

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Science Des Matériaux

Thème :

Etude de l'effet de l'anisotropie sur la
microstructure, les propriétés mécaniques et
chimiques des canettes en Aluminium.

Dirigé par :

Mr N. ZAZI

Mr C. ILLOUL

Présenté par :

M^{lle} Ferroudja DEBIANE

Promotion 2015/2016



Mémoire de Master

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Science Des Matériaux

Etude de l'effet de l'anisotropie
sur la microstructure, les
propriétés mécaniques et
chimiques des canettes en
Aluminium.



Remerciements

La louange est à Allah de par la grâce de qui se réalisent les bonnes choses et sans qui aujourd'hui on n'en serait là où chacun de nous devrait être sur terre car sans sa puissance on ne serait que néant.

On commence par dire « cela est impossible » pour se dispenser de le tenter ; et cela devient en effet impossible car on ne l'aura pas tenté, Fourrier a dit ceci autrefois, Mon directeur de mémoire Monsieur **Nacer ZAZI** n'a cessé de me prouver la justesse de ces mots, j'aurais appris à ses côtés que rien n'est impossible et qu'il ne fallait jamais diffamer si j'ose dire un simple résultat car on peut partir d'un petit point pour arriver à dépasser les limites qu'on se fixe. Pour ainsi dire, je remercie Mr ZAZI pour ses conseils, son soutien et disponibilité. Je le remercie également pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Mr Cherif ILLOUL fût aux cotés de Mr ZAZI dans mon parcours donc je tiens à le remercier aussi pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportée ainsi que pour sa disponibilité en se montrant présent tout au long de l'étude.

J'associe à ces remerciements, Monsieur **Ali BILEK** pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'assurer la présidence du jury de soutenance.

Je tiens également à exprimer mes remerciements et ma reconnaissance à Madame **Fadhila MOHELBI** et Monsieur **Ahmed SALHI** pour avoir consenti de juger mon travail à sa juste valeur en acceptant de faire part des membres du jury.

Au laboratoire Science Des Matériaux (SDM) de la faculté du génie de la construction, j'ai eu la chance de trouver un soutien continu de la part de **Mr** et **Mme SETBEL** qui ont toujours été là à m'aider dans la réalisation de ce travail. Se joignent à eux, tous les ingénieurs des laboratoires, RDM et LMSE à savoir, **Mr AHMED ZAID**, **Mr ANARIS**, **Mr OMARI** ainsi que **Mr SLIMANI** pour leurs conseils et l'aide qu'ils nous ont apportée à moi et mes collègues.

Enfin, je remercie ma famille, parents, frères et cousins d'avoir toujours été derrière moi à me pousser pour aller de l'avant et apprendre à me surpasser.

Je ne les citerais pas, mais ils se reconnaîtront, tous mes amis qui m'ont soutenu même de loin, je leurs en suis reconnaissante.

Dédicaces

Le plaisir le plus délicat est de faire celui d'autrui, j'ose espérer qu'en ces quelques mots je ferais celui des personnes que je citerais même si les remerciements et les sentiments ne se transmettent guère par les écrits.

Le succès n'est jamais une fin en soi. L'échec n'est jamais fatal. C'est le courage qui compte. Tu as toujours su être à mes côtés, su me donner du courage pour avancer et j'en ai puisé dans ta réserve quand la mienne s'était écoulée.

L'autorité d'un père n'est autre qu'un sentiment d'affection paternelle qui se manifeste en voulant faire de ses enfants un modèle qui pourra résister au monde extérieur et sa tendresse ne sera pour lui qu'un élixir qui lui proférera confiance et assurance en soi.

A toi Papa, tu es un héros et un roi pour tes enfants et je crois que le titre de père est le plus respectable que nous puissions te donner toi qui es l'auteur de nos jours car tu es le genre de père condamné à être aimé à père-pétuité.

Je n'ai jamais aimé les poupées quand j'étais petite, quant à cela, ma mère disait que j'étais un garçon manqué mais moi je lui répondrais que je suis une fille réussie. Je ne vais pas te dire merci de m'avoir porté 9 mois mais plutôt de m'avoir supporté pendant 23 ans surtout quand je n'étais que peu consciente et que mon plus grand plaisir était de te dire non à mes 4 ou 5 ans.

Carl Schurz a dit : « l'idéal est comme une étoile. Vous ne réussissez pas à la tenir entre vos doigts. Mais comme le matin sur l'océan sans fin, choisissez-là comme guide, et, en la suivant, vous atteindrez votre but ». Tes mots maman, ont été pour moi cette étoile et je l'ai toujours suivie et Dieu merci j'ai toujours réussi, la preuve, pour te faire plaisir aujourd'hui je suis là, j'ai réussi à atteindre ton objectif et je n'espère qu'être à la hauteur de tes espérances car je pourrais passer ma vie à chercher comment exprimer mes sentiments et ma gratitude sans pouvoir y arriver.

Etre l'aîné d'une famille est une immense responsabilité que l'on porte sur ses épaules. Je ne peux oser imaginer ce que cela peut représenter pour toi mon frère. DADA, nos parents nous ont toujours appris à t'appeler ainsi pour te témoigner tout le respect que l'on porte à ton égard. Tu as su être un modèle pour tes frères. Aujourd'hui c'est à mon tour de te remercier d'avoir été là quand j'étais petite et m'avoir suivi à la trace pour que je ne perde pas mon chemin.

Allal, que pourrais-je dire à ton sujet !! Le genre de frère sentimental qui a toujours envie de donner le sourire aux autres et de tendre la main, tu as toujours été là derrière moi à rectifier et assumer mes erreurs. J'ai eu la chance d'être la cadette de la maison car je t'ai vu courir et suer pour me protéger.

Quels mots utiliser pour remercier LA personne qui nous a appris à écrire nos premières lettres alors qu'on est aujourd'hui arrivé à un tel niveau. Petit, je t'ai toujours appelé ainsi malgré que l'amour que je porte pour toi est grand et ta valeur à mes yeux est grande. Le petit frère que tout le monde rêve d'avoir, tu as tracé tant de points pour que j'apprenne à écrire mais tu ne savais pas que tu étais entrains de tracer ainsi le chemin de ma vie.

Certaines personnes n'ont pas la chance d'avoir de famille, moi j'ai une chance inouïe d'avoir trois familles, ma famille biologique, et mes deux autres familles adoptives.

Tata Nadia, tu m'as accueillie dans ta famille sans me demander quoi que ce soit en retour, grâce à toi j'ai une petite sœur et un petit frère que j'aime de tout cœur et je sais que quoi qu'il arrive je les trouverais à mes côtés. Je ne pourrais te remercier assez pour ta présence dans ma vie.

Ouiouiz, une relation hors du commun qui surpasse celle du sang. Je sais que tu n'as pas besoin de grandes phrases écrites pour les dédicaces d'un mémoire pour savoir ce que tu représentes pour moi.

Loin des yeux mais toujours près du cœur, telle est la phrase que tu répètes sans cesse, chaque année j'attends avec impatience ce petit mois qui nous rassemble. Kahina, finalement les miracles existent vu que tu m'es tombé du ciel pour prendre la place de sœur qui était vide jusque-là, aujourd'hui toi et ta maman êtes ma troisième famille.

Je ne peux oublier de citer Daghling, Dihia, une des connaissances que j'ai pu acquérir grâce à mon entrée à l'université et que je ne regrette en aucun cas car jour après jour, on apprend à connaître les personnes et à savoir quelles sont les vraies et les fausses.

Pour finir, je remercie toute personne ayant fait irruption dans ma vie ou ayant joué son rôle, bien soit-il ou mal car sans eux je ne serais ce que je suis aujourd'hui.

Une petite pensée à mon grand oncle Hamid et sa femme Yamina que Dieu aie leurs âmes, vous ne quittez jamais mon esprit.

Table des matières

INTRODUCTION	1
---------------------------	----------

CHAPITRE I : *Les alliages d'aluminium pour boitage*

I.1 – Introduction	3
I.2 – Production de l'Aluminium	4
I.2.1 – Extraction de la bauxite	4
I.2.2 – Production de l'Alumine	5
I.2.3 – Obtention de l'Aluminium	6
I.3 – Propriétés de l'Aluminium	7
I.3.1 – Propriétés physiques et mécaniques	7
I.3.2 – Propriétés chimiques.....	8
I.3.3 – Traitements thermiques	9
I.3.3.1 – Trempe	9
I.3.3.2 – Vieillessement	9
I.3.3.3 – Recuit	9
I.4 – L'Aluminium de provenance industrielle	10
I.4.1 – Les alliages d'Aluminium	10
I.4.1.1 – Le système américain.....	10
I.4.1.2 – Le système européen.....	12
I.4.2 – Influence des éléments d'ajout	12
I.4.3 – Domaines d'utilisation.....	14
I.5 – L'Aluminium de boitage	14
I.5.1 – Boites de conserves	14

I.5.2 – Boîtes pour boissons.....	14
I.5.3 – Alliages d’aluminium exploités	15
I.5.3.1 – Alliages de la série 1000	15
I.5.3.2 – Alliages de la série 3000	16
I.5.3.3 – Alliages de la série 8000	18
I.6 – La canette en Aluminium.....	18
I.6.1 – Fabrication de la canette	18
I.6.2 – Recyclage de la canette.....	21

CHAPITRE II : *Traitements thermomécaniques des alliages d’aluminium : Laminage et emboutissage*

II.1 – Introduction	22
II.2 – Déformation de l’aluminium	22
II.2.1 – Déformation macroscopique de l’aluminium	22
II.2.2 – Déformation microscopique de l’aluminium	23
II.3 – Le laminage de l’aluminium	23
II.3.1 – Principe du procédé de laminage	24
II.3.2 – Le laminage à chaud	25
II.3.3 – Le laminage à froid	26
II.4 – L’emboutissage	26
II.4.1 – Principe du procédé d’emboutissage	27
II.4.2 – Etapes du procédé d’emboutissage	28
II.4.2.1 – Le découpage	28
II.4.2.2 – L’emboutissage	29
II.5 – Comportement à l’écrouissage	31

II.5.1 – Principe du durcissement par écrouissage	31
II.5.2 – Lois d'écrouissage	31

CHAPITRE III : *La Corrosion des métaux en général et de l'aluminium en particulier*

III.1 – Introduction	34
III.2 – Notions de corrosion	35
III.2.1 – Corrosion sèche dite à haute température	35
III.2.2 – Corrosion aqueuse	35
III.2.3 – Réactions de corrosion	36
III.3 – Attaques de corrosion	37
III.3.1 – Corrosion généralisée	37
III.3.2 – Corrosion localisée	38
III.3.2.1 – Corrosion galvanique	38
III.3.2.2 – Corrosion par piquûre	38
III.3.2.3 – Corrosion intergranulaire	39
III.3.2.4 – Corrosion par cavitation	40
III.3.2.5 – Corrosion par crevasse	40
III.3.2.6 – Corrosion sous contrainte	40
III.3.2.7 – Corrosion érosion	40
III.4 – Electrolyse	41
III.4.1 – Principe du processus	41
III.4.1.1 – L'anode	42
III.4.1.2 – La cathode	42
III.4.2 – Réactions partielles	42

III.4.2.1 – L’oxydation	42
III.4.2.2 – La réduction	43
III.5 – Cinétique de corrosion	43
III.5.1 – Vitesse de corrosion	43
III.5.2 – Contrôle du potentiel	44
III.5.3 – Spectroscopie d’impédances électrochimiques	44
III.5.4 – Mesure quantitative du taux d’oxydation	44
III.6 – Corrosion de l’aluminium et ses alliages	45
III.6.1 – Rôle du film d’oxyde	45
III.6.2 – La passivité	46
III.7 – Facteurs influant sur la corrosion de l’aluminium et ses alliages	46
III.7.1 – L’ion Chlorure	46
III.7.2 – pH	46
III.7.3 – Eléments d’addition (alliages)	48
III.8 – Protection de l’aluminium et ses alliages	48

CHAPITRE IV : *Anisotropie des métaux en général et de l’aluminium et ses alliages en particulier*

IV.1 – Introduction	49
IV.2 – Notions, Isotropie – Anisotropie	49
IV.2.1 – Homogénéité	49
IV.2.2 – Isotropie	50
IV.2.3 – Anisotropie	50
IV.3 – Etude de l’anisotropie	50
IV.3.1 – Coefficient d’anisotropie	51

IV.3.2 – Anisotropie normale	52
IV.4 –Influence de l’anisotropie	53
IV.4.1 – Module d’élasticité	53
IV.4.2 – Magnétisme	53
IV.4.3- La corrosion	53

CHAPITRE V : *Techniques expérimentales*

V.1 – Introduction	54
V.2 – Matériau étudié	54
V.3 – Caractérisation microscopique	56
V.3.1 – Préparation micrographique des échantillons	56
V.3.1.1 – Enrobage	56
V.3.1.2 – Polissage	57
V.3.1.3 – Attaques chimiques	57
V.3.2 – Microscope optique	58
V.3.3 – Microscope Electronique à Balayage (MEB)	59
V.4 – Caractérisation mécanique	60
V.4.1 – Microdureté Vickers	60
V.4.2 – Essai de traction	61
V.4.2.1 – Préparation des éprouvettes	61
V.4.2.2 – Réalisation de l’essai	62
V.4.2.3 – Courbes de traction	63
V.5 – Caractérisation chimique	64
V.5.1 – Corrosion libre	64
V.5.2 – Corrosion en présence de champ magnétique permanent	65

V.5.3 – Potentiel de corrosion	66
--------------------------------------	----

CHAPITRE VI : *Résultats et discussions*

VI.1 – Microstructures de l’alliage étudié	67
VI.1.1 – Microstructure avant et après corrosion de 30 secondes dans le réactif de KELLER et dans le réactif de 1% de NaOH	67
VI.1.2 – Microstructures avant corrosion observées au MEB	71
VI.1.3 – Morphologie de la corrosion dans la solution de NaCl	71
VI.2 – Cinétique de la corrosion dans la solution de NaCl	74
VI.3 – Caractérisations mécaniques de la tôle	77
VI.3.1 – Courbes de traction de plusieurs éprouvettes dans différentes directions	77
VI.3.2 – Courbes de microdureté Vickers en fonction de la direction	79
VI.4 – Anisotropie de la tôle	80

CONCLUSIONS	82
--------------------------	----

Liste des figures

CHAPITRE I : *Les alliages d'aluminium pour boitage*

Figure I.1- Principale source de l'Aluminium : La bauxite.	4
Figure I.2- Procédé Bayer pour l'obtention de l'alumine.	5
Figure I.3-Schéma représentatif du principe de l'électrolyse.	6
Figure I.4-Cuve d'électrolyse.	7
Figure I.5 – Représentation atomique de l'aluminium.	8
Figure I.6 – Etapes de fabrication de la canette [14].	21

CHAPITRE II : *Traitements thermomécaniques des alliages d'aluminium : Laminage et emboutissage*

Figure II.1- Evolution de la déformation microscopique (évolution du grain).	23
Figure II.2- Principe du procédé de laminage.	24
Figure II.3- Principe du procédé d'emboutissage [18].	27
Figure II.4- Etapes de réalisation de l'emboutissage.	30
Figure II.5- Courbe de traction rationnelle.	32

CHAPITRE III : *La corrosion des métaux en général et de l'aluminium en particulier*

Figure III.1 – Schématisation de la réaction de corrosion du fer en milieu acide [21].	37
Figure III.2 – Observation d'une corrosion généralisée sur une pièce en métal (écrou +vis) [22].	38
Figure III.3 – Observation d'une corrosion intergranulaire [24].	39
Figure III.4 – Représentation schématique d'une pile électrochimique.	41

Figure III.5 – Diagramme potentiel – pH de l’aluminium à 25°C.	47
--	----

CHAPITRE V : *Techniques expérimentales*

Figure V.1- Transformations apportées à la canette en coupant les embouts supérieur et inférieur.	55
Figure V.2- Enrobage de trois échantillons suivant X, Y et Z.	56
Figure V.3- Microscope optique avec transmission de marque HUND WETZLAR.	58
Figure V.4- Microscope optique de marque EUROMEX.	59
Figure V.5: Microscope électronique à balayage (Philips ESEM–XL30SEM).	60
Figure V.6 - a) Microduromètre, b) écran affichant la dureté HV, c) étalon.	61
Figure V.7- Empreinte laissée par le pénétrateur du microduromètre.	61
Figure V.8- Eprouvettes prélevées des canettes suivant les différentes directions.	62
Figure V.9- Machine de traction de marque ibertest.	63
Figure V.10- Corrosion libre de l’aluminium dans une solution de NaCl.	64
Figure V.11- Corrosion de l’aluminium dans une solution de NaCl en présence d’un champ magnétique permanent.	65
Figure V.12- Dispositif utilisé pour la mesure du potentiel de corrosion de l’aluminium dans une solution de NaCl.	66

CHAPITRE VI : *Résultats et discussions*

Figure VI.1- Microstructure de l’alliage, a) avant corrosion pour un échantillon non poli et non décapé , b) après immersion d’un échantillon non poli et non décapé dans le réactif de Keller, c) après immersion d’un échantillon non poli et non décapé dans la solution NaOH, d) après immersion d’un échantillon poli dans le réactif de Keller, e) après immersion d’un échantillon poli dans la solution NaOH.	67
--	----

Figure VI.2- Effet loupe de 10 fois de la microstructure (de la Figure VI.1) après immersion de 30 secondes dans le réactif de Keller.	69
Figure VI.3- Effet loupe de 10 fois de la microstructure (de la Figure VI.1b) après immersion de 30 secondes dans le réactif de Keller (échantillon non poli non décapé).	69
Figure VI.4- Effet loupe de 10 fois la microstructure (de la Figure VI.1c) après immersion de 30 secondes dans le réactif de NaOH (échantillon non poli non décapé).	70
Figure VI.5- Effet loupe de 10 fois la microstructure (de la Figure VI.1d) après immersion de 30 secondes dans le réactif de Keller (échantillon poli).	70
Figure VI.6- Images MEB de l'alliage étudié.	71
Figure VI.7- Corrosion du matériau poli dans une solution de 0.3% NaCl pendant 20 jours.	72
Figure VI.8- Corrosion du matériau poli dans une solution de 3% NaCl pendant 03 jours.	72
Figure VI.9- Corrosion du matériau vernis à la surface durant 20 jours dans une solution de a) 0.3%NaCl, b) 3%NaCl.	73
Figure VI.10- Immersion dans une solution de NaCl en présence d'un champ magnétique permanent de faible intensité 0.3% NaCl.	74
Figure VI.11- Potentiel de corrosion libre de l'alliage étudié dans la solution de 0.3% NaCl (échantillon poli).	75
Figure VI.12- Potentiel de corrosion libre de l'alliage étudié dans la solution de 3%NaCl.	76
Figure VI.13- Comparaison du potentiel de corrosion libre de l'alliage étudié dans la solution de 0.3%NaCl (♦) à celui dans la solution de 3% NaCl (■).....	76
Figure VI.14- Courbes de traction dans la direction de laminage de plusieurs éprouvettes.	77
Figure VI.15- Courbes de traction dans la direction transverse au laminage de plusieurs éprouvettes.	78
Figure VI.16- Courbes de traction dans la direction 45° de plusieurs éprouvettes.	78
Figure VI.17- Microdureté Vickers en fonction de la direction par rapport à la direction du laminage.	79

Figure VI.18- Coefficient d'anisotropie en fonction de la direction par rapport à la direction du laminage.	80
Figures VI.19- Coefficient d'anisotropie normal pour plusieurs échantillons prélevés de cannetes différentes.	81
Figures VI.20- Coefficient d'anisotropie planaire pour plusieurs canettes utilisées lors des essais.	81

Liste des tableaux

CHAPITRE I : *Les alliages d'aluminium pour boitage*

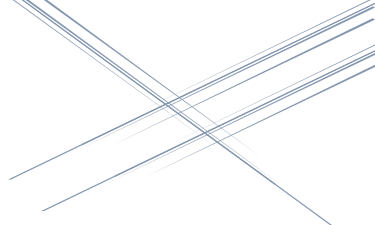
Tableau I.1– Propriétés mécaniques de l'aluminium coulé et recuit.	8
Tableau I.2– Désignation des alliages d'Aluminium corroyé.	11
Tableau I.3– Désignation des alliages d'Aluminium de fonderie.	11
Tableau I.4– Effet de l'ajout de certains éléments à l'aluminium [7].	13
Tableau I.5– Principales propriétés de l'alliage 1050.	16
Tableau I.6– Principales propriétés des alliages 3003 et 3004.	17

CHAPITRE IV : *Anisotropie des métaux en général et de l'aluminium et ses alliages en particulier*

Tableau IV.1– Module d'élasticité en fonction de la distribution cristallographique pour les métaux cités.	53
---	----

CHAPITRE V : *Techniques expérimentales*

Tableau V.1– Composition de l'alliage 8011.	55
Tableau V.2– Caractéristiques de la canette 33cl.	56
Tableau V.3– Composition chimique du réactif de Keller.	57



INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'utilisation des matériaux pour les productions; artisanales soient-elles ou industrielles ; a connu une évolution infinie à travers le temps et les civilisations ayant pour un même but de satisfaire les besoins de demain.

Compte tenu des exigences de l'industrie moderne, de nombreux domaines de recherche se sont créés en vue de diversifier et développer d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères, etc. Mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers ne cessent de s'améliorer de jour en jour grâce à ces recherches et tel est le cas de l'aluminium et plus précisément des tôles d'aluminium à qui on porte une grande attention ces dernières décennies.

L'étude réalisée et que rapporte ce manuscrit traite des propriétés physico-chimiques que peut présenter une tôle d'aluminium pour boîtier, soit, d'une canette pour boisson.

Cette tôle est étudiée pour évaluer son comportement aux sollicitations mécaniques dans différentes directions (x, y et z) et son comportement vis-à-vis d'un milieu corrosif agressif.

Les tests de tractions sont faits sur des éprouvettes suivant la norme ASTM E8, des prétraitements de préparation ont été effectués pour les échantillons destinés pour l'étude de la morphologie de la corrosion. Il est à noter que le matériau étudié a subi préalablement un laminage à chaud, un laminage à froid suivi d'un emboutissage, ces traitements modifient profondément les propriétés physico-chimique du matériau étudié.

L'analyse mécanique consiste à étudier la résistance de cette dite tôle, pour ce faire, des essais de traction sont réalisés dans les trois directions soit, la direction 0° (X), la direction 45° (Z) et la direction 90° (Y).

Ajoutant à cela, d'autres expériences viennent compléter ce travail portant sur le comportement à la corrosion de ce matériau. L'essai de corrosion a été réalisé en absence et en présence d'un champ magnétique de faible intensité d'un aimant permanent dans une solution de 0.3 et 3% de NaCl.

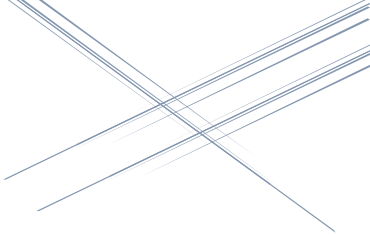
Du fait que le matériau étudié est utilisé pour l'emballage de boissons celles-ci sont conservées dans un réfrigérateur contenant un moteur électrique qui induit un champ magnétique.

On vise aussi à acquérir des connaissances ou une maîtrise du comportement anisotrope en affinant les techniques de caractérisation pour ce matériau.

Ce manuscrit traite sur l'aluminium en général, son extraction et sa production, puis on parlera des traitements que subit la tôle lors de sa préforme. Pour finir, on se penchera sur la corrosion de l'aluminium et l'étude de l'anisotropie.

Ce travail est réparti sur six (06) chapitres se présentant comme suit :

- Les alliages d'aluminium pour boitage
- Traitements thermomécaniques des alliages d'aluminium : Laminage et emboutissage.
- La Corrosion des métaux en général et de l'aluminium en particulier.
- Anisotropie des métaux en général et de l'aluminium et ses alliages en particulier.
- Techniques expérimentales.
- Résultats et discussions.



CHAPITRE I

Les alliages d'aluminium pour boitage

CHAPITRE I : *Les alliages d'aluminium pour boitage*

I.1 – Introduction

L'Aluminium, le matériau qui a pu se frayer un chemin et se démarquer d'entre les autres matériaux est aujourd'hui en extension continuelle. Son essor est redevable aux propriétés exceptionnelles que possède celui-ci (légèreté, conductibilité, résistance à la corrosion...).

Fût un temps où l'Aluminium n'était utilisé que pour la fabrication des bijoux faute de sa rareté et sa précieuse valeur. Au fil des années, il put s'imposer peu à peu dans une multitude de domaines lui permettant ainsi de participer aux grandes évolutions de la technologie.

En 1854, le chimiste Sainte-Claire Deville présenta à l'Académie des sciences un lingot d'Aluminium encore inconnu à leur acquis même si Humphry Davy, en 1807, supposait l'existence de ce métal. [1] A cette époque, il est très difficile et très cher d'en produire ; il est alors plus cher que l'argent.

Sachant qu'il représente 7.45% en masse de la lithosphère (croûte terrestre), celui-ci est le deuxième matériau le plus consommé après le fer d'où l'intérêt qu'on lui porte dernièrement.

