hydrauliques, de lubrification, de carburant et surtout dans les composantes qui ne nécessitent pas une grande résistance mécanique. Les alliages 7xxx sont utilisés pour des environnements à basse température dans des composantes nécessitant une haute résistance mécanique et dans des composantes fournissant une haute résistance à la corrosion sous tension. En plus du choix du matériau des programmes d'inspection rigoureux sont en place pour en déceler les indices précurseurs. Et déceler les défauts qui peuvent apparaître en service et représenter un risque [30].

3.2 Ténacité :

La ténacité est la résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure c'est une notion très importante pour conditionner la fiabilité des structures. Des nombreuses études sur les alliages d'aluminium ont montré l'influence de la microstructure en particulier les particules hors solution (précipités) sur la ténacité. Ces particules constituent des sites de création de microfissures soit à cause de leur fragilité intrinsèque soit du fait de leur incohérence vis-à-vis de la matrice, leur décohésion créant des cavités qui sous l'action des tensions s'agrandissent et se développent sous forme de fissures.

L'interaction résistance-ténacité a été considéré comme étant la conséquence de liaison des vides créés par la décomposition induite par le glissement des particules (de taille inférieure à $1\mu\text{m}$) qui se produit facilement à haut niveau de résistance. Si les précipités sont cisailables, ils peuvent favoriser la nucléation prématurée des fissures à cause de la déformation localisée, le fait que les précipités de renforcement soient cisailés non, bouclés et contournés par des dislocations dépend de la composition de l'alliage et du traitement de vieillissement, au cours des vieillissements, des précipitations hétérogènes se précipitent généralement aux limites des grains et de sous-grains causant un effet néfaste sur la ténacité [13].

Les alliages 7xxx présentent la combinaison de résistance et de ténacité la plus élevée de toutes les familles d'alliages d'aluminium qui est associée au revenu (T6). Cependant la diminution de la résistance à des niveaux acceptables par sur-vieillissement augmente la ténacité, la résistance à la fissure par corrosion sous contraintes et croissance des fissures par fatigue. Les alliages commerciaux 2xxx vieillissent naturellement (T3 et T4) offrent une bonne combinaison de ténacité et de résistance contrairement au vieillissement artificiel (T8) durcis par précipitation qui donne une grande stabilité des propriétés mécaniques et une réduction de la ténacité à température élevée [13].

En plus de traitement de vieillissement, la mise en solution et la trempe affectent aussi l'équilibre entre résistance et ténacité de la série 2000. Le traitement thermique de la solution détermine la quantité de soluté dans la solution solide et la teneur en lacunes, ce qui affecte la cinétique de vieillissement ultérieure. La trempe affecte à la fois la microstructure et les propriétés en déterminant la quantité de soluté qui précipite pendant le refroidissement et celle qui est disponible pour un durcissement par vieillissement ultérieur. L'alliage 2124, une version plus haute pureté de 2024, a été le premier alliage 2xxx développé pour avoir une résistance à la rupture élevée. La principale contribution à une ténacité est une pureté accrue (faible teneur en fer et en silicium) ce qui minimise la formation des constituants insolubles ($<1\mu\text{m}$) [13,28].

3.3 La fatigue des alliages d'aluminium :

Beaucoup de travaux ont été faits sur des échantillons lisses et entaillés des alliages d'aluminium commerciaux pour démontrer que peu ou pas de différence détectable dans la résistance à la fatigue. Les premiers travaux sur les essais de poutre rotative sont résumés sur la figure (3-1). Une grande répartition des résistances à la fatigue pour les éprouvettes non entaillées que pour les éprouvettes entaillées. La dispersion de la résistance à la fatigue lisse est en partie associée à des variations des sources d'interaction de fissure au niveau des imperfections de surface ou des localisations de déformation. Cependant pour l'éprouvette entaillée, la propagation de fissure similaire après le détruit de la fissure avec des entailles nettes ce qui minimise la différence.

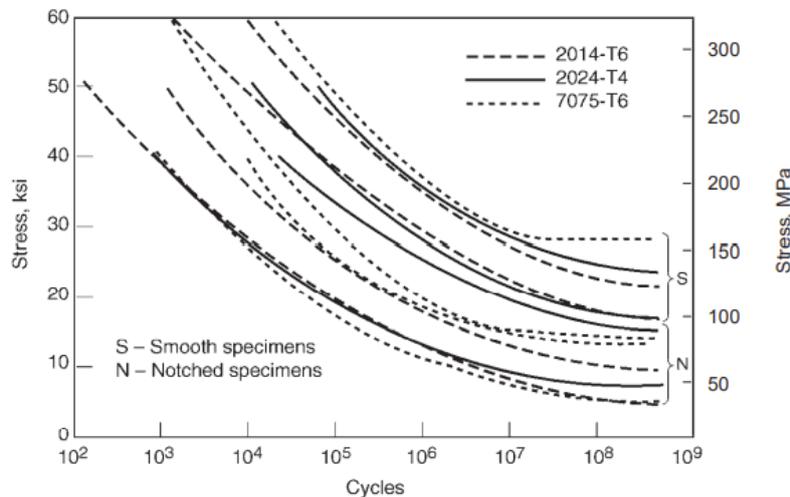


Figure 3-1 Comparaison des bandes de résistance à la fatigue pour les alliages d'aluminium 2014-T6, 2024-T4 et 7075-T6 pour les essais de poutre rotative [13].

L'approche de S-N ne fournit pas de distinctions claires dans les caractéristiques des stades d'initiation et de propagation des fissures de fatigue.

Il convient de noter que les augmentations proportionnelles de la résistance à la fatigue dues aux résistances à la traction semblent plus faibles pour les alliages d'aluminium durcis par vieillissement que pour les

alliages durcis par écrouissage (figure 3-2). Une tendance similaire apparaît évidente la résistance à la fatigue à $5 \cdot 10^8$ cycles.

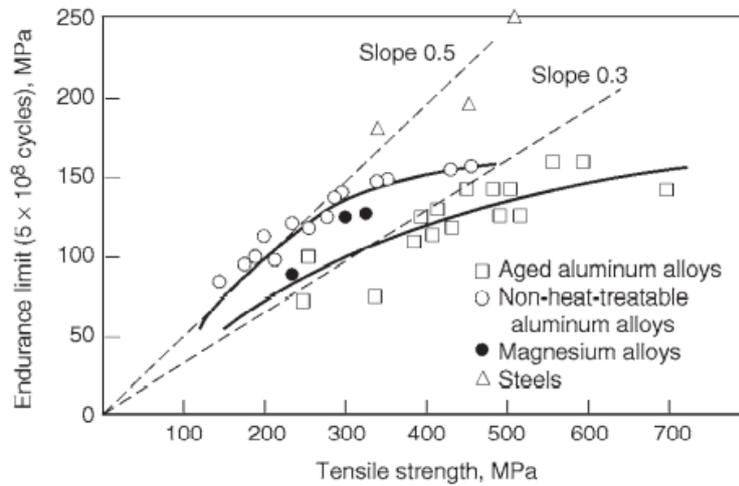


Figure 3-2 Rapports de fatigue (limite d'endurance / résistance à la traction) pour les alliages d'aluminium et autres matériaux [13].

La plupart des alliages d'aluminium subissent une certaine réduction de la résistance à la fatigue dans des environnements corrosifs tels que l'eau de mer. En général, les résistances à la fatigue des alliages d'aluminium 5xxx et 6xxx plus résistants à la corrosion et les états de revenu sont moins affectés par les environnements corrosifs que les alliages 2xxx et 7xxx à plus haute résistance (figure 3-3). Les performances de fatigue par corrosion des alliages 7xxx est améliorées en sur vieillissement aux états T7 et T8. Pour les alliages 2xxx les états T3 et T4 (naturellement vieillis) qui offrent une combinaison de résistance et de résistance à la fatigue à des durées élevées. Cependant, le vieillissement artificiel des alliages 2xxx s'accompagne d'une perte de ténacité avec une diminution de la résistance à la croissance des fissures de fatigue à des intensités de contraintes intermédiaires et élevées [13].

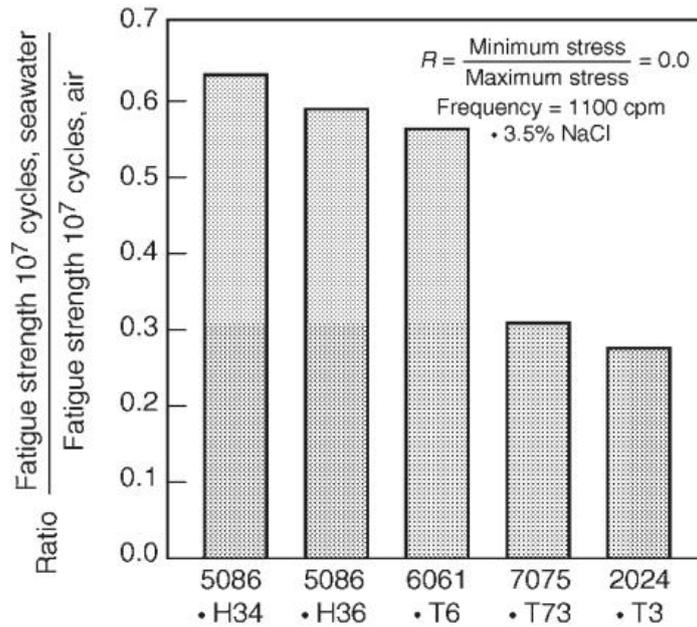


Figure 3-3 Comparaison des résistances à la fatigue axiale de la feuille d'alliage d'aluminium de 0,81 mm (0,029 po) dans l'eau de mer et l'air [13].

De nombreux alliages ont de grandes inclusions qui peuvent concrétiser la déformation lors de la déformation cyclique et conduire à une nucléation précoce des fissures. Pour réduire cet effet néfaste les teneurs des impuretés sont réduites. La figure (3-4) montre qu'une amélioration significative de la durée de vie à la fatigue à cyclé élevé de l'alliage 7075 est obtenue en réduisant la teneur en fer et en silicium (alliage 7475).

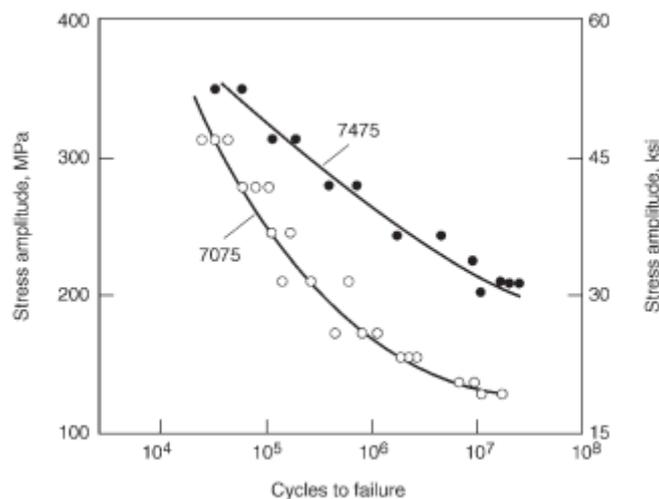


Figure 3-4 Effet de la densité d'inclusion sur le comportement à la durée de vie de deux alliages 7xxx: alliage à haute densité d'inclusion 7075 et alliage à faible densité d'inclusion 7475 [13].

3.3.1 La fissure par fatigue des alliages d'aluminium :

En examinant les courbes de taux de croissance des fissures par fatigue de nombreux matériaux présentant de très grandes différences de microstructure la figure (3-5) illustre une compilation de données par les alliages d'aluminium des séries 2xxx et 7xxx on remarque que les courbes sont similaires, les facteurs métallurgiques qui contribuent à l'augmentation de la résistance à la rupture contribuent également à une résistance accrue à la propagation des fissures de fatigue.

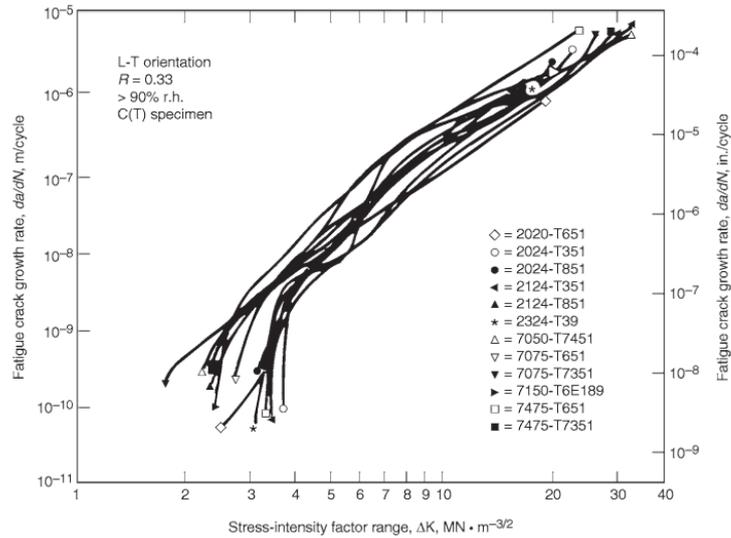


Figure 3-5 Influences mineures de microstructures différentes sur les courbes de taux de croissance des fissures de fatigue: données de douze alliages d'aluminium 2xxx et 7xxx avec différents traitements thermiques [13].

La figure (3-6) montre qu'à de faibles intensités de contraintes les taux de croissance des fissures de fatigue pour 7475 sont approximativement les mêmes que pour 7075 ; la croissance de 7475 à des niveaux Δk élevés est deux fois plus lente que pour 7078 une tendance similaire a été observée pour le 2124 – T851 et 2024 – T851.

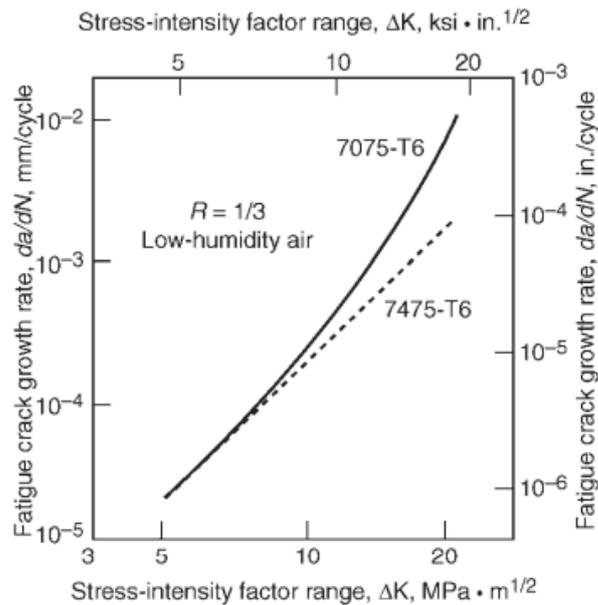


Figure 3-6 Bénéfice de l'alliage 7475 à haute ténacité à une intensité de contrainte intermédiaire et élevée[13]

Les échantillons lisses des alliages 2024 et 2124 présentant un comportement en fatigue assez similaires. Parce que la fatigue dans les échantillons est dominée par l'amorçage de la fatigue, les grosses particules insolubles peuvent ne pas contribuer significativement à l'initiation des fissures de fatigue. Cependant une fois la fissure initiée, la propagation de cette dernière est plus lente dans un matériau avec peu de grosse particule (2124) que dans un matériau avec un plus grand nombre de grosse particules (2024). Un léger changement dans la chimie des alliages, des éléments d'affinage de grains ou l'élimination des éléments

d'impureté fer et silicium permet d'améliorer les propriétés secondaires (résistance à la corrosion sous contrainte, résistance à la fatigue et la ténacité) [13].

3.3.2 Le comportement du matériau lors de l'essai :

Dans l'essai à charge contrôlée, la réponse du matériau se traduit par des variations d'amplitudes de déformation au cours du cycle, mais il est souvent remarqué qu'après plusieurs cycles de chargement, la réponse du matériau se stabilise sous une de ces trois états :

- Accommodation : lorsque le cycle se stabilise présente une boucle d'hystérésis.
- Adaptation : Correspond à un cycle stabilisé ou le comportement est redevenu purement élastique.
- Rochet : Quand la déformation plastique dans l'éprouvette augmente régulièrement cycle après cycle.

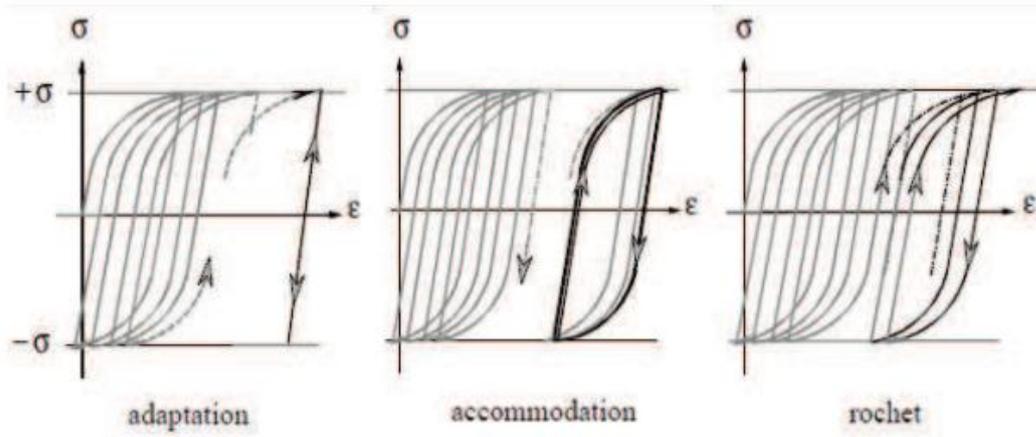


Figure 3-7 Comportement limite des structures soumises à des chargements cycliques à contraintes imposées[13].

Le but de la plupart des travaux dans ce domaine est de lier le comportement macroscopique des structures aux observations obtenues à l'échelle microscopique. Srivatsan et Coryne ont découvert que les précipités qui existent dans la matrice induisent des concentrations de contraintes conduisant des bandes de glissement très intenses générant ainsi des nucléations de microfissures [31].

Lors de l'essai, la charge appliquée a aussi une influence sur les résultats de l'essai c'est pour ça il est préférable de tester le matériau aux mêmes sollicitations et dans le même environnement que celui de l'industrie.

L'influence du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue (propagation d'une fissure de fatigue) est étudiée par de nombreux chercheurs, la figure(3-8) montrent que l'augmentation du R fait augmenter la durée de vie, R influence aussi la vitesse de fissuration figure(3-9), la vitesse de fissuration dans le stade stable de propagation est modélisée l'équation $\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m$ où le coefficient m dépend du rapport de charge [32].

