



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie mécanique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

**En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Génie
mécanique spécialité :**

Génie des matériaux

Thème :

**Corrosion du Magnésium dans une solution de 0.9% NaCl en
présence d'un champ magnétique perpendiculaire de faible
intensité.**

Réalisé par :

Mme CHABANE

Selma



Encadré par :

Pr ZAZI Nacer

Co-encadré par :

Mme BEN ABDESSELAM

Djedjiga

PROMOTION : 2023/2024



Dédicaces

Je dédie ce travail en signe de respect, d'amour et de reconnaissance à :

À mes parents,

Pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices sans fin. Merci de toujours croire en moi et de m'encourager à avancer.

À mes sœurs (Manel, Souad, Imane et Céline) et à tous les membres de ma famille,

À mes amis,

À mes éducateurs,

Pour votre soutien, vos enseignements précieux et votre guidance tout au long de mes études. Vous avez été des sources d'inspiration et de motivation dans la réalisation de ce travail.

À Mme BEN ABDESSELAM Djedjiga, en particulier,

Pour votre accompagnement exceptionnel, vos conseils éclairés et votre soutien inestimable. Votre dévouement et votre expertise ont été essentiels à l'aboutissement de ce mémoire.



Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Dieu le Tout-Puissant pour m'avoir donné la capacité de comprendre et d'analyser des concepts complexes, pour m'avoir guidé dans mes études et pour m'avoir permis d'atteindre ce stade de mon parcours.

Je voudrais exprimer ma gratitude à mon directeur de mémoire Professeur **Nacer ZAZI**, pour ses conseils, son soutien et sa disponibilité. Je le remercie également pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance sincère à ma co-promotrice, **Mme BEN ABDESSELAM Djedjiga**, votre soutien, vos conseils éclairés et votre dévouement ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire. Sans vous, je n'aurais pas pu mener à bien ce projet. Vous avez été bien plus qu'une promotrice pour moi ; vous avez été une amie, toujours présente pour m'encourager et me guider. Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Je tiens aussi à remercier l'ingénieur du laboratoire SDM Mme YAKOUBI Milyada de m'avoir aidé à réaliser toutes mes expériences. Je remercie également tous les membres du labo LMSE.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à mes chers amis (**Sylas, Yasmina, Dalila, Samia, Lisa, Wissam, Tita** et **Loula**) pour votre soutien, vos encouragements et votre présence tout au long de cette aventure. Votre amitié et votre soutien moral ont été des sources d'inspiration et de réconfort qui ont enrichi mon expérience universitaire. Merci d'avoir été là pour moi dans les bons comme dans les moments plus difficiles.

Je remercie les membres du jury pour avoir pris le temps d'évaluer ce travail avec attention et pour leur précieuse contribution lors de sa soutenance.

Et pour finir, je remercie tous les auteurs dont les travaux ont été cités dans mes références bibliographiques, pour la richesse des informations qu'ils ont apportées et qui ont enrichi mes connaissances.



Liste des figures

Figure I.1 : La magnésite [2].....	6
Figure I.2 : La dolomite [2].....	7
Figure I.3 : La carnallite.....	7
Figure I.4 : La bischofite.....	7
Figure I.5 : La kiesérite.....	8
Figure I.6 : La brucite.....	8
Figure I.7 : L'olivine.....	9
Figure I.8 : TIMAB Magnésium[6].....	10
Figure I.9 : Propriétés physiques et chimiques du Magnésium.....	10
Figure I.10 : Structure cristalline hexagonale du Magnésium.....	12
Figure I.11 : Utilisation du magnésium, En 2019, dans le monde.....	23
Figure I.12 : Le Magnésium alimentaire.....	24
Figure I.13 : Complément alimentaire Mg.....	24
Figure I.14 : Implants biodégradables en magnésium.....	26
Figure II.15 : Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température.....	35
Figure II.16 : Mécanisme de la corrosion électrochimique.....	36
Figure II.17 : Corrosion biochimique.....	37
Figure II.18 : Corrosion uniforme.....	38
Figure II.19 : Corrosion localisée.....	39
Figure II.20 : Corrosion par piqûres.....	39
Figure II.21 : La corrosion intergranulaire.....	40
Figure II.22 : La corrosion par crevasses.....	40
Figure II.23 : La corrosion galvanique.....	41
Figure II.24 : Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage A-Mg.....	41
Figure II.25 : Corrosion filiforme.....	42
Figure II.26 : Diagramme de Pourbaix potentiel-Ph du magnésium dans l'eau à 25°C.....	43
Figure II.27 : Effet des éléments d'addition sur la tenue à la corrosion d'alliages de magnésium binaires testés dans une solution à 3% NaCl.....	45
Figure II.28 : Prévention par la forme du récipient (a) : mauvais. (b) : correct.....	48
Figure III.29 : Visualisation du champ magnétique créé par un aimant droit.....	56
Figure III.30 : La règle de la main droite.....	57
Figure III.31 : La règle de la main droite.....	57
Figure III.32 : Schéma du champ magnétique terrestre.....	58
Figure III.33 : Contours de densité de flux magnétique dans a) un matériau diamagnétique, b) un matériau paramagnétique, c) un matériau superconducteur.....	60
Figure III.34 : Boucle d'hystérésis.....	61
Figure IV.35 : Organigramme de travail.....	66
Figure IV.36 : Bloc de magnésium.....	67
Figure IV.37 : Echantillon découpé et connecté à un fil en cuivre.....	68
Figure IV.38 : Echantillons enrobés.....	68
Figure IV.39 : Polisseuse STUERS.....	69
Figure IV.40 : Acide nitrique à 65%.....	70
Figure IV.41 : Microscope optique de type « HUND WETZLAR ».....	71
Figure IV.42 : Dimensions du bloc du magnésium.....	71
Figure IV.43 : Duromètre HOMMEL.....	73
Figure IV.44 : Principe de l'essai de dureté Vickers.....	73



Figure IV.45 : Balance électrique.	74
Figure IV.46 : Tests de corrosion réalisés.	75
Figure IV.47 : Schéma de la chronopotentiometrie sous tension imposée 1.5V.....	76
Figure IV.48 : Balance d'analyse de type KERN.....	77
Figure IV.49 : Dispositif réalisé pour la mesure d'une courbe de polarisation potentiostatique.....	78
Figure IV.50 : Four électrique.....	79
Figure IV.51 : Traitement de recuit à 200°C.....	79
Figure IV.52 : Traitement de recuit à 300°C.....	80
Figure IV.53 : Intensité du petit aimant.....	80
Figure IV.54 : Intensité du grand aimant.....	81
Figure V.55 : Microstructure du magnésium sans traitement.	83
Figure V.56 : Microstructure du magnésium après quatre secondes d'attaque chimique dans l'acide nitrique dilué.	83
Figure V.57 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant une heure pour les trois échantillons.	85
Figure V.58 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant vingt-quatre heures des trois différents échantillons.	86
Figure V.59 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant cinq jours des différents échantillons.	86
Figure V.60 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant dix jours des trois échantillons.	87
Figure V.61 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant une heure sous tension imposée 1.5 V dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.	88
Figure V.62 : Suivi du courant de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant une heure sous une tension imposée 1.5V dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.	89
Figure V.63 : courbe de potentiel de corrosion libre après traitement thermique à 200°C et 300°C après 5 jours d'OCP dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.....	90
Figure V.64 : Microstructure du magnésium après une heure d'OCP,	90
Figure V.65 : Microstructure du magnésium après vingt-quatre heures d'OCP,	91
Figure V.66 : Microstructure du magnésium après cinq jours d'OCP.	92
Figure V. 67 : Microstructure du magnésium après dix jours d'OCP.	93
Figure V.68 : Microstructure du magnésium après une heure d'immersion sous tension imposée 1.5V dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.....	93
Figure V.69 : Microstructure du magnésium après cinq jours OCP dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit : a) à 200°C b) à 300°C c) sans recuit.	94
Figure V.70 : Courbe de polarisation après une heure d'immersion, a -(i)=f(E), b - effet loupe et c - Log(i)=f(E).....	95
Figure V.71 : Courbe de polarisation après vingt-quatre heures d'immersion, a - (i)=f(E), b - effet loupe et c - Log(i)=f(E).	96
Figure V.72 : Courbe de polarisation après cinq jours d'immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids, a - (i)=f(E), b - effet loupe et c - Log(i)=f(E).....	97
Figure V.73 : Courbe de polarisation après dix jours d'immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids, a - (i)=f(E), b - effet loupe et c - Log(i)=f(E).	98
Figure V.74 : Courbe de polarisation après cinq jours d'immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit à 200 et 300°C, a - (i)=f(E), b - effet loupe et c - Log(i)=f(E).	99
Figure V.75 : Morphologie de la corrosion du magnésium après polarisation suite à une heure d'immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : a) en absence du champ b) en presence d'un champ d'intensité de 40 mT c) en presence d'un champ de 47 mT.	100



Figure V.76 : Morphologie de la corrosion du magnésium après 24 heures d'OCP et polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : **a)** en absence du champ **b)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **c)** en présence d'un champ de 47 mT.101

Figure V.77 : Morphologie de la corrosion du magnésium après cinq jours d'immersion suivi d'une polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : **a)** en absence du champ **b)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **c)** en présence d'un champ de 47 mT..... 102