Lorsque l'Aluminium est utilisé seul il ne rend pas les résultats attendus d'où l'avantage des alliages et précisément de l'ajout de certains matériaux à des concentrations définies lui permettant une utilisation adéquate.

I.2 – Production de l'Aluminium

L'Aluminium n'est guère un élément naturel car il existe grâce aux inventions de l'homme qui ont permis l'extraction de la bauxite qui n'est autre que l'origine de ce dernier.

I.2.1 – Extraction de la bauxite

En 1812, Pierre Berthier découvre une réserve de terre rouge qu'il nomma de *BAUXITE*. Equitablement répartie sur la planète, cette roche rouge est extraite des gisements. C'est donc une argile de structure oolithique¹; tendre, de densité 2.3 à 2.7 à surface Pulvérulente². Elle est exploitée comme minerais d'aluminium dont elle est la principale source d'obtention. La figure I.1 montre à quoi ressemble une bauxite.



Figure I.1- Principale source de l'Aluminium : La bauxite.

¹ : Pierre composée de petits grains en forme d'œufs de poisson

² : Qui se réduit facilement en poudre

I.2.2 – Production de l'Alumine

La bauxite est broyée, ensuite de la soude lui est ajoutée ; pendant plusieurs heures, on dissout l'alumine pour former de l'aluminate de sodium et les impuretés précipitent. Puis on sépare les déchets insolubles (boues rouges). En 1894, l'usine Gardanne met au point ce traitement en l'appelant « Procédé Bayer » [2].

On introduit un peu d'alumine (Al_2O_3) comme germes de cristallisation dans cette solution et on refroidit. Lors du refroidissement, les cristaux d'oxyde d'aluminium se séparent de la soude et précipitent, enfin on déshydrate les cristaux par calcination vers 1200°C et on obtient de l'alumine pure à 99% et qui est aussi fine qu'une farine.

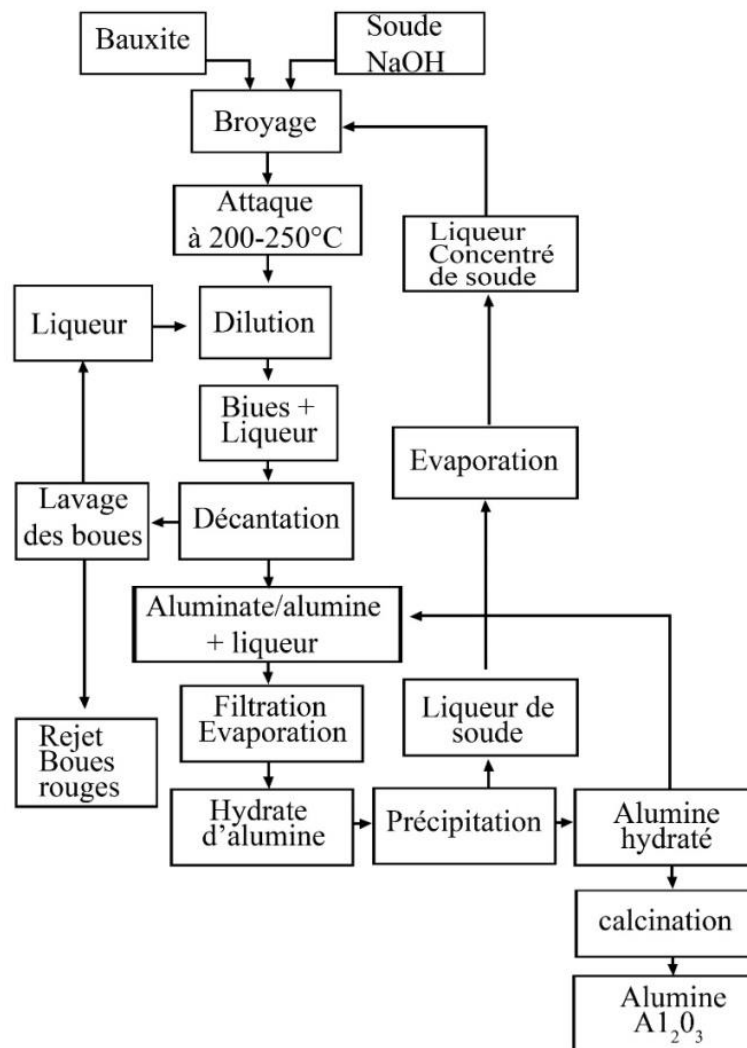


Figure I.2- Procédé Bayer pour l'obtention de l'alumine.

I.2.3 – Obtention de l'Aluminium

La production d'une tonne d'aluminium demande deux (02) tonnes d'alumine ; chaque tonne d'alumine nécessite 2.5 à 2.7 tonnes de minerai, il faut donc 5 à 5.4 tonnes de bauxite pour obtenir une (01) tonne d'aluminium.

Une fois l'alumine obtenue, elle est dissoute dans de la cryolite¹ et l'aluminium est obtenu par électrolyse qui n'est autre qu'un bain de solution en fusion à 960°C traversé par un courant qui permettra de séparer l'aluminium de l'oxygène qui se déposera au fond de la cuve (à la cathode) qui sera récupéré de temps à autres et coulé en lingots ou dans des mélangeurs. Ainsi, l'aluminium sera vérifié à chaque instant de la procédure car une fine poussière ou même une goutte d'eau peut provoquer une explosion [3]. La **figure I.3** montre en schéma le principe de l'électrolyse.

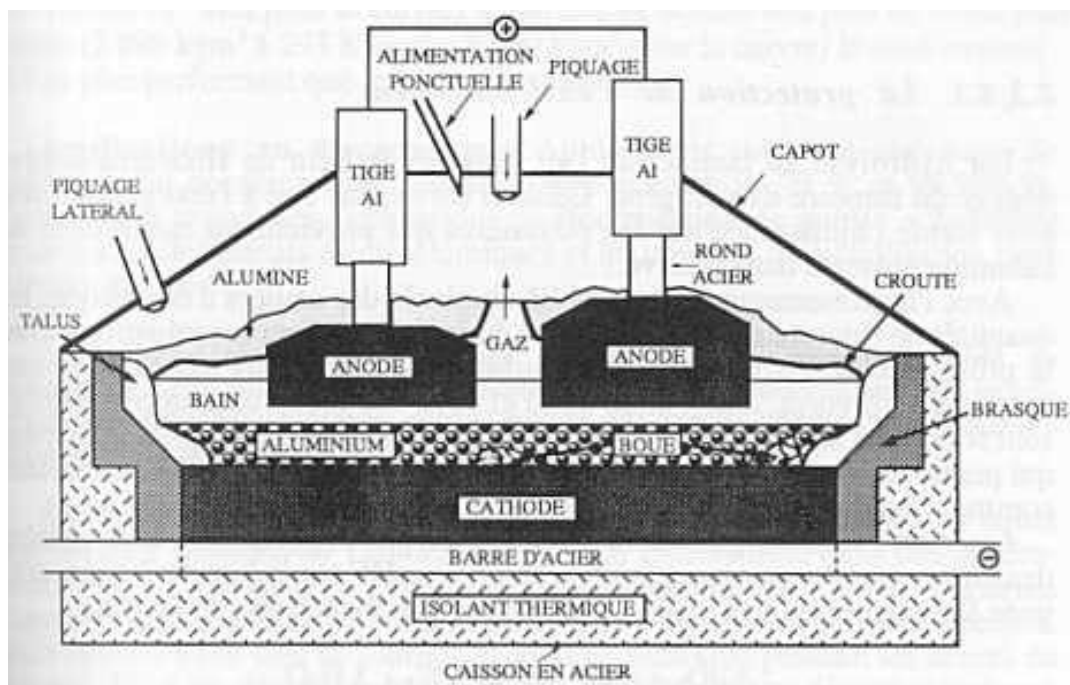


Figure I.3-Schéma représentatif du principe de l'électrolyse.

¹: Espèce minérale composée de fluorure de sodium et d'aluminium (Na_3AlF_6)



Figure I.4-Cuve d'électrolyse.

I.3 – Propriétés de l'Aluminium

I.3.1 – Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés physiques sont comme suit :

- Numéro atomique : 13
- Densité : 2.7 g/cm^3
- Module d'élasticité longitudinal : 69 000 MPa
- Température de fusion : 660°C
- Point d'ébullition : 2060°C
- Chaleur spécifique :
 - à 20°C : $0.214 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$
 - à 100°C : $0.223 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$
 - à 500°C : $0.266 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

Pour les propriétés mécaniques elles sont regroupées dans le tableau suivant :

	Aluminium coulé	Aluminium recuit
Résistance à la traction MPa	70 à 100	50
Limite élastique MPa	30 à 40	15
Allongement (%)	15 à 25	50
Module d'élasticité MPa	67500	71000
Dureté Brinell (HB)	15 à 25	15 à 25

Tableau I.1– Propriétés mécaniques de l'aluminium coulé et recuit.

I.3.2 – Propriétés chimiques

Comme illustré sur la **Figure I.5**, l'aluminium a une distribution de la forme : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$, ceci implique la présence de 3 électrons dans la couche électronique externe.

En parlant des propriétés chimiques, on pense surtout à la tenue à la corrosion, pour l'aluminium cette dernière est expliquée par la formation d'un film d'oxyde d'aluminium peu perméable et qui protège le métal contre l'agressivité du milieu extérieure.

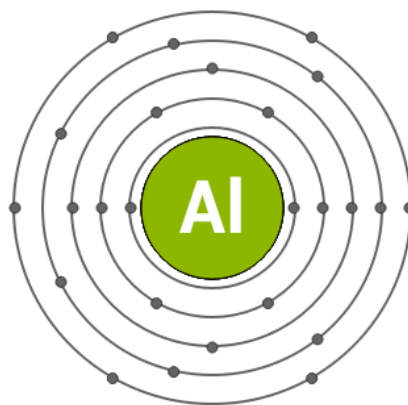


Figure I.5 – Représentation atomique de l'aluminium.

I.3.3 – Traitements thermiques

Lorsqu'on cherche à durcir un tel type de matériau, on a recours à un durcissement structural, ou/et au durcissement par l'écrouissage, ou bien durcissement par addition des éléments d'alliage. Le traitement de durcissement structural représente un traitement thermique constitué d'une trempe suivi d'un vieillissement.

I.3.3.1 – Trempe

La trempe d'un aluminium n'est guère pareille à une trempe martensitique comportant les cycles suivants :

- Chauffage jusqu'à la température de dissolution des phases présentes en excès dans l'aluminium,
- Maintien à cette même température,
- Refroidissement assez rapide jusqu'à température ambiante,
- Maintien isotherme (vieillissement naturel) ou à une température supérieure (vieillissement artificiel).

I.3.3.2 – Vieillissement

Une trempe est toujours suivie d'un vieillissement qui désigne un maintien de la température, on parle de maturation quand il s'agit d'un maintien à une température ambiante, ou d'un vieillissement artificiel lorsque il s'agit d'un maintien à une température supérieure à celle de l'ambiance.

I.3.3.3 – Recuit

Ses conditions sont le recuit d'homogénéisation, de recristallisation et d'adoucissement.

Recuit d'homogénéisation

Pour un cycle thermique comportant un chauffage à température élevée (450°C à 520°C), un maintien de 4h à 40 heures puis un refroidissement lent ou dans le four même.

Recuit de recristallisation

Pour ce cas, on chauffe l'alliage déformé pour supprimer l'écrouissage¹ et obtenir un grain plus fin suite à une recristallisation.

Recuit d'adoucissement

Pour une température variant entre 350°C et 450°C et un maintien de 1h à 2 heures de temps, celui-ci assure la décomposition et la coalescence des phases qui durcissent ainsi à la fin du procédé

I.4 – L'Aluminium de provenance industrielle

I.4.1 – Les alliages d'Aluminium

Ayant des propriétés minimales, l'aluminium est alors amélioré par l'ajout de certains composants (éléments) visant plus ou moins une rectification de la microstructure et ainsi, on obtient ce que l'on appelle les alliages d'aluminium. Il existe actuellement plus de 400 alliages d'aluminium et 200 alliages de fonderie [4]. Plusieurs systèmes de classification sont mis en œuvre pour ordonner ces derniers.

I.4.1.1 – Le système américain

Un livre établi par 'Aluminium association.inc' regroupe les alliages d'aluminium avec leurs propriétés et leurs compositions chimiques permettant ainsi la bonne utilisation de ces derniers. Ils sont compartimentés par rapport à leurs propriétés comme les traitements, les éléments d'addition principaux...

|||
¹ : action de battre un métal à froid ou le passer au laminoir pour le rendre plus dense.

Les alliages corroyés sont désignés par un nombre de quatre (04) chiffres et ceux de fonderie de trois (03) chiffres suivis d'un point et un dernier chiffre indiquant s'il s'agit d'une pièce moulée ou d'un lingot. Les tableaux ci-dessous illustrent les séries d'alliages et leurs ajouts principaux.

Série d'alliages	Eléments d'alliages principaux
1XXX	99% d'Al minimum
2XXX	Cuivre
3XXX	Manganèse
4XXX	Silicium
5XXX	Magnésium
6XXX	Magnésium et silicium
7XXX	Zinc
8XXX	Autres éléments

Tableau I.2– Désignation des alliages d'Aluminium corroyé.

Série d'alliages	Eléments d'alliages principaux
1XX.X	99% d'Al minimum
2XX.X	Cuivre
3XX.X	Silicium + cuivre et/ou magnésium
4XX.X	Silicium
5XX.X	Magnésium
6XX.X	N'existe pas
7XX.X	Zinc
8XX.X	Etain
9XX.X	Autres éléments

Tableau I.3– Désignation des alliages d'Aluminium de fonderie.

Désignation des alliages corroyés

Comme on a vu dans les tableaux, le premier chiffre (Xxxx) indique l'élément le plus important ou alors le numéro de la série (1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000 et 8000) ; le deuxième (xXxx) s'il n'est pas nul, indique si on a eu recours à une modification de l'alliage spécifique et enfin les deux derniers désignent un alliage spécifique de la série.

Désignation des alliages de fonderie

Pour une combinaison de trois chiffres et une décimale, le premier chiffre désigne l'élément d'alliage principal, le deuxième et troisième sont pour l'alliage spécifique. En ce qui concerne la décimale, c'est pour que l'on puisse savoir si une pièce moulée ou un lingot (0 pour la pièce moulée et 1 ou 2 pour le lingot) [5].

I.4.1.2 – Le système européen

Pour cette méthode, la codification des alliages d'aluminium se fait en utilisant les symboles chimiques des composants avec leurs concentrations respectives, ces indications sont placées entre crochets, par exemple ; EN AW ¹-1199 [Al 99.99].

I.4.2 – Influence des éléments d'ajout

Les atomes des éléments d'addition peuvent :

- Etre 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.

|||
¹ : A pour Aluminium et W pour corroyé (wrought)

- 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 [6].

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

Les éléments d'addition sont peu nombreux : cuivre, silicium, magnésium, manganèse, titane et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium, zinc+ magnésium + cuivre. Le tableau suivant montre l'influence que peut avoir chaque élément.

Type d'ajout	Effet apporté
Manganèse (Mn)	Evitement de la formation de la phase Fe-Al.
Zinc (Zn)	En dessous d'une concentration de 0.9%, il n'a aucun effet sachant qu'il abaisse le potentiel de l'anode (dans la cuve).
Mercure (Hg) ou Etain (Sn)	Activation de la surface de l'anode en évitant sa passivation.
Magnésium (Mg)	Amélioration des caractéristiques mécanique du métal (dureté)
Titane (Ti)	Raffine les grains et acquière l'hydrogène

Tableau I.4– Effet de l'ajout de certains éléments à l'aluminium [7].

I.4.3 – Domaines d'utilisation

L'aluminium a l'avantage et la possibilité d'être recyclé infiniment d'où la multitude des domaines de son utilisation ; construction, transport, alimentation...

La faible masse volumique de ses alliages fait de lui un matériau en vogue employé dans presque tous les domaines comme par exemple son application dans la fabrication de chaudières et d'ustensiles de cuisine grâce à sa résistivité.

I.5 – L'Aluminium de boitage

L'utilisation de l'aluminium n'a cessé d'évoluer touchant tous les domaines du quotidien. En parlant de l'aluminium de boitage on fait référence à celui utilisé comme emballage rigide qu'il soit alimentaire (boîtes de boissons, boites pour conserves) ou autre (vaporisateurs, aérosols, coffres, valises...).

I.5.1 – Boîtes de conserve

Autrefois, le fer blanc servait à la fabrication des boites de conserve mais par manque de la disponibilité de celui-ci, l'aluminium fût proposé pour le remplacer ce qui donna naissance à l'industrie de la conserve en aluminium en 1930 [8].

Les premiers intéressés par cette modernisation furent les militaires car ils pouvaient aisément conserver une eau minérale dans des bouteilles légères et incassables surtout.

I.5.2 – Boîtes pour boissons

A la demande des militaires pendant la deuxième guerre mondiale, un récipient pouvant conserver les liquides hermétiquement est conçu au seul inconvénient qu'il fallait percer un trou dans le couvercle pour y boire et c'est en 1959 qu'Erman

C. Frazee, étant fabricant d'outillage inventa le couvercle à ouverture facile en Aluminium poussant ainsi la production des canettes dans un tel développement [9].

I.5.3 – Alliages d'aluminium exploités

I.5.3.1 – Alliages de la série 1000

Les nuances de cette série se caractérisent par leur pureté commerciale d'au moins 99%. Pour de faibles propriétés mécaniques et une haute résistance à la corrosion, les alliages de cette série se prêtent aisément aux déformations plastiques à froid tel que l'emboutissage [10]. La nuance la plus utilisée est l'alliage 1050 qui est justement utilisé pour les emballages en aluminium. Tout en tenant compte de l'aspect économique, chaque alliage est choisi en fonction des propriétés que l'on cherche à avoir ou même de l'aspect final du produit.

Les propriétés observées

- Aptitude assez importante à la déformation ;
- Résistance mécanique faible ;
- Résistance élevée à la corrosion quant aux différents agents chimiques et les différentes atmosphères ;
- Aptitude au soudage, anodisation.

Facteurs influant sur les propriétés

- Les teneurs en impuretés (Fer, silicium) ;
- Le niveau de durcissement appliqué ou alors d'adoucissement (lors du recuit).

Propriétés	Alliage 1050
Masse volumique (g/cm ³)	2.7
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100° C)	23.6
Module d'Elasticité (MPa)	69000
Coefficient de poisson	0.33
Conductivité thermique (0 à 100°C)	231
Résistivité électrique (μΩcm)	2.8
Limite élastique (MPa)	20
Allongement (%)	25
Limite à la rupture	60-95

Tableau I.5– Principales propriétés de l'alliage 1050.

I.5.3.2 – Alliages de la série 3000

Utilisée comme substitue des alliages de la série 1000 quand certaines améliorations des propriétés mécaniques sont recherchées, cette série d'alliages Al-Mn se prête aussi à la mise en forme permettant ainsi une diverse utilisation (tôles, barres, tubes, etc.) dans tous les domaines. Pour ce cas, on peut retenir que la teneur en magnésium influe clairement sur les propriétés de ces alliages [11] et pour cette catégorie, on retrouve le plus souvent les deux alliages 3003 et 3004. **Tableau I.6** nous montre l'influence que peut avoir une différence dans la concentration en Mn.

Les propriétés observées

- Aptitude assez importante à l'emboutissage ;
- Résistance mécanique faible mais modifiable lors de l'ajout du magnésium ;

- Résistance élevée à la corrosion quant aux différents agents chimiques et les différentes atmosphères ;
- Aptitude au soudage.

Facteurs influant sur les propriétés

- Les teneurs en magnésium.

Propriétés	Alliage 3003	Alliage 3004
Masse volumique (g/cm ³)	2.73	2.72
Coefficient de dilatation linéique ¹ (0 à 100° C)	23.2	23.8
Module d'Elasticité (MPa)	69000	69 000
Coefficient de poisson	0.33	0.33
Conductivité thermique ² (0 à 100°C)	180	163
Résistivité électrique ³ (μΩcm)	4.2	4.1
Limite élastique (MPa)	120	180
Allongement (%)	5	2
Limite à la rupture (MPa)	140-180	220-265

Tableau I.6– Principales propriétés des alliages 3003 et 3004.

¹ : Expansion à pression constante du volume du corps occasionné par son réchauffement.

² : Energie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps.

³ : Capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique.

I.5.3.3 – Alliages de la série 8000

Contrairement aux deux séries citées préalablement, ces alliages ont des propriétés bien plus différentes car leurs compositions permettent un recyclage facile des déchets et ils sont obtenus sous forme de bandes minces d'une épaisseur allant de 10 à 100 mm. Ces derniers sont réalisés simplement par une coulée continue, un laminage à froid et enfin un recuit [12].

Etant le plus utilisé, on retrouve l'alliage 8011 présentant un bon compromis entre résistance et plasticité le rendant ainsi apte à maintes utilisations et spécialement du type de boitage, capsulage, papier ménager...

I.6 – La canette en Aluminium

I.6.1 – Fabrication de la canette

L'aluminium de base servant à cette fabrication arrive sous forme de lingot qui par la suite passera entre deux laminoirs à une température allant de 455°C à 540°C. Pour éviter tout chauffage lors de cette opération les rouleaux sont refroidit essentiellement par de l'eau (95% d'eau et 5% d'huile) et continuellement. A chaque passage entre les laminoirs, le lingot devient de plus en plus fin et donc plus long jusqu'à atteindre une épaisseur d'un demi centimètre et une longueur de plus de neuf mètre.

Cette étape de laminage à chaud enfin achevée, la plaque est fin prête à être enroulée sur elle-même pour former une bobine qui à son tour passera au laminage à froid afin de réduire d'avantage son épaisseur [13].

Les canettes en aluminium sont tellement légères qu'il est difficile de croire qu'elles ne sont autre qu'un produit obtenu à partir d'un énorme rouleau embobinant une feuille d'aluminium extrêmement fine et qui pèse neuf (09) tonnes par lequel on pourra obtenir un nombre de 750 000 canettes.

a) Découpage

Comme première étape, une presse coupe des disques que l'on appelle des flans depuis le rouleau portant la feuille d'aluminium et effectue un pré-emboutissage pour former des coupelles.

b) Emboutissage

Les coupelles obtenues passent sur une presse d'étirage où des opérations d'emboutissage et d'étirage y sont appliquées pour pouvoir obtenir la hauteur désirée. A cette étape se joint le façonnage du fond de la canette en forme de dôme inversé de sorte à résister à la pression intérieure.

c) Cisaillage

Avec un mouvement rotatif, une cisaille coupe les produits semi-finis de l'intérieure à la hauteur recherchée.

d) Nettoyage

Sachant que ces canettes sont destinées à porter un produit alimentaire à l'intérieur, elles sont préalablement nettoyées avec un rinçage à l'eau puis par un détergeant commercial, passage à l'eau froide, rinçage à l'eau déminéralisée et enfin elles seront séchées et aptes à recevoir un revêtement intérieur.

e) Impression et vernissage

Les boites sont pressées contre un rouleau encreur leur imprimant ainsi les couleurs et les écrits que doivent avoir celles-ci puis un vernis protecteur y est appliqué spécialement sur le fond.

f) Cuisson

Pour traverser le four, les boites sont placées sur un convoyeur afin de sécher l'encre à chaud.

g) Revêtement intérieur

Ce revêtement est spécialement étudié en tenant compte de tous les paramètres pouvant l'influencer puis les boites repassent une autre fois sur le convoyeur afin d'atteindre le four où ce revêtement sera cuit et séché pour qu'enfin le contrôle de porosité de ce dernier soit effectué.

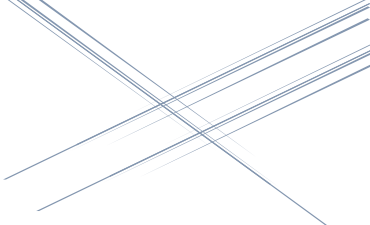
Un bordage est effectué sur la partie supérieure de la canette pour réduire le tour du diamètre car une fois cette étape achevée, la canette est prête à être envoyée chez le demandeur qui se chargera lui-même du remplissage de celle-ci et aussi de la pose du couvercle qui est toujours en aluminium par prévention d'une quelconque corrosion ou détérioration.



Figure I.6 – Etapes de fabrication de la canette [14].

I.6.2 – Recyclage de la canette

Le recyclage de l'aluminium est aujourd'hui une technique permettant de réduire l'énergie de production de celui-ci car on aura moins besoin de matière première et moins d'énergie que pour la production de l'aluminium d'une première fusion. Ce procédé est facilement mis en œuvre et permet d'obtenir des produits pouvant conserver majoritairement les qualités initiales du métal ainsi on y gagne de la matière, de l'énergie, une économie et une réduction importante à l'atteinte de l'environnement.



CHAPITRE II

Traitements thermomécaniques des alliages d'aluminium : Laminage et emboutissage

CHAPITRE II : *Traitements thermomécaniques des alliages d'aluminium : Laminage et emboutissage*

II.1 – Introduction

Les déformations plastiques entrent en jeu lors des traitements mécaniques d'un quelconque métal afin d'augmenter le durcissement de celui-ci, en effet, cette déformation influe sur la structure interne du matériau pouvant ainsi lui modifier ses propriétés mécaniques.