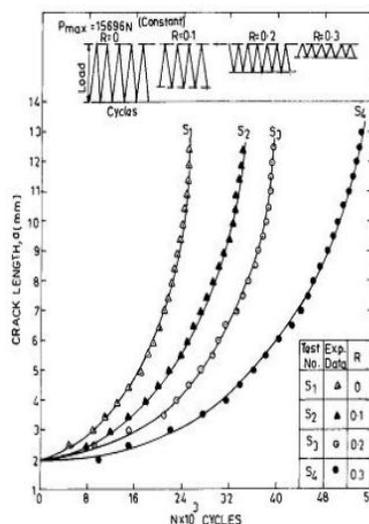


Figure 3-8 Propagation de la fissure en fonction du nombre des cycles pour des différentes valeurs de R (6063 - T6) [13].

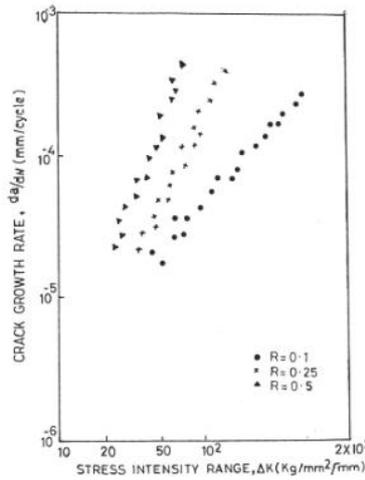


Figure 3-9 Vitesse de fissuration de l'alliage d'aluminium 2618 Sous l'effet de rapport de charge [13].

Comme déjà mentionner dans le chapitre de l'essai de fatigue, la fréquence n'a pas d'influence sur le phénomène de la fatigue, la figure (3-10) montre les résultats des essais avec différentes fréquences sur l'alliage 2618, on remarque bien que la vitesse de fissuration ne varie pas en fonction de la fréquence [32].

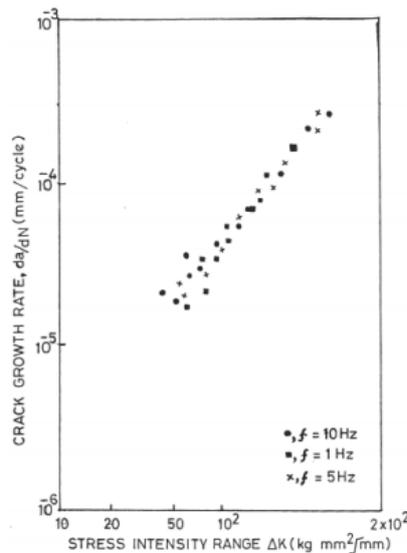


Figure 3-10 Effet de la fréquence de fatigue sur la vitesse de fissuration d'alliage 2618 à R=0.1 [13].

L'environnement peut avoir un effet important sur l'amorçage et la propagation des fissures, exemples de la nuance 2024- T351 qui est testé dans deux environnements sous vide et à l'air, sous vide l'amorçage de la fissure est retardé et la durée de la fissuration avant rupture est augmentée (240.10³) cycles contre (73.10³) cycles à l'air [32].

3.3.3 L'étude sur la durée de vie des alliages d'aluminium :

Depuis les premières études faites sur la fatigue, il a été conclu que les premiers actes d'initiation des fissures se développent en surface des pièces sous chargement cyclique. Des chercheurs ont découvert que la perte en ductilité lors de la fatigue à faible nombre de cycles est due à la présence des microfissures en

Chapitre 03 La fatigue des alliages d'aluminium

surface. D'autre part, d'autres ont confirmé que lorsqu'un alliage d'aluminium est durci avec des précipités non cisillables, il devait être plus résistant à la fatigue et à l'initiation des fissures. D'une manière similaire, il a été démontré que l'intérêt et l'effet des précipités dispersés dans la matrice lors du chargement cyclique est d'augmenter la durée de vie en fatigue de la structure. Dans d'autres travaux, il est rapporté que le chargement faible n'induit aucun changement apparent sur la surface externe de la pièce [31].

Chapitre 4 : Techniques expérimentales

4.1 Introduction :

Le but de ce travail est de mettre en œuvre un essai de fatigue uniaxial avec une machine servo-hydraulique au laboratoire de Métallurgie et Mécanique au Centre de Recherche en Technologies industrielles (CRTI). Ce chapitre est consacré à la description de la méthodologie expérimentale suivie dans ce travail où les différentes techniques et expériences, mises en œuvre seront détaillées.

Dans la première partie les essais mécaniques sont effectués afin de caractériser nos éprouvettes et avoir des informations sur l'état métallurgique et leur comportement avant de faire l'essai de fatigue.

La deuxième partie présente les techniques utilisées pour la caractérisation métallographique des échantillons.

4.2 Caractérisation mécanique :

Les alliages d'aluminium nous sont fournis usinés selon des formes et dimensions différentes. Une caractérisation mécanique est faite avec un test de microdureté et des essais de traction, aussi pour avoir les données nécessaires l'essai de fatigue.

4.2.1 Préparation des éprouvettes :

Après le découpage des éprouvettes et l'usinage on fait une préparation afin d'enlever les défauts des surfaces (figure 4-1) qui peuvent être des sites de concentrations de contrainte ce qui va accélérer la propagation de la fissure et altérer les résultats des essais.



Figure 4-1 Les éprouvettes avant la préparation.

Pour cela, on a poli avec les papiers abrasifs (500, 800, 1000) et obtenu un état de surface soigné comme le montre la figure (4-2).



Figure 4-2 Les éprouvettes après la préparation.

4.2.2 Essai de traction :

L'essai de traction est une étape qui précède l'essai de fatigue, il détermine les caractéristiques mécaniques de notre alliage qui servent comme paramètres nécessaires pour l'essai de fatigue (la limite élastique le module élastique et la résistance à la traction).

Pour notre étude, on a choisi des éprouvettes d'alliage d'aluminium avec deux épaisseurs différentes $e=6\text{mm}$ et $e=4\text{mm}$.

Machine de traction :

L'essai est fait sur une machine électromécanique (figure 4-3) qui comporte en général une traverse fixe et une traverse mobile guidée en translation par rapport au bâti grâce à deux vis à billes (quatre pour les machines de forte capacité). Les vis à billes sont souvent précontraintes pour permettre d'effectuer des essais de traction-compression et de fatigue. Une cellule à jauges de déformation, étalonnée en charge, est fixée soit à la traverse mobile, soit à la traverse fixe. Les extrémités de l'éprouvette sont fixées, à l'aide de lignes d'amarrage adéquates, l'une à la traverse fixe, l'autre à la traverse mobile, via la cellule de charge pour l'une d'entre elles. Un moteur électrique rotatif commande le déplacement de la traverse mobile grâce à une transmission par système vis-écrou, et c'est le déplacement de la traverse mobile qui assure le chargement de l'éprouvette. Le déplacement de la traverse est mesuré, avec relativement peu de précision, par l'intermédiaire de la rotation du moteur. Ces machines peuvent être asservies en déplacement de la traverse mobile, en charge, ou en déformation de l'éprouvette mesurée par un extensomètre [33].

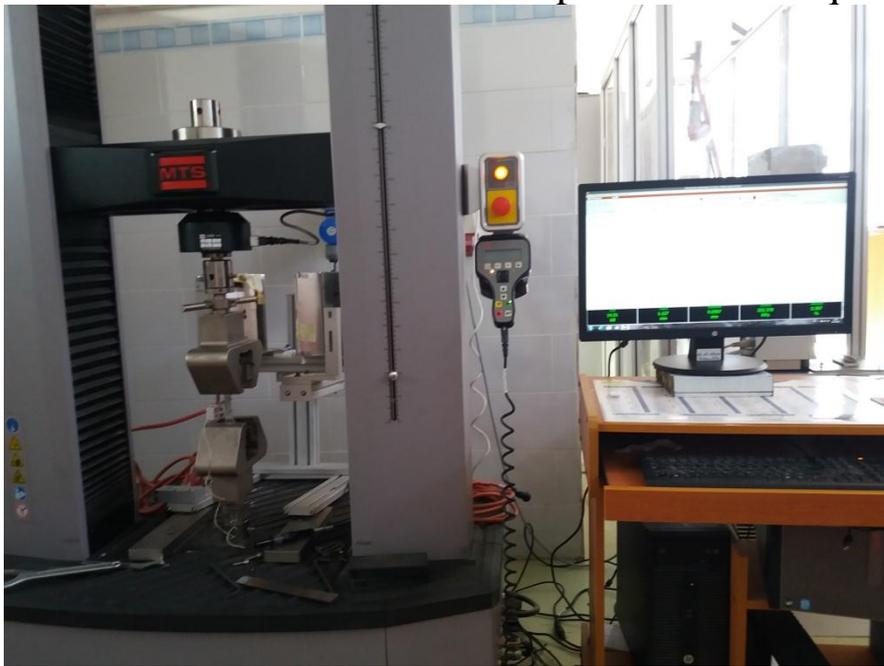


Figure 4-3 La machine utilisée est de Marque : MTS Criterion Model 45 avec une charge de 100 KN disponible au CRTI Chéraga.

- **Eprouvettes de traction :**

Les éprouvettes utilisées sont plates avec des épaisseurs différentes figure 4-4.

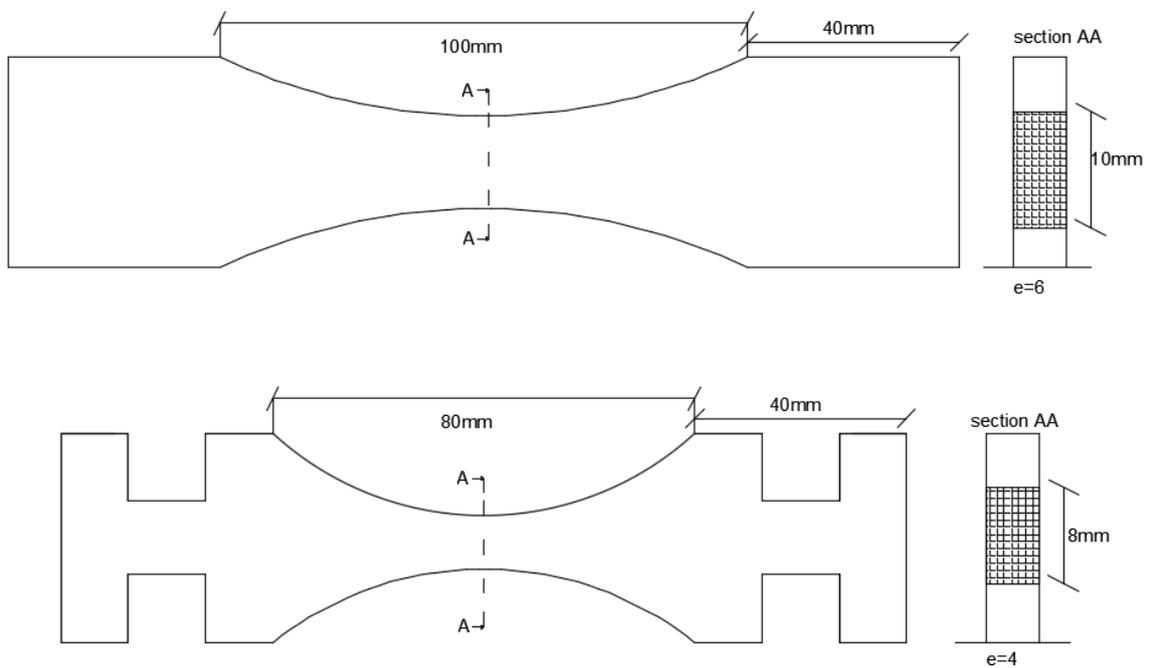


Figure 4-4 la géométrie des éprouvettes

L'éprouvette est placée de sorte à avoir la même distance entre les mors comme le montre la figure (4-5).



Figure 4-5 : l'éprouvette placée

La vitesse de l'essai est 0.01mm/min pour l'éprouvette de $e=6\text{mm}$ et 0.1 mm/min pour l'éprouvette de $e=4\text{mm}$. Les déformations ont été mesurées à l'aide d'un extensomètre avec une longueur de 25mm placé au milieu de l'éprouvette. La machine est liée à l'ordinateur avec logiciel spécialisé qui permet d'afficher les résultats de l'essai.

4.2.3 Microdureté :

La microdureté est un examen dans lequel le diamètre de l'empreinte reste au-dessous de l'ordre de grandeur du grain de l'éprouvette à examiner. Ce désir de mesurer la dureté d'un grain a conduit à la construction d'un microduremètre Vickers avec un petit diamant de forme d'une pyramide [34].

La pyramide est à base carrée avec un angle entre face 136° et un rapport entre la diagonale de l'empreinte, d , et profondeur de pénétration h de 7. La dureté est alors donnée par [35] :

$$HV = 1.856 \frac{F}{d^2}$$

La mesure est basée sur la détermination des dimensions d'empreintes produites dans le matériau par enfoncement d'un pénétrateur, sous l'action d'une charge de 100gf et 200gf pendant 10 secondes dans différents états [33].

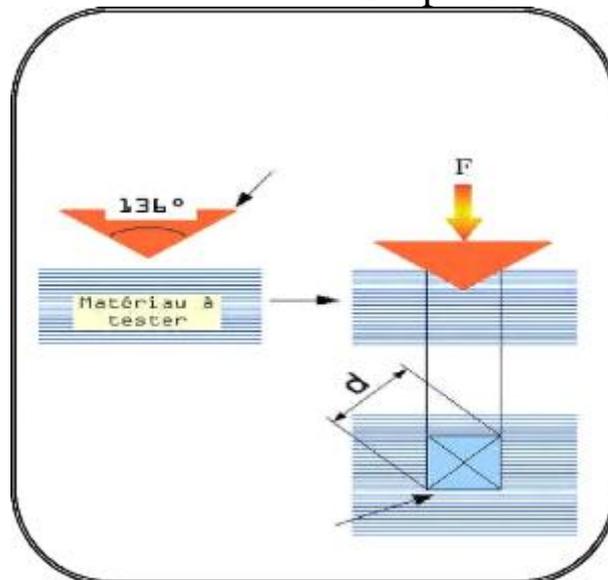


Figure 4-6 Principe de l'essai de dureté Vickers



Figure 4-7 Microduro-mètre (CRTI).

4.2.4 Essai de fatigue :

Dans le but de concrétiser les informations acquises par la théorie, nous voulons faire les essais de fatigue en traction ondulé uniaxiale avec $R=0.1$ sur des éprouvettes typiques à la machine et voir leur comportement sous l'action des contraintes ondulées en traction.

- Machine de l'essai de fatigue :

On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue, selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.).

Le laboratoire de Métallurgie et Mécanique au Centre de Recherche en Technologies industrielles (CRTI) dispose d'une machine d'essai fatigue en traction-compression MTS ± 100 kN comme le montre la figure (4-8)

Le principe :

La cellule de charge est fixée au châssis d'essai d'un côté et à la direction de charges d'un autre côté. Les poignées utilisées pour maintenir l'échantillon rigidement dans la direction de charges peut être de type différent, selon l'éprouvette. Souvent, le type de poignées qui doivent être utilisées pour le test est spécifié par l'ASTM. Parfois, des extensions de chargement de type spécial sont utilisées pour faciliter différents types de tests, un moteur électrique entraîne une hydraulique pompe qui génère une pression élevée pour le contrôle de la force et le mouvement d'un actionneur hydraulique.



Figure 4-8 La machine d'essai de fatigue au laboratoire du CRTI.

On fait l'essai sur deux types éprouvettes avec de différentes épaisseurs 4mm et 6mm figure 4-4, l'éprouvette est placée au milieu comme le montre la figure (4-9).



Figure 4-9 éprouvette placée sur la machine.

L'essai est fait à charge contrôlée sinusoïdale inférieure à la limite élastique de l'essai de traction (domaine d'endurance limitée) avec un rapport de contrainte de $R=0.1$ et une fréquence de 25Hz à la température ambiante, le tableau suivant (4-2) donne les contraintes appliquées sur chaque éprouvette.

Tableau 4-1 Les conditions d'essai de fatigue.

Eprouvette	La contrainte maximale (MPa)	La contrainte minimale (MPa)
F1 e=4mm	256.84	25.38
F2 e=4mm	196.272	19.62
F1 e= 6mm	202.76	25.53
F2 e= 6mm	228.11	22.8

4.3 Caractérisation métallographiques :

Le but de l'étude métallographique est d'observer la micrographie du matériau en passant par les étapes suivantes :

4.3.1 Découpe à jet d'eau

L'eau, ou plus exactement le fluide, peut contenir des additifs, notamment pour faciliter la coupe du matériau. La découpe au jet d'eau additionnée d'abrasif (type grenat), d'une granulométrie de 80 mesh dans le standard, permet la découpe de métaux, pierres, marbres, verre dans des épaisseurs allant jusqu'à 600 millimètres [33].

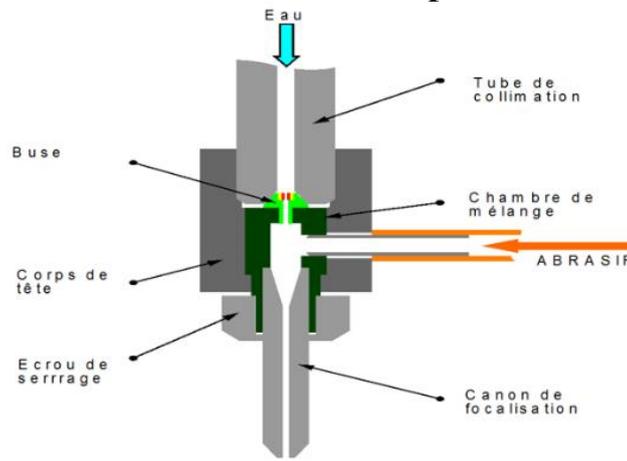


Figure 4-10 Schéma explicatif du fonctionnement de la découpe au jet d'eau.

4.3.2 Prélèvement :

Afin de déterminer la nature des alliages, un prélèvement est effectué sur une éprouvette de chaque épaisseur. Par un découpage à froid avec précision en utilisant une micro tronçonneuse (Figure 4-11) le disque est lubrifié automatiquement.



Figure 4-11 micro tronçonneuse utilisée au CRTI.

4.3.3 Enrobage des échantillons :

Une fois l'étape de tronçonnage effectuée, la seconde étape du processus consiste à enrober les petits échantillons pour pouvoir les manipuler. On positionne l'échantillon dans le cylindre on ajoute de la résine époxy électro-conductrice, l'enrobage est effectué à une température de 150 °C (enrobage à chaud) et une pression d'environ 250 bars avec un système de refroidissement [33].



Figure 4-12 Enrobeuse à chaud du CRTI.



Figure 4-13 L'échantillon enrobé.