Figure V.78 : Morphologie de la corrosion du magnésium après dix jours d'immersion suivi d'une polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : **a)** en absence du champ magnétique **b)** en présence d'un champ magnétique de 40mT **c)** en présence d'un champ magnétique de 47mT.103

Figure V.79 : Microstructure du magnésium après cinq jours OCP et polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit : **a)** 200°C **b)** 300°C **c)** sans recuit.103

Figure V.80 : Résultat de l'immersion de 02 mois dans la solution de 0.9%NaCl.....104



Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les principaux alliages de magnésium moulés Mg-Al-Zn-Mn [10].....	14
Tableau I.2 : Caractéristiques physiques de quelques alliages de magnésium moulés [10].	14
Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques de quelques alliages de magnésium moulés à 20°C [10]..	15
Tableau I.4 : Les principaux alliages corroyés [10].	17
Tableau I.5 : Caractéristiques physiques de quelques alliages de magnésium corroyés [10].	18
Tableau I.6 : Caractéristiques mécaniques de quelques alliages de magnésium corroyés à 20°C [10].	19
Tableau II.7 : Facteurs de corrosion.....	33
Tableau II.8 : Vitesse de corrosion du magnésium dans un certain nombre de conditions.....	44
Tableau II.9 : Potentiel de dissolution de certains métaux dans une solution de 3 % NaCl.	46
Tableau II.10 : le potentiel de certains métaux par rapport à l'électrode standard d'hydrogène.	47
Tableau IV.11 : La composition chimique de l'alliage de magnésium.....	67
Tableau V.12 : Dureté Vickers du magnésium.....	84
Tableau V.13 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après une heure OCP suivi d'un test de polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.....	95
Tableau V.14 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après vingt-quatre heures d'immersion suivi d'un test de polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.	96
Tableau V.15 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après cinq jours d'immersion suivi d'un test de polarisation.....	97
Tableau V.16 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après dix jours d'immersion suivi d'un test de polarisation.....	98
Tableau V.17 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après cinq jours d'immersion et polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit à 200 et 300°C.	100



Table de matière

Chapitre I : Le Magnésium et ses alliages

Introduction générale.....	2
I.1-Introduction :.....	5
I.2- Histoire de découverte du Magnésium :	5
I.3-Sources de production du Magnésium :.....	6
I.4-Les propriétés physiques et chimiques du Magnésium :	10
I.4.1-Propriétés Physiques :	11
I.4.2-Propriétés Chimiques :.....	12
I.5-Les alliages de Magnésium :	13
I.5.1. Les alliages moulés :	13
I.5.2. Les alliages corroyés :.....	16
I.6-Le processus de fabrication du Magnésium :	19
I.6.1-Le procédé électrolytique :.....	19
I.6.2 -Le procédé thermique :	20
I.7-Applications du Magnésium :.....	21
I.8-Effet du magnésium sur la santé :.....	23
I.9-Perspectives d'avenir :	26
I.10-Conclusion :	27
I.11-Références bibliographiques :	28

Chapitre II : La corrosion de Magnésium et ses alliages.

II.1-Introduction :	32
II.2-Facteurs de corrosion :	32
II.3-Les différents types de corrosion :.....	34
II.3-1. La corrosion chimique(sèche) :	35
II.3-2. Corrosion électrochimique (humide) :.....	35
II.3-3. Corrosion biochimique :	36
II.3-4. Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique) :.....	37
II.4-Les formes de corrosion :	38
II.4-1. Corrosion uniforme (généralisée) :	38
II.4-2. La corrosion localisée :	38
II.4-2-1. La corrosion par piqûres :.....	39
II.4-2-2. La corrosion intergranulaire :	39
II.4-2-3. La corrosion par crevasses :.....	40
II.4-2-4. La Corrosion galvanique :.....	40
II.4-2-5. La corrosion sous contraintes :	41



II.4-2-6. La corrosion sélective :	42
II.4-2-7. La corrosion par l'hydrogène :	42
II.4-2-8. La corrosion filiforme :	42
II.5-Corrosion du magnésium et ses alliages :	43
II.5-1. Corrosion du magnésium par couplage galvanique :	44
II.5-2. Effet des éléments d'alliage :	45
II.6-Potentiel de corrosion :	45
II.6-1. Classification électrochimique des métaux :	45
II.7-Protection contre la corrosion :	48
II.7-1. La conception des pièces selon une géométrie favorable :	48
II.7-2. L'application de revêtements protecteurs :	48
II.7-2-1. Revêtements non métalliques :	48
II.7-2-2. Revêtements métalliques :	49
II.7-3. L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion :	49
II.7-4. La protection électrochimique :	49
II.8- L'impact de la corrosion sur l'économie :	49
II.8-1. Coûts Directs et Indirects :	50
II.8-2. Secteurs Affectés :	51
II.9-Références bibliographiques :	52

Chapitre III : Le champ magnétique.

III.1-Introduction :	55
III.2-Définition du champ magnétique :	56
III.3-Sources du champ magnétique :	56
III.4-Classification des Champs Magnétiques : Statiques et Dynamiques :	58
III.5-Comportements des matériaux en réponse à un champ magnétique :	59
III.6-Effets des champs magnétiques sur les matériaux :	60
III.7-Effet du champ magnétique sur la corrosion des métaux et du magnésium en particulier :	61
III.8-Applications du champ magnétique :	62
III.9-Références bibliographiques :	63

Chapitre IV : Matériels et méthodes expérimentales.

IV.1-Introduction :	66
IV.2-Organigramme :	66
IV.3-Alliage étudié :	67
IV.4-Méthodes d'élaboration :	67
IV.4-1-Préparation des échantillons :	67
IV.4-2-Enrobage des échantillons :	68



IV.4-3-Polissage :	69
IV.4-4-Attaque chimique :	69
IV.4.4.1-Préparation de la solution :	70
IV.4-5-Examen au microscope optique :	71
IV.4-6-Mesure de la masse volumique :	71
IV.4-7-Mesure de la dureté :	73
IV.5-Préparation de la solution d'immersion :	74
IV.6- Mesure du potentiel de corrosion libre (OCP) :	75
IV.6-1-1-Corrosion libre (Chronopotentiometrie) :	75
IV.6-1-2-Chronopotentiometrie sous tension imposée 1.5V :	76
IV.6-1-3-Test d'immersion pendant deux mois :	76
IV.7-Tracer les courbes de polarisation :	77
IV.7-1-Etapes de réalisation :	78
IV.8-Traitement thermique :	79
IV.9-Mesure de l'intensité du champ magnétique :	80

Chapitre V : Résultats et interprétations.

V.1-Microstructure de l'alliage de magnésium :	83
V.2-Calcul de la dureté :	83
V.3- Evolution du potentiel de corrosion libre :	84
V.4- Evolution de la morphologie de corrosion après immersion :	90
V.5-Les courbes de polarisation :	94
V.6- Evolution de la morphologie de corrosion après polarisation :	100
V.7- Immersion pendant deux mois :	104



Introduction générale



La corrosion des métaux est un phénomène omniprésent dans notre environnement, entraînant des coûts économiques considérables et des impacts environnementaux significatifs. Parmi les métaux sujets à la corrosion, le magnésium, qui joue un rôle crucial dans de nombreuses industries, notamment l'aérospatiale, l'automobile et la construction légère. Cependant, malgré ses excellentes propriétés mécaniques et sa légèreté, le magnésium est particulièrement sensible à la corrosion, ce qui limite souvent son utilisation dans des applications critiques.

Pour mieux comprendre et prévenir du phénomène de corrosion, il est essentiel d'explorer l'impact potentiel d'un champ magnétique sur la cinétique et la morphologie de la corrosion du magnésium. Cette étude s'inscrit dans ce contexte en proposant d'évaluer et de caractériser la corrosion du magnésium sous l'influence de champs magnétiques de faible intensité. Plus précisément, nous nous intéressons aux interactions entre le magnésium, et les ions présents dans les solutions salines, et le champ magnétique, en simulant des conditions environnementales réalistes, notamment des milieux salins (une solution de 0.9%NaCl dans notre étude).

L'objectif principal de cette étude est de fournir des informations sur la corrosion du magnésium et l'effet du recuit et du champ magnétique de faible intensité sur l'évolution de sa corrosion.

Dans cette optique, ce document est structuré en cinq chapitres distincts :

Le premier chapitre nous permettra de comprendre en profondeur le magnésium et ses alliages, en explorant leurs propriétés, leurs applications industrielles, ainsi que les facteurs influençant leur susceptibilité à la corrosion.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons la corrosion du magnésium et de ses alliages, en examinant les mécanismes de corrosion, ainsi que les facteurs environnementaux et les conditions de service qui favorisent ce phénomène.

Le troisième chapitre est consacré aux principes fondamentaux du champ magnétique, en explorant ses sources et ses effets potentiels sur les matériaux, y compris son influence sur les processus de corrosion.



Introduction générale

Le quatrième chapitre décrit les méthodologies expérimentales utilisées pour étudier l'interaction entre la corrosion du magnésium et le champ magnétique dans des solutions de chlorure de sodium à 0,9 %. Nous détaillerons les techniques de mesure et d'analyse employées dans cette étude.

Enfin, dans le cinquième chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus et de discussion de ces résultats pour la compréhension de la corrosion du magnésium dans des environnements chlorurés en présence d'un champ magnétique.

Pour finir, une conclusion générale est formulée afin de fournir une vue d'ensemble de cette étude.