L'aluminium quant à lui, il peut être durci par écrouissage lui conférant des propriétés essentielles de ténacité et de commodité à la mise en forme. Le taux d'écrouissage ou l'écrouissage en lui-même dépend du type du matériau, de la quantité de déformation qui lui est appliquée et des conditions de déformation telle que la température. Ces traitements mécaniques peuvent être appliqués à chaud ou à froid.

II.2 – Déformation de l'aluminium

II.2.1 – Déformation macroscopique de l'aluminium

En tenant compte de la nature du matériau, de sa composition et du taux de déformation, lors de l'exécution du laminage qui déforme plastiquement le lingot d'aluminium aussitôt son passage entre les laminoirs, on remarque généralement une augmentation de la dureté de ce matériau traduisant ainsi l'objectif principal de l'écrouissage [15].

II.2.2 – Déformation microscopique de l'aluminium

Quand on parle de la déformation plastique microscopique on fait référence aux micro-glissements des éléments de la matière les uns par rapport aux autres qui s'accourent lors de l'écrouissage. Les glissements se produisent par rapport aux directions cristallographiques que l'on nomme de dislocations qui ne cessent de se multiplier au cours de cette étape.

Les dislocations bougent les unes par rapport aux autres conduisant ensuite à la réduction de ces mouvements. Donc plus il y'a de dislocations plus il y'aura de déformation ce qui gênera ces dernières dans leurs mouvement. L'immobilité de celles-ci entraîne l'élévation de la limite d'élasticité et donc de la dureté du matériau [15].

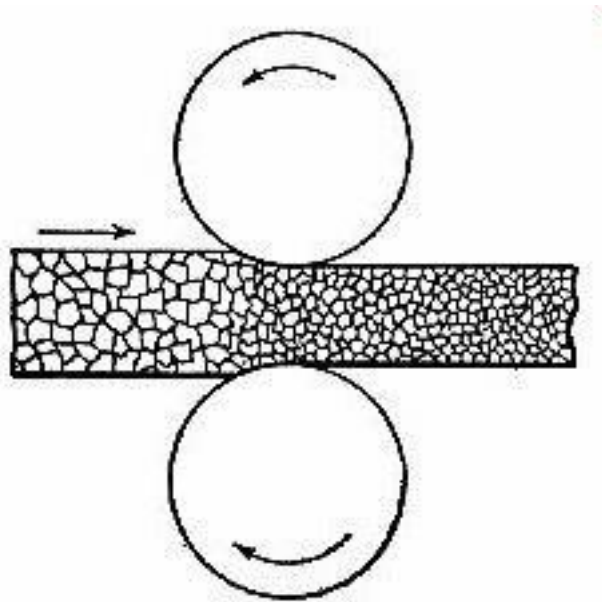


Figure II.1- Evolution de la déformation microscopique (évolution du grain).

II.3 – Le laminage de l'aluminium

Avec deux cylindre tournants dans un sens opposé l'un par rapport à l'autre ; se suit un procédé appelé le laminage, qu'il soit mis en œuvre à chaud ou à froid, son principe reste le même et qui n'est autre que la réduction de l'épaisseur du lingot

d'aluminium obtenu après coulée dans les moules afin d'arriver à des produits semi-finis.

Pour ce faire, on commence toujours par le laminage à chaud pour réduire l'épaisseur au maximum puis une finition y sera apportée lors du passage au laminage à froid.

II.3.1 – Principe du procédé de laminage

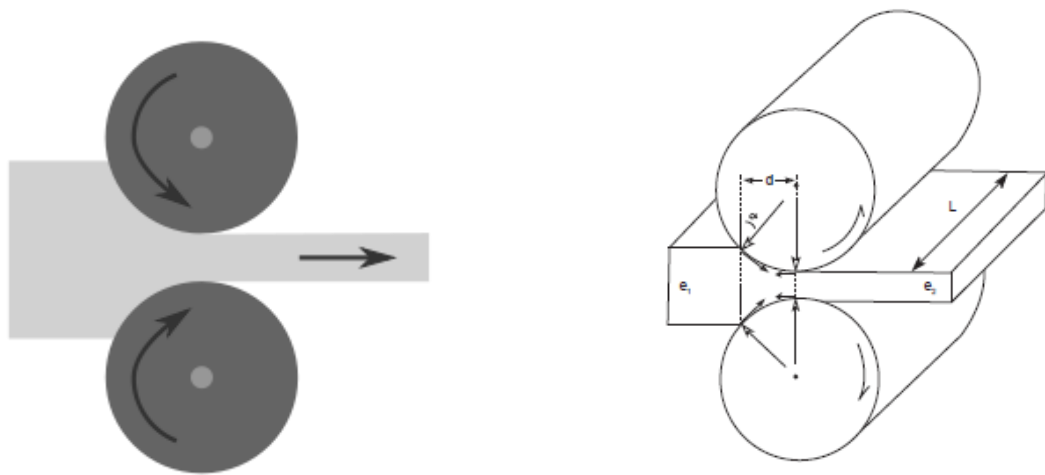


Figure II.2- Principe du procédé de laminage.

La **Figure II.2** illustre schématiquement le procédé du laminage qui montre que lors de l'engagement de la tôle (lingot) ayant pour épaisseur de départ e_1 entre les rouleaux, ceux-ci tournent en sens opposé l'un par rapport à l'autre pour déformer cette tôle lui permettant de ressortir avec une épaisseur e_2 . Pour réduire le métal à l'épaisseur souhaitée, il faudra y procéder en plusieurs passes successives.

La force de compression qui sera appliquée entre les cylindres doit être suffisamment grande pour dompter la résistance élastique du matériau.

On calcul cette force de compression de la forme suivante [16] :

$$Fn = Ys . L . d \dots\dots\dots (1)$$

Tel que
$$d \approx \sqrt{R \cdot (e_1 - e_2)} \dots\dots\dots (2)$$

Avec : Y_s ; Limite élastique du matériau

L ; Largeur de la tôle

d ; Distance d correspondant à une surface donnée de la tôle.

Les forces de frottements aux zones de contact des cylindres empêchent le métal de déborder aux extrémités car lorsque la longueur de contact devient grande devant l'épaisseur comprimée, l'écoulement sera bloqué par le frottement. De ce fait on en conclut que les forces de frottement entraînent une compression plus grande pour déformer plastiquement le matériau et donc réduire l'épaisseur.

A cet instant, le rôle de la lubrification est mis en évidence car même si les forces de frottement sont avantageuses pour faciliter la compression, elles ont de même l'inconvénient de surchauffer le matériau ou les cylindres pouvant ainsi occasionner des dégradations lors de la procédure de mise en forme bien que de cette façon on augmente le nombre de passage du lingot entre les laminoirs.

II.3.2 – Le laminage à chaud

Au préalable, le lingot (ou la plaque) passe par une écouleuse lui permettant de retirer une couche d'au moins trois (3) millimètres dans le but d'égaler la surface et éliminer les impuretés, ainsi on obtient un beau fini.

Par la suite, le lingot passe entre les deux cylindres du laminoir chauffés entre 420°C et 530°C [17] visant à amener la plaque à la température de laminage en tenant compte de la nature du matériau tout en apportant une lubrification continue pour éviter tout chauffage de la plaque ou des laminoirs; autrement dit, il faudrait une énergie considérable pour laminar celle-ci si on ne passait pas par cette étape.

Plusieurs passages entre les laminoirs sont nécessaires pour atteindre le résultat final et désiré avec une épaisseur de quelques millimètres s'accompagnant d'une augmentation de la longueur visant un passage de plus d'une quarantaine de centimètres à quelques millimètres pour pouvoir enrouler la feuille sur elle-même en forme de bobine.

II.3.3 – Le laminage à froid

Appelé aussi le laminage de finition, celui-ci est réalisé à température ambiante permettant d'obtenir des tôles d'aluminium à des dimensions précises avec une homogénéité de la structure de l'alliage prédéfini avec un état de surface tel que souhaité par le demandeur.

Contrairement au laminage à chaud, la plaque de départ qui arrive à cette étape ne fait qu'une épaisseur de quelques millimètres.

A cette étape, la plaque est écrasée entre les laminoirs à plusieurs reprises ainsi pour une deuxième fois la longueur de la bobine augmentera proportionnellement avec la réduction de l'épaisseur.

Pour ce cas de déformation, la lubrification est d'une grande importance car on est censé éviter toute égratignure pouvant abîmer le produit ou risquant de le casser car on réduit le coefficient de frottement par conséquent l'énergie nécessaire au laminage est réduite de peu ce qui évitera le patinage [17].

II.4 – L'emboutissage

Afin de transformer une tôle d'un quelconque matériau, on a recours à plusieurs et différentes méthodes mais l'emboutissage reste le meilleur moyen pour obtenir des formes difficilement concevables.

L'emboutissage permet donc d'avoir à partir de feuille plane et mince, généralement obtenue par laminage à froid ou à chaud, un objet dont la forme n'est pas développable.

II.4.1 – Principe du procédé d'emboutissage

L'emboutissage, un procédé utilisé lors de la conception de pièces ou de formes d'une géométrie assez complexe ayant pour concept l'utilisation ou la nécessité d'une presse hydraulique ou mécanique équipée d'un poinçon et une matrice. La Figure II.3 schématise le principe de ce procédé.

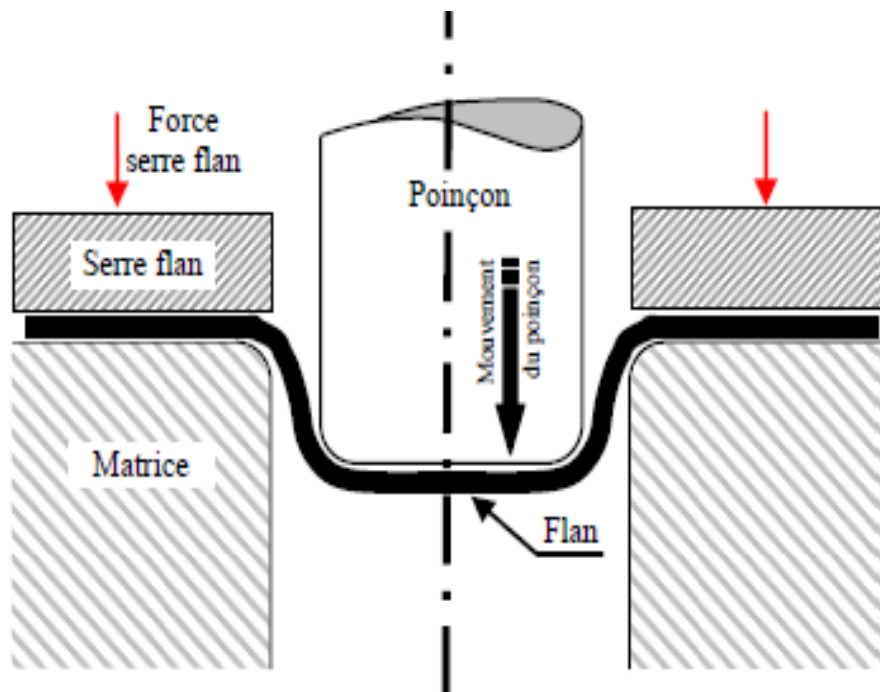


Figure II.3- Principe du procédé d'emboutissage [18].

Comme le montre la Figure II.3, la machine à emboutissage est censé être équipée de trois éléments essentiels à cette réalisation, soit, un poinçon ; une matrice

et un serre-flan. Chacun de ces trois composants joue un rôle dans la réussite de la mise en forme.

Le poinçon

Avec une forme en relief, sur une direction perpendiculaire à la plaque de métal, il épousera la forme intérieure voulue sur celle-ci en préservant son épaisseur de sorte à déformer plastiquement la tôle.

La matrice

Elle sert de socle pour maintenir au départ la matière à emboutir puis au cours du procédé, elle épousera la forme extérieure du produit. Son entrée doit être arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal donc les angles vifs sont à éviter.

Le serre-flan

Comme son nom l'indique, il est le moyen qui fixera légèrement la tôle pour la coincer pendant le poinçonnage en y appliquant une certaine pression tout en lui permettant de fluer. Le produit fini représente le flan qui sera ensuite prêt à l'utilisation après plusieurs passes.

II.4.2 – Etapes du procédé d'emboutissage

II.4.2.1 – Le découpage

Cette étape consiste à préparer la pièce à l'emboutissage et pour ce faire, une découpe est réalisée sur la tôle afin d'obtenir ce que l'on appelle un flan et qui n'est autre qu'une pièce de fine épaisseur obtenue par laminage.

Pour mener à bien cette tâche, la découpe est faite sur une presse contenant une lame tranchante qui pourra réaliser cette fonction sans détériorer la plaque. La pièce

découpée représentera le nouveau matériau de départ pour une nouvelle transformation et les chutes seront rebutées pour être reformées une autre fois.

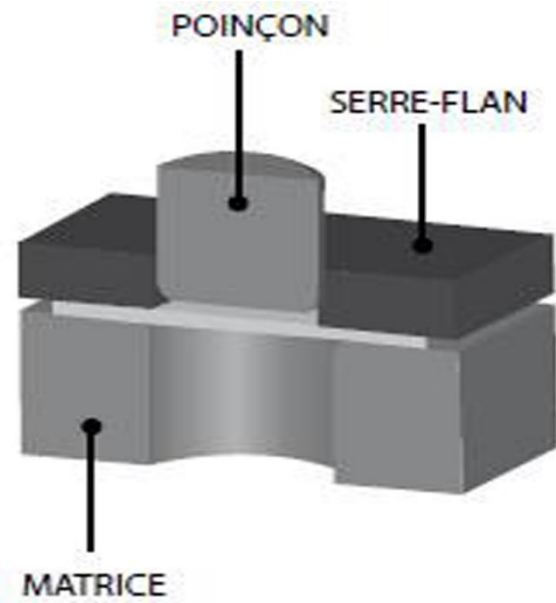
II.4.2.2 – L'emboutissage

Cette partie du travail passe par plusieurs étapes :

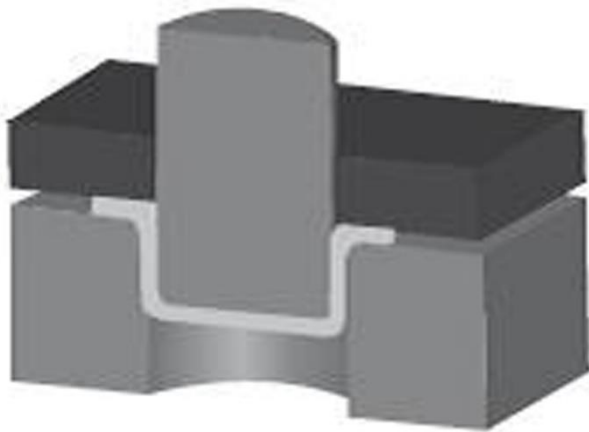
- Positionnement du flan sur la matrice tel que le serre-flan et le poinçon sont relevés et la tôle est préalablement graissée.
- Inclinaison perpendiculaire du serre-flan pour appliquer une pression sur le flan tout en lui laissant la possibilité de fluer.
- Descente du poinçon pour déformer plastiquement la tôle et le fond de la matrice contrera celle-ci pour lui donner la forme voulue.
- Relèvement du serre-flan et du poinçon laissant ainsi son empreinte sur la tôle à présent appelé embouti et qui conservera la forme qu'elle aura acquis vu que pendant la procédure l'élasticité du matériau sera perdue par le taux de déformation.
- Détourage de la pièce en ôtant les parties indésirables soit celles laissées par le serre-flan.



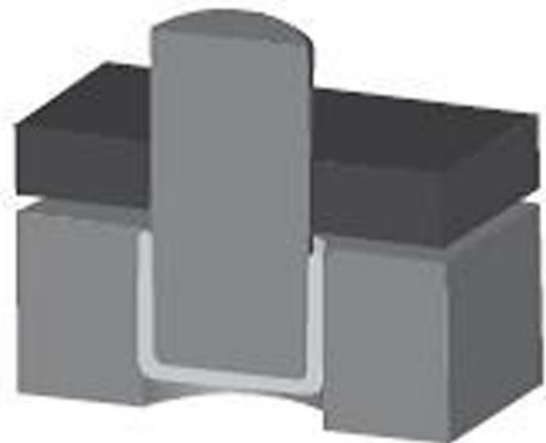
a) pièce de départ



b) Positionnement des composants



c) descente du poinçon



d) Formation de l'embouti



e) Résultat final

Figure II.4- Etapes de réalisation de l'emboutissage.

II.5 – Comportement à l'écrouissage

II.5.1 – Principe du durcissement par écrouissage

Contrairement aux autres traitements qu'on peut apporter aux métaux, l'écrouissage tend à modifier leurs microstructures par déformation plastique modifiant leurs propriétés ce qui influe sur la structure interne.

Dans un premier lieu, l'écrouissage a lieu de façon locale lui permettant ainsi d'absorber l'énergie des sollicitations mécaniques puis la déformation par écrouissage se généralise sur l'ensemble du matériau [15]. Des dislocations sont induites lors de la procédure et leurs nombres augmentent avec l'augmentation de la déformation.

L'écrouissage se caractérise par l'augmentation de la dureté du matériau et de sa limite d'élasticité mais de ce fait il devient aussi plus fragile.

II.5.2 – Lois d'écrouissage

On parle du taux d'écrouissage quand on fait référence à la capacité du métal à s'écrouir qui est estimé par le coefficient d'écrouissage nommé n qui est calculé à partir des courbes de traction rationnelles obtenues après ce même essai sur des éprouvettes normalisées.

Le taux d'écrouissage est défini en chaque point comme étant la pente de la tangente à cette courbe [19].

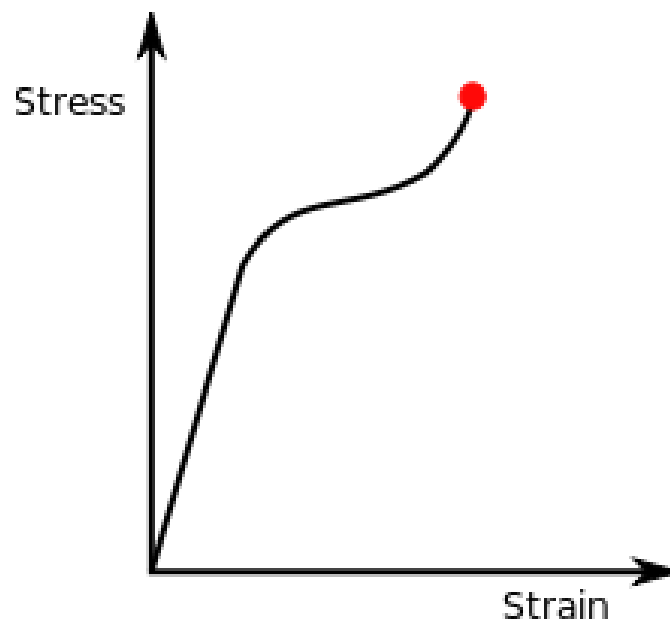


Figure II.5- Courbe de traction rationnelle.

La courbe de traction est obtenue par la transformation des forces et déplacements en contraintes et déformations respectivement.

Soit :

$$\sigma = \frac{F}{S} \dots \dots \dots (3)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} \dots \dots \dots (4)$$

Tel que : σ ; Contrainte réelle (MPa)

F ; Force de traction (N)

S ; Aire réelle de la section de l'éprouvette

ε ; Déformation longitudinale

L ; Longueur de l'éprouvette sous charge (mm)

L_0 ; Longueur initiale de l'éprouvette (mm)

Pour la détermination de la contrainte à partir de la courbe de traction on utilise généralement trois types de lois :

Loi d'Hollomon

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \dots\dots\dots (5)$$

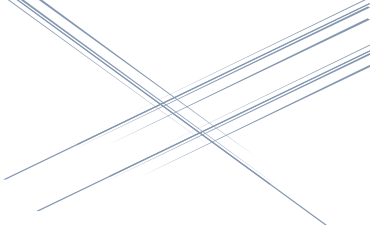
Loi de Ludwig

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot \varepsilon^n \dots\dots\dots (6)$$

Loi de Voce

$$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 - e^{-A\varepsilon}) \dots\dots\dots (7)$$

Où dans chaque cas, n représente le coefficient d'écrouissage.



CHAPITRE III

La corrosion des métaux en général et de l'aluminium en particulier

Chapitre III : *La corrosion des métaux en général et de l'aluminium en particulier*

III.1 – Introduction

La corrosion, un phénomène très courant touchant tous les domaines de la vie quotidienne attise aujourd'hui la curiosité de tous les chercheurs afin de comprendre la complexité de cette manifestation.

La corrosion peut être vue de plusieurs et différents angles selon le domaine de la personne qui en parle. Un constructeur dira que la corrosion est une dégradation du matériau au contact de l'environnement par réaction chimique, un chimiste quant à lui ne parlera que de perte d'énergie et de réduction d'un agent oxydant qui mènera à une réaction d'oxydo-réduction irréversible.

Une définition technique englobant tous ces paramètres peut être donnée tel que la corrosion est une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement [20].

Dans certaines situations, la corrosion est valorisée voire même souhaitée car elle détruit et réduit un bon nombre d'objets abandonnés dans la nature ou même parfois on travaille à corroder un matériau comme dans le cas de l'aluminium lorsqu'il est utilisé comme moyen ornemental. Celui-ci est traité de sorte à oxyder sa surface pour former un film d'oxyde décoratif et qui protégera aussi le matériau des attaques de l'environnement.

III.2 – Notions de corrosion

III.2.1 – Corrosion sèche dite à haute température

Comme son nom l'indique, la corrosion sèche se fait en absence d'électrolyte ¹ aqueux mais les réactions restent de nature électrochimique. Grace à leur conductivité ionique, les oxydes qui se forment à la surface assureront le rôle de l'électrolyte.

A haute température, certains gaz même considérés inoffensifs, peuvent réagir avec les métaux ou les phases non métalliques présentes dans les alliages [21]. Ces gaz sont principalement l'oxygène, vapeur d'eau, hydrogène, gaz carbonique...

III.2.2 – Corrosion aqueuse

On parle de corrosion humide lorsque les agents oxydants sont en solution et donc la réaction sera toujours de nature électrochimique où l'oxygène de l'air intervient simultanément dans la corrosion du métal. Tout matériau réagit différemment à la corrosion selon sa noblesse et la concentration de la solution.

Lors du processus de corrosion, on peut avoir trois (03) phases :

- Une phase métallique ; elle représente le solide soit le métal duquel se déplaceront les électrons et qui subira la réaction.
- Une phase aqueuse ; elle représente le liquide où les ions se déplaceront vers le solide.
- Une phase gazeuse ; elle contiendra l'oxydant.

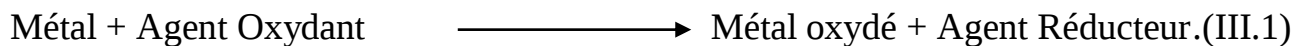
Ce système constituera ce que l'on appelle une micropile et dans ce cas on parlera de :

- L'anode où l'oxydation du métal aura lieu.
- La cathode où se produit la réduction du dioxygène.
- La Circulation des électrons dans la solution aqueuse.

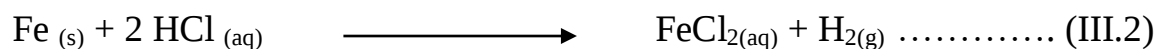
¹ : substance conductrice vu qu'elle contient des ions mobiles.

III.2.3 – Réactions de corrosion

La forme générale d'une équation de corrosion est comme suit :

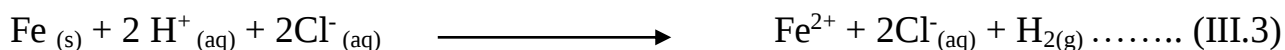


Pour mieux comprendre ce concept, on prend l'exemple de corrosion du fer dans l'acide HCl.



(s), (g), (aq) représentent respectivement une phase solide, gazeuse et aqueuse.

La solution étant aqueuse les réacteurs seront sous forme ionique tel que :



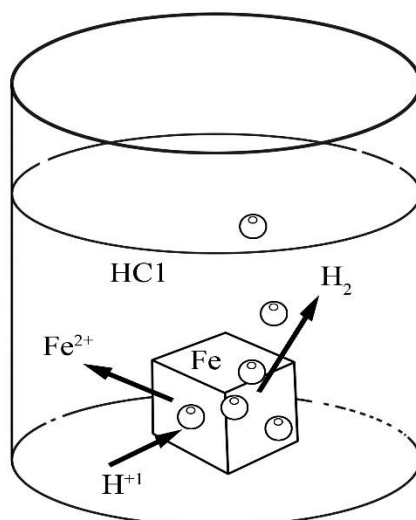


Figure III.1 – Schématisation de la réaction de corrosion du fer en milieu acide [21].

III.3 – Attaques de corrosion

III.3.1 – Corrosion généralisée

Cette corrosion tire son nom du fait qu'elle soit répartie uniformément sur une surface étudiée et c'est le type de corrosion le plus connu car c'est le plus vu même à l'œil nu.