4.3.4 Polissage :

Les échantillons sont polis à l'aide de papiers abrasifs (500, 800, 1000, 1200, 2400 et 4000) rincés à l'eau, puis séchés. Un deuxième rinçage à l'éthanol est appliqué avant le polissage de finition sur papier feutre (spécifique aux alliages d'aluminiums afin d'éviter toute contamination) en utilisant comme agent de polissage une solution diamantée de 3 μ m et 1 μ m [36].



Figure 4-14 Polisseuse automatique du CRTI.

4.3.5 Solution d'attaque :

Le réactif d'attaque utilisé est le réactif de KELLER de composition :

- 1ml HF (48%)
- 1.5ml HCl (acide chloridrique)
- 2.5ml HNO₃ (acide Nitrique)
- 100ml H₂O

L'attaque est menée durant une quarantaine de secondes, puis un rinçage à l'éthanol est toujours appliqué avant et après attaque chimique [36].

4.3.6 Microscopie :

L'observation de la microstructure est effectuée sur un microscope optique de marque NIKON couplé à une caméra figure (4-15) au CRTI [33]. Elle a permis de distinguer les grains et les différentes phases.

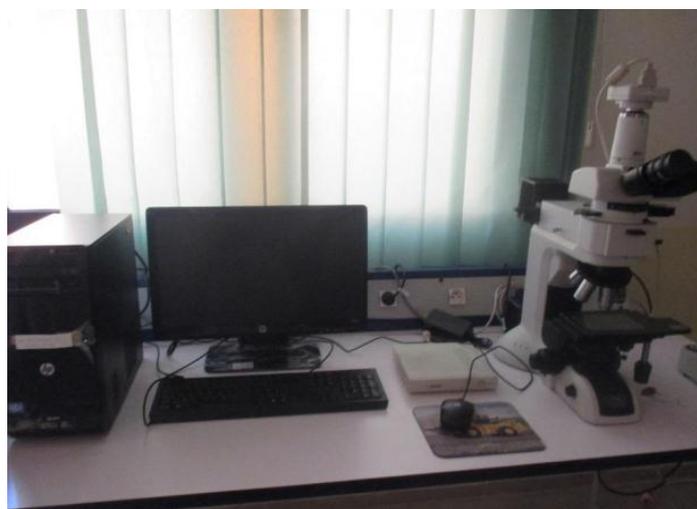


Figure 4-15 Figure: microscope optique du CRTI .

4.3.7 La microscopie électronique à balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage MEB ou « Scanning Electron Microscopy » SEM est une technique puissante d'observation de la topographie des surfaces basé sur l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface à étudier.

L'image obtenue représente l'état de surface de l'échantillon avec une résolution de l'ordre de quelques nanomètres (nm) grâce aux électrons secondaires (d'énergie d'environ quelques dizaines d'eV) émis par la surface de l'échantillon. Le rendement de ces électrons est de profondeur inférieure à 5nm et dépend essentiellement de l'angle entre le faisceau incident et la surface analysée et le numéro atomique des atomes constitutifs [33].

Une des interactions électrons-matière provoque l'émission d'un rayonnement électromagnétique dans le domaine des rayons X sous forme de photon. La mesure de l'énergie des photons X émis permet de remonter aux éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon observé. On distingue les détecteurs en spectroscopie d'énergie et ceux en spectroscopie de longueur d'onde. Dans notre cas, nous avons utilisé la spectrométrie en énergie (Energy dispersive spectrometry) [33] [34].



Figure 4-16 Le microscope électronique à balayage (CRTI).

Chapitre 5 : Résultats et discussions

Cette partie (résultats et interprétations), comporte plusieurs autres parties dans lesquelles nous présentons les matériaux de bases, leurs compositions, leurs propriétés mécaniques obtenues par diverses méthodes d'analyses expérimentales (MEB et MO) et les comportements mécaniques obtenus par l'essai de traction et l'essai de fatigue.

5.1 Matériau de base

La composition chimique du matériau :

Les éprouvettes fournies sont d'alliage d'aluminium, une analyse chimique est faite avec le MEB grâce à la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (ou EDS, abréviation de l'anglais « Energy Dispersive X-ray Spectroscopy » pour avoir la composition chimique de celle-ci et identifier la ou les série(s) à lesquelles elles appartiennent (exp 2000 3000 5000 ...).

La figure (5-1) est une micrographie prise par le MEB de l'échantillon d'une éprouvette et le rectangle rouge représente la zone à analyser.

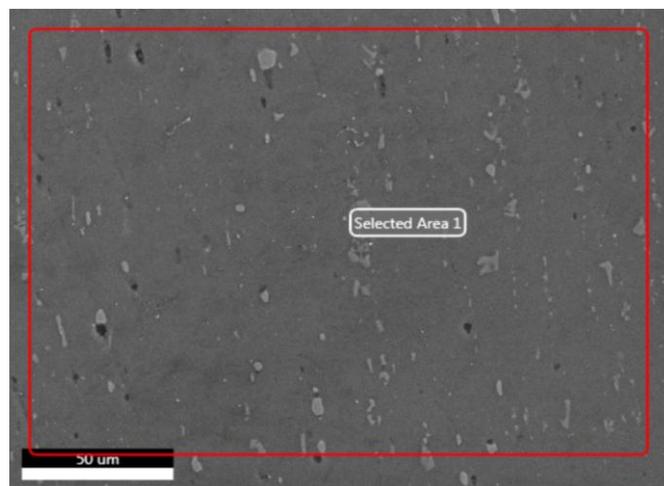


Figure 5-1 Une micrographie de l'éprouvette $e=4\text{mm}$ analysée avec le MEB.

Le spectre d'analyse EDS globale de cette zone est indiqué sur la figure 5-2 et sa composition chimique est donnée sur le tableau 5-1

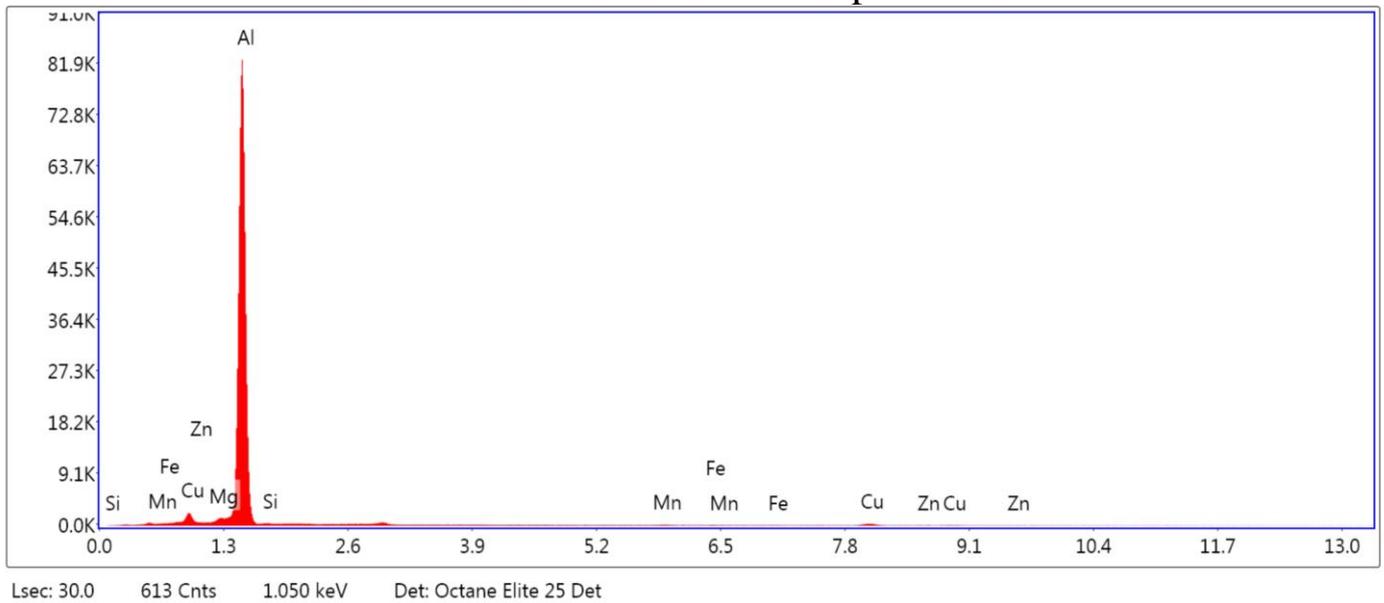


Figure 5-2 spectre d’analyse EDS de l’échantillon (4mm).

Les teneurs des éléments d’alliage sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 5-1 Composition chimique obtenue d’EDS.

Elément	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
Masse %	1.13	93.54	1.06	0.23	0.09	3.69	0.25
Erreur %	5.06	2.04	11.42	56.51	57.96	8.21	57.40

De cette première analyse on constate que les principaux éléments d’additions sont le cuivre (Cu) et le magnésium (Mg) dont les teneurs appartiennent à la série 2000.

La figure (5-3) montre l’analyse ponctuelle effectuée sur des différentes phases en présence.

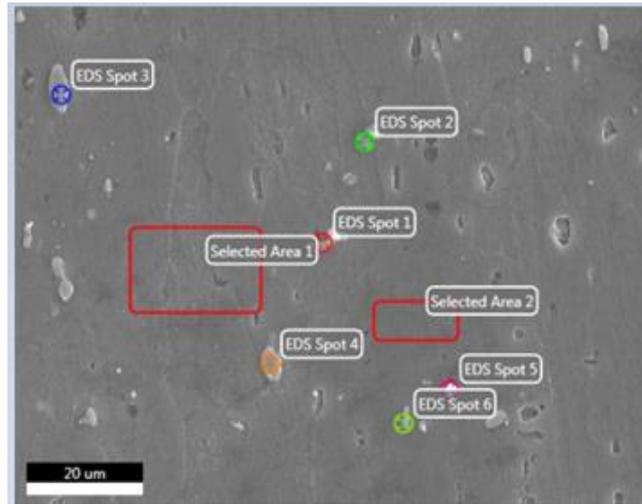


Figure 5-3 Micrographie de l'analyse instantanée (e=4mm).

Les spectres d'analyses et les compositions correspondantes sont représentés sur les tableaux ci-dessous, spécifiques à chaque partie analysée de la micrographie (figure 5-3).

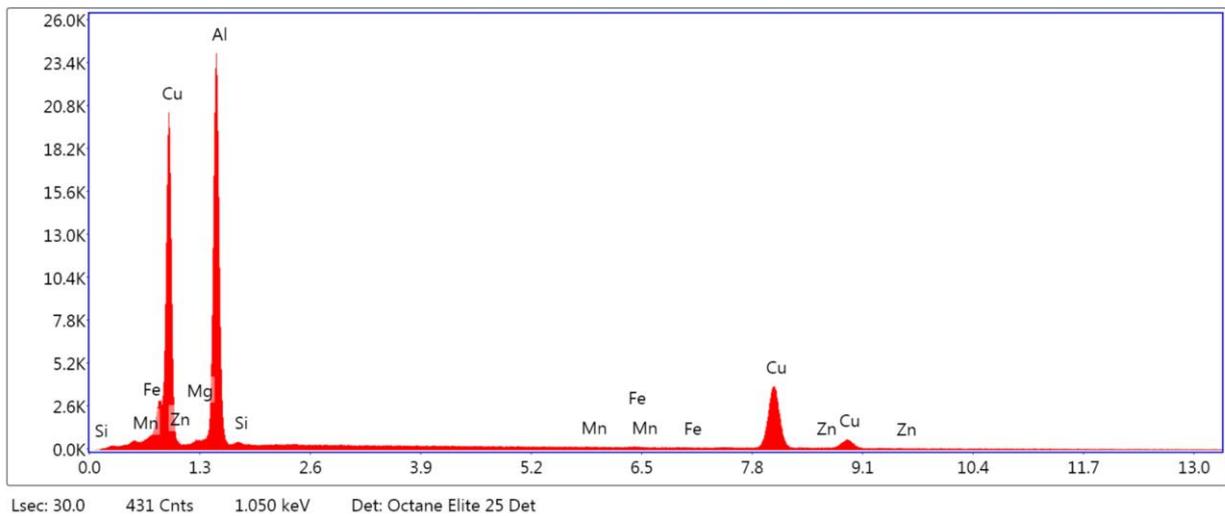


Figure 5-4 spectre d'analyse EDS du précipité Al_2Cu (EDS spot 3).

Le tableau ci-dessous présente la composition chimique du précipité Al_2Cu (spot 3) :

Tableau 5-2 Composition chimique du précipité Al_2Cu .

Elément	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
Masse %	0.60	48.31	0.81	0.07	0.10	49.66	0.45
Erreur %	15.06	6.70	12.57	59.27	58.54	2.43	55.18

La figure (5-5) montre l'analyse EDS du (selected area1) de la micrographie (figure 5-3) :

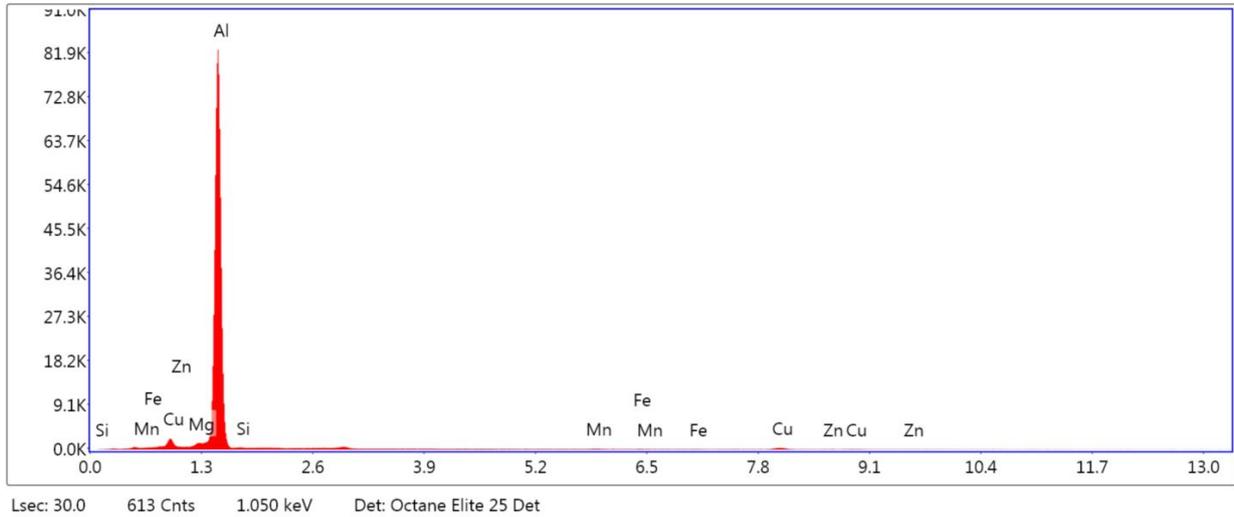


Figure 5-5 : spectre d'analyse EDS du (selected area1).

Les teneurs des éléments sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 5-3 : Composition chimique du (selected Area 1)

Élément	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
Masse %	1.13	93.54	1.06	0.23	0.09	3.96	0.23
Erreur %	5.06	2.04	11.42	56.51	57.96	8.21	57.40

La figure (5-6) montre l'analyse EDS du (selected area 2) de la micrographie (figure 5-3) :

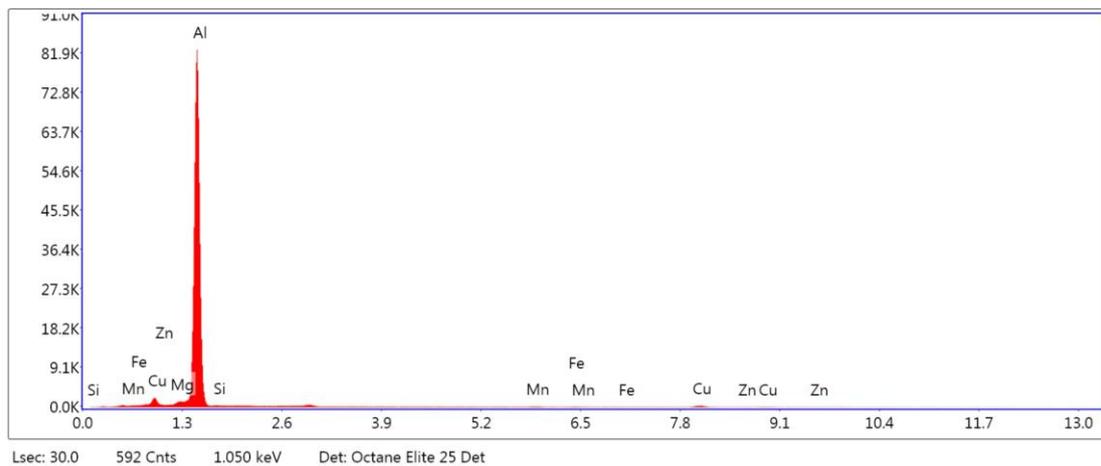


Figure 5-6 : Spectre d'analyse EDS du (selected area 2).

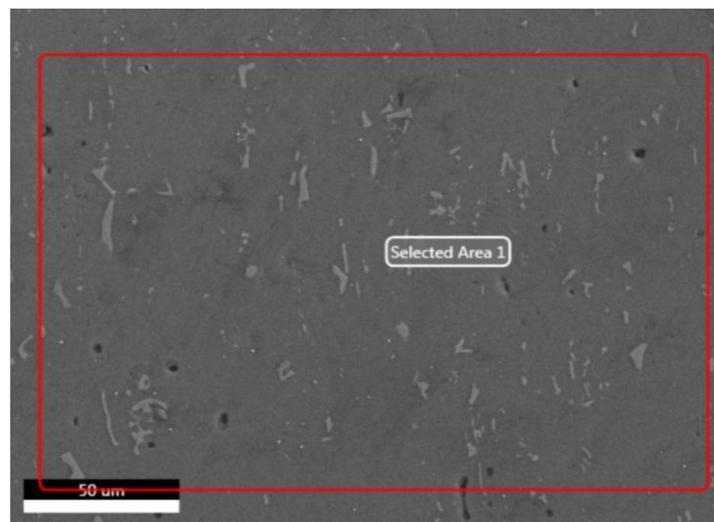
Les teneurs des éléments sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 5-4 : Composition chimique du (selected area 2)

Elément	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
Masse %	1.42	92.11	1.61	0.61	0.26	3.66	0.34
Erreur %	4.66	2.16	9.12	17.57	45.66	7.65	56.36

D'après les résultats des EDS, on constate que la série de l'alliage d'aluminium de 4mm d'épaisseur est la série 2000 car le pourcentage massique du cuivre Cu appartient à la fourchette de teneurs de cette série qui varie entre 3.5 et 4.9%.

De la même manière, une analyse globale est effectuée aussi sur l'échantillon enrobé des éprouvettes d'épaisseur $e=6\text{mm}$, comme présentée sur la figure 5-7.