CHAPITRE I :

Le magnésium et ses alliages



I.1-Introduction :

Le magnésium, métal de symbole Mg et de numéro atomique 12, est un élément chimique métallique qui a une histoire riche remontant à l'Antiquité. Il a été isolé pour la première fois à partir de sels de magnésium dans les mines de magnésie à la fin du 18^e siècle. Son nom est dérivé de Magnésia, une ancienne cité d'Asie Mineure réputée pour sa magnésie blanche depuis des siècles [1] [2]. Appartenant au groupe des métaux alcalino-terreux dans le tableau périodique, le magnésium se présente sous forme solide à température ambiante, avec une teinte argentée caractéristique. Ses propriétés légères, sa facilité de manipulation et sa faible densité en font un matériau polyvalent largement utilisé dans diverses industries. Il joue également un rôle crucial pour la santé humaine [2][3].

Les minerais de magnésium, se présentent sous forme d'oxyde, de carbonate, de chlorure ou de sulfate, sont abondamment répandus à travers le globe.

Néanmoins, malgré sa présence répandue, le magnésium métallique n'est pas présent à l'état naturel en raison de sa grande réactivité chimique. Il est essentiel d'utiliser des méthodes comme l'électrolyse ignée ou l'utilisation de réducteurs très énergétiques à des températures élevées pour réduire les composés de magnésium tels que le chlorure et l'oxyde de magnésium [2].

Ce chapitre a pour objectif de fournir une vision globale exhaustive du magnésium, incluant son histoire, sa production, ses caractéristiques, ses applications industrielles ainsi que son importance cruciale pour la santé humaine. Nous invoquerons également ses divers alliages.

I.2- Histoire de découverte du Magnésium :

Son histoire remonte à l'Antiquité, où il a été découvert dans la région grecque de Magnésie, d'où il tire son nom. Les Grecs utilisaient des sels de magnésium pour fabriquer des médicaments et des onguents, notamment pour soigner les affections de la peau.

Cependant, le chemin vers la compréhension et l'isolation du magnésium métallique tel que nous le connaissons aujourd'hui a été long et complexe. En 1755, le scientifique écossais Joseph Black a découvert un composé soluble dans l'eau qu'il a appelé "calcaire magnésien", qui était en réalité du carbonate de magnésium. Black a remarqué que ce composé pouvait être transformé en oxyde de magnésium, une substance blanche et poudreuse.



Ce n'est que plus tard, en 1808, que le chimiste anglais Sir Humphry Davy a réalisé une avancée majeure dans l'histoire du magnésium. Davy, célèbre pour ses travaux sur l'électrolyse, a réussi à isoler le magnésium métallique pur en utilisant cette technique novatrice. Il a chauffé un mélange d'oxyde de magnésium et d'oxyde de mercure tout en appliquant une charge électrique. Cela a permis de séparer le magnésium du mercure, aboutissant à l'obtention du métal pur [3] [4].

I.3-Sources de production du Magnésium :

Le magnésium occupe la huitième place en termes de quantité dans la croûte terrestre [3]. Avec une présence d'environ 2 % de sa composition. Il est largement répandu et se retrouve dans plus de 60 minéraux différents à travers le monde, parmi lesquels les plus significatifs sont [1] :

- La magnésite ou giobertite ($MgCO_3$).



Figure I.1 : La magnésite [2]

- La dolomite, qui renferme de la dolomie $(Ca,Mg)CO_3$, avec une concentration de 38 % de MgO après calcination



Figure I.2 : La dolomite [2].

- La carnallite ($\text{KCl}, \text{MgCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$), présente dans les gisements de potasse et utilisée comme source de magnésium dans les engrais.



Figure I.3 : La carnallite.

- La bischofite ($\text{MgCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$), répertoriée dans la section sur les chlorures de magnésium.



Figure I.4 : La bischofite.



- La kiesérite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), utilisée dans l'industrie des engrais.



Figure I.5 : La kiesérite.

- La brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).



Figure I.6 : La brucite.

- L'olivine, un silicate de magnésium et de fer avec une composition variant entre celle de la forstérite (Mg_2SiO_4) et celle de la fayalite (Fe_2SiO_4). La qualité commerciale contient généralement entre 45 et 51 % de MgO et entre 7 et 8 % de Fe_2O_3 .



Figure I.7 : L'olivine.

La Norvège est le premier producteur mondial de ce minéral [1][5].

La plupart des magnésies proviennent de roches carbonées [6].

Il existe deux types de roches exploitées pour leur teneur en magnésium :

- Les roches macro-cristallines, caractérisées par leur faible porosité et la présence de cristaux de grande taille, qui contiennent généralement une proportion plus élevée de CaO.
- Les roches cryptocristallines, qui sont plus poreuses et ont des cristaux de petite taille, contenant généralement davantage de SiO₂ et peu de fer et de manganèse.

La qualité de la magnésie en tant que source de magnésium dépend de la connaissance approfondie du magnésium et de ses propriétés, ainsi que des autres éléments présents dans la roche, qui peuvent avoir une influence significative sur les caractéristiques du produit final.[6]



Figure I.8: TIMAB Magnésium[6]



Le magnésium est également obtenu à partir de l'eau de mer et des saumures. La concentration moyenne en magnésium dans l'eau de mer est d'environ $1,3 \text{ kg/m}^3$, soit 0,13 %. Cependant, certaines mers ou lacs fermés peuvent contenir jusqu'à 35 kg/m^3 . Par exemple, le Grand Lac Salé dans l'Utah, aux États-Unis, présente une concentration en magnésium de 5 % en masse. Le magnésium est extrait sous forme de chlorure de magnésium (MgCl_2) et éventuellement transformé en oxyde de magnésium (MgO), ou en d'autres composés tels que l'hydroxyde ou le sulfate, voire en métal. Aux États-Unis, en 2021, 64 % de la production nationale de sels de magnésium proviennent de l'eau de mer ou des saumures. En 2017, au niveau mondial, la part provenant de l'eau de mer et des saumures était de 5,6 %. Toute la production primaire de magnésium métal aux États-Unis et en Israël provient respectivement du Grand Lac Salé et de la Mer Morte [1].

I.4-Les propriétés physiques et chimiques du Magnésium :

Le magnésium possède un ensemble de propriétés physiques et chimiques qui en font un matériau polyvalent et largement utilisé. Ces propriétés influent sur ses applications dans divers domaines industriels, médicaux et environnementaux. Examinons de plus près ces caractéristiques distinctives :

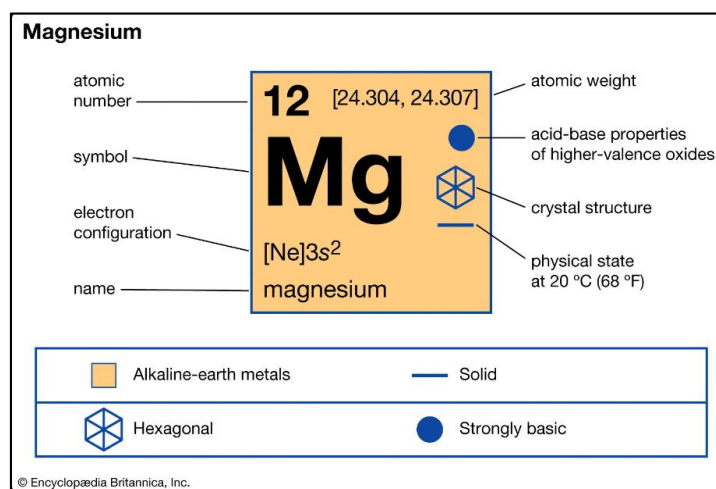


Figure I.9 : Propriétés physiques et chimiques du Magnésium.

I.4.1-Propriétés Physiques :

1. **Légèreté** : Le magnésium est célèbre pour sa légèreté. Avec une densité relative de 1,74 et une densité de 1740 kg/m^3 , il est environ deux tiers moins denses que l'aluminium.



Cette légèreté en fait un matériau de choix pour les applications nécessitant des composants légers mais robustes, tels que dans l'industrie aéronautique et automobile.

- Points de Fusion et d'Ébullition :** Le magnésium a des points de fusion et d'ébullition relativement élevés par rapport à d'autres métaux. Il fond à une température de 650 °C et bout à 1107 °C, ce qui le rend adapté à des applications nécessitant une résistance élevée aux températures élevées, comme dans les moteurs et les systèmes de chauffage.
- Rayon Atomique et Ionique :** Le rayon atomique du magnésium est d'environ 0,16 nm, tandis que son rayon ionique est d'environ 0,065 nm. Ces dimensions atomiques influent sur ses propriétés chimiques, notamment sa réactivité et sa capacité à former des liaisons avec d'autres atomes.
- Conductivité Électrique :** Bien que le magnésium soit un bon conducteur de l'électricité, sa résistivité électrique est légèrement supérieure à celle de l'aluminium. Cependant, sa conductivité thermique est plus élevée que celle de nombreux autres métaux, ce qui le rend utile dans les applications nécessitant une dissipation efficace de la chaleur, comme dans les radiateurs et les dissipateurs thermiques.
- Structure Cristalline :** Les alliages de magnésium présentent principalement une structure cristalline hexagonale, également appelée structure HCP (Hexagonal Close-Packed). Cette structure confère aux alliages de magnésium une combinaison de résistance mécanique et de ductilité, les rendant adaptés au moulage, au forgeage et à l'extrusion sous pression.