Ce caractère peut être dû à l'homogénéité du comportement intrinsèque du matériau avec une évolution uniforme de la vitesse de corrosion mais ce n'est guère le modèle de corrosion qui pourrait intéresser un chercheur car du point de vue durée de vie, on peut arriver à des résultats avec de simples essais d'immersions d'échantillons.



Figure III.2 – Observation d’une corrosion généralisée sur une pièce en métal (écrou +vis) [22].

III.3.2 – Corrosion localisée

La corrosion localisée ou sélective doit son particularisme à différentes origines tant du côté concernant le matériau ou du côté environnement et on observe plusieurs formes de corrosions localisées dont les plus retrouvées :

III.3.2.1 – Corrosion galvanique

En raison de la présence d’un courant électrique et de deux métaux différents qui sont en contact indirect il s’établit une différence de potentiel entre ces deux métaux ainsi la corrosion s’accroît sur le métal le moins résistant à ce milieu corrosif et l’attaque diminue sur le plus résistant [23].

De ce fait, le métal le moins résistant devient anodique et le plus résistant représentera la cathode qui ne se corrodera que peu.

III.3.2.2 – Corrosion par piqûre

Associée généralement à une rupture locale du film passif ou alors à une passivation incomplète elle constitue une forme d’attaque extrêmement localisée qui peut aboutir à la perforation du métal. Dans la plupart des cas elles sont si petites vu

la petitesse de leur diamètre qu'il est difficile d'étudier ou même les remarquer et elles peuvent être tellement rapprochées qu'elles donneront un effet rugueux à la surface [23].

Un autre type d'étude peut être mené pour ce type de corrosion, il s'agit de la mesure du temps d'incubation ; cela se rapporte au fait d'étudier le temps nécessaire pour qu'une pique se forme et pour qu'elle soit assez détectable ce qui nous rapporte à étudier l'épaisseur du film passif.

III.3.2.3 – Corrosion intergranulaire

A l'état solide tous les métaux peuvent être observés pour voir la microstructure qui est constituée de grains vu leurs structures granulaires. La corrosion intergranulaire se localise aux joints de grains qui prennent pour position l'anode vu leur faible résistance à la corrosion ce qui peut représenter un danger pour la désintégration du métal.

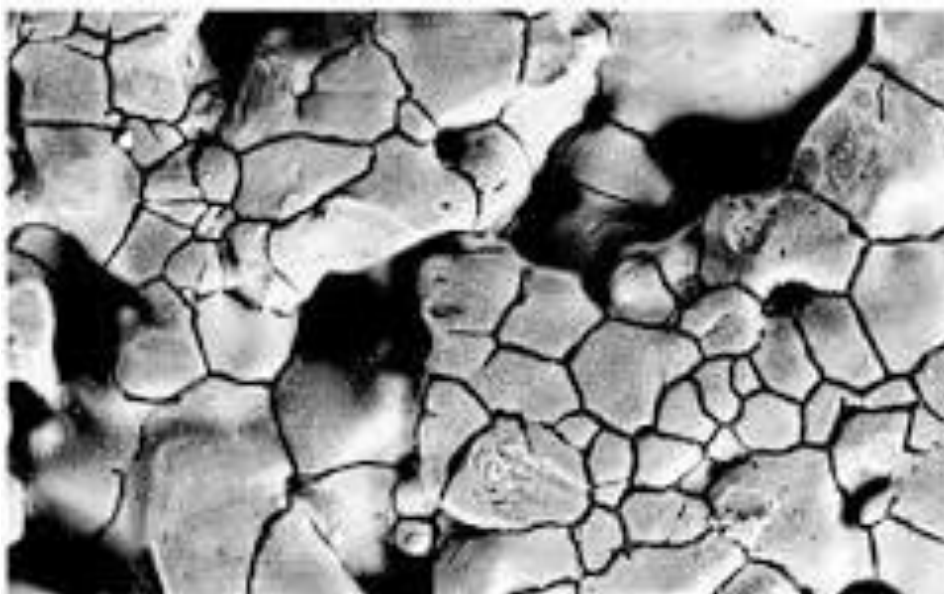


Figure III.3 – Observation d'une corrosion intergranulaire [24].

III.3.2.4 – Corrosion par cavitation

Provoquée en milieu humide, elle est caractérisée par la formation et la réunion de bulles de vapeurs dans le liquide présent au voisinage de la surface du métal.

Pour que les bulles se forment, il faut que la pression du liquide que subira le métal soit faible au commencement puis s'élève par la suite [23]. Ce cas est généralement retrouvé dans les tuyauteries d'aspiration, les turbines hydrauliques...

III.3.2.5 – Corrosion par crevasse

Communément appelée corrosion caverneuse, elle est retrouvée dans des coins d'assemblage de pièces par des boulons, des joints de soudure... car elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre ces deux parties de la structure [21]. Dans ce cas, la partie la moins accessible à l'oxygène sera attaquée.

III.3.2.6 – Corrosion sous contrainte

Comme son nom l'indique, elle est provoquée par l'action simultanée d'une contrainte mécanique et d'un milieu agressif (corrosif). La distribution des contraintes dans une pièce influe sur sa sensibilité à la corrosion sous contrainte [21].

Ce type de corrosion se caractérise par l'apparition de fissures inter ou transgranulaires dont la direction de propagation est en fonction de celle de la contrainte qui peut être d'origine résiduelle, ou thermique [25].

III.3.2.7 – Corrosion érosion

Due à l'action commune d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement de matière, elle a souvent lieu lors de l'écoulement rapide d'un fluide sur un métal qui y

est exposé. L'impact des particules ou des gouttes conduit à une érosion du film protecteur jusqu'à sa disparition.

III.4 – Electrolyse

Grace à une activation électrique, on procède à la conversion d'une énergie électrique en énergie chimique pour permettre la séparation des éléments comme pour l'extraction de l'aluminium (vu au CHAPITRE I).

III.4.1 – Principe du processus

Dans ce cas, on parle de réactions électrochimiques car cela implique un transfert de charge à l'interface entre un conducteur électronique (électrode) et un conducteur ionique (électrolyte).

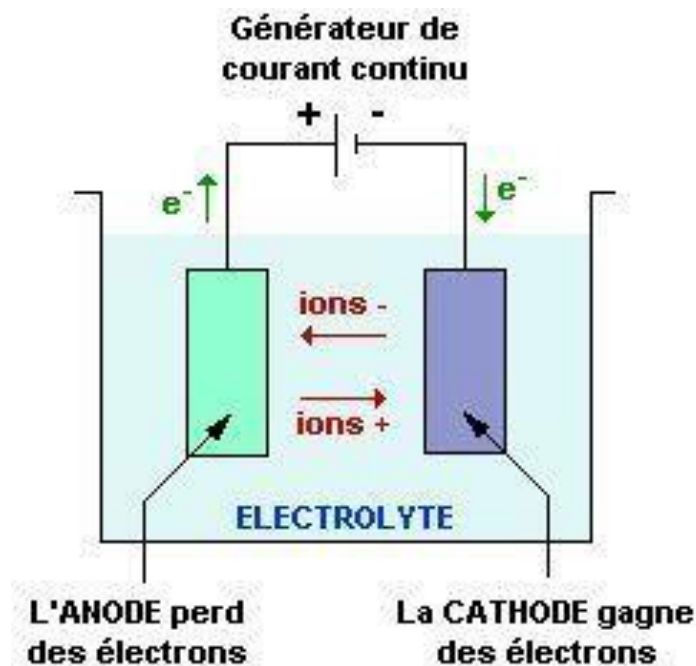


Figure III.4 – Représentation schématique d'une pile électrochimique.

Le principe consiste en une différence de potentiel qui sera appliquée entre deux électrodes immergées dans une solution aqueuse.

Au passage du courant électrique, les électrodes attirent à elles les ions de la charge opposée positive et négative pour la cathode et l'anode respectivement (Figure III.4).

III.4.1.1 – L'anode

Dans l'électrolyse, l'anode représente l'électrode où sont contraint de se diriger les ions négatifs (anions) sous l'effet du champ électrique engendré par un générateur de courant. Ajoutant à cela, c'est le lieu où une réaction d'oxydation se produit.

III.4.1.2 – La cathode

La cathode est par définition contrairement à l'anode, l'électrode recevant les ions positifs (cations) toujours sous l'effet d'un courant électrique traversant la cellule électrochimique. A cet endroit, une réduction se produit ainsi appelée réduction cathodique.

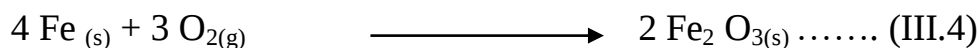
III.4.2 – Réactions partielles

Communément appelées réactions d'oxydoréduction tel que comme vu dans le passage ci-haut, l'élément ou l'électrode recevant les électrons est appelé oxydant et évidemment celui qui les cède représente le réducteur.

III.4.2.1 – L'oxydation

Toute combinaison avec de l'oxygène (O_2) représente une oxydation tel que dans la réaction chimique un élément se combine à un ou plusieurs atomes d'oxygène pour produire l'oxyde de ce même élément.

En continuant avec l'exemple du fer, sa combinaison avec l'oxygène produit de la rouille suivant la relation suivante :



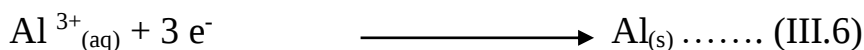
Ceci dit, quand on parle de cellule électrochimique, on pointe la perte d'électrons donc la formule d'oxydation à l'anode prend la forme suivante :



III.4.2.2 – La réduction

Contrairement à l'oxydation, pour ce cas de réaction on cherche à extraire un métal de son oxyde comme utilisé généralement en industrie pour l'extraction de l'aluminium à partir de l'alumine.

On parlera dans ces cas, de gain d'électrons.



Par la suite, à partir des réactions partielles on arrive à construire une réaction globale en additionnant ces deux dernières.

III.5 – Cinétique de corrosion

III.5.1 – Vitesse de corrosion

La vitesse des réactions des électrodes dépend du potentiel donc on en conclue qu'elle varie linéairement avec la densité du courant, selon la méthode employée ; étude du potentiel ou du courant on obtient respectivement les courbes de polarisation potentiostatique et galvanostatique ($i = f(E)$ et $E = f(i)$ respectivement) selon la loi de Faraday [21].

III.5.2 – Contrôle du potentiel

Pour réaliser ce travail, une électrode de travail et une électrode de référence sont indispensables pour lesquelles on mesure l'écart de potentiel aux extrémités de celles-ci à l'aide d'un voltmètre.

Quand le métal est plongé dans une solution corrosive, il est préférable de mesurer le potentiel car il est en relation directe avec la résistance à la corrosion de celui-ci.

Le même métal ne peut être utilisé comme deuxième électrode car les potentiels seront identiques donc aucune lecture ne sera possible. Il est souhaitable de connaître les potentiels des électrodes afin de pouvoir les comparer les uns aux autres [23].

III.5.3 – Spectroscopie d'impédances électrochimiques

Pour la détermination des caractéristiques des phénomènes intervenants lors de la corrosion (phénomènes de transfert de charges, de l'adsorption et de la diffusion) au niveau de l'interface, l'analyse du système par spectroscopie d'impédances électrochimiques est une technique adéquate.

III.5.4 – Mesure quantitative du taux d'oxydation

La mesure de la perte de masse du métal, de la couche d'oxyde formé à la surface nous renseigne aussi sur la cinétique de la corrosion du matériau.

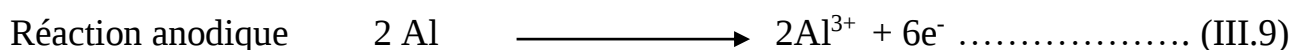
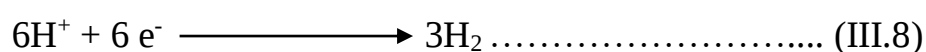
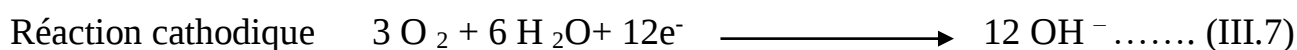
III.6 – Corrosion de l'aluminium et ses alliages

L'aluminium fait partie des métaux les plus facilement oxydables de par son potentiel standard qui est très électronégatif valant -1.66 V/ENH^1 . L'oxyde d'aluminium se forme pratiquement de manière instantanée au contact d'un environnement qui est susceptible de l'attaquer car dans un milieu corrosif l'aluminium est sujet à ce phénomène sous plusieurs formes ² et qui dépendent de la proportion du polluant.

Dans une solution neutre, la corrosion de l'aluminium et ses alliages est basée sur la dissolution des atomes de celui-ci. Dans ce cas, la dissolution du métal représente la réaction anodique et la réduction des molécules d'eau ou d'oxygène ce sera la réaction cathodique [25].

Les réactions de dissolutions sont comme suit [26] :

Dans une solution naturellement aérée



III.6.1 – Rôle du film d'oxyde

La tenue à la corrosion de l'aluminium n'est due qu'à la présence de ce même film sur le métal en question appelé couramment alumine le rendant ainsi passif à l'environnement où son épaisseur est comprise entre 5 et 10 nanomètres et sa stabilité dépend en particulier des caractéristiques du milieu environnant.

¹ : Volt par rapport à l'électrode normale à hydrogène (voir Annexe 2)

² : Citées en partie III.3.2

La vitesse de dissolution du film dépend du pH entre autre du milieu corrosif, donc elle sera très avancée en milieu acide et faible en milieu ayant un pH proche de 5 à 9.

III.6.2 – La passivité

La passivité représente la raison simple pour laquelle un métal ne se corrode pas quand il le devrait, de ce fait il présentera une tenue plus noble que ce que pourrait prévoir les études thermodynamiques [23].

L'aluminium est un métal réactif se trouvant situé en haut des valeurs des f.e.m (Annexe 2) or il possède la particularité de résister à la corrosion car il forme rapidement une couche d'oxyde qui le protégera par la suite.

III.7 – Facteurs influant sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages

III.7.1 – L'ion Chlorure

Les ions de chlorure (Cl^-) ont tendance à déstabiliser et à attaquer la couche d'oxyde qui se forme à la surface de l'aluminium localement ou totalement.

Ces ions sont pratiquement présents dans tous les domaines où sont utilisés les alliages d'aluminium et même des autres métaux comme les aciers inoxydables.

Une dissolution locale provoquerait l'amincissement du film passif par une pique qui favorisera l'accrochage des chlorures [27].

III.7.2 – pH

La **Figure III.5** montre que pour n'importe quel pH, le potentiel de l'électrode normale à hydrogène (ligne passant par $E^\circ(\text{V}) = 0$) est supérieur au potentiel des réactions de la zone B et D décrivant l'équilibre entre l'aluminium et les espèces dissoutes.

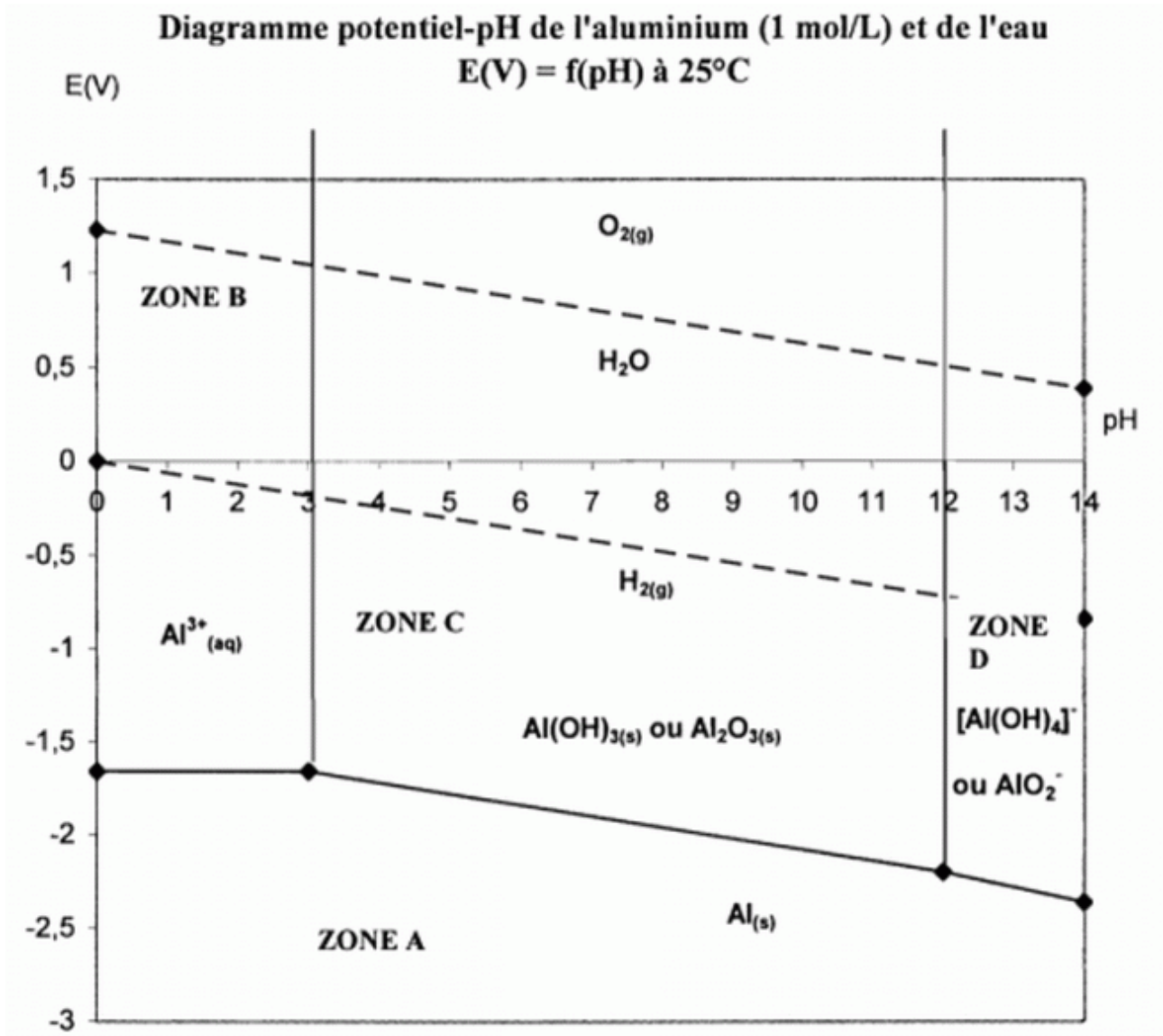


Figure III.5 – Diagramme potentiel – pH de l'aluminium à 25°C.

Le diagramme potentiel – pH n'informe que sur la possibilité de corrosion de l'aluminium en fonction des conditions de potentiel et de pH et non pas sur la vitesse de corrosion.

Notons que les zones sur la figure représentent :

- Zone A : Domaine d'immunité
- Zone B : Domaine de corrosion
- Zone C : Domaine de passivation

- Zone D : Domaine de corrosion

III.7.3 – Eléments d'addition (alliages)

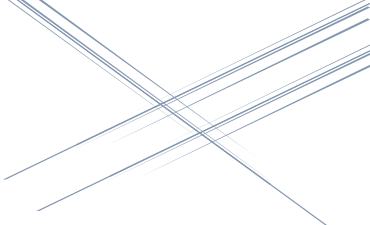
Chaque famille ou série d'alliages d'aluminium porte un élément qui a une présence plus prononcée que les autres composants, ces concentrations influent spontanément sur le potentiel de dissolution des alliages comme pour le cas du zinc qui diminue le potentiel de corrosion et le cuivre qui modifie les valeurs du négatif au positif [28].

III.8 – Protection de l'aluminium et ses alliages

Pour remédier à l'attaque que subit l'aluminium ou ses alliages, on a recours à plusieurs procédés visant cet effet comme :

- Anodisation,
- Revêtements,
- Prévention par études de formes adaptées des pièces,
- Prévention par affinage lors du choix du matériau.

Pour les alliages d'aluminium, leur comportement à la corrosion ne diffère pas trop de celui du métal pur néanmoins certains éléments accentuent ce phénomène car selon les conditions de traitements, les phases intermétalliques précipitent aux joints de grains causant ainsi une corrosion intergranulaire [21].



CHAPITRE IV

*Anisotropie des métaux en général et de
l'aluminium et ses alliages en particulier*

CHAPITRE IV : *Anisotropie des métaux en général et de l'aluminium et ses alliages en particulier*

IV.1 – Introduction

Lorsqu'un matériau est sollicité en déformation plastique lors de l'application de certains procédés de transformation (laminage, emboutissage) en vue d'une quelconque fabrication, celui-ci aura une structure dite anisotrope de par ces évolutions.

L'anisotropie, ou la structure anisotrope renvoie aux propriétés et aux caractéristiques mécaniques d'un matériau qui se différencient d'une direction à une autre modifiant ainsi le comportement de ce dernier quant aux charges ou aux applications.

IV.2 – Notions, Isotropie – Anisotropie

Pour étudier les propriétés d'un matériau, on a recours à une échelle microscopique afin de déterminer les spécificités du comportement mécanique qu'il est susceptible d'adopter sous contrainte physique ou chimique soit-elle.

On développera ci-après les notions d'homogénéité, isotropie et anisotropie pour différencier celles-ci et arriver à identifier l'influence de l'anisotropie.

IV.2.1 – Homogénéité

L'homogénéité d'un matériau réfère au fait que les propriétés d'une pièce doivent être les mêmes en tout point de la structure et la validité de ce concept dépend toujours de l'échelle à laquelle on souhaite l'utiliser.

L'étude d'un modèle homogène ne permet en aucun cas de prédire le comportement d'un matériau à l'échelle du micromètre [29].

IV.2.2 – Isotropie

Distinctement de l'homogénéité, l'isotropie est une grandeur physique interprétant la similitude des propriétés du matériau dans toutes les directions de l'espace.

L'isotropie convient à un espace indifférencié dans lequel les déplacements peuvent prendre n'importe quelle direction sans pour autant influencer sur le comportement du matériau.

IV.2.3 – Anisotropie

Au sens littéraire du terme, l'anisotropie est la qualité d'un corps ou d'un milieu dont les propriétés optiques, physiques ou mécaniques varient selon les directions.

Les propriétés macroscopiques anisotropes sont une conséquence de la structure du cristal à l'échelle microscopique [30].

L'anisotropie découle de l'hétérogénéité de la microstructure d'un matériau et l'origine de cette anisotropie ne peut se déterminer que par l'analyse de cette altérité.

On parle généralement de l'anisotropie d'organisation pointant ainsi la disparité présente dans les microstructures touchant la répartition des éléments au même rang que l'orientation [31].

IV.3 – Etude de l'anisotropie

A cause de l'évolution de la texture d'un matériau polycristallin celui-ci peut présenter un comportement anisotrope.

Suivant différents cas, l'anisotropie peut être néfaste ou bénéfique [32] donc il est nécessaire de prévoir l'anisotropie à partir du comportement du grain c.à.d. des propriétés du monocristal.

IV.3.1 – Coefficient d'anisotropie

Pour évaluer l'anisotropie mécanique, on a recours au calcul du coefficient d'anisotropie dit coefficient de Lanckford « r » calculé comme suit :

$$r = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \dots\dots\dots (1)$$

Avec : ϵ_2 ; Déformation en direction de la largeur

ϵ_3 ; Déformation en direction de l'épaisseur

Le coefficient de Lanckford se détermine au cours des essais de traction en évaluation de la déformation plastique transversale par rapport à celle engendrée suivant l'épaisseur, ainsi on arrivera à déterminer la capacité du matériau à la formabilité.

La conclusion est tirée avec une comparaison qui sera faite sur le coefficient même tel que :

- Si $r < 1$ alors la tôle se déforme beaucoup plus suivant son épaisseur que dans son plan.
- Si $r > 1$ alors la tôle se déforme aisément suivant son plan que suivant son épaisseur.
- Si $r = 1$ dans ce cas, la déformation est isotrope sachant que la déformation accrue suivant le plan et l'épaisseur est la même.

IV.3.2 – Anisotropie normale

Une fois l'essai de traction réalisé éventuellement sur une machine de traction donnant instantanément les déformations sur des éprouvettes ou une tôle destinée à cet effet pour trois directions suivant celle du laminage soit ; 0° , 45° et 90° ; on arrive à évaluer le coefficient d'anisotropie ainsi :

$$r_n = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

De ce fait, on peut mesurer la variation de r communément appelée coefficient d'anisotropie planaire :

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$

L'anisotropie peut être aussi constatée sur les valeurs de la résistance à la traction, de l'élasticité, du coefficient d'écrouissage, de l'allongement ... en fonction de la direction de traction.

IV.4 – Influence de l'anisotropie

IV.4.1 – Module d'élasticité

Métal	[100]	[110]	[111]
Aluminium	63.7	72.6	76.1
Cuivre	66.7	130.3	191.1
Fer	125.0	210.5	272.7
Tungstène	384.6	384.6	384.6

Tableau IV.1– Module d'élasticité en fonction de la distribution cristallographique pour les métaux cités.