Figure 5-7 Micrographie d'un échantillon d'éprouvette $e=6\text{mm}$.

La figure 5-8 représente le spectre de l'analyse globale de la micrographie (figure 5-7)

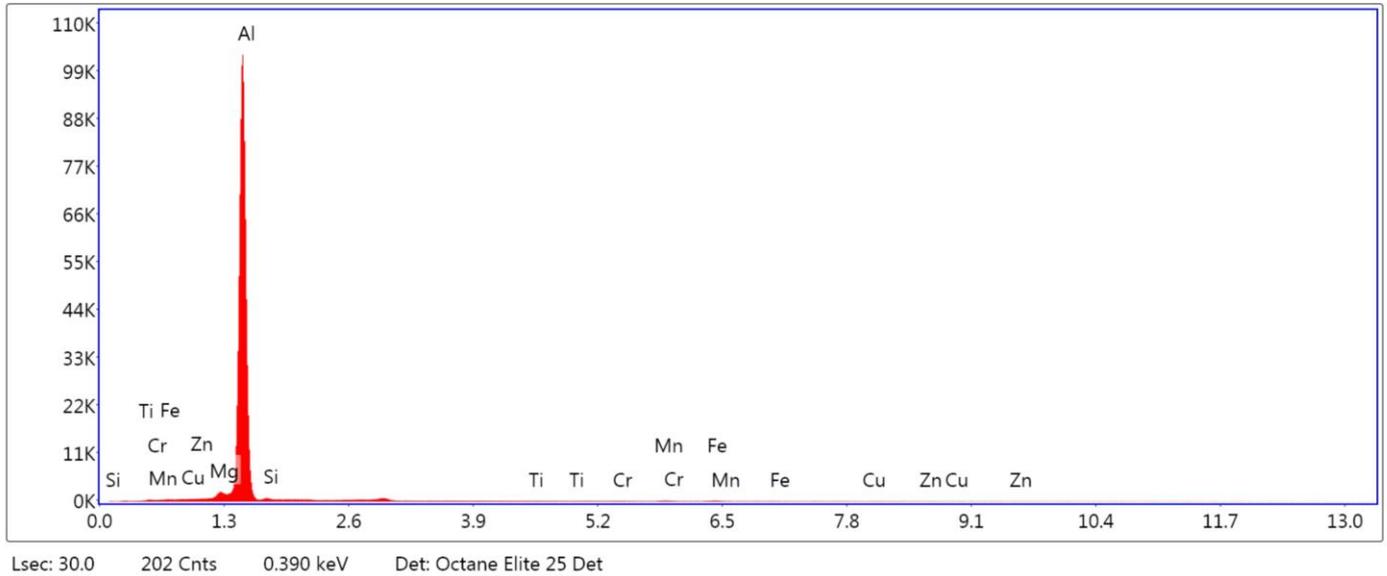


Figure 5-8 Spectre d’analyse EDS de l’échantillon (e=6mm).

Les teneurs des éléments d’alliages obtenues sont présentées sur le tableau ci-dessous :

Tableau 5-5 Composition chimique de l’alliage.

Elément	Mg	Al	Si	Mn	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn
Masse %	2.34	92.44	3.36	0.23	0.04	0.19	0.69	0.21	0.13
Erreur %	3.42	1.80	8.49	56.51	57.66	40.99	20.75	57.06	57.76

De cette analyse on constate que les principaux éléments d’additions sont le silicium (Si) et le magnésium (Mg). Cependant, les teneurs des deux éléments sont élevées qu’il nous est difficile d’identifier la série de l’alliage, d’où la nécessité d’une autre technique : la fluorescence X qui est quantitative et qualitative.

La figure (5-9) montre l’analyse ponctuelle effectuée sur les différentes phases en présence.

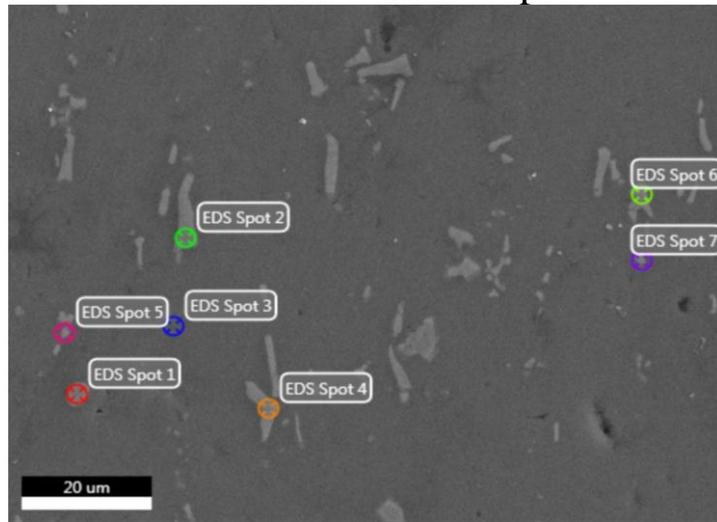


Figure 5-9 Micrographie de l'analyse locale de l'échantillon (e=6mm).

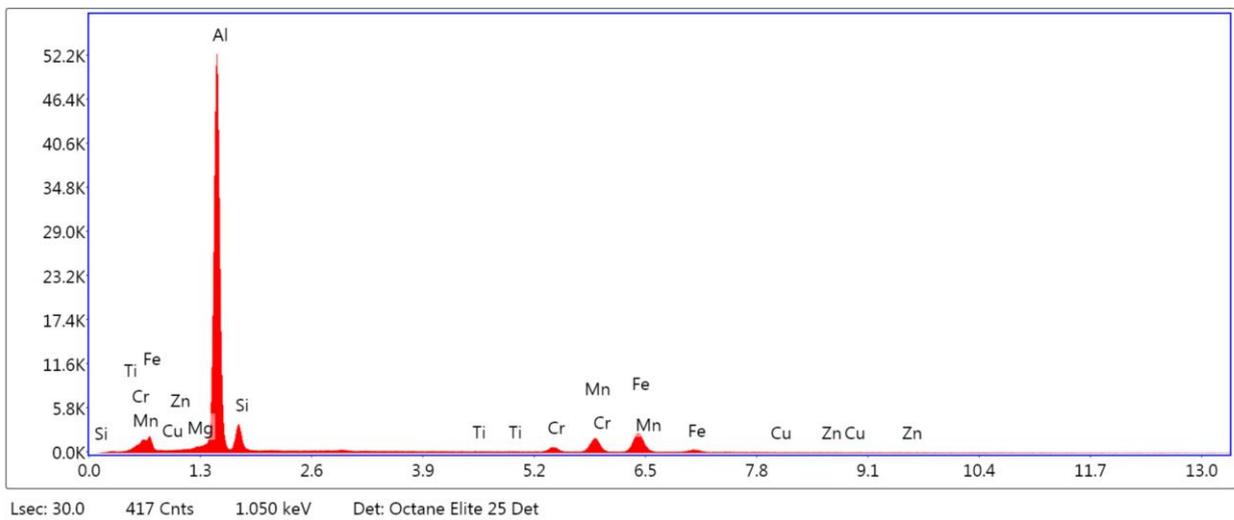


Figure 5-10 Spectre d'analyse EDS du précipité Al(Mn,Cr,Fe)Si (spot 2).

Le tableau ci-dessous présente la composition chimique de ce précipité (spot 2) :

Tableau 5-6 Composition chimique du précipité Al(Mn,Cr,Fe)Si.

Elément	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
Masse %	0.82	63.06	8.56	0.07	2.51	9.21	15.26	0.33	0.18
Erreur %	9.49	4.40	7.74	56.71	5.47	2.96	2.58	56.46	57.45

La figure suivante montre le spectre du précipité AlFeSi (spot 4) de la micrographie (5-9) :

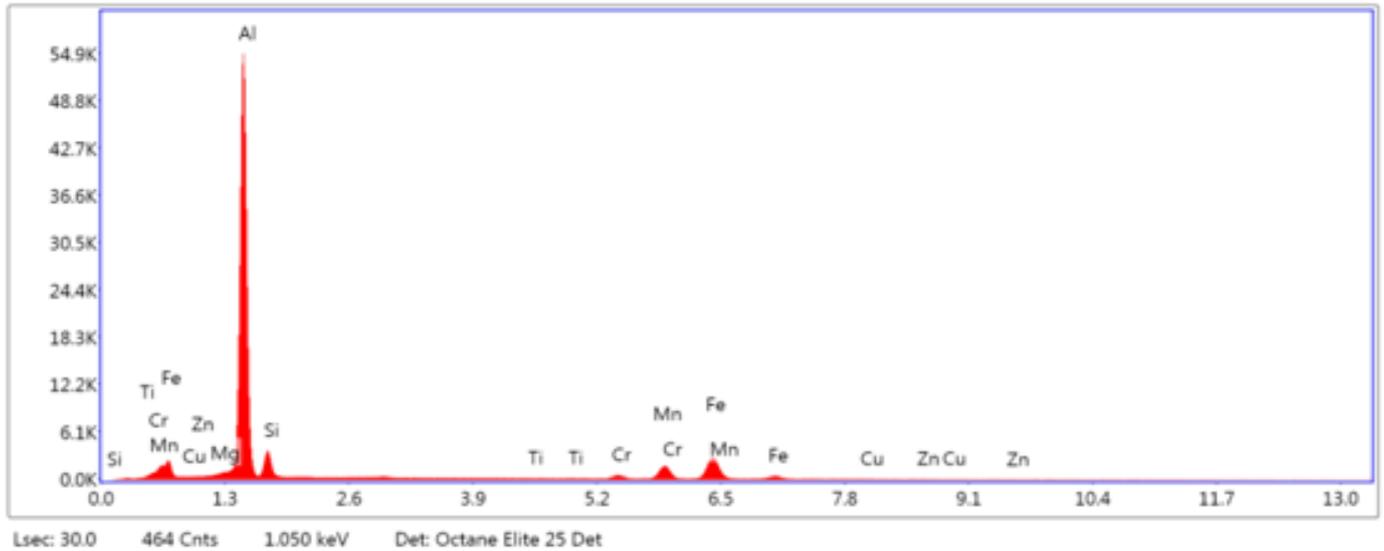


Figure 5-11 : spectre d’analyse EDS du précipité AlFeSi (spot 4).

Le tableau suivant donne la composition de ce spectre :

5-7 : Composition chimique du précipité AlFeSi.

Elément	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
Masse %	0.89	63.67	8.10	0.05	1.72	8.31	16.51	0.54	0.20
Erreur %	8.07	4.41	7.77	57.05	7.06	3.01	2.53	28.77	57.24

D’après les résultats des EDS, on constate que la série de cette éprouvette n’est pas la série 2000, l’alliage de cette éprouvette est à base d’aluminium et deux autres éléments d’addition qui sont le magnésium et le silicium soit un alliage de la série 4xxx ou bien 5xxx ou 6xxx.

5.2 Les résultats de la caractérisation mécanique :

Afin de savoir l’état métallurgique des éprouvettes fournies un test de microdureté est fait sur les deux types d’éprouvette le tableau 5-8 résume les résultats obtenus de l’essai :

Tableau 5-8 Les résultats de l’essai de la microdureté.

L’épaisseur de l’éprouvette	La dureté sous a charge 100 gf	La dureté sous la charge 200 gf
e =4 mm	144.3 HV	121 HV
e =6 mm	93.4 HV	86.05 HV

Ces résultats montrent que les deux éprouvettes ont une microdureté différente et que l’éprouvette de 4mm d’épaisseur est plus dure que celle de 6mm.

Chapitre 05 Résultats et discussions

Pour confirmer ces observations, on a fait un essai de traction sur les deux types d'éprouvettes de différentes épaisseurs et au même temps pour avoir les données nécessaires pour effectuer un essai de fatigue à savoir : le module d'élasticité et la limite élastique.

Les figures 5-12 et 5-13 Donnent les courbes de traction de chaque éprouvette, et le tableau 5-9 les résultats des essais.

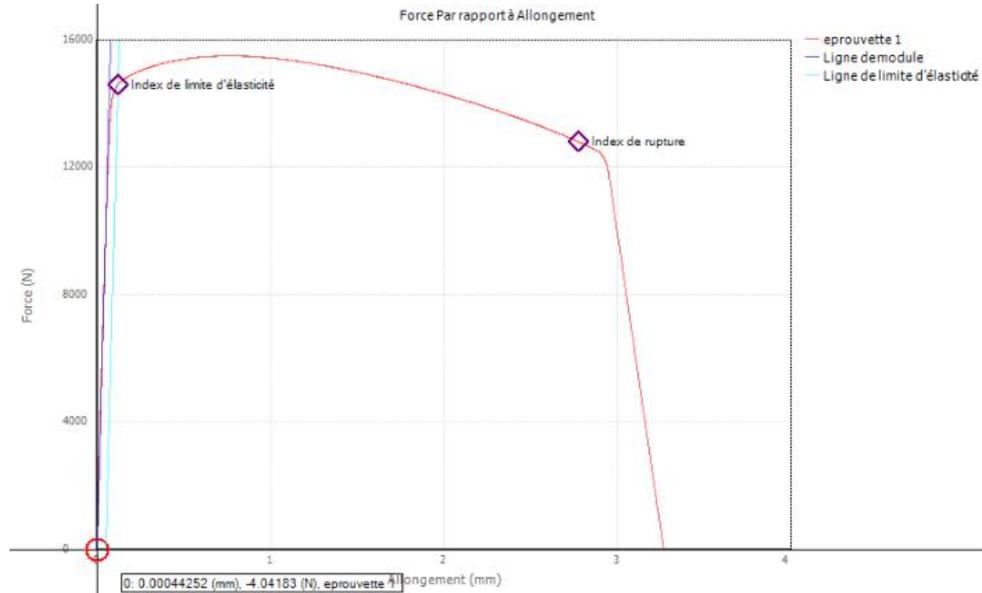


Figure 5-12 Courbe de traction d'éprouvette $e=6\text{mm}$.

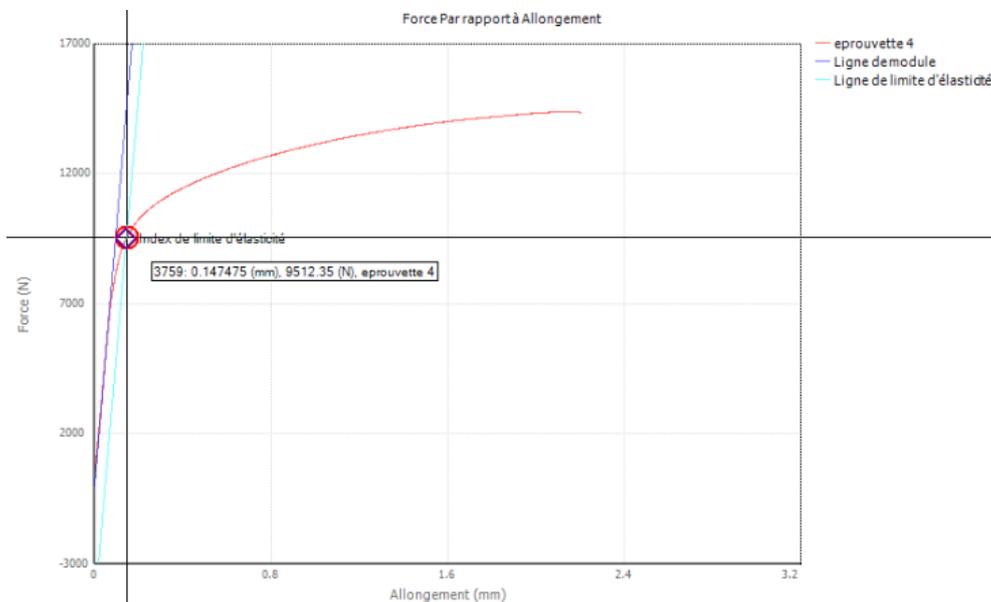


Figure 5-13 Courbe de traction d'éprouvette $e=4\text{mm}$.

La courbe de traction de T4 $e=4\text{mm}$ n'est pas complète (elle est à moitié) à cause d'un message d'arrêt de l'extensomètre

Tableau 5-9 Les caractéristiques mécaniques de l'alliage.

	Eprouvette 1	Eprouvette 2
Rm (MPa)	424.50	273.1
Re (MPa)	278.95	253.46
A (%)	Non défini	11.10
E (MPa)	72902.21	90979.86
Eprouvette 1 : e= 4mm		
Eprouvette 2 : e= 6mm		
Non défini : l'essai est interrompu		

On observe que la résistance à la rupture de l'éprouvette de 4mm d'épaisseur avec 424.50 MPa est plus élevée que celle de l'éprouvette de 6mm avec 273.1MPa, d'où, l'on peut conclure que les deux éprouvettes ont des états métallurgiques différents.



Figure 5-14 La faciès de l'éprouvette rompue.

La rupture est de forme V la figure 5-14, la figure 5-15 montre une analyse de ces faciès au MEB :

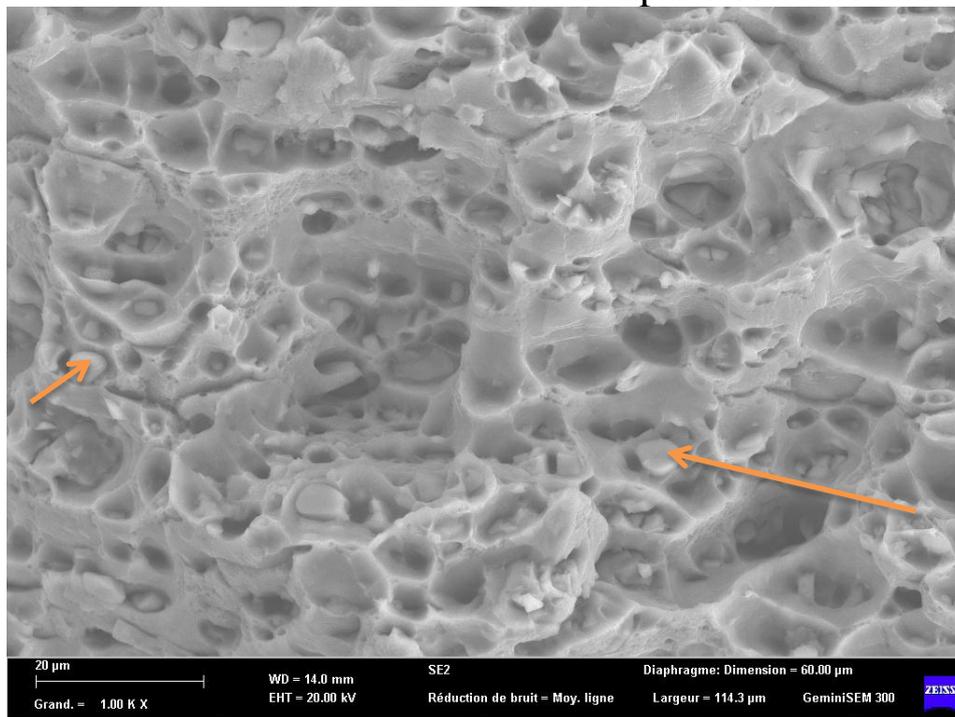


Figure 5-15 Fractographie de l'éprouvette e=6mm.