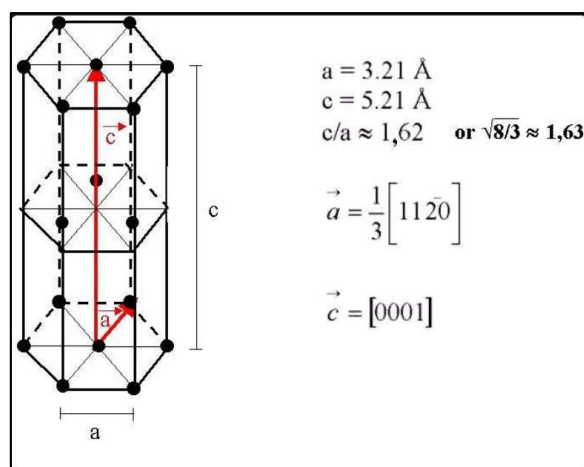


Figure I.10 : Structure cristalline hexagonale du Magnésium.



I.4.2-Propriétés Chimiques :

1. **Réactivité** : Le magnésium est un métal réactif qui réagit facilement avec de nombreux éléments et composés chimiques. Il peut réagir avec l'eau pour produire de l'hydrogène gazeux et des hydroxydes métalliques et des ions Mg^{2+} .
2. **Oxydation** : Lorsqu'il est exposé à l'air, le magnésium a tendance à s'oxyder, formant une couche d'oxyde de magnésium (MgO) à sa surface. Cette couche protectrice offre une certaine résistance à la corrosion, ce qui rend le magnésium approprié pour les applications en extérieur et dans des environnements corrosifs.
3. **Réactivité avec les Acides** : Le magnésium réagit avec les acides pour former du dihydrogène et des sels de magnésium. Par exemple, lorsqu'il est ajouté à de l'acide chlorhydrique, il produit du chlorure de magnésium et du dihydrogène gazeux.
4. **Formation de Composés** : Le magnésium peut former une variété de composés chimiques, y compris des chlorures, des oxydes, des sulfates et des carbonates. Ces composés ont des applications dans l'industrie chimique, la médecine et l'agriculture, entre autres [1] [7] [8] [9].

En combinant ses propriétés physiques et chimiques uniques, le magnésium est un matériau indispensable dans de nombreux secteurs, de la fabrication d'alliages métalliques à la médecine, en passant par l'ingénierie environnementale et la production d'énergie.

I.5-Les alliages de Magnésium :

Le magnésium est très malléable, ductile mais peu tenace. Afin d'améliorer ses caractéristiques pour des applications spécifiques, différents alliages ont été développés au fil du temps, regroupés en plusieurs catégories correspondant à leur évolution chronologique [2].

L'aluminium, le zinc, le zirconium, les terres rares, le thorium, le manganèse et l'argent sont les principaux alliages rencontrés avec le magnésium.

- **L'aluminium** : Avec le durcissement structurel par précipitation de phases intermétalliques, l'aluminium améliore la coulabilité ainsi que toutes les caractéristiques mécaniques, mais il a tendance à favoriser la présence de microporosités.



- **Le zinc** : Lorsqu'il est contenu à une teneur supérieure à 5,5 %, il améliore la coulabilité et la résistance mécanique par effet d'affinage des grains et réduit la microporosité.
- **Le zirconium** : Il améliore la coulabilité et l'ensemble des caractéristiques mécaniques par effet d'affinage de grains.
- **Les terres rares** : Elles améliorent la résistance à la corrosion galvanique, la coulabilité, la limite d'élasticité et la tenue au fluage jusqu'à 250 °C et ont tendance à réduire les microporosités.
- **Le thorium** : Il réduit la fragilité et les microporosités et améliore les propriétés de tenue au fluage jusqu'à 350 °C.
- **Le manganèse** : Il n'améliore pratiquement pas les caractéristiques mécaniques, mais il améliore la résistance à la corrosion en éliminant les effets néfastes de certains éléments résiduels comme le fer et le nickel.
- **L'argent** : Il est principalement utilisé en présence de terres rares, il augmente la résistance mécanique [10].

Les alliages de magnésium sont divisés en deux groupes principaux : les alliages moulés et les alliages corroyés.

I.5.1. Les alliages moulés :

Les alliages moulés sont utilisés pour la fabrication de pièces moulées par gravité, sous pression ou par injection. Ils sont généralement composés de magnésium, d'aluminium, de zinc et de manganèse. Les alliages moulés sont appréciés pour leur bonne coulabilité, leur résistance mécanique et leur résistance à la corrosion. Le tableau I.1 donne la liste des principaux alliages de magnésium moulés.

Tableau I.1 : Les principaux alliages de magnésium moulés Mg-Al-Zn-Mn [10].

Alliage	Composition chimique (% en poids)			Impuretés Fe, Si, Cu, Ni	Traitement thermique
	Al	Zn	Mn		



GA4S1	3,5 / 5	< 0,1	0,2 / 0,5	Si 0,1/0,5 autres 0,4	T4
GA8Z1	7 / 8,1	0,4 / 1	0,13	0,7	T4
GA9Z1	8,3 / 9,7	0,35 / 1	0,13 / 0,15	0,1 / 1,1	T4 à T6
GA6M	5,5 / 6,5	0,22	0,13 / 0,25	0,2 / 0,8	T4

Les tableaux I.2 et I.3 donnent les caractéristiques physiques et mécaniques des principaux alliages du magnésium moulé.

Tableau I.2 : Caractéristiques physiques de quelques alliages de magnésium moulés [10].

Alliage	Masse Volumique 20°C (g/cm³)	Coefficient dilatation 20-200°C (10⁻⁶.K-1)	Conductivité thermique 20°C (W/m.K)	Résistivité électrique 20°C (10⁻⁸ Ω .m)	Chaleur spécifique 20-200°C (J/(Kg.K))
WE54	1.85	24.6	52	17.3	960
WE43	1.84	26.7	51	14.8	966
GTR3Z2	1.80	26.8	100	7.3	1050
GZ4TR	1.84	27.1	109	6.8	960
EQ21	1.81	26.7	113	6.85	1000
ZC63	1.87	27.0	123	5.4	960



GA8Z1	1.81	27.2	84	13.4	1000
GA9Z1	1.83	27.0	84	14.1	1000
GA6M	1.80	27.0	60.7	10	1047
GA4S1	1.78	27.0	67.0	8	1047

Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques de quelques alliages de magnésium moulés à 20°C [10].

Alliage	Etat (2)	Traction			Tenue ⁽¹⁾ fatigue (N/mm ²)	Dureté Brinell HB	Module d'Young (N/mm ²)
		R _m (N/mm ²)	R _{p0.2} (N/mm ²)	A (%)			
WE54	Y23	255	185	2	95	80	44000
WE43	Y23	220	172	2	80	80	44000
GTR3Z2	Y25	140	95	3	75	55	44000
GZ4TR	Y23	200	135	3	95	60	44000
EQ21	Y23	240	175	2	100	80	45000
ZC63	Y23	210	125	2	90	60	45000



GA8Z1	Y30	190	170	2	70	60	44000
GA9Z1	Y40	200	140	2	50	65	44000
GA6M	Y40	250	130	6	50	-	45000
GA4S1	Y40	230	135	6	50	-	45000

(1) Fatigue pour 5 10⁷ cycles en flexion rotative. (2) Désignation des états moulés selon l'ancienne norme NF A 03002 : Y23 : moulé en sable, trempe et revenu maximum. Y25 : moulé en sable, revenu de stabilisation. Y30 : moulé en coquille, pas de traitement thermique. Y40 : moulé sous pression, pas de traitement thermique.

I.5.2. Les alliages corroyés :

Les alliages corroyés quant à eux, sont utilisés pour la fabrication de pièces forgées, laminées ou extrudées. Ils sont généralement composés de magnésium, d'aluminium, de zirconium et de terres rares. Les alliages corroyés sont appréciés pour leur bonne résistance mécanique, leur résistance à la fatigue et leur résistance à la corrosion [10]. Le tableau I.4 présente la composition chimique ainsi que les principaux usages de quelques alliages de magnésium corroyés.

Tableau I.4 : Les principaux alliages corroyés [10].

Produits	Nuances	Composition chimique (% en poids)					
		Al	Mn	Th	Zn	Zr	TR
Barres	GA3Z1	3,0	-	-	1,0	-	-
	GA6Z1	6,5	-	-	1,0	-	-
	GA7Z1	8,5	-	-	0,5	-	-



	GZ5Zr	-	-	-	5,5	> 0,45	-
	ZK40	-	-	-	4,0	> 0,45	-
Tôles	GA3Z1	3,0	-	-	1,0	-	-
	HK31	-	-	2,5/4,0	0,3	0,4/1,0	-
	HM21	-	0,45/1,1	1,5/2,5	-	-	-
Forgés	AZ80	3,0	0,3	-	1,0	-	-
	GA3Z1	3,0	-	2,5/4,0	1,0	-	-
	HK31	-	-	1,5/2,5	3,0	0,4/1,0	-
	HM21	-	0,45/1,1	-	-	-	-
	GA7Z1	8,5	-	-	0,5	-	-
	GA6Z1	6,5	-	-	1,0	-	-
	GZ5Zr	-	-	-	5,5	>0,45	-
	WE43(1)	Y=4,0	-	-	-	0,5	3,0
	WE54(1)	Y=5,2	-	-	-	0,5	3,5
	ZK60	-	-	-	6,0	0,6	-

Yttrium au lieu d'Aluminium

Les tableaux I.5 et I.6 donnent les caractéristiques physiques et mécaniques des principaux alliages du magnésium corroyé.