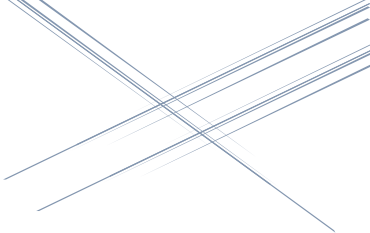
Comme illustré par le tableau ci-haut, on déduit facilement que la direction des plans influe amplement sur les valeurs du module d'élasticité obtenues comme pour le cas du fer et du cuivre : les résultats suivant la direction [110] sont deux fois plus grands que ceux de la direction initiale [100] donc on en conclut que ce n'est que l'anisotropie que présentent ces métaux qui est à l'origine de ces différences.

IV.4.2 – Magnétisme

Pour de grandes performances magnétiques une certaine structure est recherchée. De sorte à avoir la structure cubique d'un matériau, les tôles sont laminées à froid puis recristallisées comme dans le cas du fer [33].

IV.4.3 – La corrosion

La corrosion des matériaux laminés est orientée dans la direction du laminage.



CHAPITRE V

Techniques expérimentales

CHAPITRE V : *Techniques expérimentales*

V.1 – Introduction

Le présent chapitre traite sur les techniques expérimentales dont on a usé lors de la réalisation de cette étude pour aboutir à la caractérisation du matériau.

Le but de ce travail est d'étudier en premier lieu le comportement mécanique du matériau ensuite de se pencher sur la morphologie et la cinétique de sa corrosion en faisant varier les conditions d'essais.

V.2 – Matériau étudié

Les essais sont réalisés sur des tôles d'aluminium obtenues à partir de canettes pour boissons gazeuses provenant elles-mêmes de lingots d'aluminium laminés et préformés pour subir un emboutissage afin d'avoir cette même forme.

Pour la fabrication de ces canettes, la nuance d'aluminium la plus utilisée est l'alliage 8011 qui est utilisé également pour la production du papier emballage alimentaire. Favorisé par sa pureté commerciale de concentration en Aluminium allant de 97.3 à 98.9% et son aisance au recyclage, sa composition chimique est comme suit [35]:

Tableau V.1— Composition de l'alliage 8011.

Eléments	Concentration %
Silicium (Si)	0.50 à 0.90
Fer (Fe)	0.60 à 1.0
Cuivre (Cu)	≤ 0.10
Manganèse (Mn)	≤ 0.20
Magnésium (Mg)	≤ 0.05
Chrome (Cr)	≤ 0.05
Zinc (Zn)	≤ 0.10
Titane (Ti)	≤ 0.08
Autres, chaque	≤ 0.05
Autres, au total	≤ 0.15

**Figure V.1**- Transformations apportées à la canette en coupant les embouts supérieur et inférieur.

Hauteur (mm)	Hauteur sans les embouts (mm)	Diamètre (mm)	Epaisseur (mm)	Poids (g)
116	90	66	0.19	13.65

Tableau V.2– Caractéristiques de la canette 33cl.

V.3 – Caractérisation microscopique

V.3.1 – Préparation micrographique des échantillons

V.3.1.1 – Enrobage

La tôle étant d'une fine épaisseur (0.19 mm), on aura du mal à manier l'échantillon qui y sera prélevé et pour cela, on réalise un enrobage à l'aide d'une pâte appelée colle ABRO afin de faciliter les étapes qui suivront celle-ci.

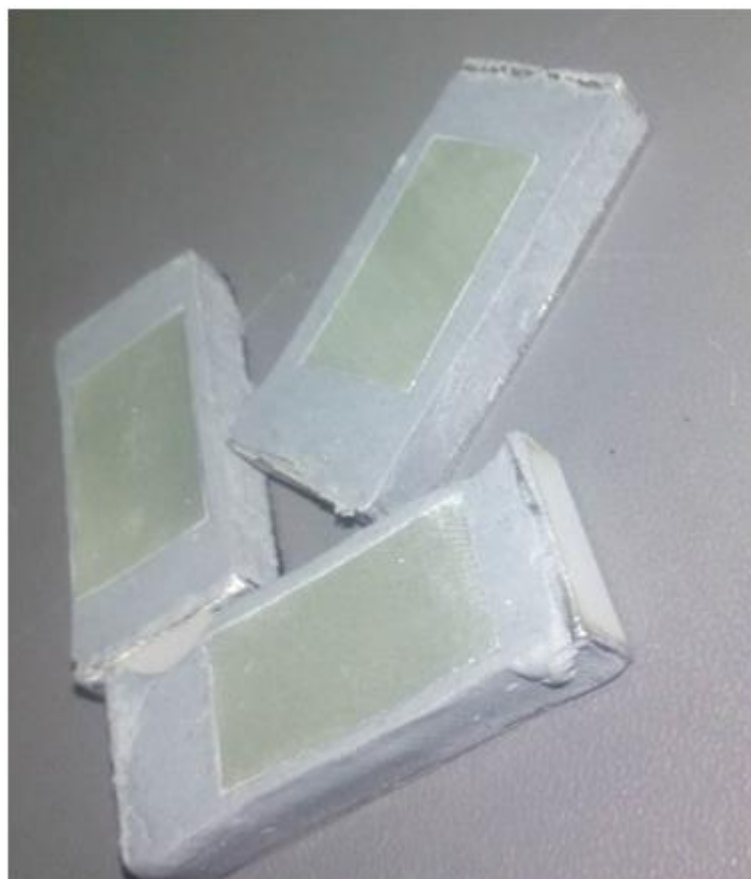


Figure V.2- Enrobage de trois échantillons suivant X, Y et Z.

V.3.1.2 – Polissage

Le polissage est une opération visant l'obtention d'un fini ou un état de surface adéquat à une étude micrographique. Dans notre cas, cette étape est réalisée afin d'enlever la couche de vernis qui recouvre l'intérieur des canettes et que l'on met comme revêtement de protection.

L'étape de polissage se fait avec le passage de l'échantillon par plusieurs papiers abrasifs de granulométrie décroissante 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 puis on termine avec la finition au 4000. Pour ce qui est de nos échantillons, on n'a utilisé que le papier de granulométrie 1200 et une finition au 4000 pour enlever la couche de revêtement intérieur car l'épaisseur de la tôle ne permet pas ce passage de plusieurs papiers et ceci pour qu'il ne y'ai pas d'arrachements.

V.3.1.3 – Attaques chimiques

L'attaque chimique est un moyen permettant l'observation de la microstructure car les constituants n'auront plus de pouvoir réfléchissant après l'attaque.

Pour le cas de l'aluminium, le réactif utilisé est le réactif de KELLER de composition donnée par le tableau suivant :

Composant	Acide nitrique (HNO ₃)	Acide Chlorhydrique (HCl)	Acide Fluorhydrique (HF)	Eau distillée (H ₂ O)
Quantité (%)	2.5%	1.5%	1%	95%

Tableau V.3– Composition chimique du réactif de Keller.

V.3.2 – Microscope optique

Une analyse micrographique est réalisée sur tous les échantillons, avant et après attaque chimique, à des temps d'immersion différents dans des solutions distinctes en faisant varier le paramètre de préparation de l'échantillon (échantillon poli, échantillon sans suppression du vernis et échantillon décapé par le diluant).

Pour ce faire, on utilise deux microscopes optiques, le premier de marque HUND WETZLAR relié à un ordinateur permettant la transmission de l'image observée grâce à une caméra accolée à ce microscope permettant ainsi d'aller jusqu'à un grossissement de 400X et l'acquisition de cette image se fait au logiciel de traitement Piced CORA. Le deuxième de marque EUROMEX n'est guère muni de caméra permet un grossissement allant jusqu'à 1000X.



Figure V.3- Microscope optique avec transmission de marque HUND WETZLAR.



Figure V.4- Microscope optique de marque EUROMEX.

V.3.3 – Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Contrairement au microscope optique à transmission, le MEB se base sur la détection des électrons secondaires de la surface sous l'impact d'un fin pinceau d'électrons [34] primaires balayant la surface à observer et permettant ainsi l'obtention des images, de ce fait, il est considéré comme étant une technique puissante d'observation de la topographie des surfaces. Nous avons observé les trois types d'échantillons au MEB.



Figure V.5: Microscope électronique à balayage (Philips ESEM–XL30SEM).

V.4 – Caractérisation mécanique

V.4.1 – Microdureté Vickers

Contrairement à la dureté Vickers, la microdureté se fait sous une charge de quelques grammes à une centaine de grammes. De même que dans ce cas, la dureté est donnée sur l'écran de l'appareil ce qui n'est pas le cas du duromètre où la dureté HV doit se calculer par la loi suivante :

$$HV = F/S \dots\dots\dots (1)$$

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

Où, A est l'angle au sommet du pénétrateur et d est la diagonale de l'empreinte.

Pour cet essai, nous usons d'un microduromètre de marque ZWICK Roell Indentec doté d'une lunette permettant de visualiser l'empreinte laissée par le pénétrateur qui a une forme en diamant à base carrée avec un angle au sommet formant 136° pour ainsi sélectionner la diagonale pour laquelle l'appareil nous donnera la valeurs de la dureté HV.

Plusieurs essais sont faits pour un même échantillon sur une même ligne pour qu'on puisse calculer la moyenne pour des résultats plus sûrs et ceci suivant les trois

directions de l'étude. La force appliquée est de 0.05 Kgf où le pénétrateur touche la surface pendant 20 secondes.

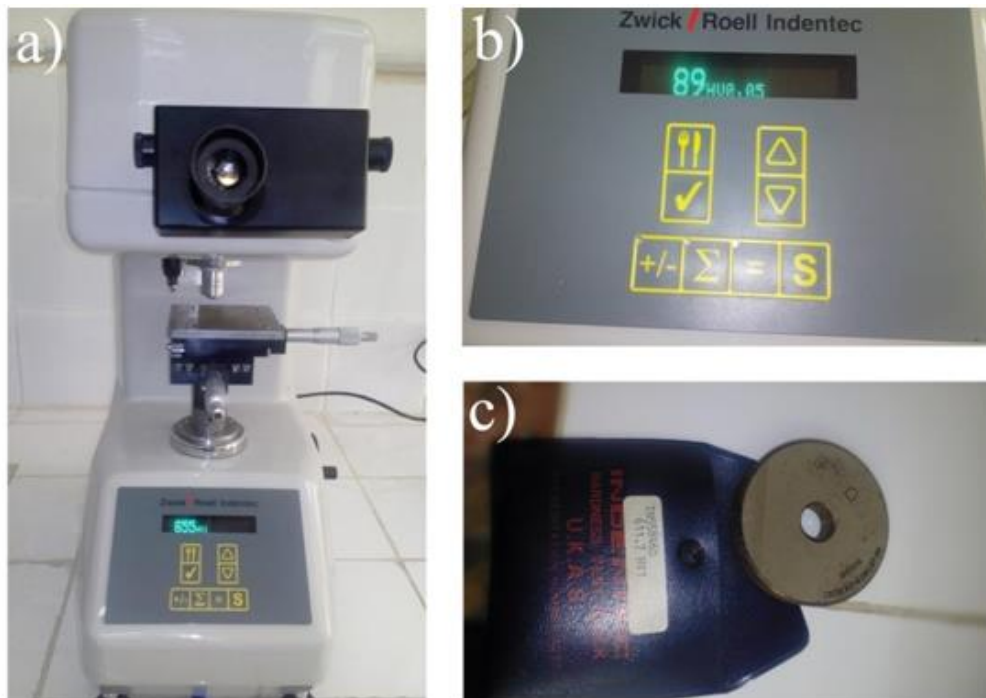


Figure V.6 - a) Microduromètre, b) écran affichant la dureté HV, c) étalon.

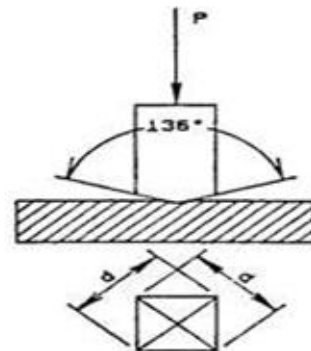
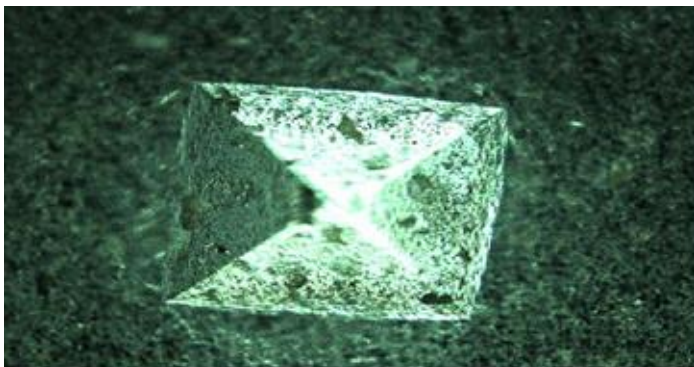


Figure V.7- Empreinte laissée par le pénétrateur du microduromètre.

V.4.2 – Essai de traction

V.4.2.1 – Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes plates sont découpées à partir de la tôle des canettes selon une norme ASTM E8 (voir annexe 3) suivant trois directions X, Y et Z représentant

respectivement 0° , 90° et 45° . Vu la faible épaisseur à laquelle on a affaire, les éprouvettes sont découpées à l'aide de ciseaux en suivant la forme exacte retracée sur la tôle.

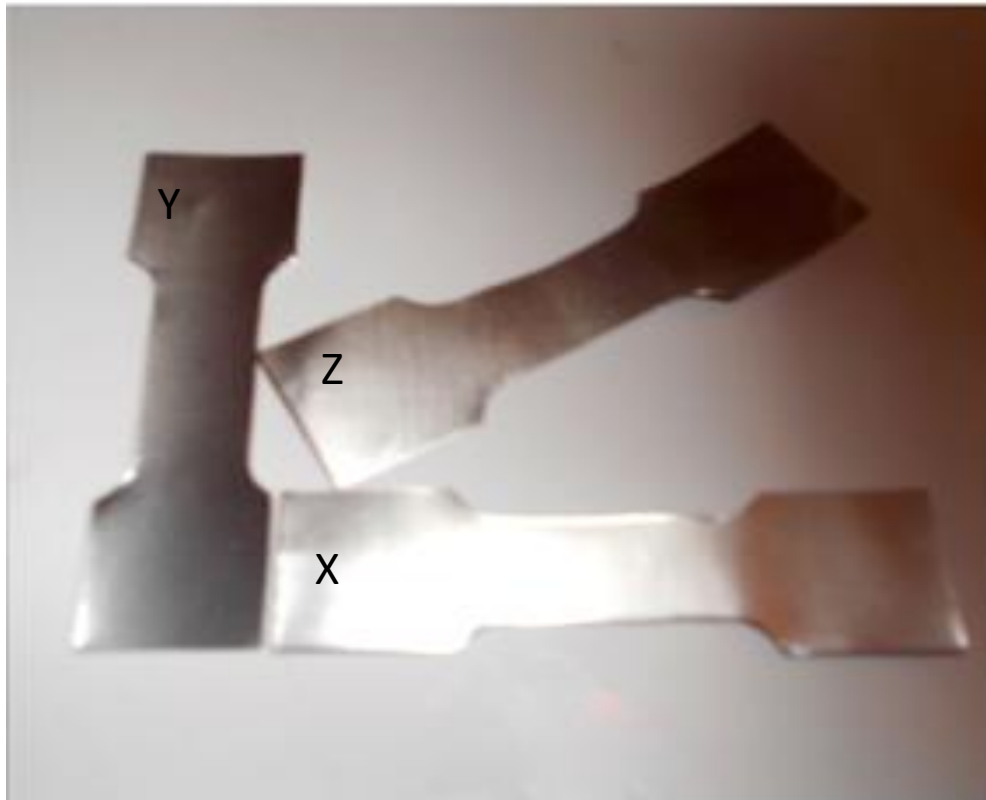


Figure V.8- Eprouvettes prélevées des canettes suivant les différentes directions.

V.4.2.2 – Réalisation de l'essai

Pour étudier l'anisotropie d'un matériau on a recours à l'étude de son comportement et sa réponse aux sollicitations lors de la traction. Pour cet essai, on a opté pour un nombre de trente (30) éprouvettes soit dix (10) éprouvettes par direction pour une déformation à froid et un avancement de 2 mm/min.

L'éprouvette est placée entre les mors de la machine et l'essai ne se termine qu'à la rupture.

Les valeurs de la force données en KN et du déplacement en mm nous permettront par la suite de déterminer la courbe de traction ; contrainte en fonction de la déformation.



Figure V.9- Machine de traction de marque ibertest.

V.4.2.3 – Courbes de traction

Les valeurs données et mesurées lors de l'essai sont la force et le déplacement ou l'allongement ΔL donc pour avoir la courbe on doit apporter les modifications suivantes pour avoir la contrainte et la déformation :

$$R = F / S_0 \dots\dots\dots (3) \quad \text{et} \quad \epsilon = \Delta L / L_0 \dots\dots\dots (4)$$

Dans notre cas, on détermine le diagramme rationnel quand on détermine les contraintes et les déformations vraies telles que dans cette situation, la contrainte et la déformation se calculent comme suit [35] :

$$\sigma_v = F / S \dots\dots\dots (5) \quad \text{et} \quad \epsilon = \ln (L / L_0) \dots\dots\dots (6)$$

Tel que : $\sigma_v = \sigma_c [(L_0 + \Delta L)/L_0]$ (7)

et $\epsilon = \ln (L/L_0) = \ln (S_0/S)$ (8)

Avec S : section instantanée de l'éprouvette lors de l'essai,

σ_v : Contrainte vraie.

V.5 – Caractérisation chimique

V.5.1 – Corrosion libre

L'évolution de la morphologie de corrosion des échantillons est suivie tout au long de 20 jours, les examens micrographiques pour l'étude de la morphologie de corrosion sont effectués à des temps d'immersion différents.

Pour cet essai, on varie l'échantillonnage et les solutions, tel qu'on aura 3 types d'échantillons (Echantillon poli par le polissage mécanique, échantillon décapé par un diluant et échantillon sans suppression du vernis) en immersion dans une solution de chlorure de sodium (NaCl à haute pureté) de concentration de 0.3% et 3%.



Figure V.10- Corrosion libre de l'aluminium dans une solution de NaCl.

V.5.2 – Corrosion en présence de champ magnétique permanent

En tenant compte du fait que l'aluminium de l'étude soit obtenu à partir d'une canette pour boisson gazeuse et que celle-ci puisse passer des journées entières dans un réfrigérateur, un essai de corrosion en présence d'un aimant est réalisé en faisant référence au champ magnétique induit par le moteur électrique de ce dernier.

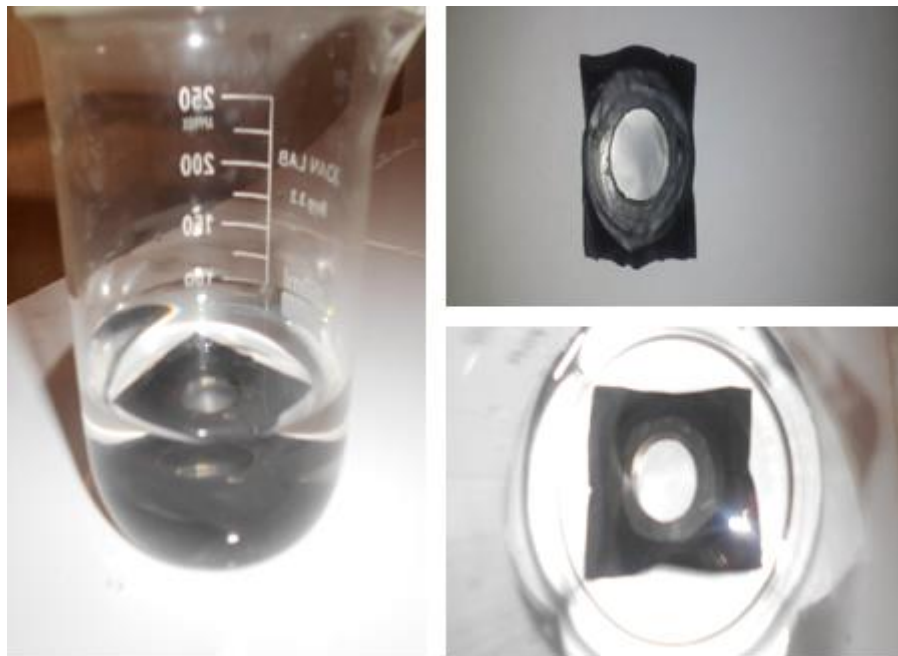


Figure V.11- Corrosion de l'aluminium dans une solution de NaCl en présence d'un champ magnétique permanent.

Cet essai est fait dans le but de voir le comportement du matériau en tant que canette et en tant que tôle d'aluminium ayant subie un laminage et emboutissage sans avoir eu de revêtement intérieur d'où l'utilisation d'un échantillon poli et un autre non. L'essai de la morphologie de corrosion libre en présence du champ dans une solution de 0.3% NaCl est réalisé durant trois (03) jours.

V.5.3 – Potentiel de corrosion

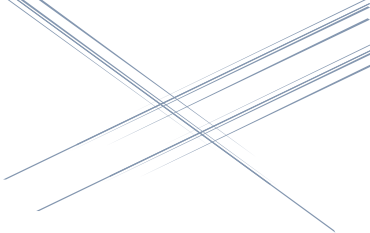
Pour effectuer ce test, on a utilisé une cellule de corrosion à montage de deux électrodes, l'électrode de référence Ag/AgCl obtenue par l'immersion du fil d'argent dans l'Hypochlorite de sodium par contre l'électrode de travail est l'alliage étudié. Les deux électrodes ont été immergées dans une solution de NaCl (0.3% et 3% de concentration) pour les trois types d'échantillons (poli, décapé et non décapé).

L'unité de mesure du potentiel est le V ou le mV par rapport au potentiel de l'électrode Ag/AgCl.

On immerge dans la solution électrolytique l'électrode de référence et à l'instant où la deuxième électrode est immergée, on prend les valeurs du potentiel affichées sur le multimètre relié aux deux électrodes ainsi on pourra caractériser l'évolution du potentiel libre de corrosion de l'alliage étudié en fonction du temps.



Figure V.12- Dispositif utilisé pour la mesure du potentiel de corrosion de l'aluminium dans une solution de NaCl.



CHAPITRE VI

Résultats et discussions

CHAPITRE VI : Résultats et discussions

VI.1 – Microstructures de l’alliage étudié

VI.1.1 – Microstructure avant et après corrosion de 30 secondes dans le réactif de KELLER et dans le réactif de 1% de NaOH

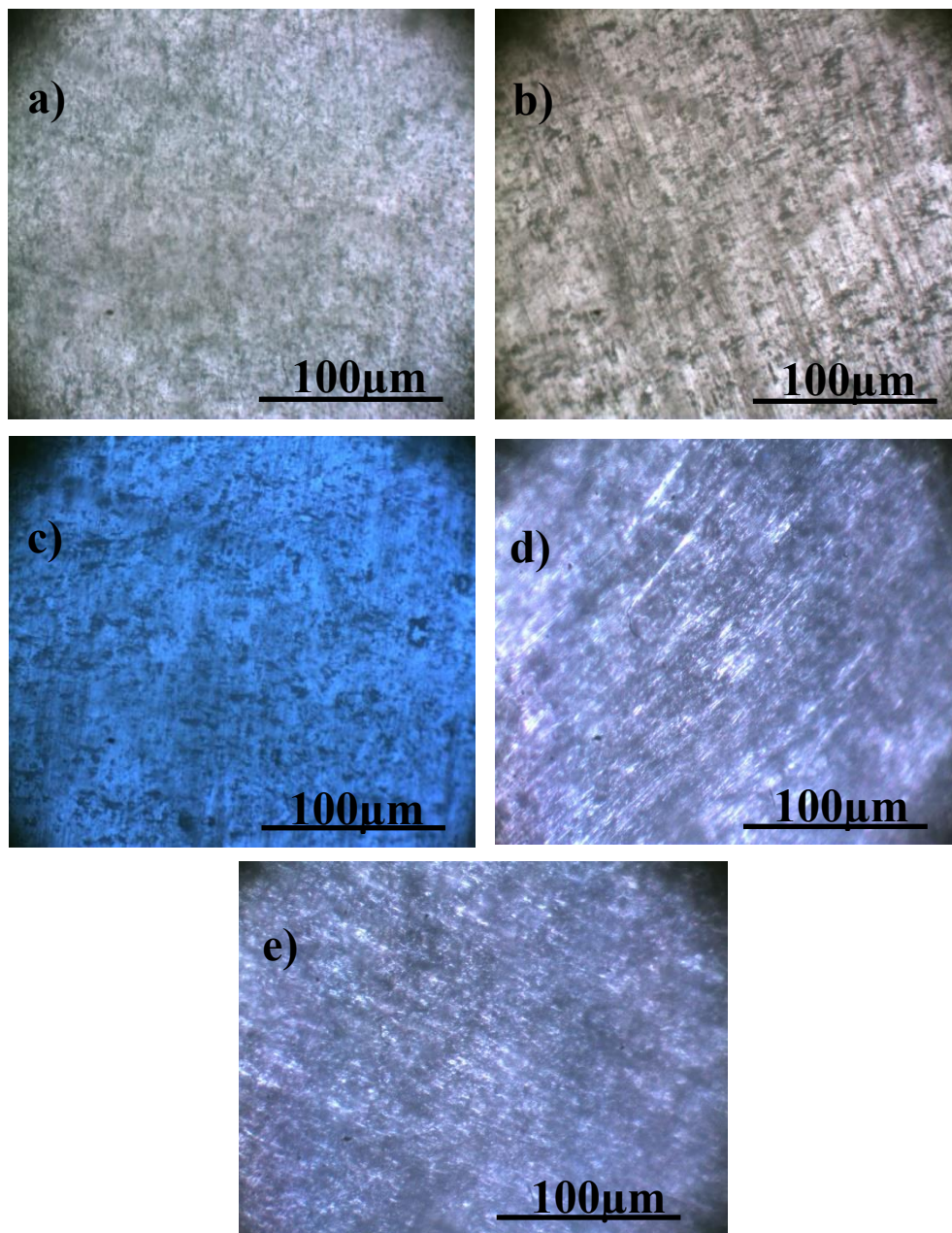


Figure VI.1- Microstructure de l’alliage, **a)** avant corrosion pour un échantillon non poli et non décapé , **b)** après immersion d’un échantillon non poli et non décapé dans le réactif de Keller, **c)** après immersion d’un échantillon non poli et non décapé dans la solution NaOH, **d)** après immersion d’un échantillon poli dans le réactif de Keller, **e)** après immersion d’un échantillon poli dans la solution NaOH.