Cette fractographie montre une rupture ductile du matériau et les cupules (indiquées par les flèches) caractérisent la déformation ductile.

D'après la littérature et la corrélation des résultats de la caractérisation mécanique de notre éprouvette (4mm) et ceux obtenus dans l'étude de HEMMOUCHE, L. et al [37]. L'alliage de la série 2000 est bien la nuance 2017A.

La nuance 2017A :

Le diagramme d'équilibre Al-Cu à 3.8%Cu indique qu'entre 500 et 580°C, l'alliage est monophasé : le cuivre fait dans l'aluminium une solution solide désordonnée de substitution.

En dessous de 500°C l'alliage devient biphasé α +Al₂Cu, au fur à mesure que la température diminue la proportion du précipité augmente. A la température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de la phase α et 7% de Al₂Cu [30].

La composition chimique de l'alliage 2017A est donnée dans le tableau (5-10).

Tableau 5-10 La composition chimique d'alliage d'aluminium 2017A.

L'élément	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Cr	Ti	Al
Wt%	0.890	3.890	0.478	0.061	0.806	0.783	0.040	0.077	92.975

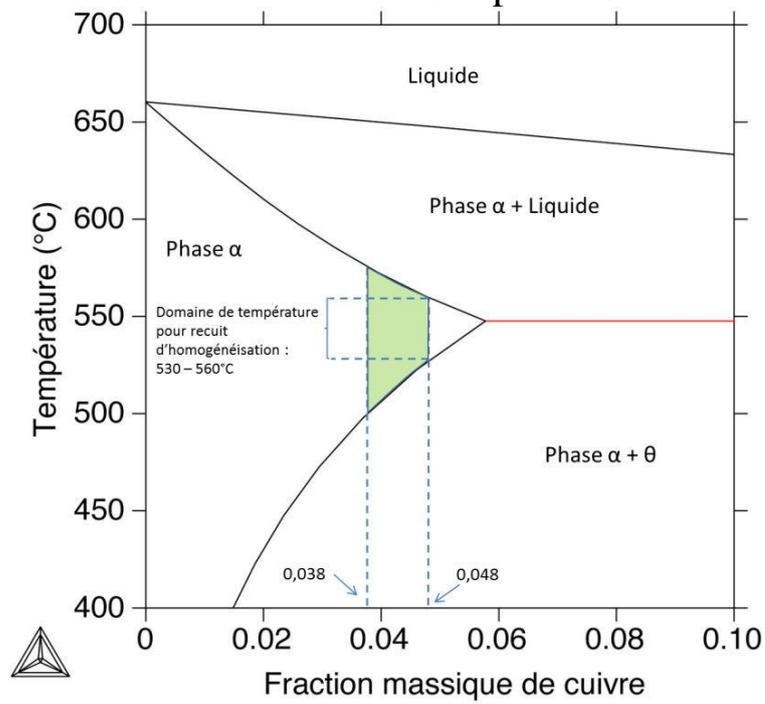


Figure 5-16 Diagramme de phase du système-Al-Cu.

5.3 Les résultats de la caractérisation métallographique :

L'observation au microscope optique, indique que la structure des deux échantillons des éprouvettes (e=4mm et e=6mm) est constituée d'une phase (α) et d'une seconde phase (particules).



Figure 5-17 La microstructure de l'échantillon e=4mm avec G×200

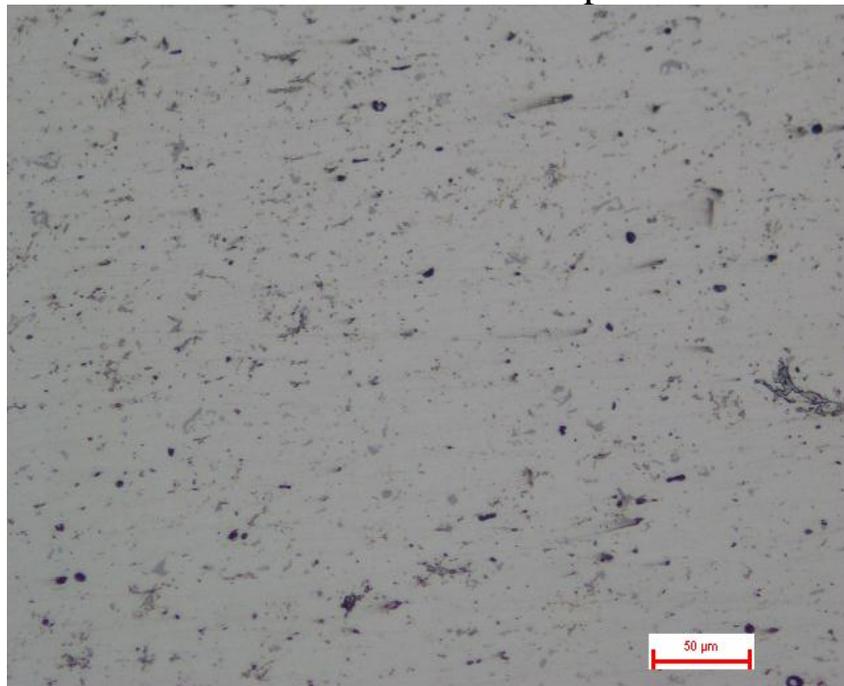


Figure 5-18 Microstructure de l'échantillon $e=6\text{mm}$ avec $G\times 200$.

Les micrographies prises par le MEB montrent clairement la structure des deux alliages,

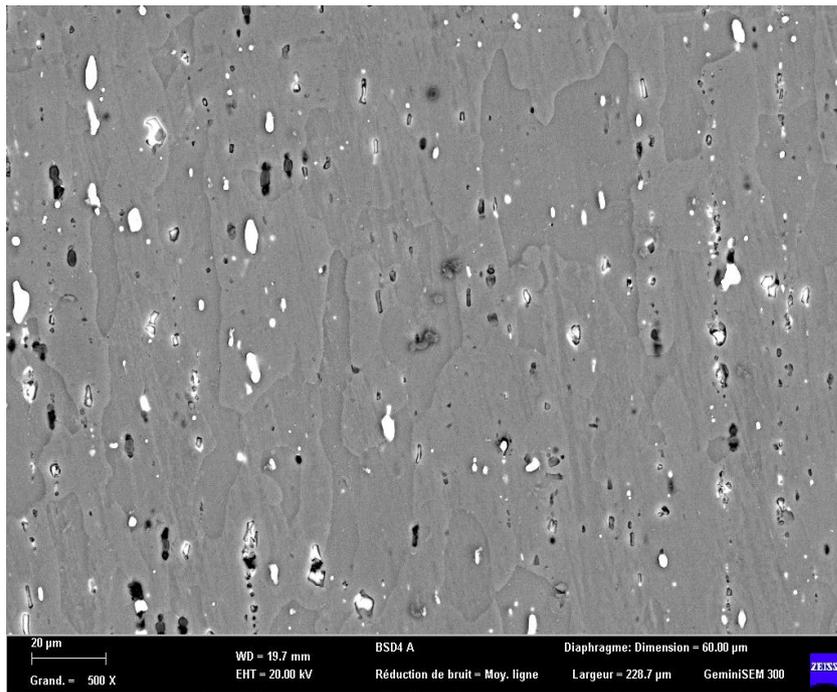


Figure 5-19 une micrographie de l'éprouvette $e=4\text{mm}$

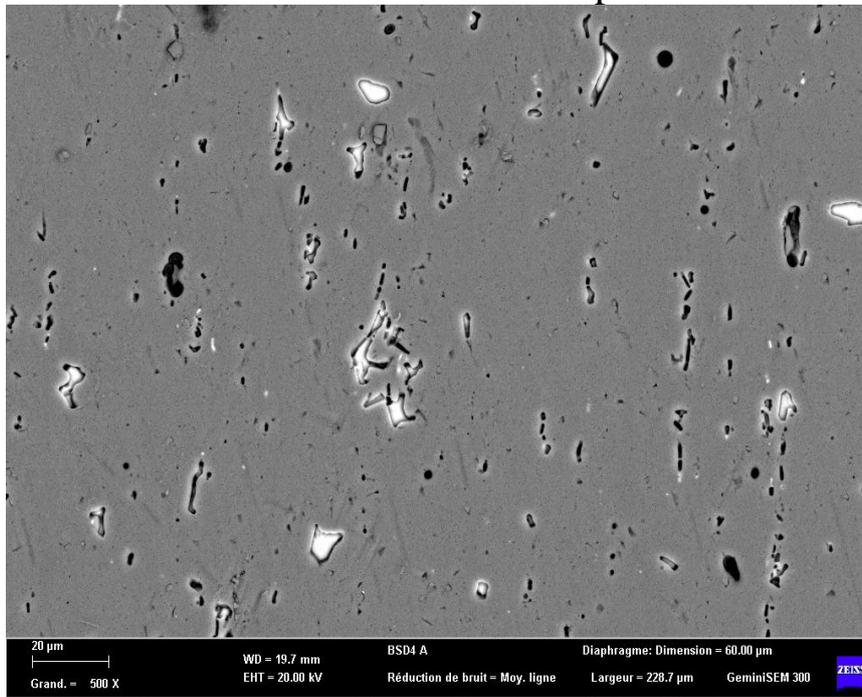


Figure 5-20 une micrographie de l'éprouvette e=6mm

Pour l'alliage 2017A la phase (α) est l'aluminium et les particules sont des précipités de Al_2Cu figures 5-17 et 5-19 d'après le diagramme d'équilibre figure 5-16 et les analyses EDS, la composition chimique de ces précipités est donnée dans le tableau 5-2.

On observe que la matrice est constituée des grains allongés (phase α) et particules blanches sont les précipités Al_2Cu , Al_2CuMg , AlCuMnFeSi(Mg) trouvés par les EDS et d'autres particules noires sont des vides laissés par les précipités dissous lors de l'attaque chimique.

Pour l'éprouvette de 6mm on constate une matrice dans laquelle des précipités intermétalliques au fer AlFeSi et Al(Mn,Cr,Fe)Si sont dispersés.

Plus ces précipités sont fins avec un espacement interparticulaire étroit plus la granulométrie atteint la valeur minimale ce qui offre de bonnes caractéristiques mécaniques, une dureté élevée, une résistance à la traction ultime et une résistance à la fatigue et diminution de la ductilité car le mouvement des dislocations est freiné par ces particules et rend difficile la croissance des grains [27].

Analyse mapping :

Les figures suivantes présentent les résultats de mapping d'une micrographie figure 5-21 d'un échantillon de l'éprouvette e=4mm.

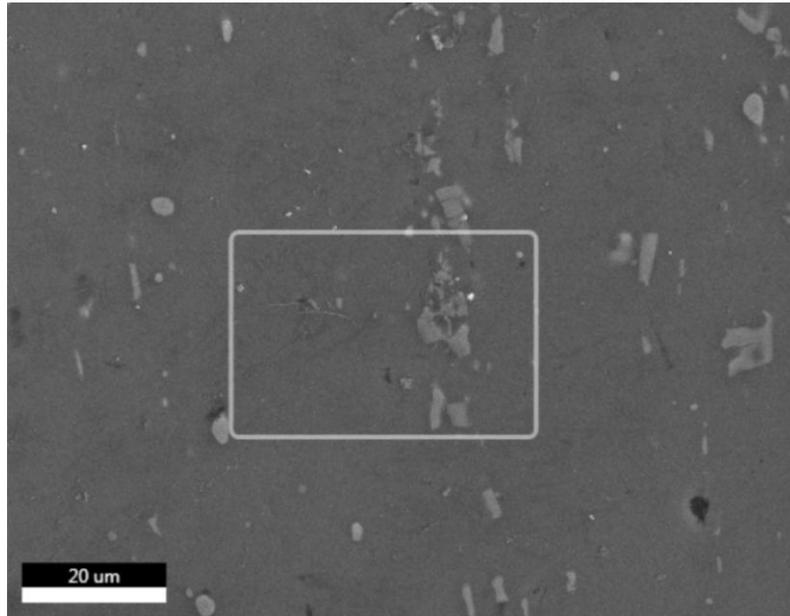


Figure 5-21 micrographie du mapping

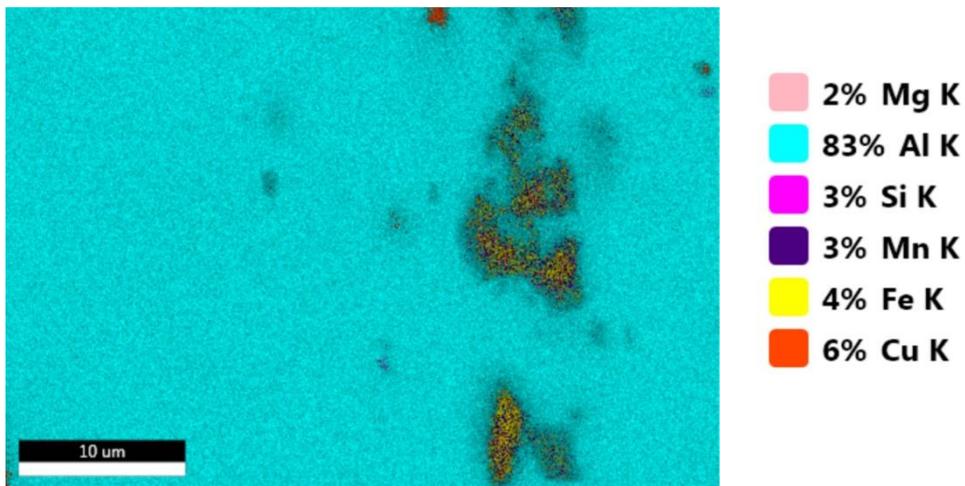


Figure 5-22 L'analyse de l'échantillon par la technique du mapping.

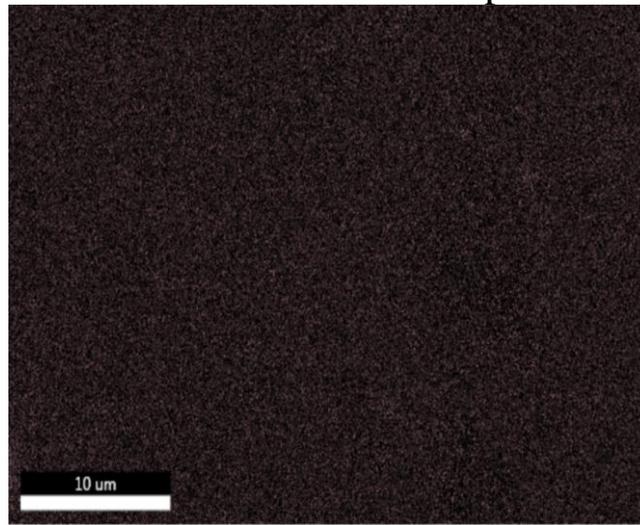


Figure 5-23 Mg K_ZAF Wt (8%)

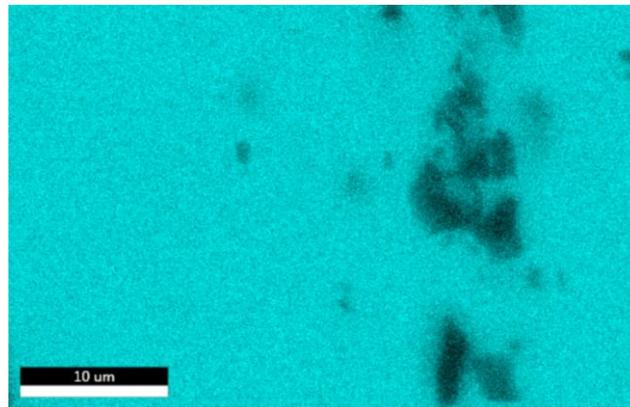


Figure 5-24 Al K_ZAF Wt (100%)

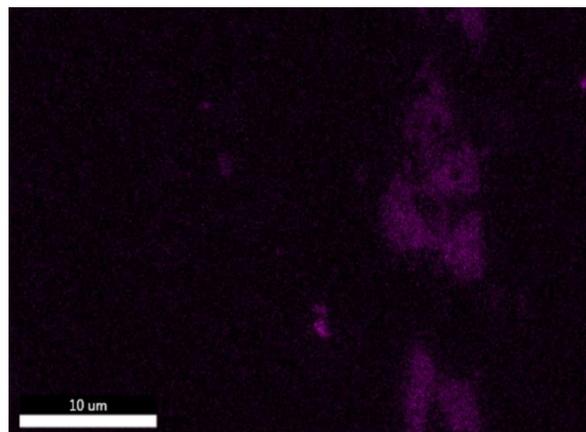


Figure 5-25 Si K_ZAF Wt (26%)

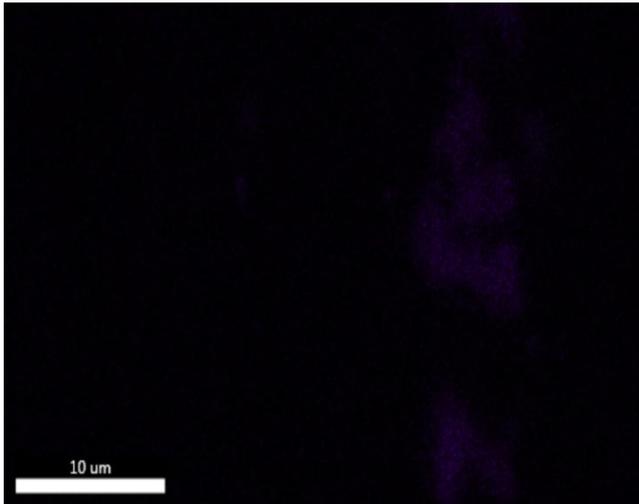


Figure 5-26 Mn K_ZAF Wt (23%)

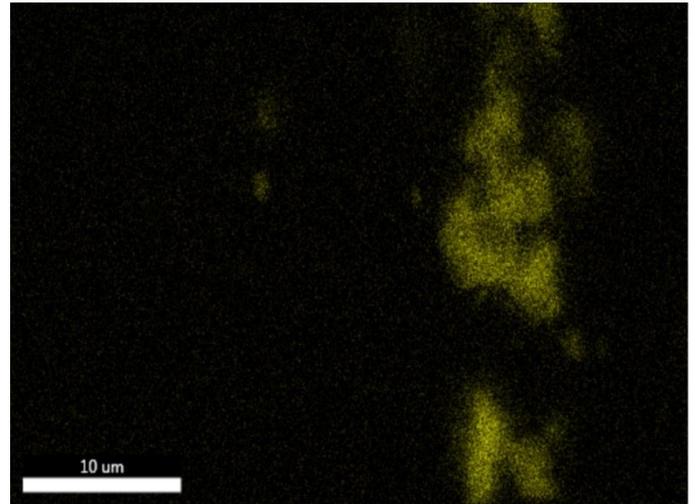


Figure 5-27 Fe K_ZAF Wt (32%)

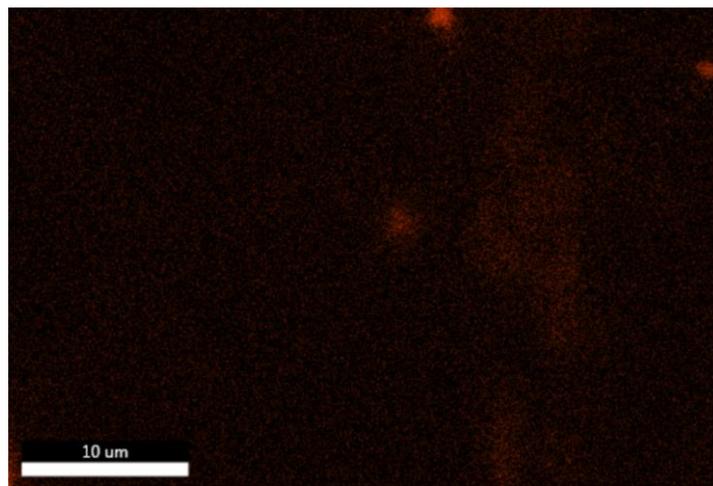


Figure 5-28 Cu K_ZAF Wt (39%)

Dans cette analyse, chaque élément a une couleur spécifique qui permet de le distinguer et savoir s'il est présent ou non dans la partie sélectionnée de la micrographie.