Tableau I.5 : Caractéristiques physiques de quelques alliages de magnésium corroyés [10].

Alliage	Masse Volumique	Coefficient dilatation	Conductivité thermique	Résistivité électrique	Chaleur spécifique
	20°C (g/cm ³)	20-200°C (10 ⁻⁶ . K-1)	20°C (W/m. K)	20°C (10 ⁻⁸ Ω .m)	20-200°C (J/(Kg. K))
ZC71	1.87	26.0	123	5.4	960
GA6Z1	1.80	27.3	79	14.3	1000
GA7Z1	1.80	26.0	78	14.5	1050
GA3Z1	1.77	26.0	96	10.0	1040
HM21	1.78	26.0	138	5.2	-
HK31	1.80	26.0	114	6.0	-

Tableau I.6 : Caractéristiques mécaniques de quelques alliages de magnésium corroyés à 20°C [10].

Alliage	Etat (2)	Traction			Tenue ⁽¹⁾ fatigue (N/mm ²)	Dureté Brinell HB	Module d'Young (N/mm ²)
		R _m (N/mm ²)	R _{p0.2} (N/mm ²)	A (%)			
ZC71	Filé presse	240	160	7	-	70	44000



GA6Z1	Filé presse	280	150	9	115	60	45000
GA7Z1	Forgés Filé presse	300	200	8	130	65	45000
GA3Z1	Filé presse	300	200	8	130	65	45000
HM21	Forgé	235	170	8	-	-	45000
HK31	Forgé	260	205	9	-	68	45000

(1) Fatigue : pour 5.10^7 cycles par flexion rotative.

I.6-Le processus de fabrication du Magnésium :

La métallurgie du magnésium met en œuvre deux procédés principaux : l'électrolyse en milieu sel fondu et la réduction dans un four électrique selon le procédé thermique. [11]

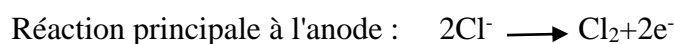
I.6.1-Le procédé électrolytique :

Le procédé électrolytique est une méthode utilisée pour produire du magnésium métallique à partir de ses sels fondus, principalement le chlorure de magnésium ($MgCl_2$) à une température comprise entre 750 et 800 °C. Voici les principales étapes du processus :

- 1. Préparation de l'électrolyte :** Le chlorure de magnésium est dissous dans un solvant approprié, généralement du chlorure de potassium (KCl) ou du chlorure de sodium (NaCl), pour former un électrolyte fondu. Ce mélange fondu est placé dans une cellule d'électrolyse.
- 2. Installation de l'anode et de la cathode :** Une anode et une cathode sont insérées dans l'électrolyte fondu. L'anode est généralement en graphite, tandis que la cathode peut être soit en graphite, soit en acier recouvert de carbone.



- 3. Passage du courant électrique** : Lorsqu'un courant électrique est appliqué à travers la cellule d'électrolyse, les ions de magnésium positivement chargés migrent vers la cathode, où ils gagnent des électrons et se déposent sous forme de magnésium métallique. En même temps, des ions négativement chargés, généralement des chlorures, migrent vers l'anode.
- 4. Collecte du magnésium** : Le magnésium métallique produit se dépose sur la cathode sous forme de couche solide. Il est ensuite récupéré à intervalles réguliers en retirant la cathode de la cellule d'électrolyse.
- 5. Gestion des sous-produits** : Pendant le processus électrolytique, du chlore gazeux est généralement libéré à l'anode. Ce chlore peut être récupéré pour être utilisé dans d'autres processus chimiques.



Le procédé électrolytique offre plusieurs avantages, notamment une pureté élevée du magnésium produit et une efficacité énergétique relative par rapport à d'autres méthodes de production. Cependant, il nécessite une source d'électricité constante et peut être plus coûteux en capital initial que d'autres méthodes de production de magnésium [8] [12].

I.6.2 -Le procédé thermique :

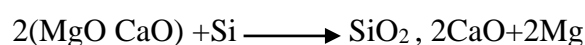
Le procédé thermique, également connu sous le nom de procédé Pidgeon, est une méthode alternative de production de magnésium qui repose sur la réduction thermique des oxydes de magnésium. Les principales étapes de ce processus :

- 1. Préparation du mélange réactif** : Le minerai de magnésium, généralement de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou de la magnésite (MgCO_3), est combiné avec un agent réducteur tel que du ferrosilicium (un alliage de fer et de silicium) et éventuellement un combustible comme le charbon. Ce mélange est préparé en proportions appropriées pour faciliter la réaction de réduction.
- 2. Chauffage du mélange réactif** : Le mélange réactif est chauffé dans un réacteur spécial à des températures élevées, généralement entre 1150°C et 1200°C . Cette chaleur



provoque la décomposition thermique du minerai de magnésium, libérant du magnésium gazeux et d'autres composés.

- 3. Condensation du magnésium** : Le magnésium gazeux produit dans le réacteur est dirigé vers un système de condensation où il est refroidi et condensé pour former du magnésium métallique pur.
- 4. Collecte et purification** : Le magnésium métallique condensé est collecté et soumis à des étapes de purification pour éliminer les impuretés résiduelles et obtenir un produit final de haute qualité.



Le procédé thermique présente l'avantage d'utiliser des matières premières abondantes et peu coûteuses. Cependant, il est moins économe en énergie que le procédé électrolytique et peut générer des émissions polluantes, notamment de CO₂. De plus, il peut nécessiter des investissements en capital importants pour les équipements de chauffage et de condensation [8] [12].

I.7-Applications du Magnésium :

Les applications du magnésium sont diverses et couvrent plusieurs domaines, en raison de ses propriétés physiques et chimiques uniques. Notamment, l'industrie, la métallurgie, la chimie, la médecine et l'aéronautique. Les principales applications du magnésium :

1. Industrie et Métallurgie :

Le magnésium est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés structurelles légères. Ses alliages sont utilisés dans des pièces légères pour diverses applications, offrant des avantages tels qu'une densité plus faible que l'aluminium, une durée de moule prolongée, une facilité d'usinage et une absorption des vibrations [13].

2. Chimie :

En chimie, le magnésium est utilisé comme agent énergique pour protéger les pièces d'acier de la corrosion par voie humide. Il est également utilisé dans la réaction de Grignard et



comme élément d'alliage pour l'aluminium, l'inoculation de la fonte GS, la désulfuration de l'acier et l'affinage du titane [2].

3. Médecine :

Le magnésium est crucial pour la santé humaine, jouant un rôle dans diverses fonctions biologiques. Les carences en magnésium peuvent accroître le risque de maladies cardiovasculaires et d'AVC. Les suppléments de magnésium peuvent être nécessaires pour combler les carences et des études suggèrent qu'ils pourraient aider à soulager l'anxiété modérée [14].

5. Aéronautique :

Dans l'aéronautique, le magnésium est utilisé pour fabriquer des pièces légères. Les alliages de magnésium sont utilisés pour les carters, les tubes et les profilés dans l'industrie aéronautique, offrant des avantages tels qu'une réduction significative du poids des pièces.[13]

6. Usinage :

L'usinage du magnésium est important pour créer des pièces légères et résistantes à la corrosion. Le magnésium est facile à façonner, offre une finition de surface exceptionnelle, une rupture nette des copeaux, une durée de vie prolongée de l'outil et une efficacité énergétique lors de l'usinage. [15] [16]

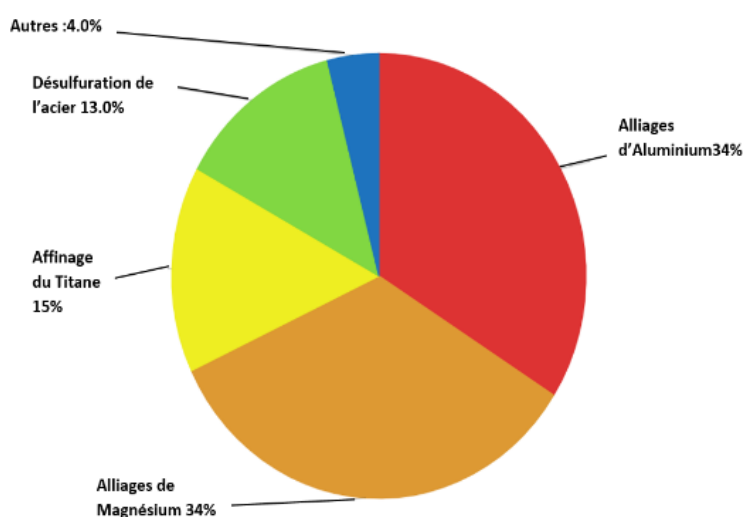


Figure I.11 : Utilisation du magnésium, En 2019, dans le monde.



I.8-Effet du magnésium sur la santé :

Le magnésium est un minéral essentiel pour le corps humain, qui joue un rôle important dans de nombreuses fonctions, notamment la régulation de la concentration en calcium, la solidité des os et des muscles, l'abaissement de la tension artérielle, la réduction de la fatigue, l'amélioration de la qualité du sommeil, et l'atténuation des symptômes du syndrome prémenstruel [17] [18] [19].

Les aliments les plus riches en magnésium sont les légumes verts à feuilles, les céréales complètes, les légumineuses, les oléagineux, et le chocolat noir [17] [18]. Cependant, une alimentation sans aliments riches en magnésium peut entraîner une carence, qui peut être comblée par une cure de magnésium sous forme de médicament ou de complément alimentaire [17].