La microstructure de l'échantillon non poli, non décapé et non attaqué montre la présence de fines taches noires, ces taches sont plus visibles après immersion dans les deux réactifs ; Keller et solution de NaOH ; car elles représentent les particules intermétalliques ayant subi une corrosion sur leurs contours avant et après immersion (**Figure VI.1**).

Les sillons formés durant le laminage sont plus visibles pour l'échantillon non poli, non décapé ayant subi une immersion dans le réactif de Keller (**Figure VI.1b**).

La corrosion observée est une corrosion galvanique autour des précipités, et autour des sillons provoqués par le laminage (**Figure VI.1b et VI.1c**). Cette corrosion est due à une différence de potentiel entre les particules intermétalliques et la matrice d'un côté et l'aération différentielle d'un autre côté.

L'attaque au Keller et à l'NaOH sur les échantillons polis accélère la corrosion du matériau (**Figure VI.1d et VI.1e**).

La (**Figure VI.2**) qui représente l'effet loupe de la (**Figure VI.1a**) montre l'apparition d'une corrosion galvanique sur la surface interne de la canette lors de sa mise en service (conservation de la boisson), ceci est dû à la perméabilité du vernis.

Les (**Figure VI.3 et VI.4**) représentant l'effet loupe des (**Figure VI.1b et VI.1c**) montrent que certains précipités n'ont pas subi de corrosion. Ces précipités sont représentés sur les figures par des cercles. Ces particules n'ont pas subi de corrosion car probablement elles sont recouvertes par le vernis. Ceci est confirmé par la (**Figure VI.5**) qui représente l'effet loupe de la (**Figure VI.1d**).

L'alliage est constitué de deux types de particules intermétalliques comme le montre la (**Figure VI.6**) qui représente l'image MEB d'un l'échantillon poli.

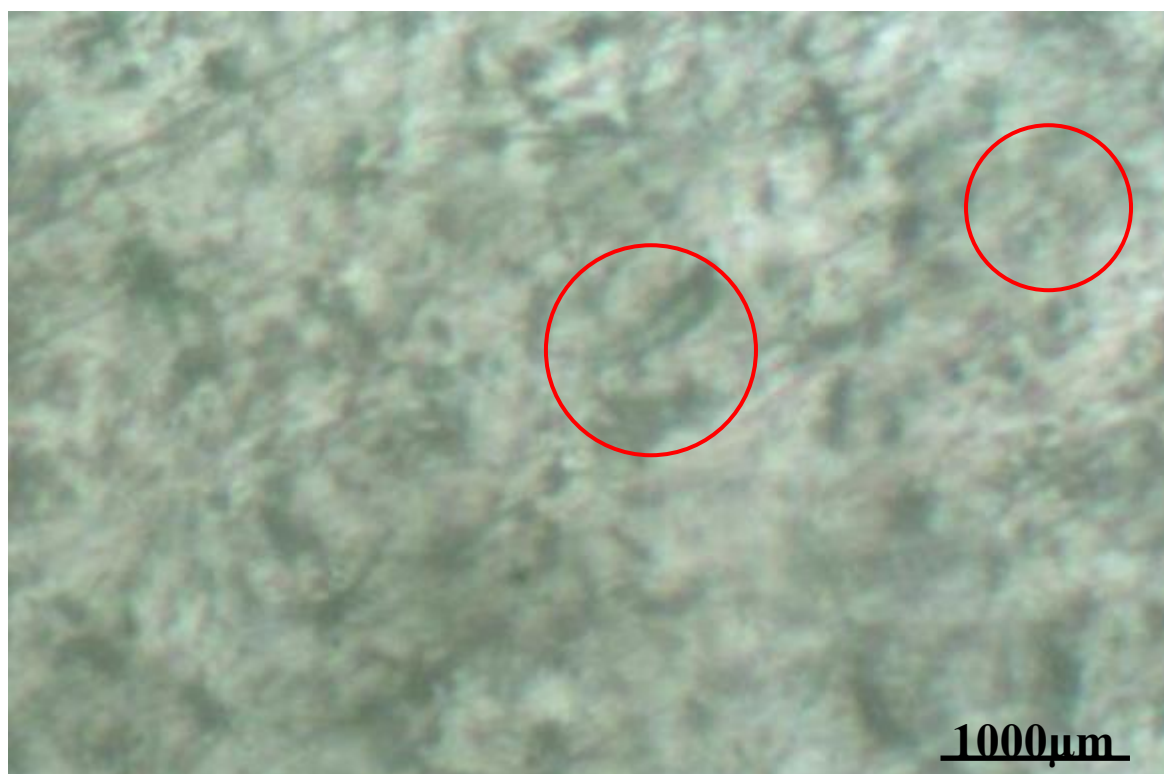


Figure VI.2- Effet loupe de 10 fois de la microstructure (**Figure VI.1a**).

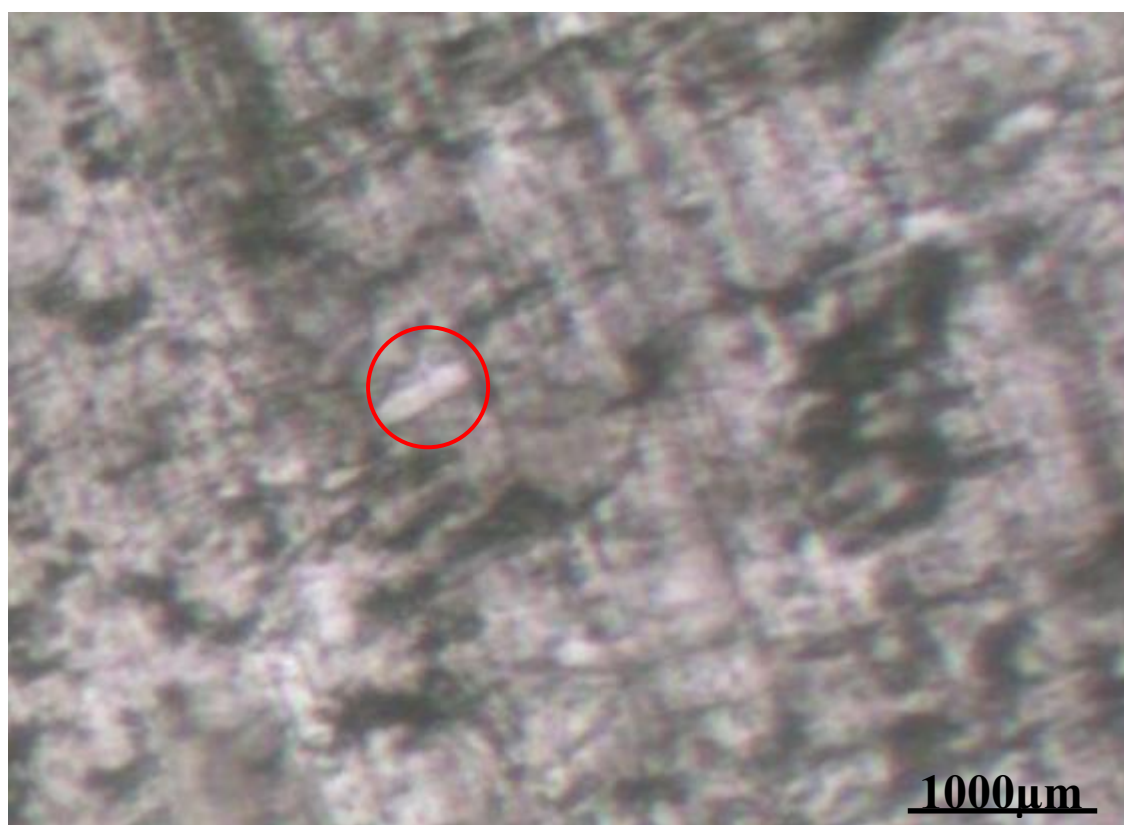


Figure VI.3- Effet loupe de 10 fois de la microstructure (**Figure VI.1b**) après immersion de 30 secondes dans le réactif de Keller (échantillon non poli non décapé).

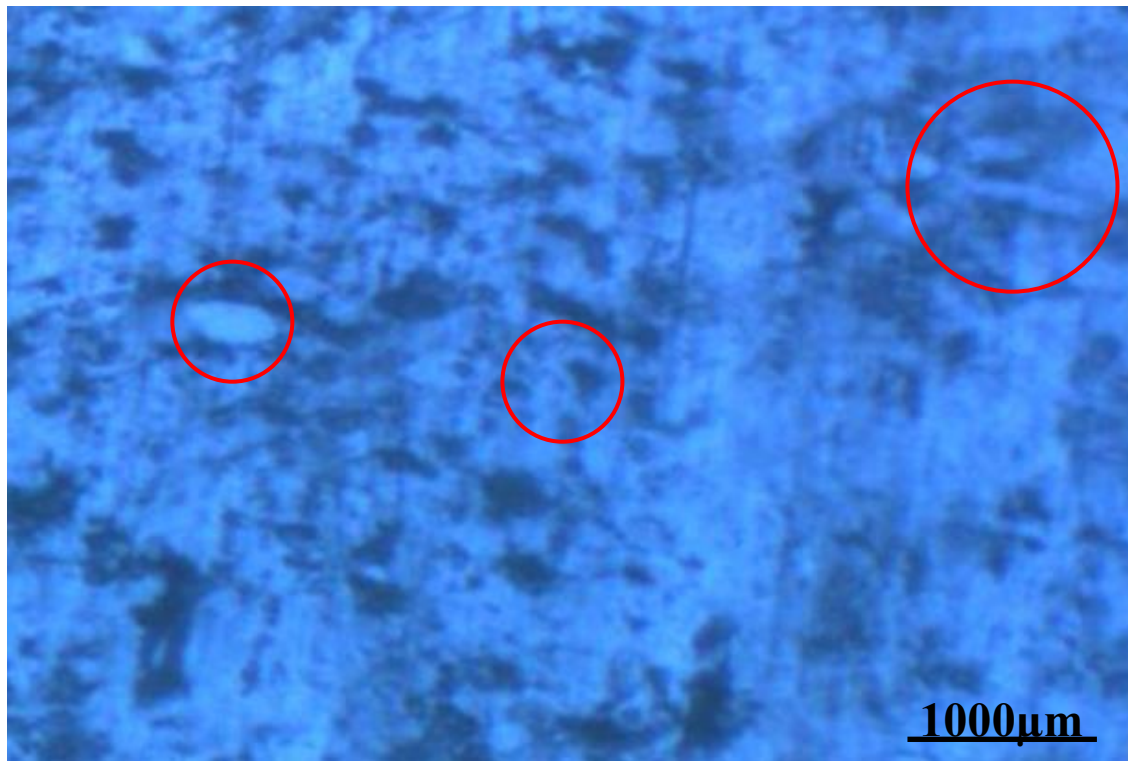


Figure VI.4- Effet loupe de 10 fois de la microstructure (**Figure VI.1c**) après immersion de 30 secondes dans le réactif de NaOH (échantillon non poli non décapé).

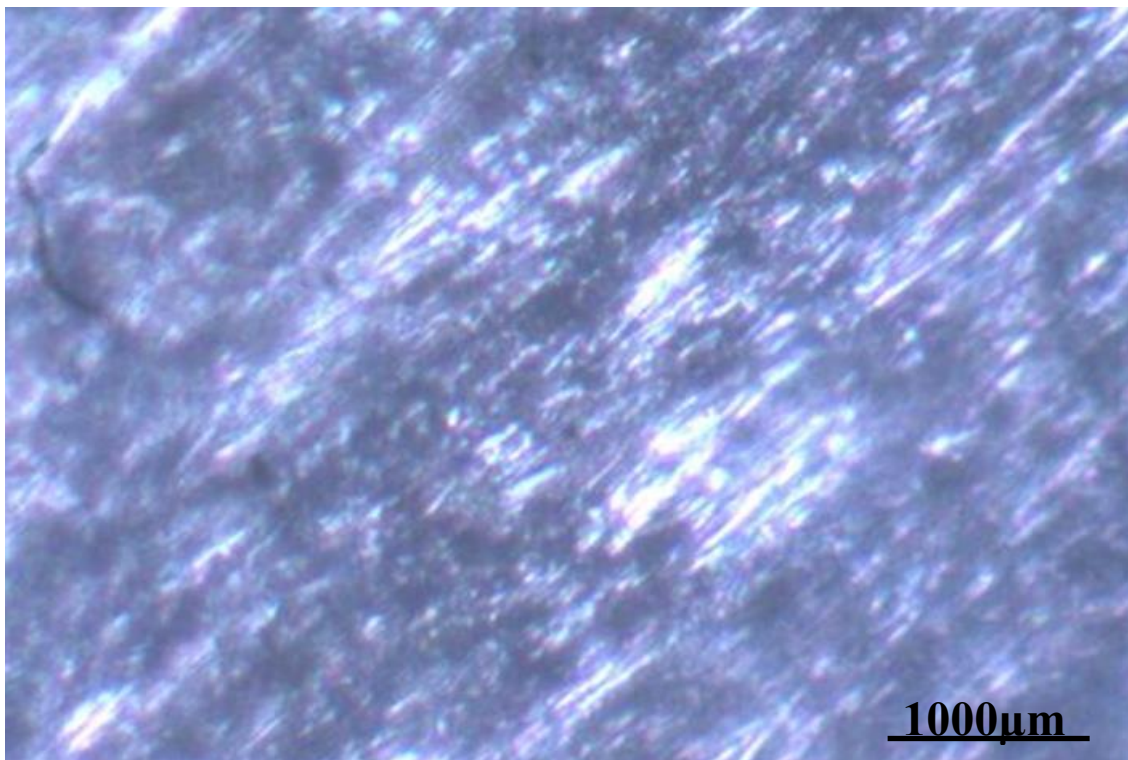


Figure VI.5- Effet loupe de 10 fois la microstructure (**Figure VI.1d**) après immersion de 30 secondes dans le réactif de Keller (échantillon poli).

VI.1.2 – Microstructures avant corrosion observées au MEB

Les images MEB montrent que l'alliage comporte deux types de particules intermétalliques.

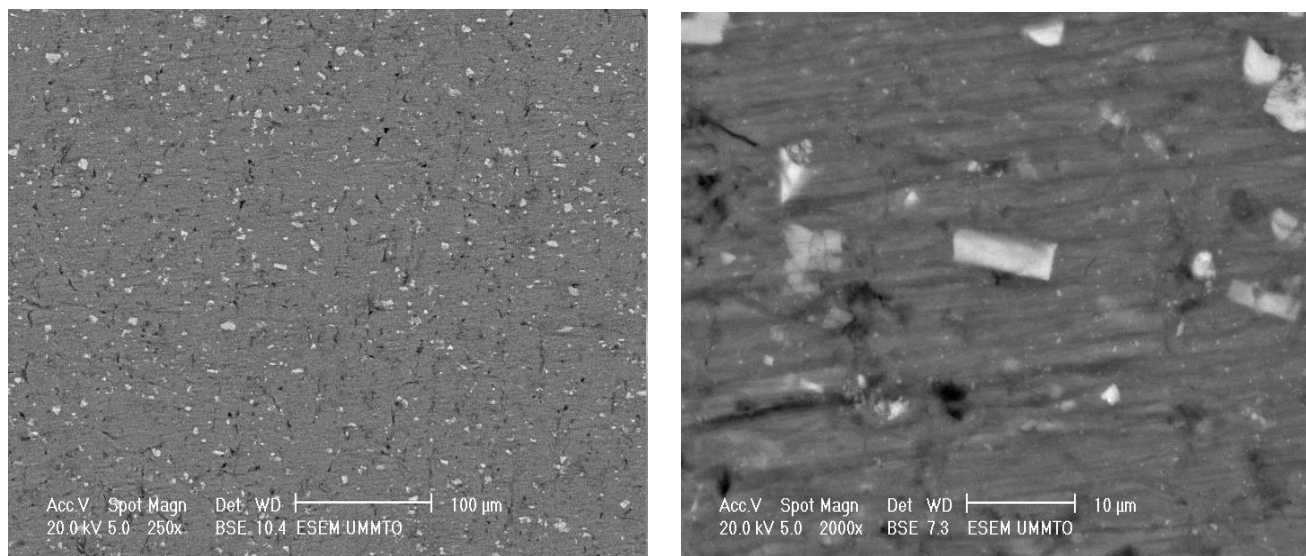


Figure VI.6- Images MEB de l'alliage étudié.

VI.1.3 – Morphologie de la corrosion dans la solution de NaCl

L'immersion du matériau dans une solution de 0.3% de NaCl pendant 20 jours montre que la corrosion de celui-ci est marquée et l'immersion du matériau étudié dans une solution de 3% de NaCl pendant 3 jours uniquement (**Figure VI.7**) a un effet plus marqué (**Figure VI.8**). De ce fait, on peut dire que l'alliage étudié est sensible à la corrosion dans une solution de chlorures, et les chlorures peuvent être contenus dans la boisson. Souvent les chlorures jouent le rôle de fragilisants de la couche de passivation protégeant le matériau.

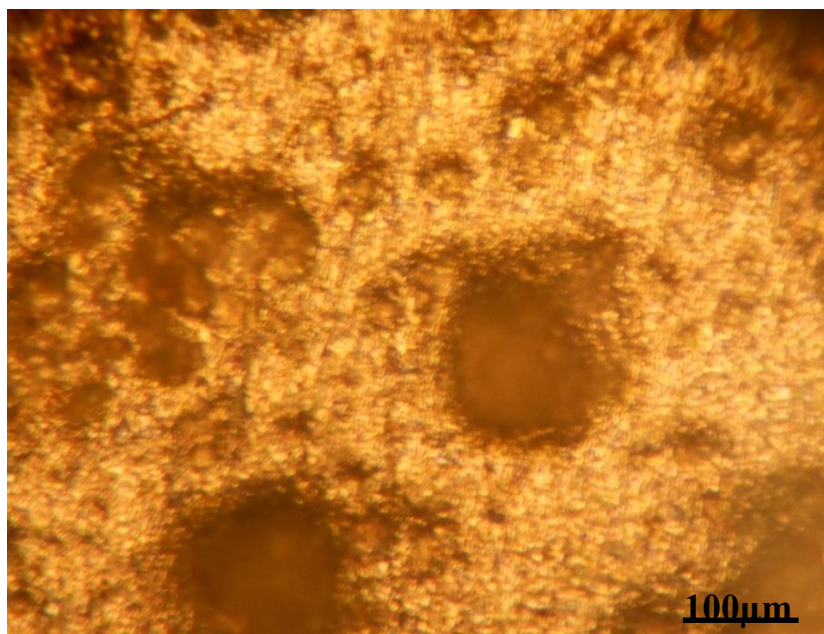


Figure VI.7- Corrosion du matériau poli dans une solution de 0.3% NaCl pendant 20 jours.

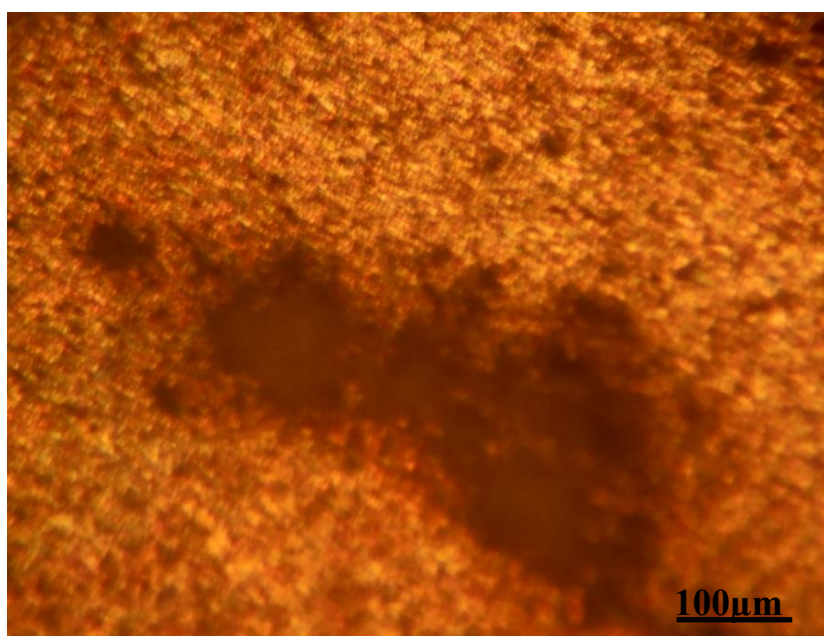


Figure VI.8- Corrosion du matériau poli dans une solution de 3% NaCl pendant 03 jours.

L'immersion de l'échantillon ayant une couche de vernis à la surface durant 20 jours dans une solution de 0.3% NaCl montre que la corrosion de celui-ci s'amorce dans certains endroits (**Figure VI.9**), ceci est dû aux chlorures qui fragilisent la surface, après que la surface soit fragilisée les échantillons vont ressembler aux échantillons ayant subi le polissage.

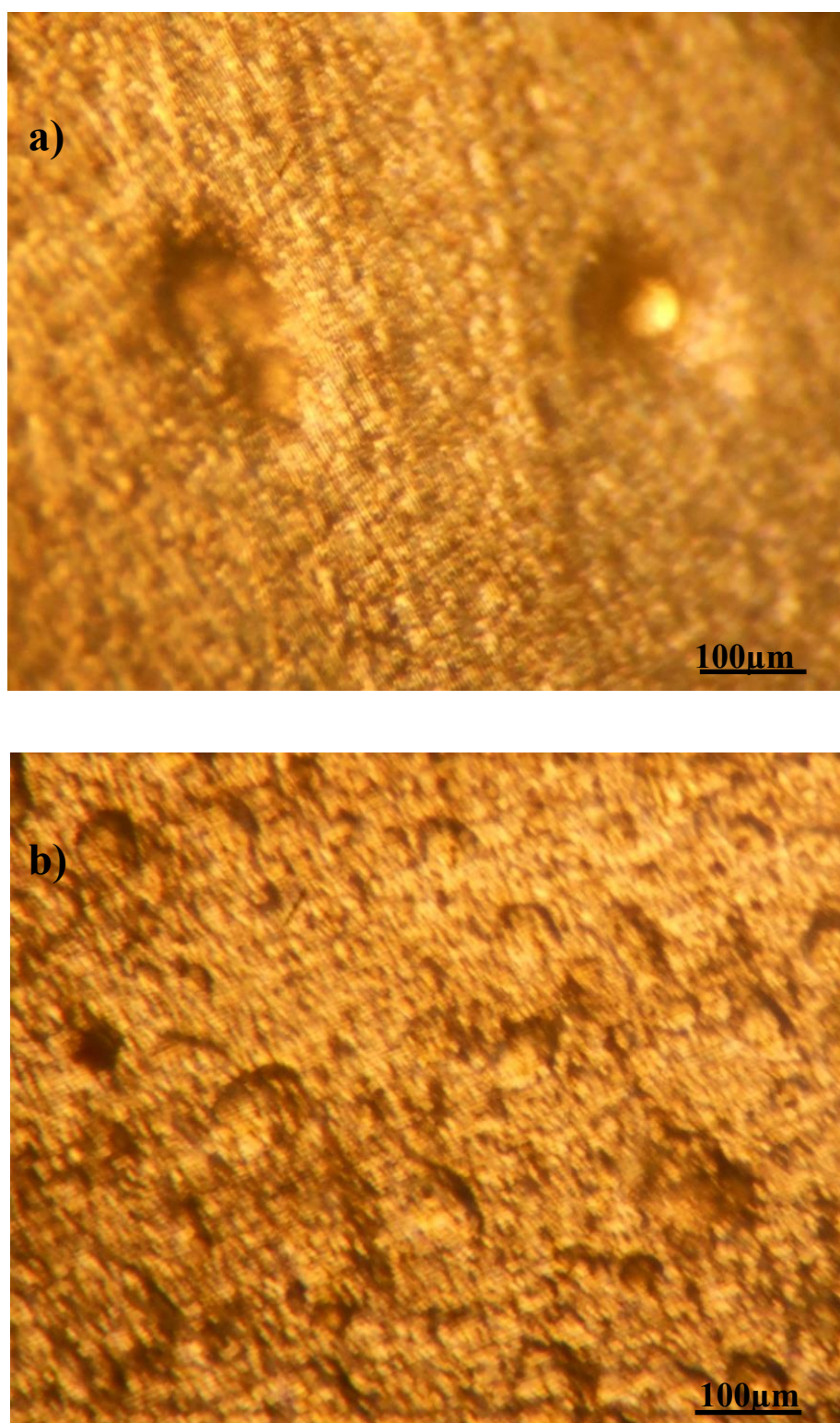


Figure VI.9- Corrosion du matériau vernis à la surface durant 20 jours dans une solution de **a)** 0.3%NaCl, **b)** 3%NaCl.