On remarque que l'aluminium est présent à 100% (par rapport à la partie sélectionnée) dans la matrice et beaucoup moins dans les précipités contrairement aux autres éléments Si, Fe Cr, Mn, Mg, Cu qui sont présents dans le précipité avec des pourcentages différents indiqués en dessous de chaque figure, le Cu est présent dans le précipité et la matrice mais avec une densité bien inférieure à celle de l'aluminium et dans le précipité, le fer est l'élément le plus présent dans ce précipité avec un pourcentage de 32% de la partie sélectionnée (précipité intermétallique au fer) .

Une analyse EDS est effectuée de cette partie figure (5-29). Le tableau (5-11) donne sa composition chimique

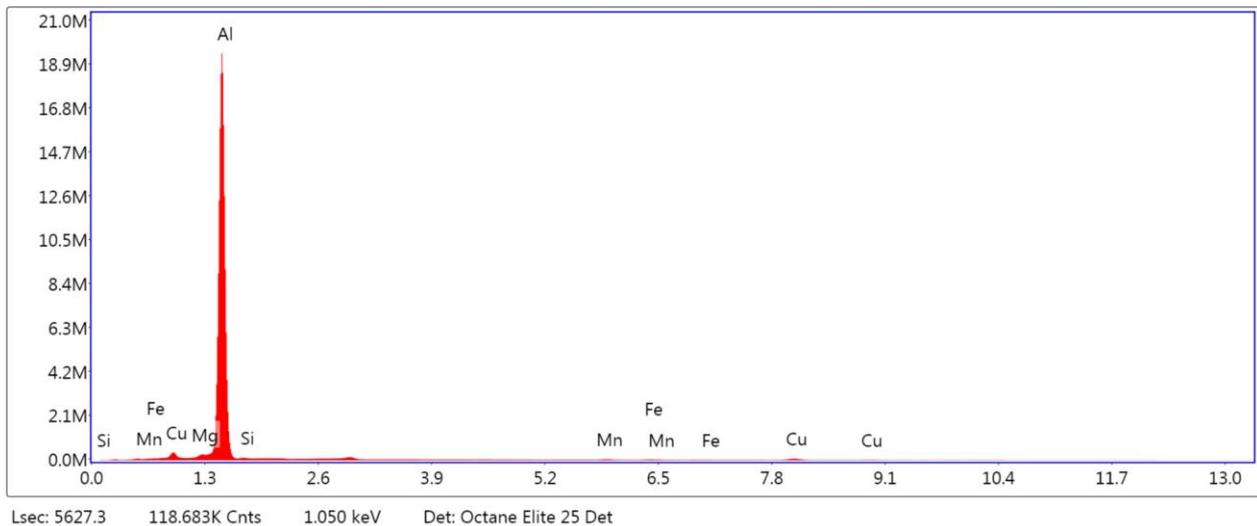


Figure 5-29 Analyse de la partie sélectionnée

Tableau 5-11 composition chimique de la partie sélectionnée

Elément	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
Masse %	1.03	92.03	2.05	0.71	0.58	3.59
Erreur %	3.21	2.11	7.71	2.69	2.72	2.49

5.4 Les résultats des essais de fatigue :

Dans cette partie du chapitre les résultats des quatre éprouvettes testées sont présentés :

- Éprouvette F1 (2017A e=4mm).
- Éprouvette F2 (2017A e=4mm).
- Éprouvette F1 (Al-Mg-Si e=6mm).
- Éprouvette F2 (Al-Mg-Si e=6mm).

Tout au long d'essai, le logiciel affiche l'évolution des trois courbes :

La courbe d'hystérésis : L'amplitude de la contrainte en fonction de la déformation.

La force contre cycles : la variation de la force en fonction du nombre de cycle.

Le déplacement contre cycles : la variation du déplacement en fonction du nombre de cycle.

Comme on a cité dans la partie théorique de l'essai fatigue (paragraphe 1.5.1), la boucle d'hystérésis commence à se stabiliser après un certain nombre de cycle.

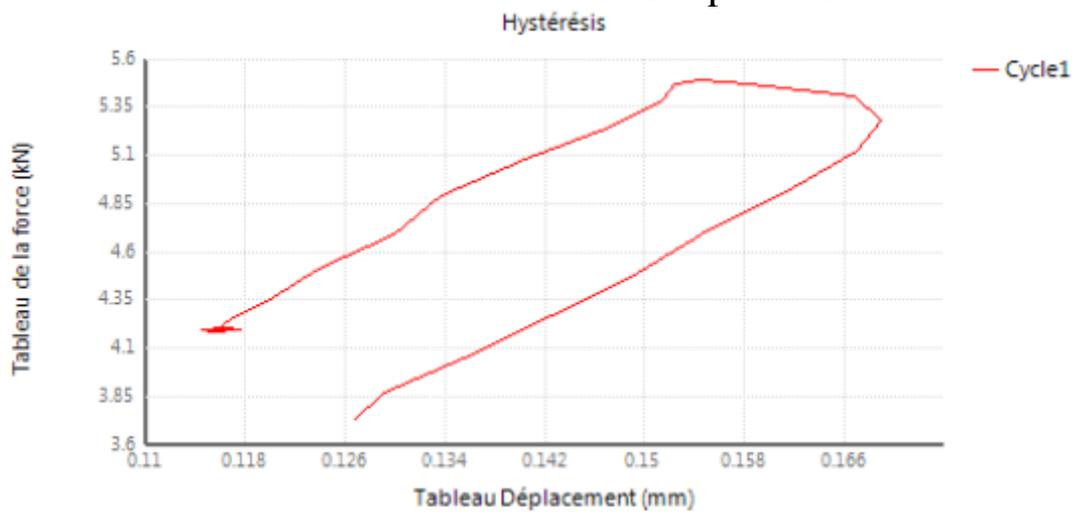


Figure 5-30 La boucle d’hystérésis du premier cycle

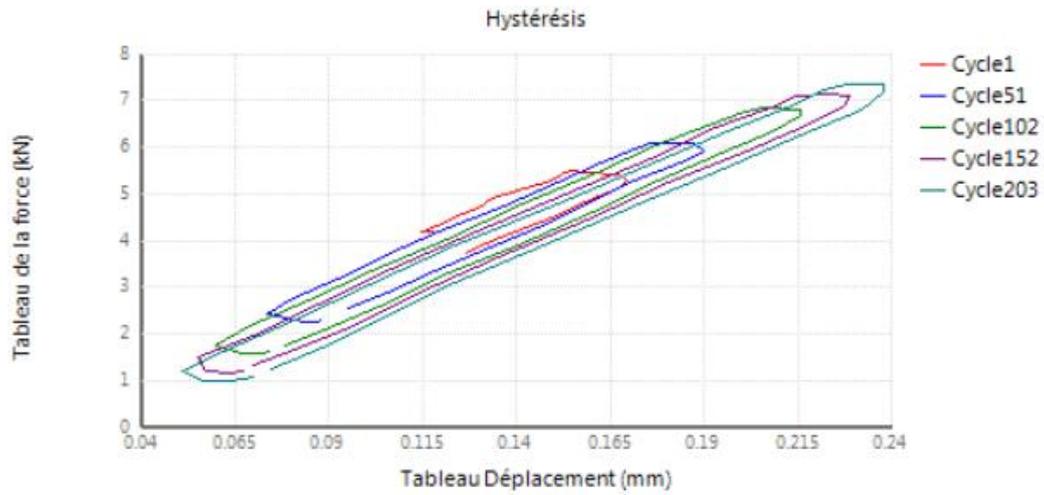


Figure 5-31 Les boucles d'hystérésis des premiers cycles

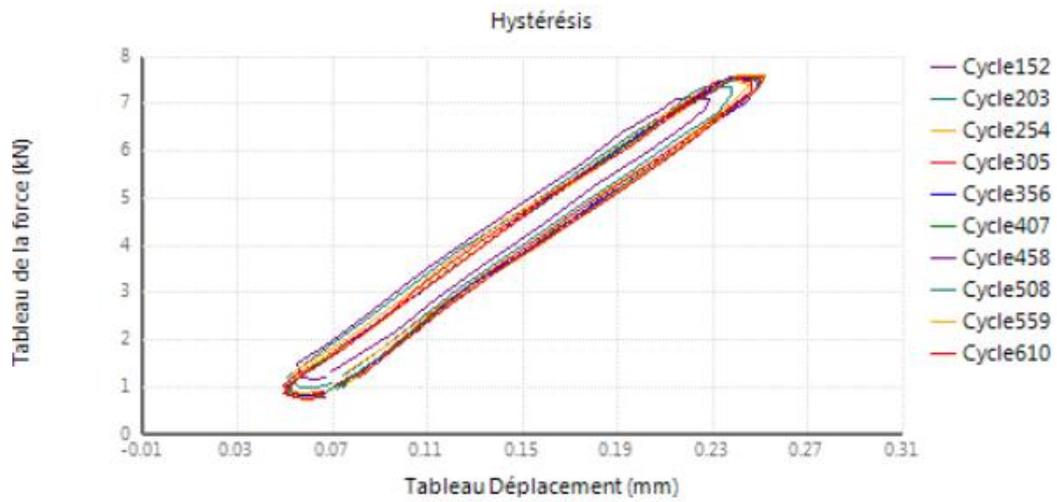


Figure 5-32 Les boucles d'hystérésis des quelques cycles

Les figures 5-33,5-34,5-35,5-36 présentent les boucles d'hystérésis à la fin d'essais des quatre éprouvettes.

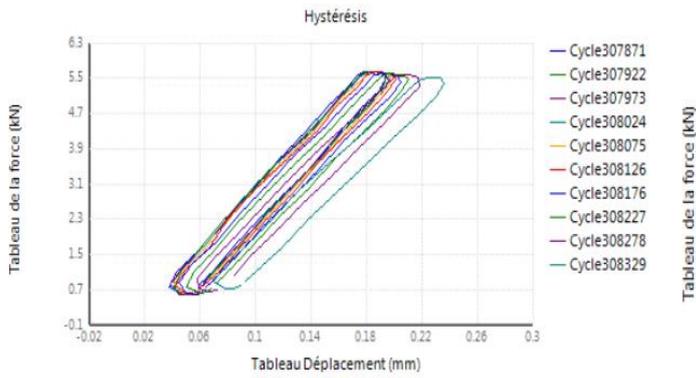


Figure 5-33 les boucles d’hystérésis de F1 (2017A e=4mm)

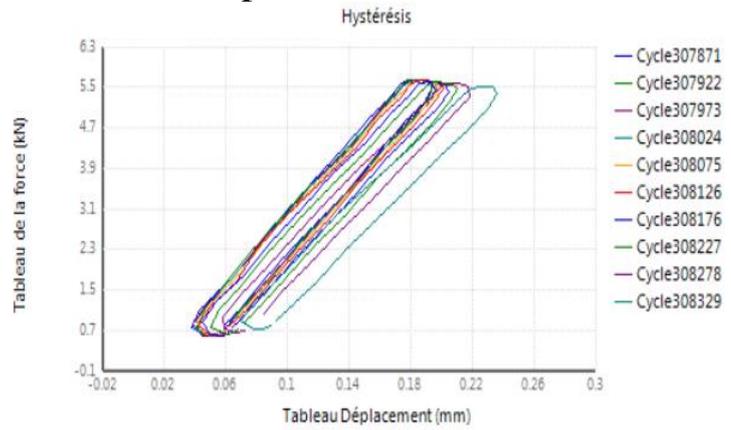


Figure 5-34 les boucles d’hystérésis de F2(2017A e=4mm)

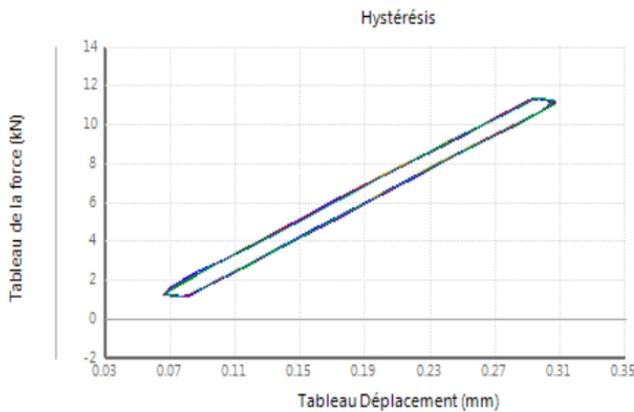


Figure 5-35 : les boucles d’hystérésis de F1 (Al-Mg-Si e=6mm)

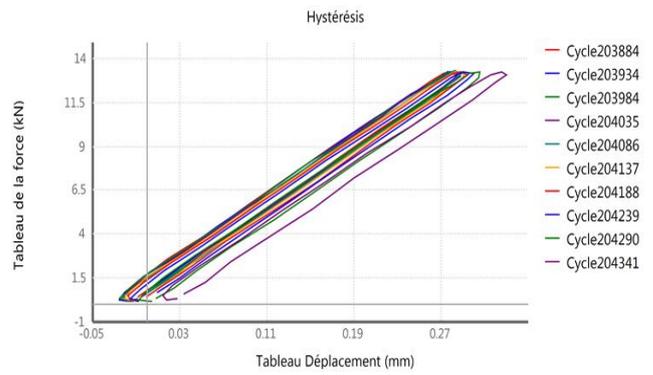


Figure 5-36 : les boucles d’hystérésis de F2 (Al-Mg-Si e=6mm)

Les boucles hystérésis représentent la variation de la contrainte en fonction de la déformation. On constate que la déformation augmente progressivement après chaque cycle, même après la stabilité de ces dernières c’est l’effet rochet (paragraphe 3.3.2). Sauf l’éprouvette F1 (Al-Mg-Si e=6mm) car l’essai s’est arrêté avant que l’éprouvette se rompt.

On remarque que les quatre boucles sont étroites ce qui montrent que la déformation plastique n’est pas importante dans ce domaine d’endurance limitée (la contrainte appliquée est inférieure à la limite élastique), plus la contrainte diminue plus le nombre de cycle à la rupture augmente et le comportement de l’éprouvette est purement élastique jusqu’en-dessous d’une certaine contrainte le nombre de cycle à la rupture est infini (la limite d’endurance).

Le tableau suivant donne le temps d’essai et le nombre de cycle à la rupture de chaque éprouvette :

Tableau 5-12 : les résultats des essais de fatigue

L'éprouvette	Le nombre de cycle à la rupture	Le temps de l'essai (s)
F1 2017A e=4mm	99645	4230
F2 2017A e=4mm	308376	12441
F1 6000 e=6mm	4359542*	174900*
F2 6000 e=6mm	204398	8176

*l'essai a été arrêté

Les figures suivantes présentent la déformation en fonction du nombre de cycle des quatre éprouvettes.