Figure I.12 : Le Magnésium alimentaire

Il existe différentes formes de compléments alimentaires de magnésium, tels que les comprimés, les gélules, les capsules, les ampoules, les sticks, et les solutions buvables. Les compléments alimentaires de magnésium contiennent souvent de la vitamine B6, qui contribue à limiter la survenue d'effets indésirables associés au magnésium, en particulier au niveau digestif [17].



Figure I.13: Complément alimentaire Mg.

Le magnésium marin, extrait du sel de l'eau de mer, est la forme de magnésium la plus naturelle et est bien absorbé et assimilé par l'organisme, dès qu'il est associé à la vitamine B6. Il est également mieux toléré par le système digestif [17].

Des doses élevées de magnésium sont plus susceptibles de provoquer des troubles digestifs et, à l'heure actuelle, il n'y a pas suffisamment de preuves pour étayer les effets de doses élevées sur le long terme. Il est donc important de respecter les instructions figurant sur l'étiquette et de consulter un professionnel de la santé avant de prendre un supplément de magnésium [18].

Le magnésium est généralement sans danger pour tous, mais certaines personnes peuvent présenter des niveaux faibles de ce minéral important, notamment les personnes âgées, les diabétiques de type 2, et les personnes souffrant de problèmes intestinaux, tels que la maladie de Crohn. Avant de prendre un supplément, il est essentiel de consulter un médecin généraliste, car certains médicaments peuvent interagir avec le magnésium ou affecter le statut en magnésium [18].

En somme, le magnésium peut être bénéfique pour la santé, en améliorant la qualité du sommeil, en luttant contre les crampes, les migraines et d'autres symptômes du syndrome prémenstruel, en agissant comme un antidépresseur, et en augmentant l'impact de la vitamine D. Il est important de respecter les doses recommandées et de consulter un professionnel de la santé avant de prendre un supplément de magnésium [18] [14] [4].



Au cours des dernières décennies, le magnésium a été de plus en plus utilisé dans les implants médicaux, en raison de ses propriétés biocompatibles et de sa capacité à se dégrader dans le corps humain sans laisser de résidus nocifs [24].

Les implants en magnésium sont des dispositifs médicaux biodégradables qui offrent une alternative prometteuse aux implants métalliques traditionnels. Ces implants sont conçus pour se dissoudre dans l'environnement biologique après une certaine durée d'utilisation fonctionnelle, évitant ainsi une seconde intervention chirurgicale pour les retirer. Ils offrent à la fois une biocompatibilité et des propriétés mécaniques appropriées au corps humain, ce qui réduit les risques de rejet ou de réactions allergiques par rapport aux implants métalliques classiques [20]. La figure I.14 représente des applications réelles des implants biodégradables en magnésium : (a) stents cardiovasculaires ; (b) des vis pour la fixation orthopédique ; (c) des microclips biodégradables ; (d) implants orthopédiques biodégradables ; (e) dispositifs pour refermer les plaies.

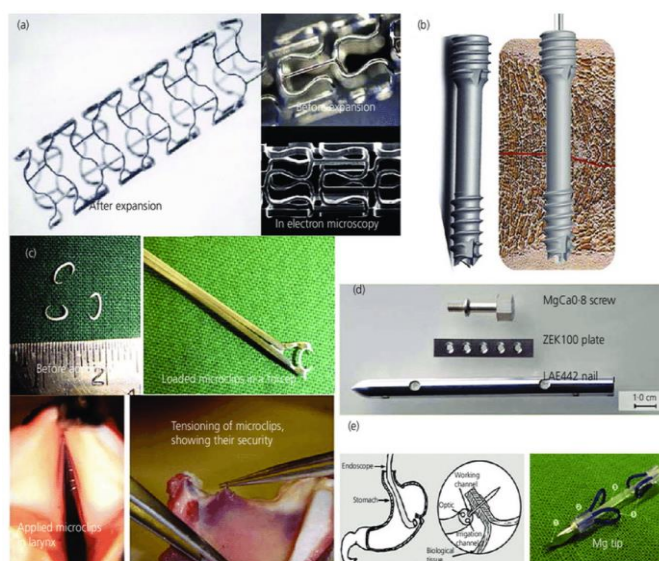


Figure I.14: Implants biodégradables en magnésium.

I.9-Perspectives d'avenir :

Le magnésium offre plusieurs perspectives d'avenir prometteuses dans divers domaines, notamment la médecine, l'industrie, et l'énergie. Voici quelques-unes des perspectives clés :

Le magnésium est un matériau d'avenir pour le bâtiment en raison de sa légèreté et de sa résistance à la corrosion [21]. Il a le potentiel de devenir une alternative au lithium pour les



batteries des voitures électriques, grâce à sa plus grande densité énergétique, son coût plus faible et sa plus grande durabilité. Des chercheurs de l'Université des sciences de Tokyo ont déterminé la composition optimale d'une cathode de batterie en magnésium, ce qui a entraîné une augmentation du nombre de cycles et une capacité de batterie très importante [22].

Dans le domaine médical, le magnésium a été introduit comme biomatériau orthopédique et les implants en magnésium et les applications similaires sont devenus des options très intéressantes. Les alliages de magnésium sont également utilisés dans la production d'armes et d'équipements militaires en raison de leur résistance accrue et de leur capacité à réduire le poids de l'équipement [23].

En termes de perspectives, le magnésium a un grand potentiel pour l'avenir en raison de ses propriétés uniques et de ses applications dans divers domaines.

I.10-Conclusion :

Le magnésium, avec son histoire riche et fascinante, a évolué pour devenir un élément essentiel dans de nombreux aspects de notre vie moderne. De ses premières découvertes et utilisations par les anciennes civilisations à son rôle crucial dans les applications contemporaines, le magnésium a toujours captivé l'intérêt des scientifiques, des ingénieurs et des chercheurs.

En ce qui concerne sa production, le magnésium est principalement extrait de minéraux comme la dolomie et la magnésite, avec des procédés de production complexes qui ont évolué au fil du temps pour répondre aux demandes croissantes de diverses industries.

Les propriétés physiques et chimiques uniques du magnésium en font un matériau polyvalent, utilisé dans une gamme diversifiée d'applications, de l'industrie automobile à l'aérospatiale, en passant par la médecine et les technologies électroniques.

Son influence sur la santé humaine ne peut être sous-estimée, avec des études continuant à révéler son rôle crucial dans de nombreux processus biologiques. De plus en plus, les alliages de magnésium offrent des solutions innovantes dans la fabrication de composants légers et résistants pour diverses applications industrielles.



En fin de compte, le magnésium demeure un sujet d'intérêt et de recherche continu, offrant des perspectives prometteuses dans un large éventail de domaines. Sa polyvalence, combinée à ses propriétés uniques et à son impact sur la santé, en fait un matériau essentiel pour l'avenir, avec un potentiel encore à explorer et à exploiter pleinement.



I.11-Références bibliographiques :

- [1] « Magnesium-2022.pdf ». Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://lelementarium.fr/wp-content/uploads/2018/04/Magnesium-2022.pdf>
- [2] M. HARDOUIN et M. SCHEIDECKER, « MAGNÉSIUM », Encyclopædia Universalis. Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.universalis-edu.com/encyclopedie/magnesium>
- [3] « Magnésium - Élément atomique n°12 - Symbole Mg - France Minéraux ». Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.france-mineraux.fr/tableau-periodique-des-elements/magnesium/>
- [4] « Le Magnésium | Superprof ». Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.superprof.fr/ressources/physique-chimie/physique-chimie-tous-niveaux/cours-sur-element-symbole-mg.html>
- [5] « Le magnésium va-t-il sauver les véhicules électriques ? - Les Lignes Bougent ». Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://blog.leslignesbougent.org/pile-magnesium-vehicule-electrique/>
- [6] « le magnésium par TIMAB Magnesium », TIMAB Magnesium. Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.timabmagnesium.com/fr/le-magnesium-par-timab-magnesium/>
- [7] « Rappels des propriétés physiques et chimiques du magnésium », Techniques de l'Ingénieur. Consulté le: 27 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/elaboration-et-recyclage-des-metaux-non-ferreux-42370210/metallurgie-du-magnesium-m2350/rappels-des-proprietes-physiques-et-chimiques-du-magnesium-m2350v2niv10001.html>
- [8] « Magnésium », *Wikipédia*. 15 mars 2024. Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Magn%C3%A9sium&oldid=213371299>



- [9] « Magnésium, propriétés chimiques, effets sur la santé et l'environnement ». Consulté le: 27 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lenntech.fr/periodique/elements/mg.htm>
- [10] Guy Murry, Robert Lévêque Dans« Aide-mémoire - Métallurgie (2023) », pages 337 à 353.
- [11] George J. Simandl, « Magnesium - Raw Materials, Metal Extraction and Economics - Global Picture », the Ninth Biennial SGA Meeting,2007
- [12] « Magnésium - Produits SCF », Société Chimique de France (SCF). Consulté le : 27 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://new.societechimiquedefrance.fr/produits/magnesium/>
- [13] « Le magnésium dans l'automobile - vers des structures allégées - MetalBlog ». Consulté le: 27 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://metalblog.ctif.com/2021/05/24/le-magnesium-dans-lautomobile-vers-des-structures-allegees>.
- [14] @NatGeoFrance, « Magnésium : bienfaits et limites de la supplémentation », National Geographic. Consulté le : 27 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nationalgeographic.fr/sciences/medecine-sante-magnesium-bienfaits-et-limites-de-la-supplementation>
- [15] Charles. « Usinage du magnésium - Avantages, considérations relatives à l'usinage et conseils de sécurité ». *Prototool*, 3 septembre 2023, <https://prototool.com/fr/machining-magnesium/>.
- [16] *Pièces en Magnésium: légères et résistantes*. <https://www.gurelan.es/fr/pièces-en-magnesium-poids-reduit-resistance>. Consulté le 27 avril 2024.
- [17] *Magnésium : bienfaits et cure en cas de carence - Conseils santé*. <https://www.pharmagdd.com/fr/les-bienfaits-du-magnesium>. Consulté le 27 avril 2024.
- [18] « Nutrition : les 6 principaux bienfaits du magnésium pour la santé ». *BBC News Afrique*, 13 septembre 2023, <https://www.bbc.com/afrique/articles/c985p82d0ydo>.