En présence d'un champ magnétique de faible intensité (39 mT), la corrosion semble être généralisée pour la solution de 0.3% NaCl après trois (03) jours d'immersion (**Figure VI.10**).

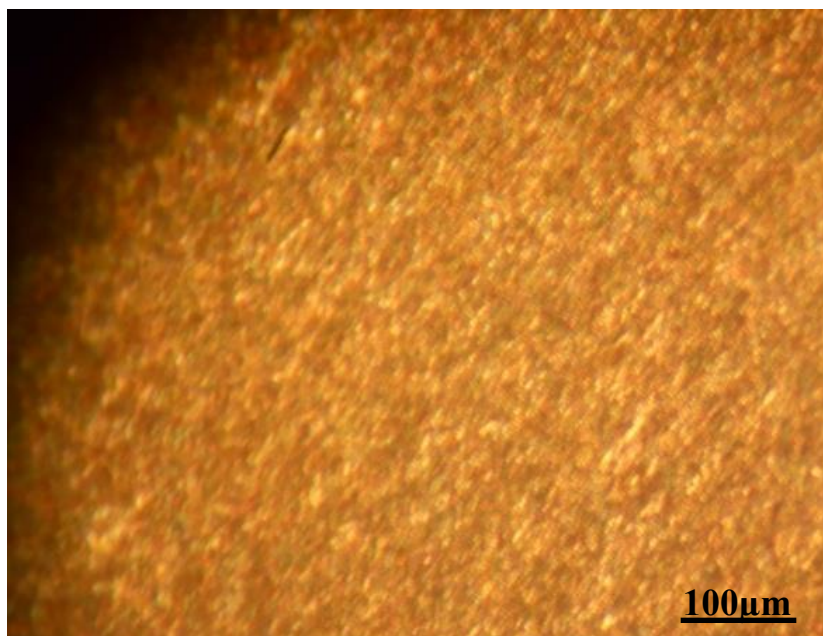


Figure VI.10- Immersion dans une solution de NaCl en présence d'un champ magnétique permanent de faible intensité 0.3% NaCl.

VI.2 – Cinétique de la corrosion dans la solution de NaCl

La courbe du potentiel de corrosion libre dans la solution de 0.3% NaCl d'un échantillon poli montre que le potentiel de corrosion aux premiers instants (à l'immersion) est aux alentours de -130 mV, après 1 heure d'immersion celui-ci commence à chuter. Le potentiel de corrosion atteint une valeur de -722 mV après 7 heures de corrosion dans cette solution. Après 7 heures de corrosion le potentiel semble se stabiliser jusqu'à 30 jours. Ceci dit après 7 heures de corrosion la passivation s'installe (**Figure VI.11**).

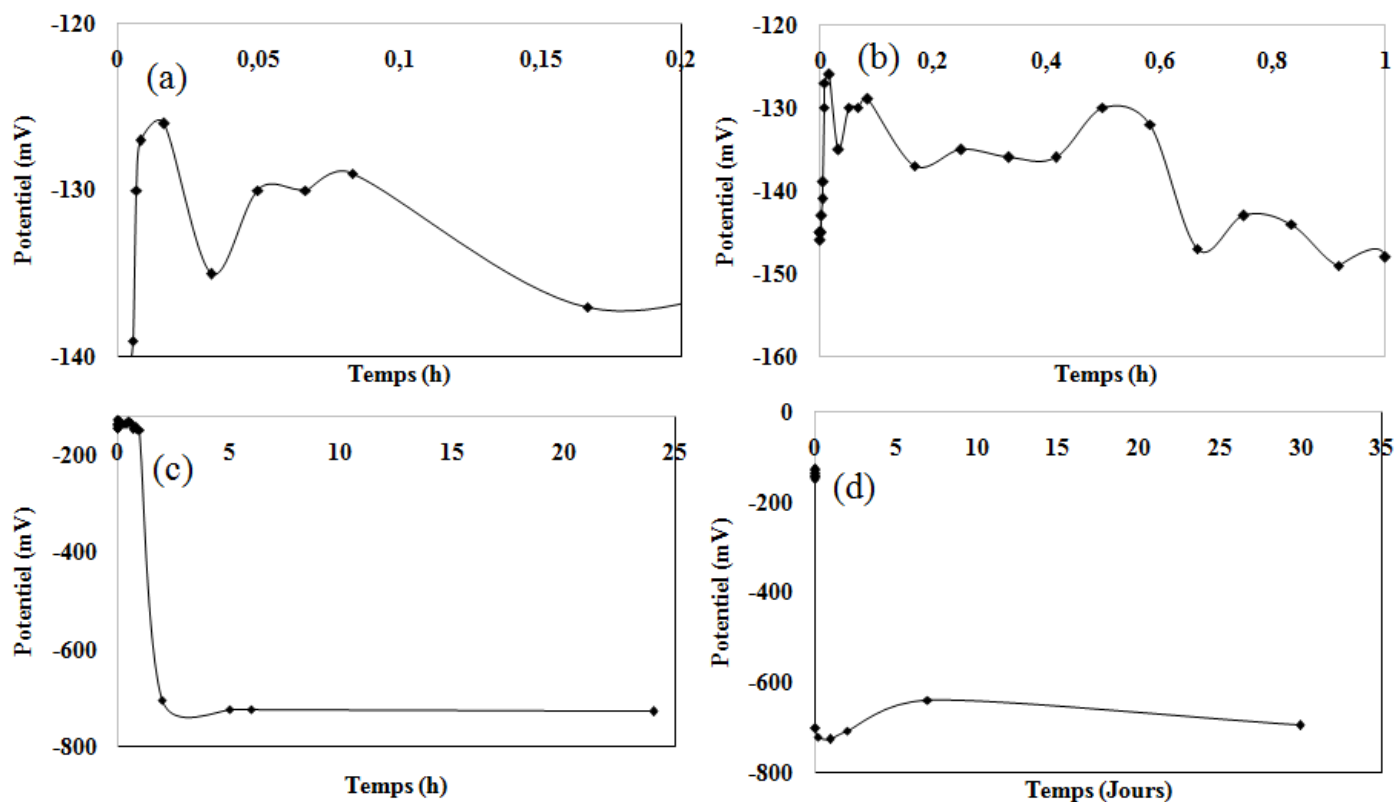


Figure VI.11- Potentiel de corrosion libre de l'alliage étudié dans la solution de 0.3% NaCl (échantillon poli).

L'immersion d'un échantillon semblable dans une solution de 3% de NaCl montre que le potentiel de corrosion de départ n'est pas dans les alentours de -130 mV mais égal à -736 mV, nous pensons que la concentration des chlorures de 10 fois est la raison de cette situation car les chlorures sont des éléments fragilisants de la couche de passivation. Après 3 jours d'immersion le potentiel de corrosion semble augmenter pour atteindre une valeur de -471 mV. Par la suite ce potentiel chute aux environs de -700 mV, ainsi une passivation s'installe de nouveau à partir d'environ dix jours de corrosion (Figure VI.12).

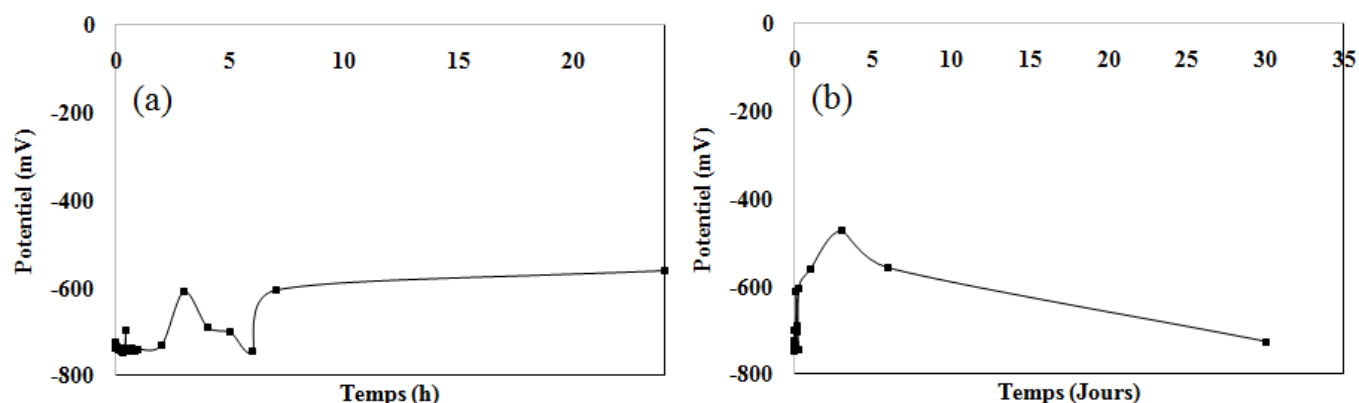


Figure VI.12- Potentiel de corrosion libre de l'alliage étudié dans la solution de 3%NaCl.

La comparaison des deux courbes de corrosion libre montre que quelque soit le point de départ de la corrosion et quelque soit la concentration en chlorures, le potentiel de passivation semble être le même (**Figure VI.13**). Les courbes du potentiel de corrosion ont été tracées pour d'autres échantillons prélevés du même lot de tôles, dans une solution de concentration 0.3% NaCl, celles-ci montrent que le potentiel de corrosion de passivation prend des valeurs proches de celles obtenues sur les courbes des deux échantillons représentées après 24 heures de corrosion mais le potentiel de départ est différent, cela veut dire que chaque échantillon est caractérisé par un potentiel différent à l'immersion.

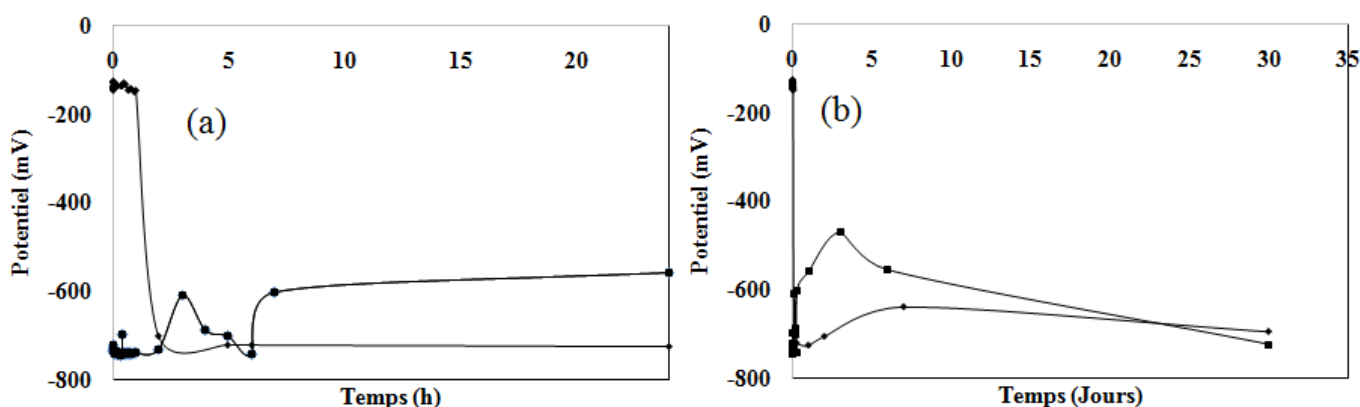


Figure VI.13- Comparaison du potentiel de corrosion libre de l'alliage étudié dans la solution de 0.3%NaCl (♦) à celui dans la solution de 3% NaCl (■).

VI.3 – Caractérisations mécaniques de la tôle

VI.3.1 – Courbes de traction de plusieurs éprouvettes dans différentes directions

La (Figure VI.14) représente les courbes de traction dans la direction du laminage de plusieurs éprouvettes découpées de plusieurs boîtes du même lot. Ces courbes montrent que les caractéristiques de traction des éprouvettes sont différentes d'une éprouvette à une autre ceci dit chaque éprouvette est différente de l'autre malgré que ces éprouvettes soient prélevées dans une même direction, la direction du laminage.

Ceci nous pousse à penser qu'il ya des instabilités des propriétés mécaniques dans la tôle. Cette situation est encore observée même dans les directions transversale et 45°. Les (Figures VI.15 et VI.16) représentent les courbes de traction de plusieurs éprouvettes découpées dans la direction transversale et 45° respectivement.

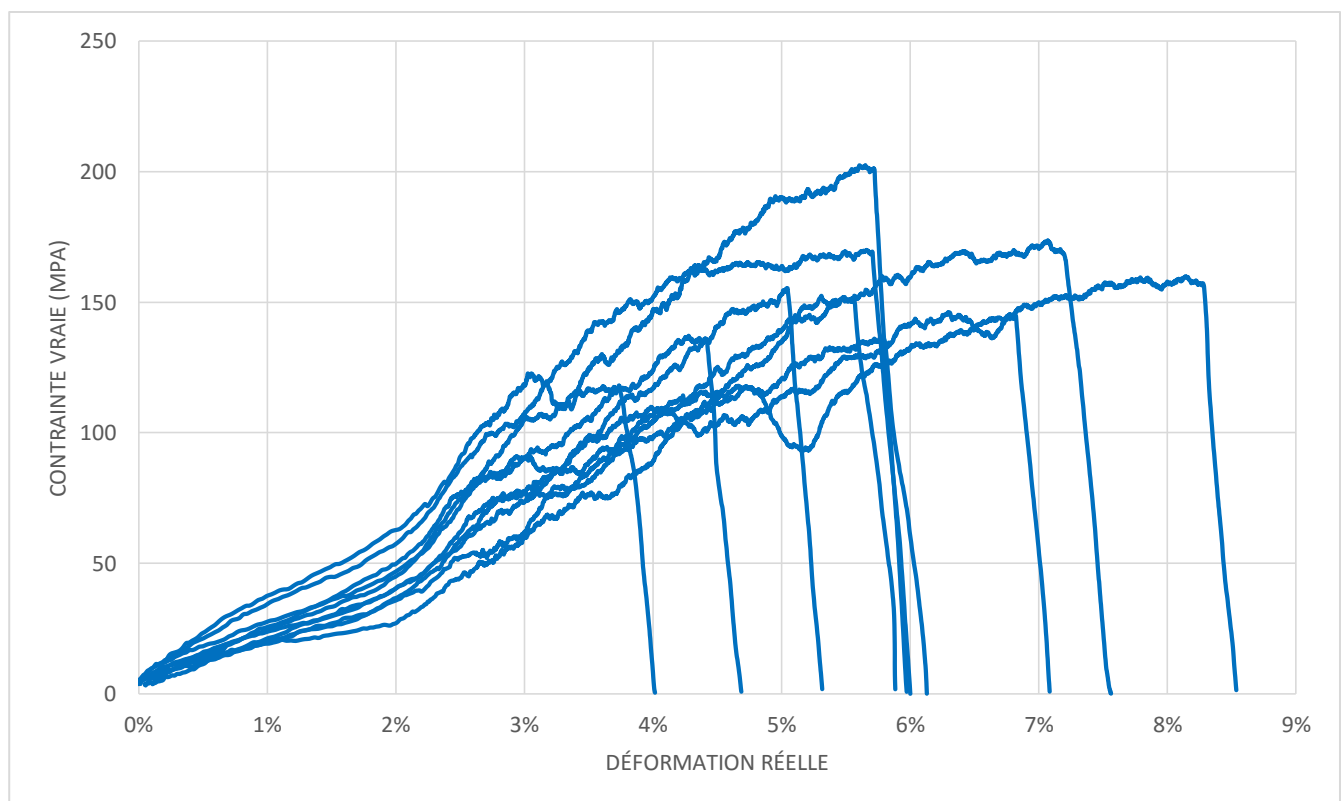


Figure VI.14- Courbes de traction dans la direction de laminage de plusieurs éprouvettes.

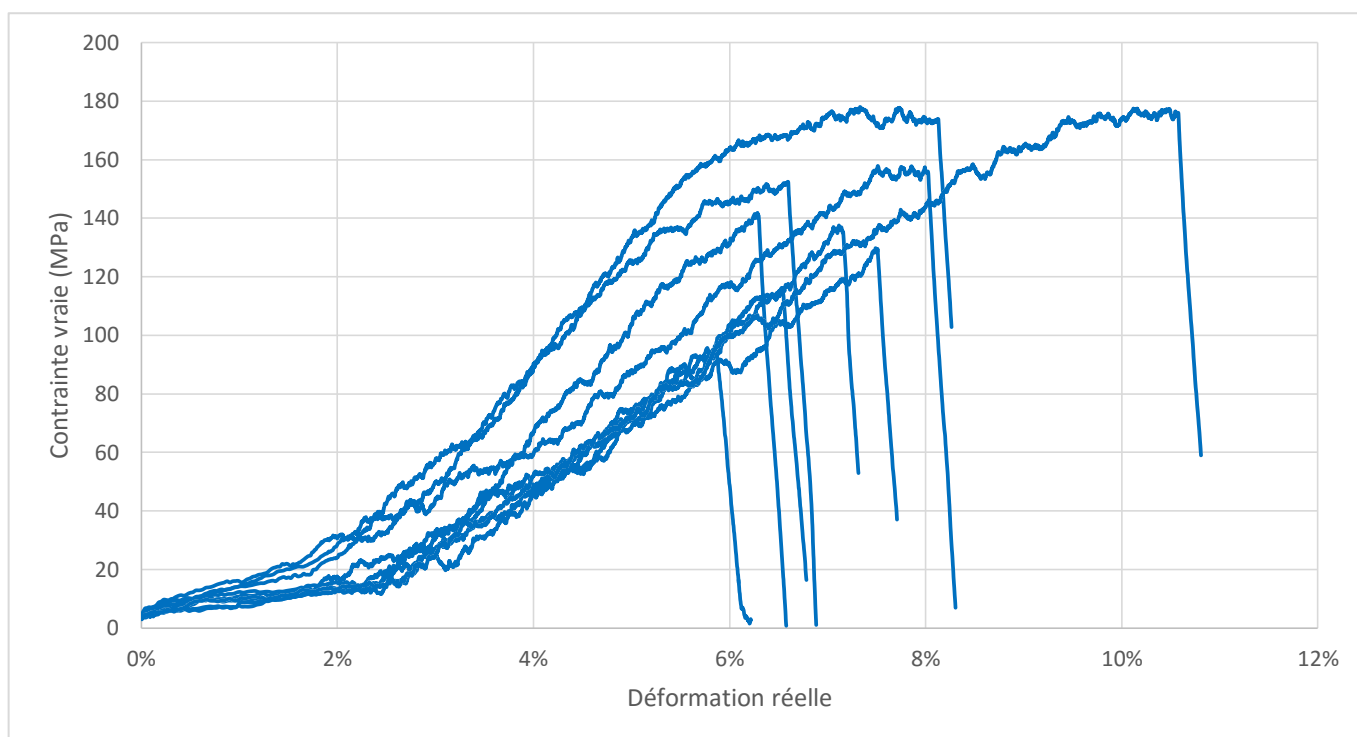


Figure VI.15- Courbes de traction dans la direction transverse au laminage de plusieurs éprouvettes.

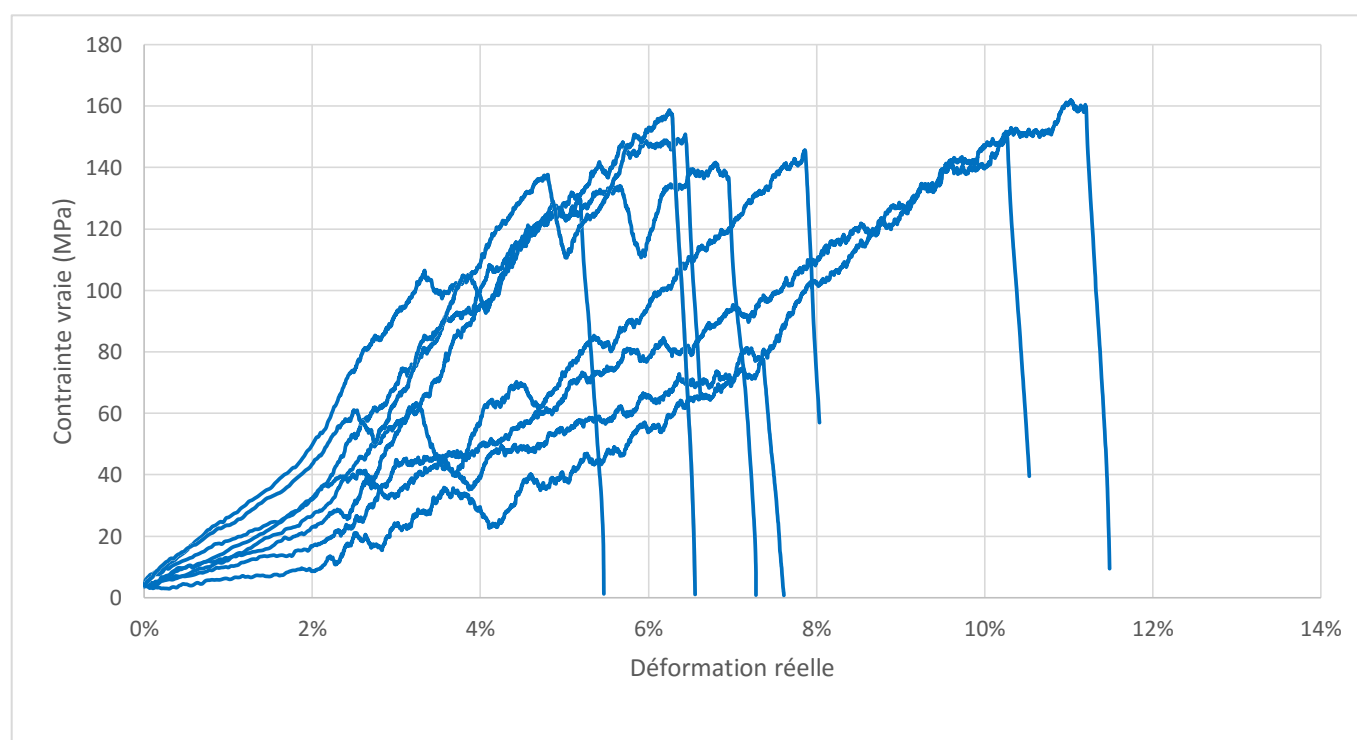


Figure VI.16- Courbes de traction dans la direction 45° de plusieurs éprouvettes.

VI.3.2 – Courbes de microdureté Vickers en fonction de la direction

La courbe de microdureté en fonction de la direction par rapport à la direction du laminage qui est représentée par la (Figure VI.17) montre aussi que la dureté du matériau varie en fonction de la direction. Ceci veut dire que l'une des directions est plus dure qu'une autre, pour ces éprouvettes c'est la direction 45° qui est la plus dure. Donc la déformation du matériau varie avec la direction.