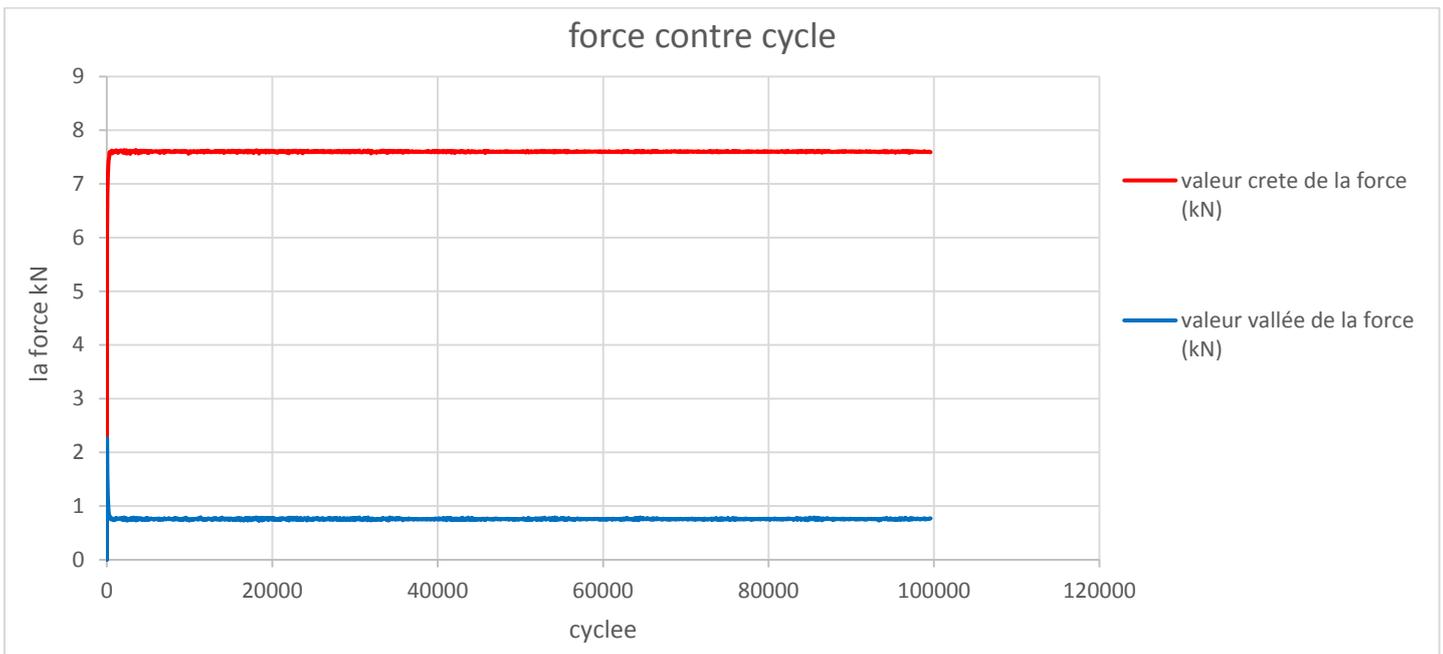


Figure 5-37 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F1 (2017A e=4mm)

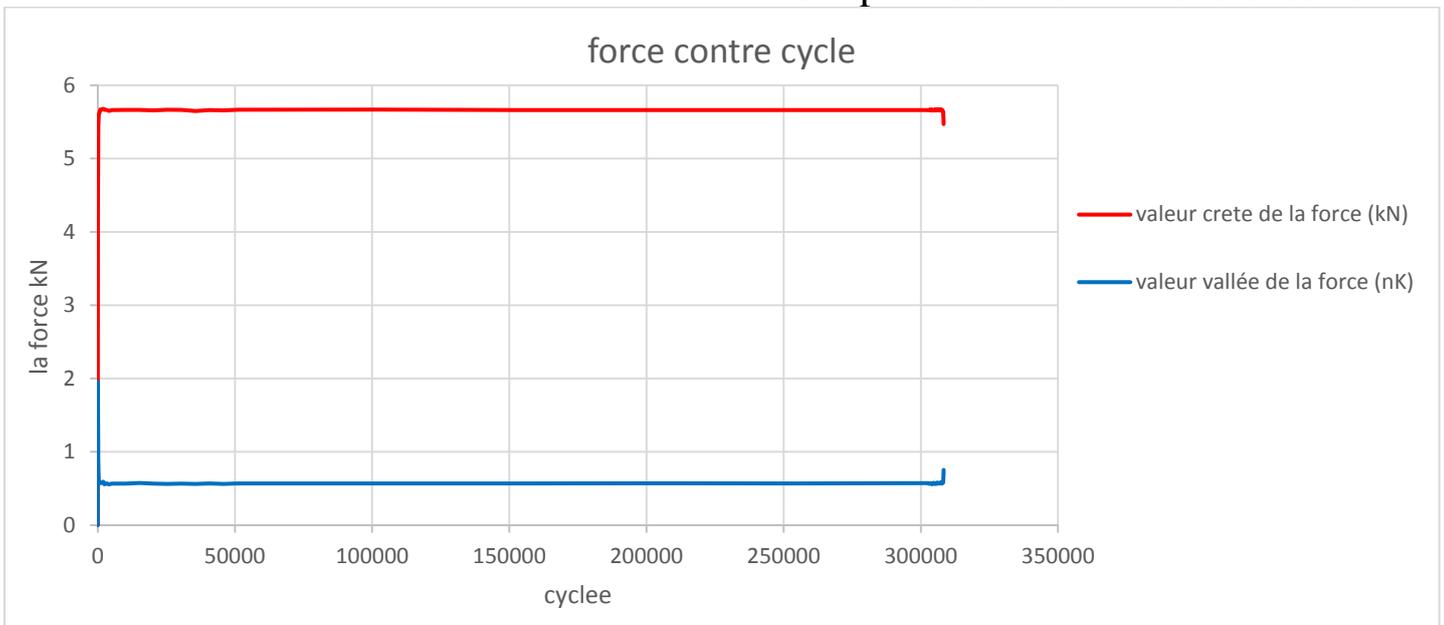


Figure 5-38 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F2 (2017A e=4mm)

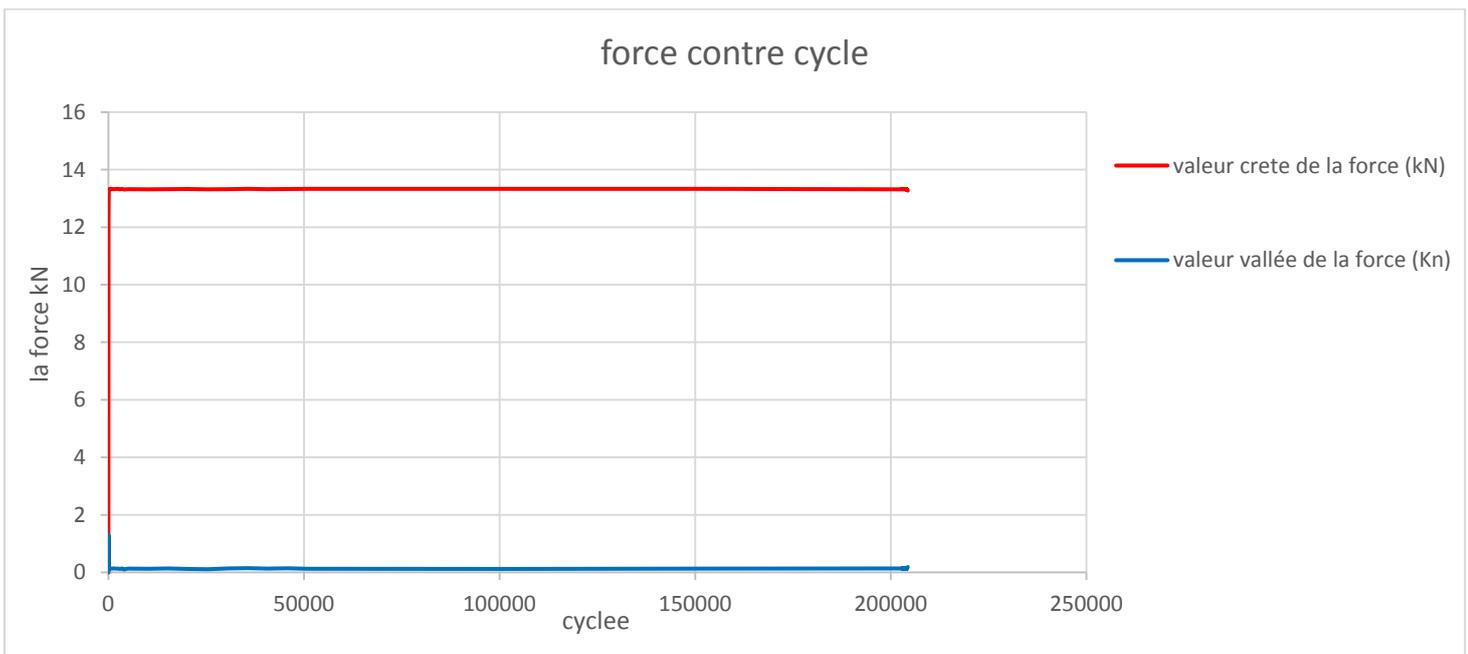


Figure 5-39 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F2 (Al-Mg-Si e=6mm)

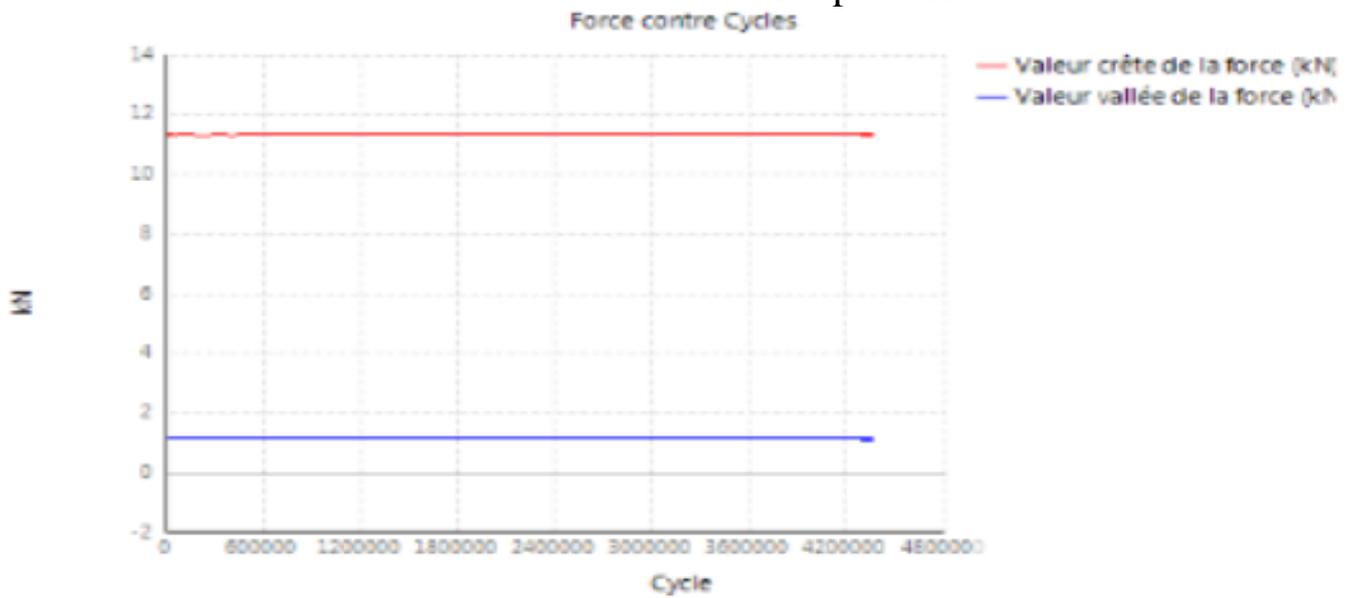


Figure 5-40 La courbe de la force contre cycle de l'éprouvette F1 (Al-Mg-Si e=6mm)

On remarque que la courbe dans les quatre essais reste constante jusqu'à la fin d'essai car l'essai est effectué à une amplitude constante.

Les figures suivantes présentent le déplacement en fonction du nombre de cycle des quatre éprouvettes.

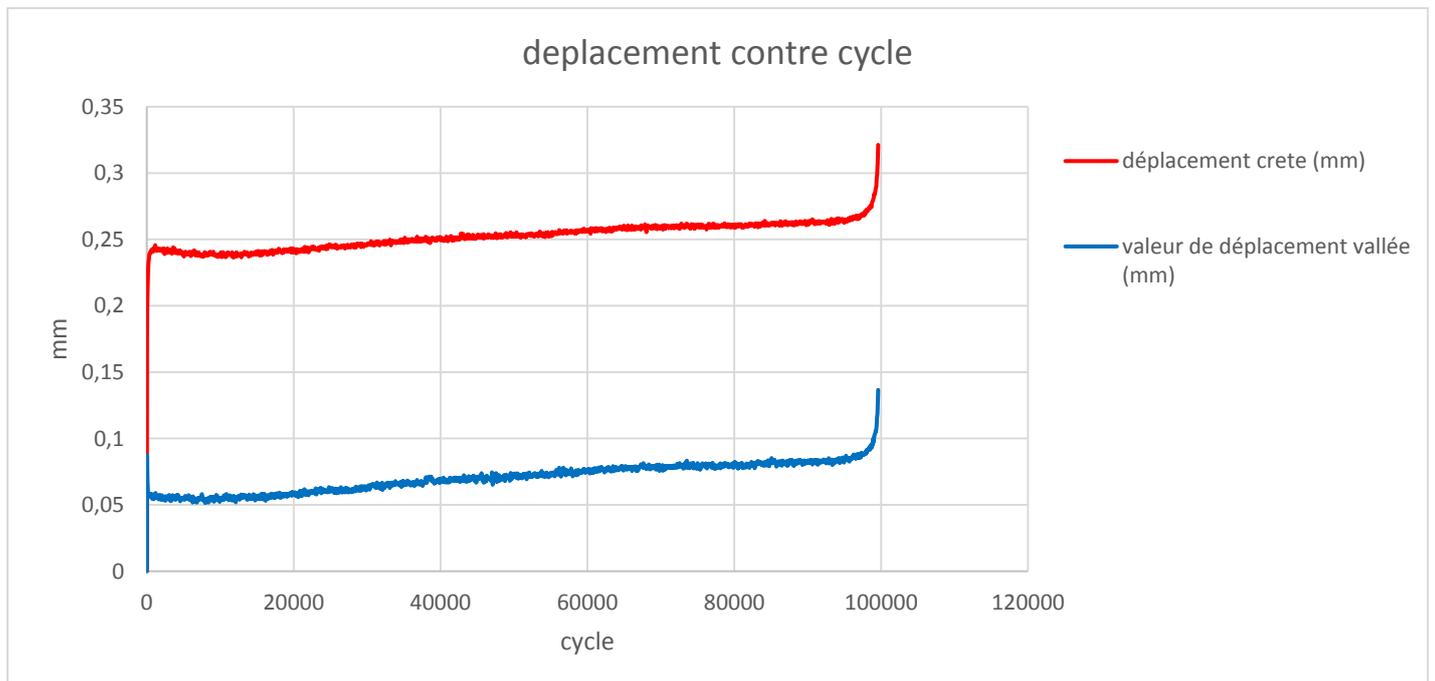


Figure 5-41 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F1 (2017A e=4mm)

On remarque que le déplacement augmente avec le nombre du cycle jusqu'à la rupture au 99645 cycles.

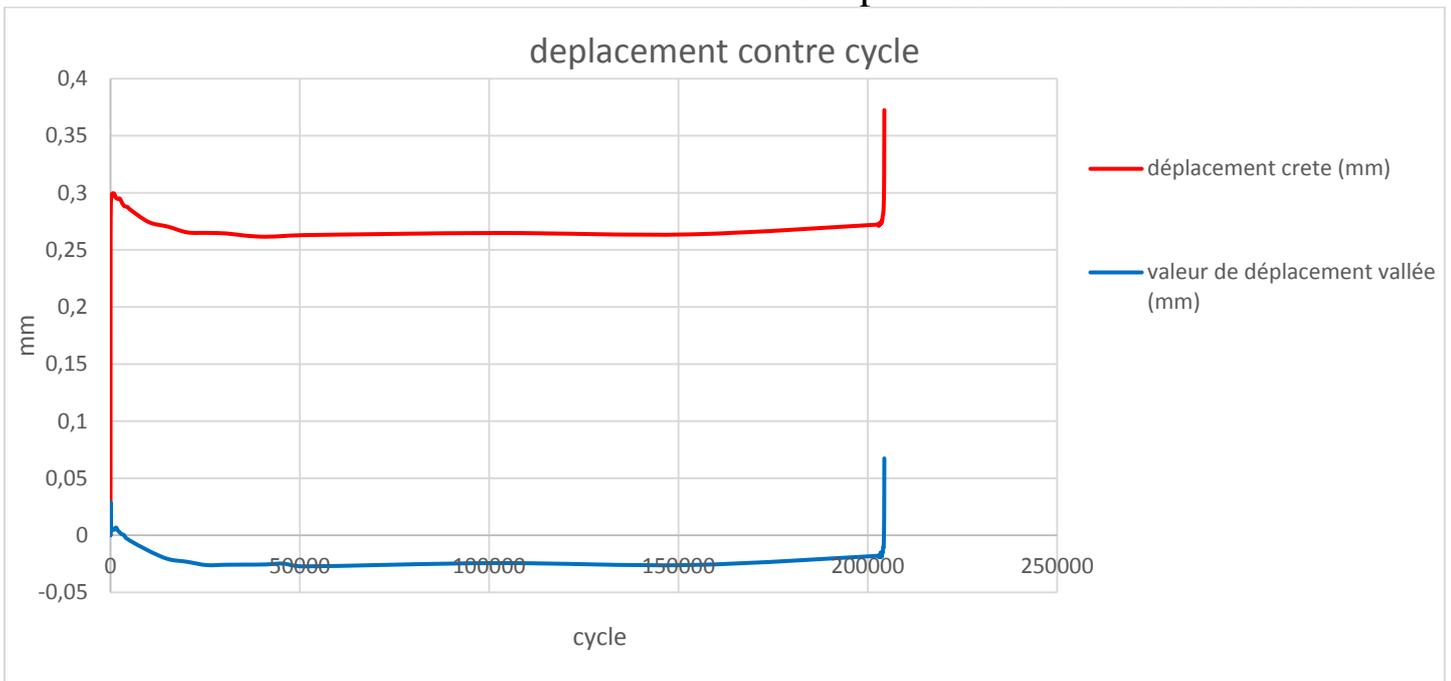


Figure 5-42 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F2 (2017A e=4mm).

Pour l'éprouvette F2 (2017A e=4mm) le déplacement est stable tout au long de l'essai jusqu'à la rupture.

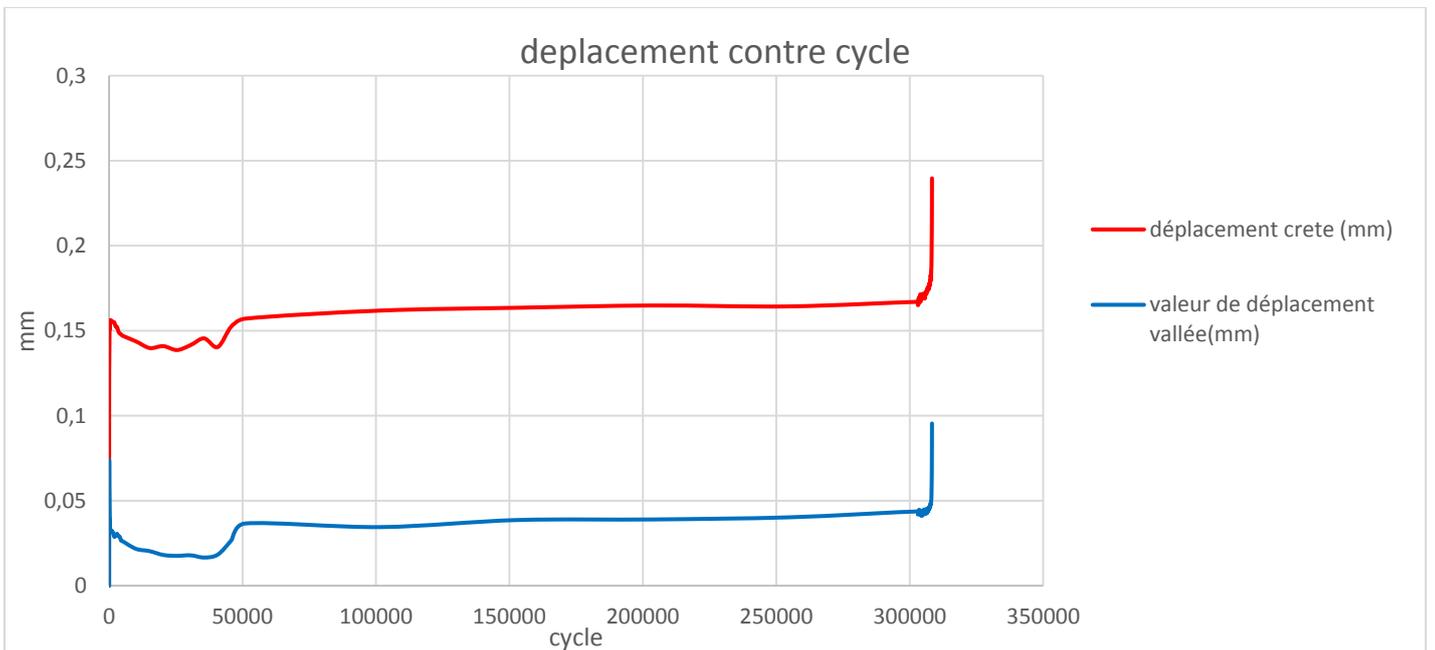


Figure 5-43 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F2 (Al-Mg-Si e=6mm)

On remarque que le déplacement est perturbé jusqu'aux 40000 cycles à cause du climatiseur (changement de la température au cours de l'essai), le déplacement devient stable jusqu'à la rupture après qu'on a éteint le climatiseur.