[19] *Magnésium : Rôle, Apports, Aliments & Signes de manque* | *Revue Santé PiLeJe*. <https://www.pileje.fr/revue-sante/definition-magnesium>. Consulté le 27 avril 2024.

[20] étrangères, Ministère de l'Europe et des Affaires. « Un alliage de magnésium pour les implants médicaux biodégradables ultra résistants ». *France Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères*, <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique-et-universitaire/veille-scientifique-et-technologique/hong-kong/article/un-alliage-de-magnesium-pour-les-implants-medicaux-biodegradables-ultra>. Consulté le 27 avril 2024.

[21] *2012_01_25_CONTRIBUTION_N_14_MO.pdf*. https://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-gaz-salinsdeslandes/site/DOCS/CONTRIBUTIONS/2012_01_25_CONTRIBUTION_N_14_MO.PDF. Consulté le 27 avril 2024.

[22] *Le magnésium pourrait-il remplacer le lithium dans les batteries des véhicules électriques ?* <https://www.tressolchabrier.com/actualites/Innovation%2B%26%2BTechnologie%2BAutomobile/Le%2Bmagn%25C3%25A9sium%2Bpourraitil%2Bremplacer%2Ble%2Blitium%2Bdans%2Bles%2Bbatteries%2Bdes%2Bv%25C3%25A9hicules%2B%25C3%25A9lectriques%2B%253F-136>. Consulté le 27 avril 2024.

[23] Admin. *Utilisations et domaines d'application du magnésium* -. 15 juillet 2020, <https://www.aixihardware.com/fr/utilisations-et-domaines-dapplication-du-magnesium/>.

[24] Y. Jang, B. Collins, J. Sankar, et Y. Yun, « Effect of biologically relevant ions on the corrosion products formed on alloy AZ31B: An improved understanding of magnesium corrosion », *Acta Biomaterialia*, vol. 9, n° 10, p. 8761 - 8770, nov. 2013, doi: 10.1016/j.actbio.2013.03.026.



CHAPITRE II :

La corrosion du magnésium et ses alliages



II.1-Introduction :

La corrosion, originaire du latin ‘corrodere’, signifie ronger, attaquer. Désigne un processus de détérioration involontaire des matériaux, en particulier les métaux, causé par des agents corrosifs tels que les conditions atmosphériques ou les produits chimiques réactifs. Sous l'effet de cette corrosion, les métaux ont tendance à revenir à leur état initial sous forme d'oxydes, de sulfures, de carbonates, etc., qui sont plus stables par rapport à leur environnement, entraînant ainsi une altération de leurs propriétés[1].

La corrosion est un enjeu majeur dans de nombreuses industries, telles que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, et la construction, où elle peut entraîner des coûts élevés en termes de maintenance, de réparation et de remplacement des équipements corrodés[2].

Il existe différents types de corrosion, tels que la corrosion uniforme, la corrosion localisée, la corrosion galvanique, la corrosion par crevasses, la corrosion sous contrainte, la corrosion par piqûres et la corrosion par fatigue. Chacun de ces types de corrosion a des caractéristiques et des causes différentes, et nécessite des méthodes de prévention et de contrôle spécifiques.

Les facteurs qui influencent la corrosion comprennent l'environnement, la substance, la conception et la fabrication de l'équipement ou de la structure, l'exploitation et la maintenance. L'environnement peut être aqueux, gazeux ou solide, et peut contenir des substances corrosives telles que l'acide, l'alcalin, le sel, l'humidité et l'oxygène. Le matériau peut être choisi en fonction de sa résistance à la corrosion, mais il peut également être affecté par des impuretés, des défauts de fabrication et des conditions d'utilisation.[3]

Ce deuxième chapitre se concentrera sur la corrosion en général et la corrosion du magnésium en particulier ; en examinant les différents types de corrosion, les facteurs qui influencent la corrosion, les méthodes de protection contre la corrosion et les exemples de corrosion dans les applications industrielles.

II.2-Facteurs de corrosion :

Les facteurs de la corrosion des métaux sont variés et peuvent être regroupés en plusieurs catégories principales. Les principaux facteurs sont représentés dans le tableau II.7:



Tableau II.7 : Facteurs de corrosion.

<p>Facteurs Intrinsèques (liés au métal)</p>	<ol style="list-style-type: none">1. Pureté du métal :<ul style="list-style-type: none">- Métaux purs vs alliages- Présence d'impuretés2. Composition chimique :<ul style="list-style-type: none">- Nature des éléments d'alliage- Réactivité chimique du métal3. Microstructure :<ul style="list-style-type: none">- Grains cristallins- Phases métalliques et inclusions4. Caractéristiques du film de surface :<ul style="list-style-type: none">- Nature et uniformité des couches passives ou oxydes- Épaisseur et adhérence du film protecteur
<p>Facteurs Environnementaux</p>	<ol style="list-style-type: none">1. Composition de l'environnement :<ul style="list-style-type: none">- Concentration d'ions corrosifs (chlorures, sulfates, etc.)- Nature des électrolytes présents2. Température :<ul style="list-style-type: none">- Influence sur les réactions chimiques et la diffusion- Effet sur la vitesse de corrosion3. Humidité de l'air :<ul style="list-style-type: none">- Présence et condensation de l'eau- Impact de l'humidité relative4. pH de la solution :<ul style="list-style-type: none">- Acidité ou basicité de l'environnement- Effet sur la solubilité des produits de corrosion5. Oxygénation :<ul style="list-style-type: none">- Disponibilité de l'oxygène- Influence sur les réactions cathodiques6. Présence de polluants :<ul style="list-style-type: none">- Substances corrosives dans l'atmosphère (SO₂, NO_x, etc.)- Contaminants dans les électrolytes



Facteurs Mécaniques	<ol style="list-style-type: none">1. Stress et contraintes :<ul style="list-style-type: none">- Tensions internes et externes- Fatigue et corrosion sous contrainte2. Érosion-corrosion :<ul style="list-style-type: none">- Effet combiné de l'abrasion et de la corrosion chimique3. Usure :<ul style="list-style-type: none">- Effet de la friction sur les surfaces métalliques
Facteurs Electrochimiques	<ol style="list-style-type: none">1. Potentiel électrochimique :<ul style="list-style-type: none">- Différence de potentiel entre différents métaux- Formation de couples galvaniques2. Courant électrique :<ul style="list-style-type: none">- Courants vagabonds- Effet de l'électrolyse sur la corrosion
Facteurs liés aux Produits de Corrosion	<ol style="list-style-type: none">1. Propriétés des produits de corrosion :<ul style="list-style-type: none">- Nature chimique des produits formés- Solubilité et adhérence des dépôts2. Accumulation de produits de corrosion :<ul style="list-style-type: none">- Formation de couches protectrices ou non protectrices- Effet sur la progression de la corrosion

Comprendre l'interaction complexe entre ces facteurs est essentiel pour élaborer des stratégies de prévention et de contrôle de la corrosion, ainsi que pour sélectionner les matériaux appropriés pour des environnements spécifiques[3] [4].

II.3-Les différents types de corrosion :

La corrosion des métaux est un phénomène complexe qui se manifeste sous diverses formes, chacune influencée par des facteurs spécifiques de l'environnement et des propriétés intrinsèques des matériaux. Comprendre les différents types de corrosion est essentiel pour identifier les mécanismes en jeu et développer des stratégies de prévention efficaces en fournissant une vue d'ensemble des conditions dans lesquelles elles se produisent et de leurs impacts sur la durabilité des matériaux.



En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous[1]:

- Corrosion chimique (sèche).
- Corrosion électrochimique (humide).
- Corrosion biochimique.
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).

II.3-1. La corrosion chimique(sèche) :

La corrosion chimique se produit par l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolytique ou par l'action de gaz tels que l'oxygène (O_2), le sulfure d'hydrogène (H_2S) et le dioxyde de carbone (CO_2). Lorsque le réactif est gazeux ou que cette corrosion survient à haute température, on parle alors de corrosion sèche ou de corrosion à haute température[5][6].