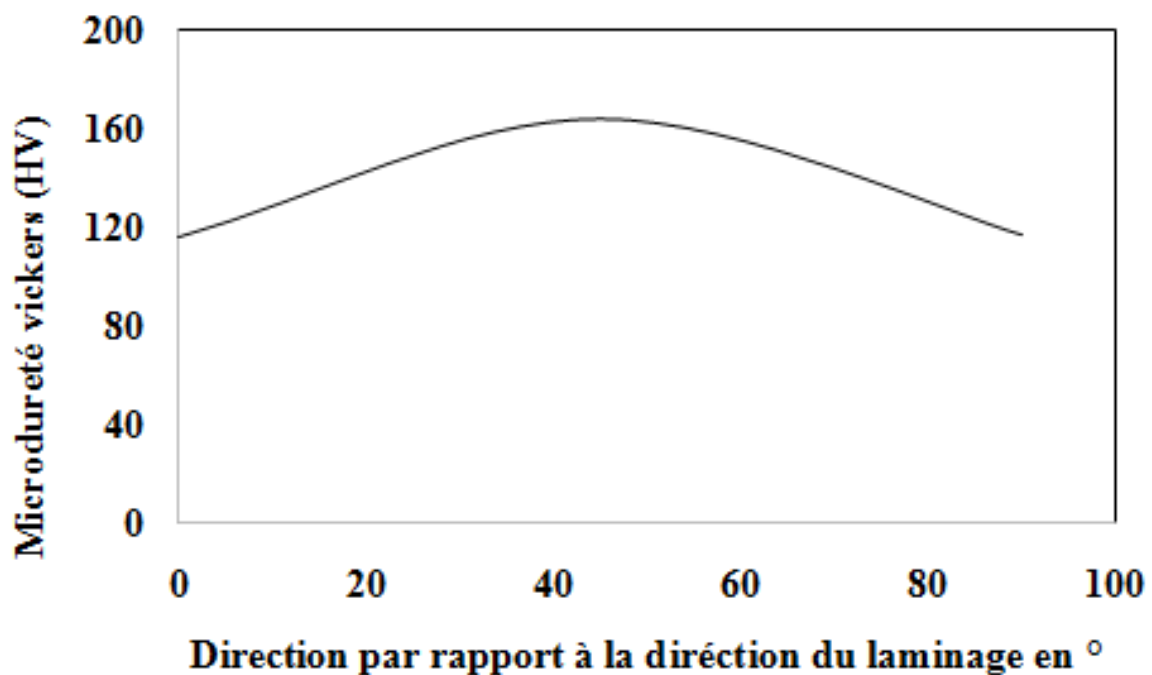


Figure VI.17- Microdureté Vickers en fonction de la direction par rapport à la direction du laminage.

VI.4 – Anisotropie de la tôle

La (Figure VI.18) montre l'évolution du coefficient d'anisotropie en fonction de la direction. Ce coefficient varie en fonction de la direction. Celui-ci est moindre pour la direction 90° (Transversale). Ceci implique que l'amincissement de la tôle change d'une direction à une autre, ceci augmente le risque de fissuration de la tôle et rend la déformation hétérogène.

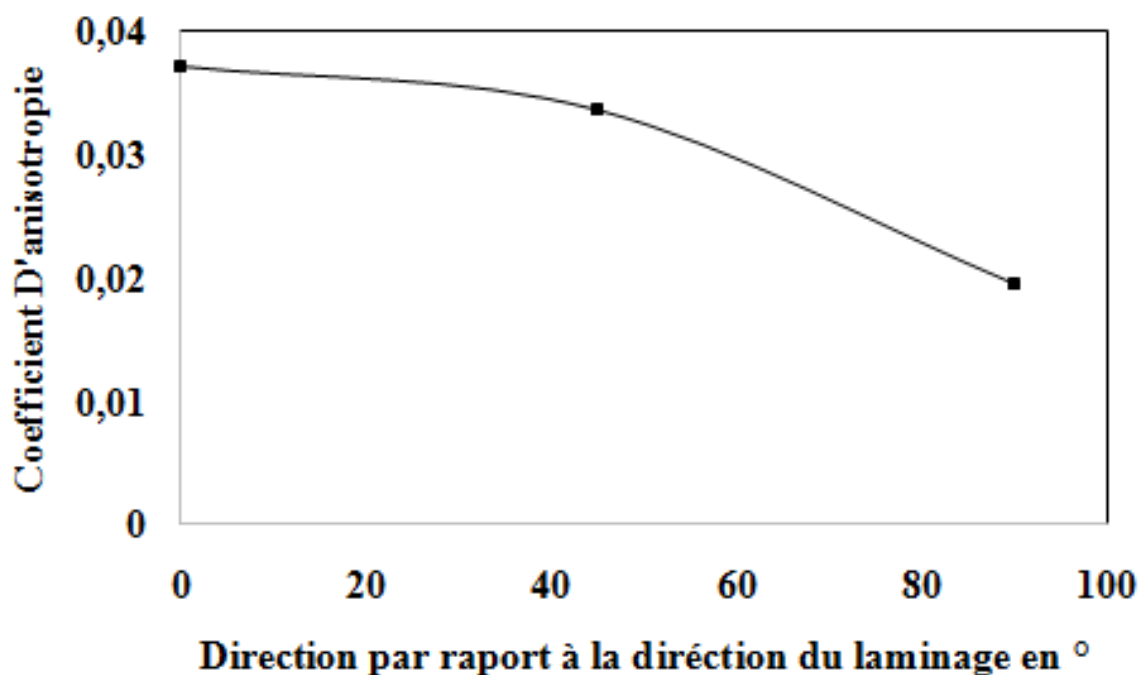
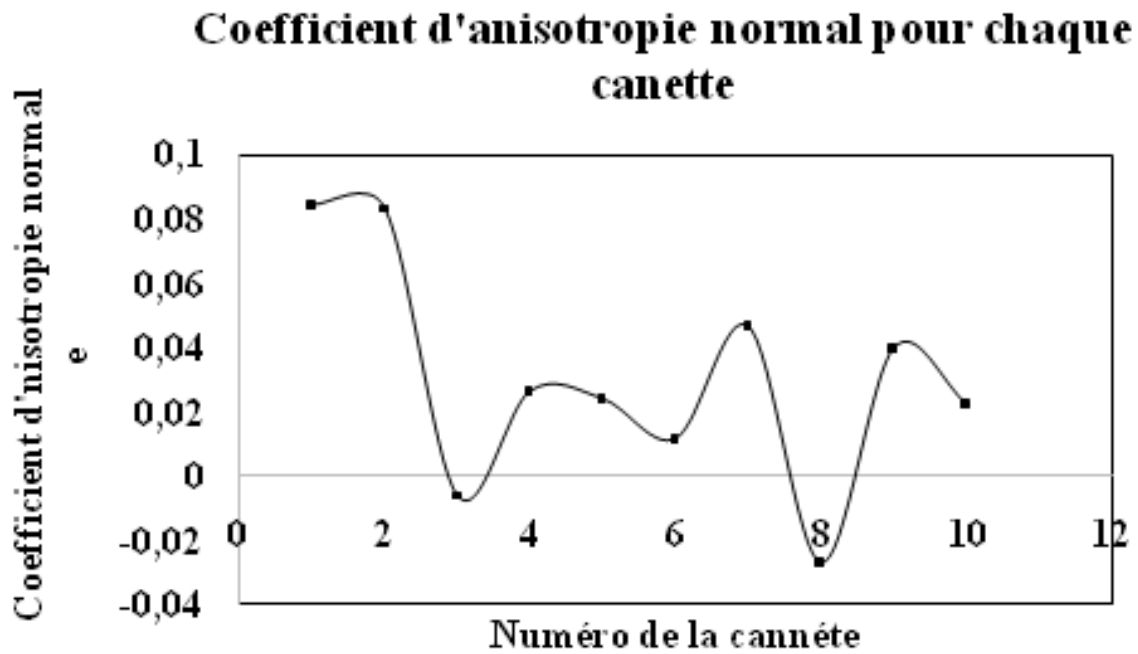
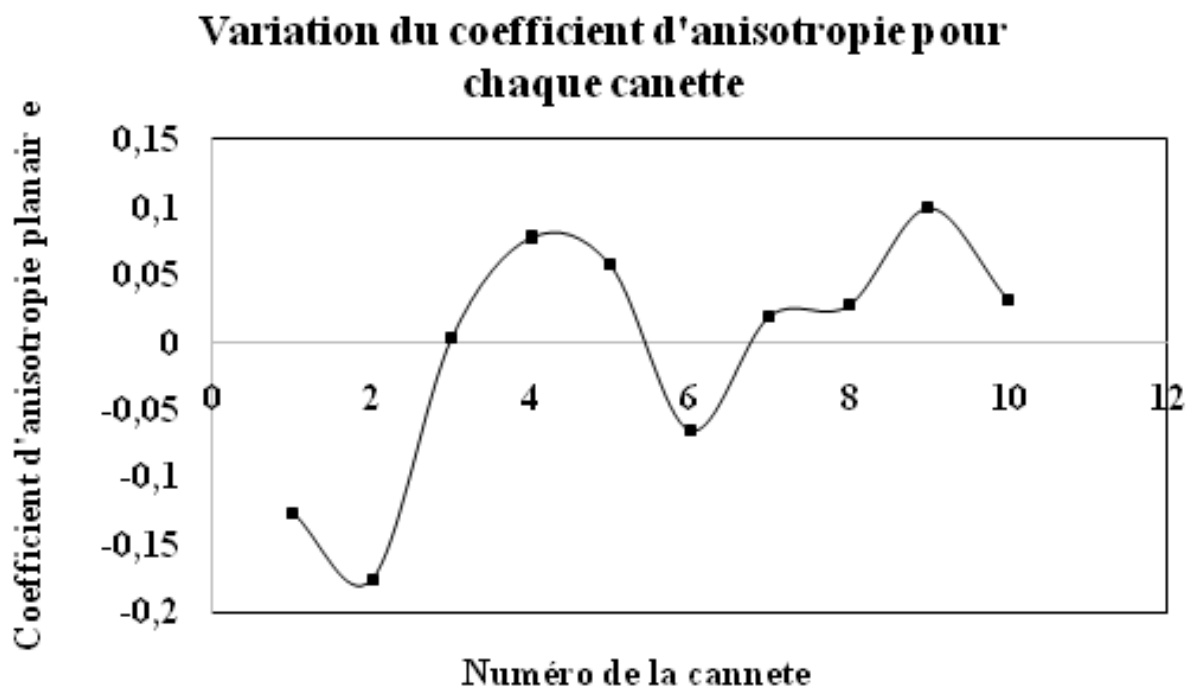


Figure VI.18- Coefficient d'anisotropie en fonction de la direction par rapport à la direction du laminage.

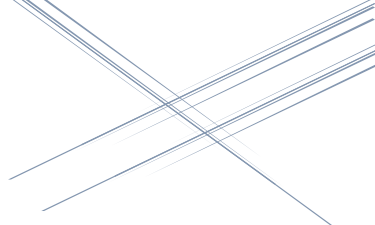
Les (Figures VI.19 et VI.20) montrent que le coefficient d'anisotropie normal et le coefficient d'anisotropie planaire diffèrent d'une tôle à une autre. Il y'a des valeurs positives et des valeurs négatives. Ceci confirme l'existence de l'instabilité mécanique dans la tôle de l'alliage étudié.



Figures VI.19- Coefficient d'anisotropie normal pour plusieurs échantillons prélevés de canettes différentes.



Figures VI.20- Coefficient d'anisotropie planaire pour plusieurs canettes utilisées lors des essais.

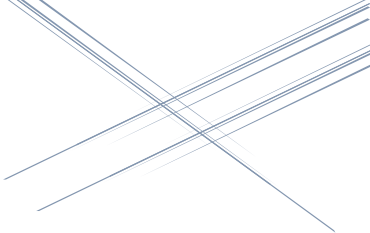


CONCLUSION

CONCLUSIONS

En conclusion nous pouvons dire que :

- 1) L'alliage étudié est un alliage qui comporte deux types de particules intermétalliques ;
- 2) La boîte d'aluminium est corrodée dans certains endroits de la tôle en raison de la perméabilité du vernis ;
- 3) La morphologie de corrosion est plus marquée dans une solution plus concentrée en chlorures ;
- 4) Le potentiel de passivation ne dépend pas de la concentration en chlorures. L'allure des courbes du potentiel de corrosion diffère d'un échantillon à un autre pour une même solution, ceci est le résultat d'une hétérogénéité de distribution des phases existantes dans cet alliage et de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques à la surface des échantillons ;
- 5) Les caractéristiques mécaniques obtenues par la traction des échantillons prélevés dans la même direction sont différentes ;
- 6) Le coefficient d'anisotropie varie en fonction de la direction par rapport à la direction du laminage ;
- 7) Les coefficients d'anisotropie normal et planaires diffèrent d'une boîte à une autre, ceci dit l'instabilité mécanique et la possibilité de fissuration de ces tôles est envisagée suite à une déformation.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références

- [1] Aluminium par rapport à l'aluminium. Investigating the english language across de glob. www.worldwidewords.org.
- [2] Claire König. FUTURA Science. L'Aluminium un métal d'exception. P 24. Avril, 2008.
- [3] C'est pas sorcier -ALUMINIUM. <https://www.youtube.com/watch?v=XblulGNR-FA>. 15 mai 2016. 09h30
- [4] Vennekens, EWE- institue belge de la soudure. Cahier IBS. Classification des alliages d'aluminium.
- [5] understanding aluminium alloys. Welding journal. Avril 2002. P 77-80.
- [6] Support de cour, BTS ACI (lycée Raymond LEOWY) p 4.
- [7] Asma Haddouche. Mémoire Master en physique des matériaux, Université de Med Khider, Biskra. 2013-2014.
- [8] Musée national des arts et traditions populaires (France). Mise en boîte : 6 octobre 1994-17 avril 1995. Université de Virginie. Ed. Réunion des musées nationaux, 1994. P 65.
- [9] Dossier pédagogique / L'âge de l'aluminium / La Turbine CCSTI / 2005-2006
- [10] Jean-Paul Bailon, Jean-Marie Dorlot. Des matériaux, troisième édition. Presse internationale, Ecole Polytechnique de Montréal. P 514. 2000
- [11] Jean-Paul Bailon, Jean-Marie Dorlot. Des matériaux, troisième édition. Presse internationale, Ecole Polytechnique de Montréal. P 516. 2000
- [12] Céline Martias, Métallurgie descriptive, ISITV.
- [13] Comment fabriquer papier d'aluminium. <https://www.youtube.com/watch?v=gNCF5H-8XOs> . 21 mai 2016. 12h58

- [14] <http://thelifeofacanofcoke.yolasite.com/production.php>. 23 mai 2016. 10h51
- [15] Bruno CHENAL, Julian DRIVER Écrouissage d'alliages d'aluminium Référence M230 v1 | Date de publication : 10 juin 1999
- [16] Le feuillard technique. Le laminage de l'aluminium : procédé et produit, TALAT, F1301. CQRDA. P 4-5
- [17] Patrick DENEUVILLE. Mise en forme de l'aluminium. Référence M3140 v1 | Date de publication : 10 juin 2010
- [18] Yann Ledoux. Optimisation des procédés d'emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Savoie, 2005. Français.
- [19] Métallurgie générale, J. Bénard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, éd. Masson (1969, 1984 pour la 2^e éd.), 607 p., ISBN 978-2-225-82347-3
- [20] I. BRAIN, Thermochemical Data of Pure Substances, Volume I et II, VCh, Weinheim, 1989.
- [21] DIETER Landolt, Traité des matériaux. 12. Corrosion et chimie des surfaces des métaux. Ed, presses polytechniques et universitaires romandes. P 332. ISBN 2-88074-245-5
- [22] Forgeage et moulage par excellence – 514-788-6007. 7 types de corrosion dans les projets de fabrication de pièces en métal. <http://fr.monmet.com/nouvelles/7-types-de-corrosion-frequents-les-projets-de-fabrication-pieces-metal.aspx>. 29 mai 2016. 19h14
- [23] Joseph F. BOISCH. Ingénieurs praticiens. Prévention de la corrosion. Entreprise Moderne d'Édition. P 40-41. 1977. ISBN. 2.7044.0581.6

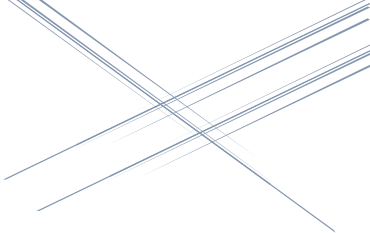
- [24] Luzinete Pereira Barbosa ; Isolda Costa. L'évaluation de la résistance à la corrosion de l'AISI 316 filtres en acier inoxydable. ISSN 1980-5373. June 2005.
- [25] Madjid IFIRES, Etude du comportement électrochimique de l'alliage AA6061 dans le milieu NaCl en présence d'inhibiteur de corrosion. Mémoire de Magister. Blida, 26 janvier 2012.
- [26] Bethencourt, M., Botana, F.J., Cano, M.J., Marcos, M., Sanchez-Amaya, J.M., Gonzalez-Rovira, L., "Using EIS to analyse samples of Al–Mg alloy AA5083 treated by thermal activation in cerium salt baths", Corrosion Science, V. 50, (2008), 1376 – 1384.
- [27] Bockris, J.O. and Minevski L.V., "On the mechanism of the passivity of aluminum and aluminum alloys", Journal of Electroanalytical Chemistry, V. 349, (1993), 375 - 414.
- [28] Vargel, C., "Corrosion of Aluminium", Elsevier Inc, New York, (2004), 658 p.
- [29] Federica DAGHIA- Lionel GENDRE. Modélisation du comportement des composites : l'élasticité anisotrope. Université PARIS-SACLAY. 04 mai 2011
- [30] Encyclopaedia Universalis. Dictionnaire des pierres précieuses fines et ornementales.
- [31] ZAZI Nacer. Influence des effets de vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium-Magnésium. Thèse de doctorat. 2011
- [32] M. Pernot et R. Penelle. Anisotropie de comportement plastique des tôles d'Aluminium et de Titane possédant une texture cristallographique. Laboratoire de métallurgie physique. Université Paris-Sud. Orsay. France. J.-P. Boehler (ed), Mechanical behaviour of anisotropic solids/ Comportement mécanique des solides anisotropes. 1982

[33] Matthieu BITTERLIN. Importance, applications et détermination de l'anisotropie cristalline. 2014. SYS862B

[34] Jacky RUSTE. Microscopie électronique à balayage- Principe et équipement. Réf P865 v3. 10 mars 2013

[35] Métaux et alliages dans le système de numérotation unifié, 8e éd., Society of Automotive Engineers, Inc. et American Society for Testing and Materials (1999).

[36] Jo Perez. Matériaux non cristallins et science du désordre. Collection des sciences appliquées de l'INSA de Lyon : Matériaux. Ed, PPUR presses polytechniques, 2001. ISBN 2880744857,9782880744854.



ANNEXES

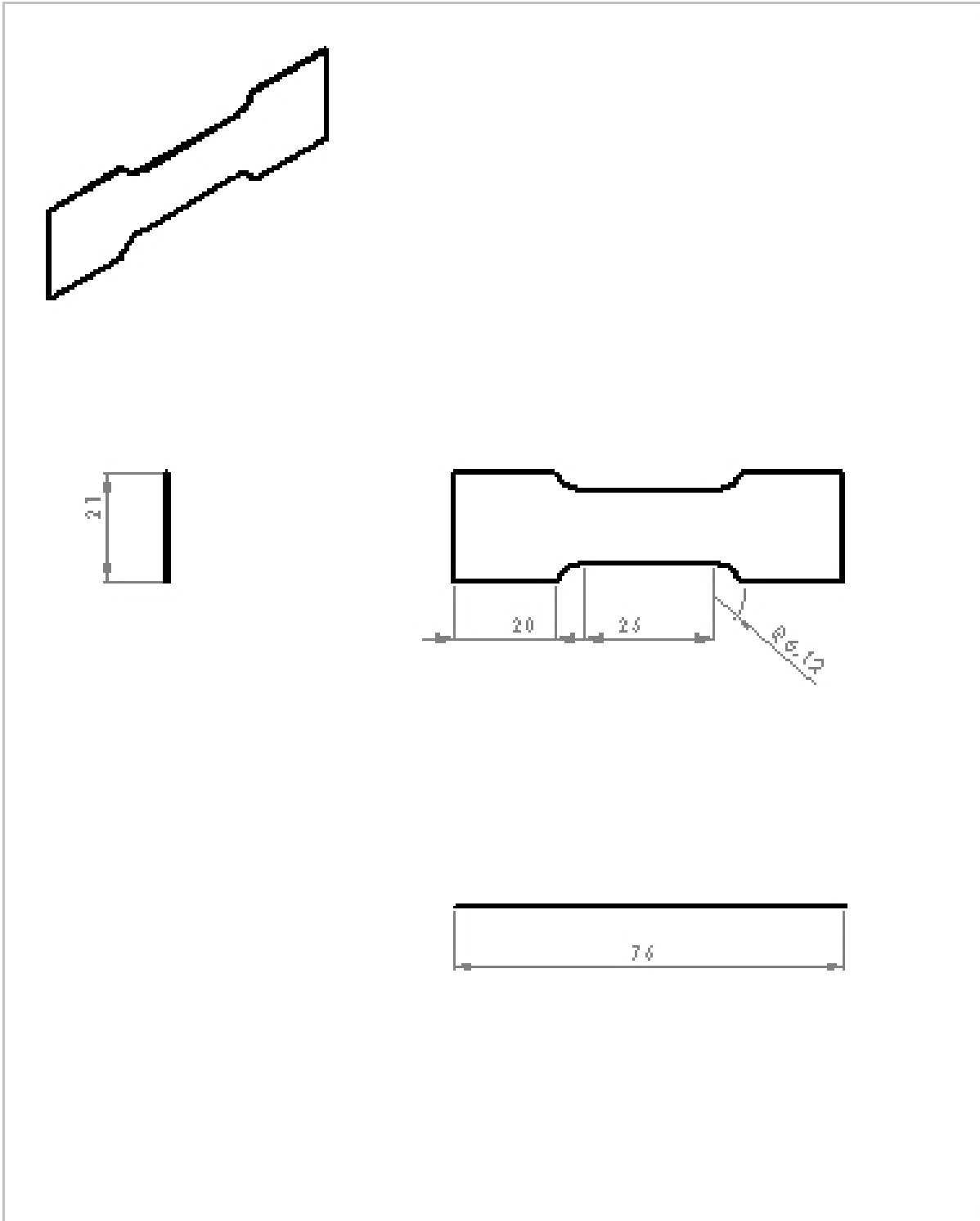
ANNEXES

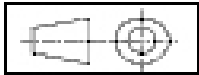
Annexe n°1

Annexe n°2

Oxydant	$\xrightleftharpoons[\text{oxydation}]{\text{réduction}}$	Réducteur	E ₀ (V)
F ₂ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 F ⁻	+ 2,87
S ₂ O ₈ ²⁻ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 SO ₄ ²⁻	+ 2,10
MnO ₄ ⁻ + 4 H ₃ O ⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	MnO ₂ + 6 H ₂ O	+ 1,69
ClO ⁻ + 2 H ₃ O ⁺ + e ⁻	$\rightleftharpoons$	½ Cl ₂ + H ₂ O	+ 1,63
MnO ₄ ⁻ + 8 H ₃ O ⁺ + 5 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Mn ²⁺ + 12 H ₂ O	+ 1,51
Au ³⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Au	+ 1,50
ClO ⁻ + 2 H ₃ O ⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Cl ⁻ + 3 H ₂ O	+ 1,49
PbO ₂ + 4 H ₃ O ⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Pb ²⁺ + 6 H ₂ O	+ 1,45
Cl ₂ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 Cl ⁻	+ 1,39
Cr ₂ O ₇ ²⁻ + 14 H ₃ O ⁺ + 6 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 Cr ³⁺ + 21 H ₂ O	+ 1,33
O ₂ + 4 H ₃ O ⁺ + 4 e ⁻	$\rightleftharpoons$	6 H ₂ O	+ 1,23
2 IO ₃ ⁻ + 12 H ₃ O ⁺ + 10 e ⁻	$\rightleftharpoons$	I ₂ + 18 H ₂ O	+ 1,19
Br ₂ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 Br ⁻	+ 1,07
NO ₃ ⁻ + 4 H ₃ O ⁺ + 3 e ⁻	$\rightleftharpoons$	NO + 6 H ₂ O	+ 0,96
ClO ⁻ + H ₂ O + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Cl ⁻ + 2 OH ⁻	+ 0,90
Ag ⁺ + e ⁻	$\rightleftharpoons$	Ag	+ 0,80
NO ₃ ⁻ + 2 H ₃ O ⁺ + e ⁻	$\rightleftharpoons$	NO ₂ + 3 H ₂ O	+ 0,80
Fe ³⁺ + e ⁻	$\rightleftharpoons$	Fe ²⁺	+ 0,77
I ₂ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 I ⁻	+ 0,54
H ₂ O + ½ O ₂ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 OH ⁻	+ 0,40
Cu ²⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Cu	+ 0,34
CH ₃ CHO + 2 H ₃ O ⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	CH ₃ CH ₂ OH + 2 H ₂ O	+ 0,19
SO ₄ ²⁻ + 3 H ₃ O ⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	HSO ₃ ⁻ + 4 H ₂ O	+ 0,17
S ₄ O ₆ ²⁻ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 S ₂ O ₃ ²⁻	+ 0,09
2 H ₃ O ⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	H ₂ + 2 H ₂ O	0,00
CH ₃ CO ₂ H + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	CH ₃ CHO	- 0,12
Pb ²⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Pb	- 0,13
Sn ²⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Sn	- 0,14
Ni ²⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Ni	- 0,23
Fe ²⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Fe	- 0,44
2 CO ₂ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	C ₂ O ₄ ²⁻	- 0,49
Zn ²⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Zn	- 0,76
2 H ₂ O + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	2 OH ⁻ + H ₂	- 0,83
Al ³⁺ + 3 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Al	- 1,67
Mg ²⁺ + 2 e ⁻	$\rightleftharpoons$	Mg	- 2,37
Na ⁺ + e ⁻	$\rightleftharpoons$	Na	- 2,71
Cs ⁺ + e ⁻	$\rightleftharpoons$	Cs	- 2,92

Annexe n°3



Echelle 1:1	Eprouvette	DEBIANE
		06.2016
	UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI	ASTM E8