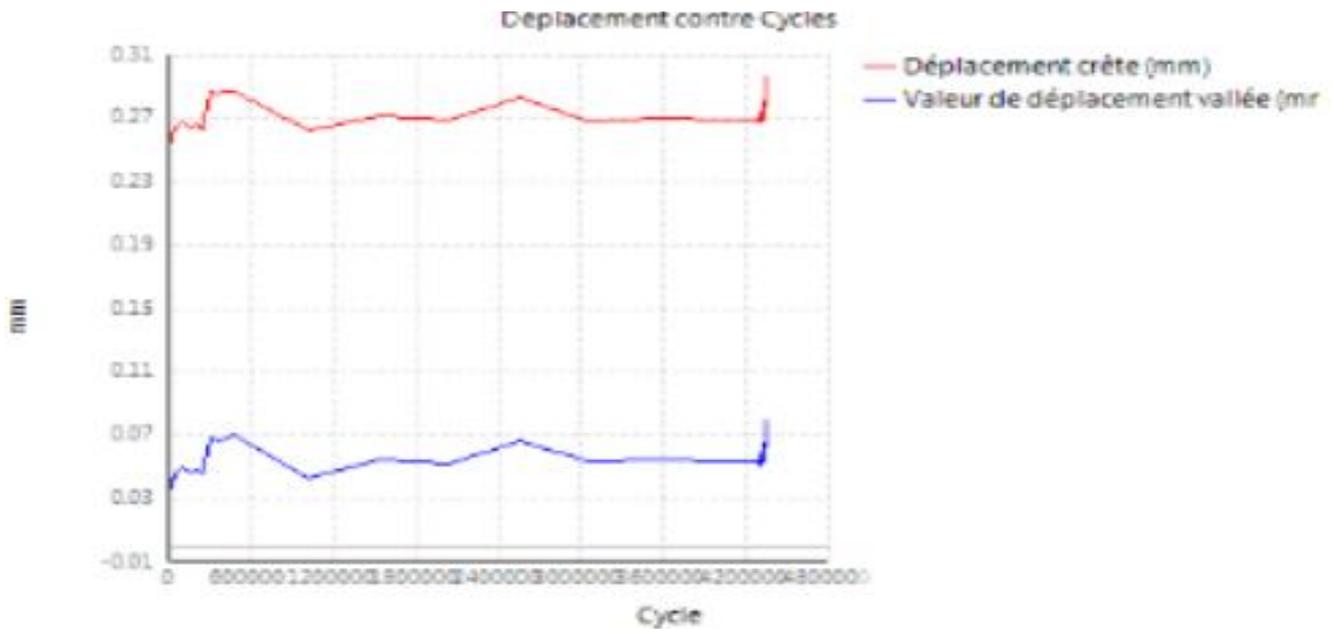


Figure 5-44 Déplacement contre cycle de l'éprouvette F1 (Al-Mg-Si $e=6\text{mm}$)

L'éprouvette F1 (Al-Mg-Si $e=6\text{mm}$) était la première à tester, on remarque une perturbation du déplacement remarquée dans l'éprouvette à cause du climatiseur, il a été allumé au cours de l'essai dans le laboratoire (changement de la température).

La figure 5-45 donne la force appliquée à chaque éprouvette en fonction de la durée de vie (le nombre le cycle au bout duquel l'éprouvette rompt) par alliage.

Dans notre cas, cette courbe ne nous donne pas une indication sur le comportement des deux matériaux lors d'un essai de fatigue, c'est avec la courbe de Wöhler qu'on détermine la limite d'endurance, et la tenue en fatigue des matériaux.

Pour la tracer on fait l'essai à plusieurs niveaux de contrainte avec minimum trois éprouvettes par niveau de contrainte et aussi par domaine (domaine d'endurance limitée et d'endurances illimitée) afin la dispersion des résultats comme cité dans la partie théorique de l'essai de fatigue (paragraphe 1.5.2.1).

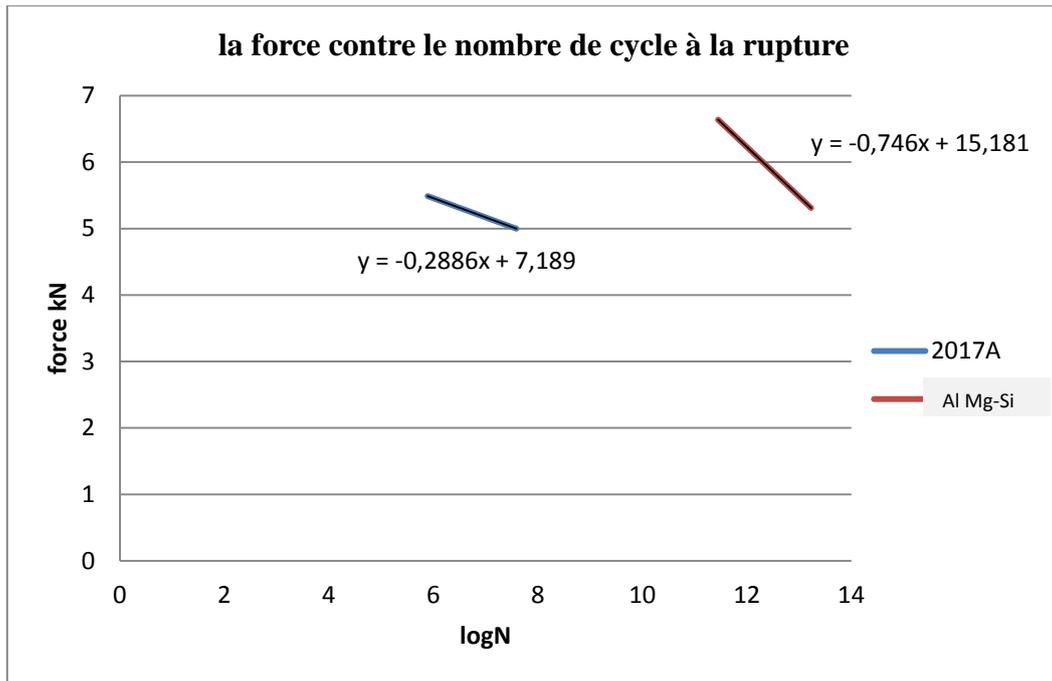


Figure 5-45 La force en fonction du nombre de cycle à la rupture

5.5 Analyse des faciès de rupture :

A l'examen optique loupe binoculaire souvent possible d'observer un certain nombre de caractéristique sur la section de la rupture (les figures 5-46.5-47) :

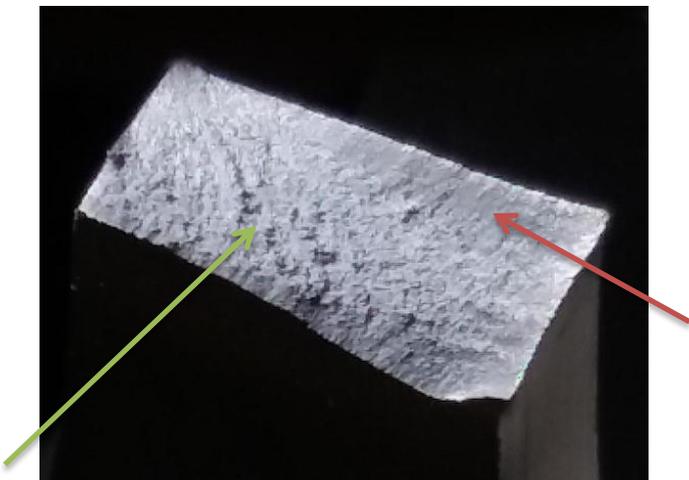


Figure 5-46 faciès de rupture de l'éprouvette F2 2017A e=4mm

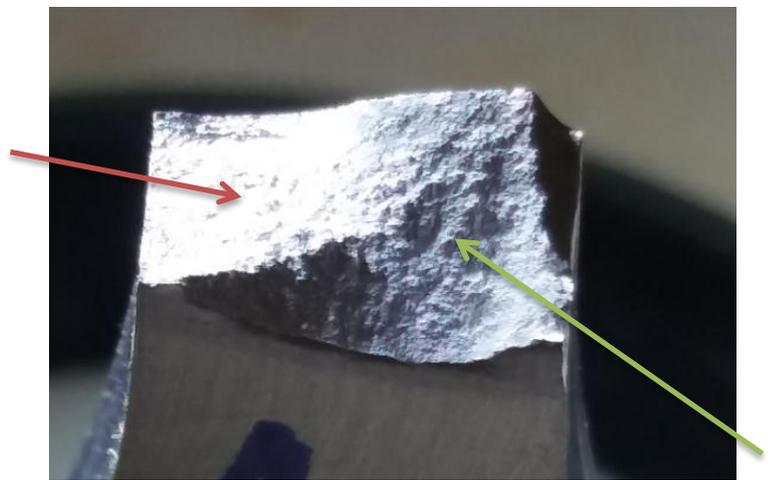


Figure 5-47 faciès de rupture de l'éprouvette F2 Al-Mg-Si e=6mm

On constate la présence de deux zones distinctes :

- Zone de la rupture brutale avec un faciès à grains ou à nerfs (flèche vertes).
- Zone de la fissure de fatigue avec une surface lisse et soyeuse (flèches rouges).

La zone de la fissure par fatigue contient (selon le matériau et les conditions de sollicitation) :

- Les lignes concentriques appelées lignes d'arrêt qui sont les « cicatrices » de la fissure lors des arrêts de la machine.
- Lignes normales aux précédents, appelées lignes radiales, et qui correspondent soit à des décrochements entre fissures dans le cas d'amorces multiples, soit à un changement du champ des contraintes infléchissant le plan de la rupture et conduisant à la formation de facette.

Dans les figures on voit ces lignes mais on ne peut pas distinguer entre elles (un examen au MEB montre de plus près les faciès), on constate aussi la zone de la rupture brutale des deux éprouvettes est une rupture ductile.

Conclusion générale

On a présenté des notions théoriques sur l'essai de fatigue ainsi que les paramètres ayant une influence sur la limite d'endurance d'une pièce mécanique. Des généralités sur les alliages d'aluminium et le comportement de ces deniers en fatigue.

En pratique, non seulement nous avons répondu à l'objectif de mise en œuvre de l'essai de fatigue mais aussi, nous avons appris à identifier et à définir l'état métallurgique des alliages d'aluminium fournis qui étaient inconnus en utilisant plusieurs techniques de caractérisations telles que la microscopie optique (MO) et la microscopie électronique à balayage (MEB), mais aussi une caractérisation mécanique en utilisant la microdureté HV et des essais de traction avec extensomètre pour arriver à définir qu'il s'agit de deux alliages d'aluminium différents dont les résultats des caractérisations sont présentés dans la partie expérimentale et résultats,.

En fatigue, le travail s'est porté sur la mise en œuvre d'un essai de fatigue uniaxial des alliages d'aluminium avec $R=0.1$. On a testé nos éprouvettes dans le domaine d'endurance limitée. Les contraintes appliquées sont en dessous de la limite élastique ($0.9R_e$, $0.8R_e\dots$) avec un critère de fin d'essai de 10^5 pour ces niveaux de contraintes. Le nombre de cycle des quarte essais a dépassé les 10^5 cycles sans que l'éprouvette se rompe (cas de F1 $e=6\text{mm}$ qui dépasse les 4×10^6) ce qui indique que l'essai est correct dans ce domaine d'étude avec ces conditions.

La variation de la température influence sur l'essai de fatigue (le déplacement) d'où il est important de ne pas changer les conditions d'essais de température au cours de l'essai pour ne pas altérer les résultats.

Perspectives

Ce travail, n'est qu'un début qui a permis de mettre un protocole d'essai de fatigue uniaxial, mais reste incomplet par le fait que le nombre d'essais est insuffisant ce qui ne nous a pas permis de tracer la courbe de Wöhler et déduire la limite d'endurance.

Références bibliographiques

- [1]. ASTM, E. (1995). E 1150-1987, "Standard Definitions of Fatigue". 1995 Annual Book of Standards,
- [2]. MAY, Abdelghani. Etude du comportement cyclique et de l'endommagement par fatigue d'un alliage d'aluminium anisotrope du type 2017A. Thèse de doctorat. 2013.
- [3]. BLÉTRY, Marc. Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux. École Nationale Supérieure des Mines de Paris (2006-2007), 2006.
- [4]. FORTUNIER, Roland. Comportement mécanique des matériaux. Cours, ENS des Mines de Saint-Etienne ,p. 214. 2001.
- [5]. Mécanique du solide et des matériaux Elasticité-Plasticité-Rupture Jean Claude Charmettes.
- [6]. Zalt, A. Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des structures soudées de type caisson (Doctoral dissertation, Université de Lorraine) (2012).
- [7]. M.J. Cieslak, Cracking Phenomena Associated with Welding, Welding, Brazing, and Soldering, Vol 6, ASM Handbook, ASM International, 1993
- [8]. NF A03-400 Aout 1983 Produits sidérurgiques essais de fatigue Principes généraux.
- [9]. Boyer, H. E. (Ed.). (1985) Atlas of fatigue curves. ASM International.
- [10]. Introduction à la résistance des matériaux Cours RDM / A.U : 2012-2013
- [11]. Abd el Hakim, B. Contribution à l'étude de la fatigue des matériaux (Doctoral dissertation, Université de MOHAMED BOUDIAF M'sila faculté de sciences et technologies (2016).
- [12]. Berrehili, A. Comportement cyclique et tenue en fatigue sous chargement multiaxial d'un polyéthylène: expériences et critère d'endurance (Doctoral dissertation) (2010).
- [13]. Campbell, F. C. (Ed.). Fatigue and fracture: understanding the basics. ASM International (2012).
- [14]. M.J. Cieslak, Cracking Phenomena Associated with Welding, Welding, Brazing, and Soldering, Vol 6, ASM Handbook, ASM International, 1993.
- [15]. Lemaignan, C. La rupture des matériaux. EDP sciences (2012).
- [16]. R. Davis "Aluminum and aluminum alloys", Ed. by ASM International, Print.3, 1994
- [17]. COLOMBIÉ, Michel. Matériaux métalliques-2ème édition. Hachette, 2008.
- [18]. Y. Ohmori, L. C. Doan, Y. Matsuda, S. Kobayashi, K. Naki, Mater. Trans, p 2476-2583, (2001).
- [19]. R.F. Kern, Selecting Steels and Designing Parts for Heat Treatment, American Society for Metals, 1969.
- [20]. LAZIZI Hakim « Comportement et mise en Forme des matériaux ». Mémoire de projet de fin d'études Université de Moulod MAMMERI de Tizi-Ouzou 2013

- [21]. Fares Serradj. Thèse de Doctorat. Etude de la Cinétique de Précipitation dans les Alliages Al-Mg-Si contenant différents teneurs des éléments d'additions. Université de Constantine 1. (2014).
- [22]. M. Ladinek, A. Niederwanger, R. Lang, J. Schmid, R. Timmers, G. Lener, the strain-life approach applied to welded joints: Considering the real weld geometry, *Journal of Constructional Steel Research* 180–188 (2018).
- [23]. M. J. de Haas, thèse de doctorat. Plasticity in Aluminium Alloys. Université de Groningen (2002).
- [24]. BENLAMNOUAR, Mohammed Farid. Contribution à l'amélioration du comportement en fatigue d'un alliage d'aluminium anodisé. Mémoire de magister. Ecole militaire polytechnique. 2010.
- [25]. Oh, D., Song, S., Kim, N., & Kim, M. Effect of Cryogenic Temperature on Low-Cycle Fatigue Behavior of AISI 304L Welded Joint. *Metals* (2018).
- [26]. R. Davis "Aluminum and aluminum alloys", Ed. by ASM International , Print.3, 1994
- [27]. S. Jacob ; " Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie"; *Technique d'Ingénieur M 4 675*, 2006
- [28]. COCHARD, Audrey. Microstructures et propriétés mécaniques des alliages de type Duralumin du Breguet 765 n° 504 64-PH: approche historique et sciences des matériaux.. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III . 2016
- [29]. Hayette Bedboudi. Thèse de Doctorat. Etude de développement de structures dans les alliages à base d'aluminium : Al-Zn et Al-Cu-Zn. Université BADJI MOKHTAR Annaba. 2011
- [30]. Findlay, S. & Harrison, N. (2002). Why aircraft fail. *Materials Today*,
- [31]. G.J. Davies, Performance in Service: Essential Metallurgy for Engineers, E.J. Bradbury, Ed., Van Nostrand Reinhold, London, p 126–155,1985.
- [32]. BEKKAR, Baghdad. Etat de l'art sur le comportement en fissuration par fatigue des alliages d'aluminium a durcissement structural. Mémoire de fin d'étude.2014.
- [33]. BELBACHIR Nacer, TADJER Nosseiba. «Essais de traction par corrélation d'images numériques sur les alliages de magnésium soudés et non soudés». Mémoire de projet de fin d'étude. Ecole Nationale Polytechnique (ENP) 2018.
- [34]. PAQUETON, Henri; RUSTE, Jacky. Microscopie électronique à balayage Principe et équipement. *Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation*, 2006,
- [35]. REZAKHANLOU, R. The hardness test: a real mechanical test. Electricite de France (EDF), 1993
- [36]. OUALLAM, Seddik. Étude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024 T3. MEMOIRE DE MAGISTER. Ecole nationale polytechnique (ENP) 2009.
- [37]. HEMMOUCHE, L.; FARES, C.; BELOUCHRANI, M. A. Influence of heat treatments and anodization on fatigue life of 2017A alloy. *Engineering Failure Analysis*, 2013.