La réaction qui se produit est de la forme :

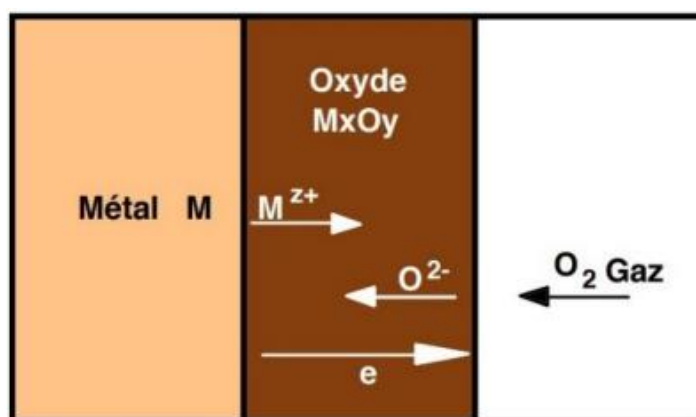
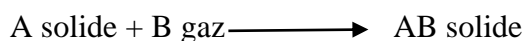


Figure II.15: Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température.

II.3-2. Corrosion électrochimique (humide) :

Le milieu ici est conducteur de courant électrique, ce qui rend la corrosion électrochimique fréquente dans les environnements naturels (eau douce, eau de mer, pluie) ainsi que dans les environnements artificiels (installations chimiques, production d'engrais, industries alimentaires, milieu biologique) [7].

Les principales caractéristiques de la corrosion électrochimique sont :



- Elle nécessite un conducteur électronique (le métal) et un conducteur ionique (l'électrolyte).
- La réaction bilan est une réaction d'oxydation du métal par l'eau.
- Des piles de corrosion se forment, avec une zone anodique (oxydation) et une zone cathodique (réduction).

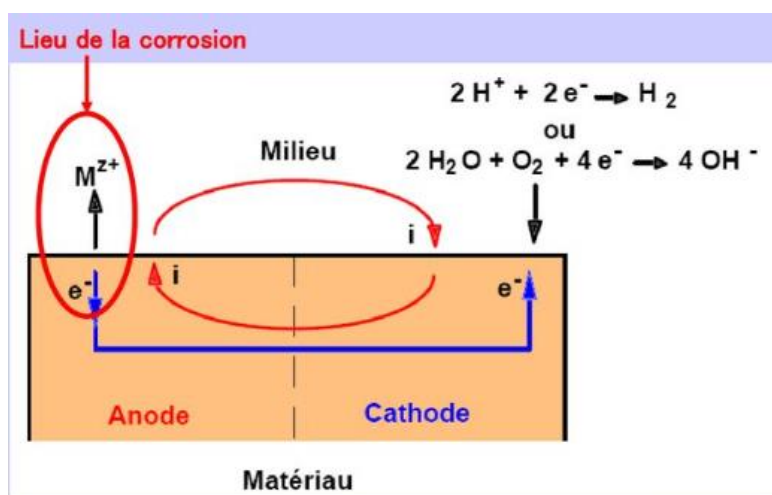


Figure II.16: Mécanisme de la corrosion électrochimique.

II.3-3. Corrosion biochimique :

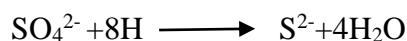
La corrosion biochimique ou la corrosion bactérienne des métaux, se manifeste généralement dans des milieux biologiques ou canalisations enterrées, peut se produire par divers mécanismes :

a. Corrosion chimique :

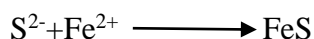
La production de substances corrosives telles que le CO_2 , le H_2S , le H_2SO_4 , l'ammoniac (NH_3) ou un acide organique peut provoquer cette corrosion. Le cas le plus courant est observé dans les canalisations enterrées, où la formation d'acide sulfurique attaque le métal.

b. Réduction des sulfates par des bactéries :

Certaines bactéries réduisent les sulfates en présence d'hydrogène :



L'hydrogène provient, par exemple, des régions cathodiques, entraînant la dépolarisation des cathodes et une formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes :



c. Formation de dépôts adhérents :

Dans certains cas, des dépôts adhérents peuvent se former sur le métal. Ces dépôts résultent de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Cela conduit à la formation de piqûres sur le métal à l'endroit du dépôt, selon un processus de corrosion dû à une différence de concentration en oxygène [1].



Figure II.17: Corrosion biochimique.

II.3-4. Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique) :

La corrosion accompagnée d'érosion (mécanique) se caractérise par les éléments suivants :

- 1) C'est un type de corrosion où la détérioration du métal est accélérée par des processus mécaniques, tels que l'abrasion ou l'impact, en plus de l'action corrosive [8][1].
- 2) L'écoulement d'un fluide à grande vitesse peut provoquer une contrainte de cisaillement sur la paroi métallique, entraînant une corrosion-érosion même en l'absence de particules solides.
- 3) La vitesse critique d'écoulement du fluide au-delà de laquelle la corrosion-érosion s'accélère dépend de la contrainte de cisaillement critique et des propriétés du fluide comme sa densité et sa vitesse.
- 4) La conception des équipements, comme la forme des coudes de tuyauterie, peut influencer le risque de corrosion-érosion en modifiant l'écoulement du fluide [9][1].



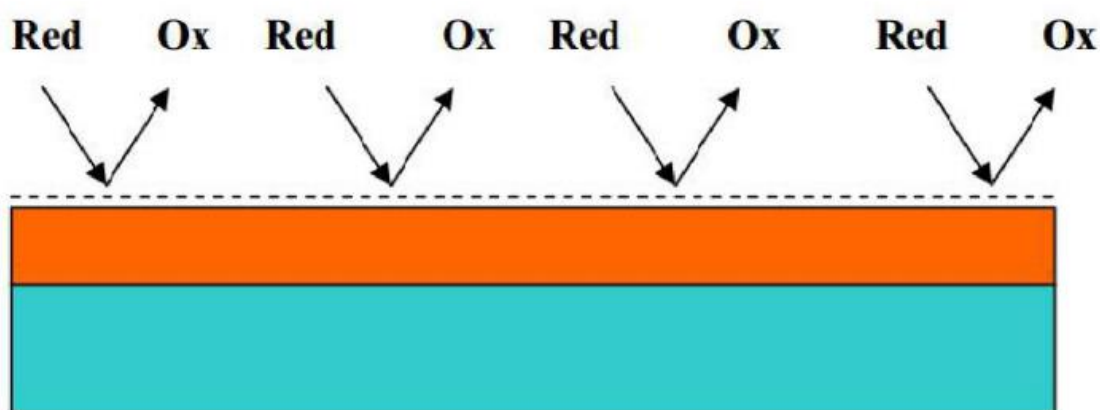
En résumé, la corrosion accompagnée d'érosion est un phénomène complexe où les contraintes mécaniques liées à l'écoulement des fluides accélèrent la dégradation des surfaces métalliques par corrosion.

II.4-Les formes de corrosion :

Le processus de corrosion des métaux se manifeste sous de nombreuses formes, principalement classées en fonction de l'apparence de la surface corrodée.

II.4-1. Corrosion uniforme (généralisée) :

La corrosion uniforme se produit lorsque l'ensemble de la surface métallique en contact avec la solution est attaqué de manière homogène (figure II.4). Cela entraîne une dissolution uniforme de la surface du métal exposé à l'agent corrosif [10]. Ce type de corrosion se développe couramment dans des environnements acides ou alcalins.



FigureII.18: Corrosion uniforme.

II.4-2. La corrosion localisée :

La corrosion localisée se caractérise par une attaque concentrée sur de petites zones spécifiques de la surface métallique, contrairement à une corrosion uniforme. Ce type de corrosion est souvent le plus grave, car il provoque des pénétrations profondes qui peuvent rapidement endommager les composants. Elle se produit généralement en présence de microenvironnements particuliers, où des variations locales de composition chimique, de pH ou de température favorisent l'attaque corrosive. Les défauts de surface, les inclusions dans le matériau, ou les conditions bimétalliques peuvent également contribuer à son développement. Les conséquences de la corrosion localisée sont souvent sévères, nécessitant une détection et un traitement rapides pour éviter des dommages majeurs [11].

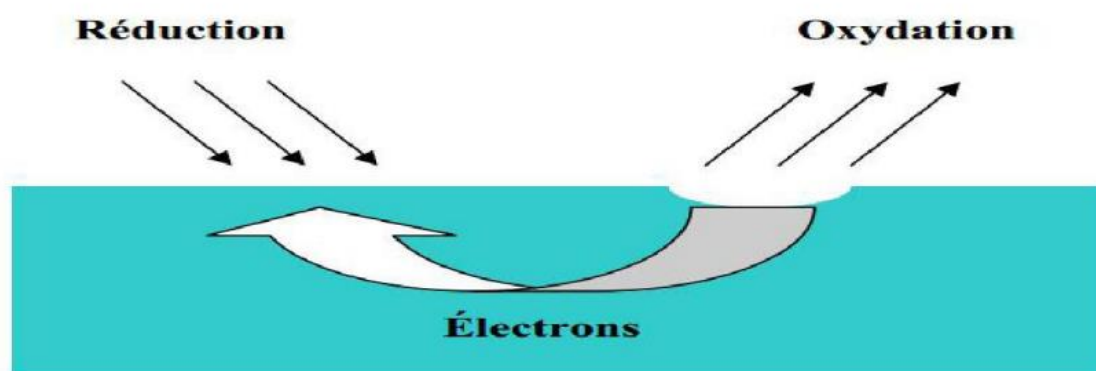


Figure II.19 : Corrosion localisée.

Il existe plusieurs types de corrosion localisée, chacun avec ses propres caractéristiques et mécanismes. Parmi les principaux types de corrosion localisée, on trouve :

II.4-2-1. La corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres est une forme extrêmement localisée de corrosion conduisant à la création de petits trous dans le métal. Ce type de corrosion est initié par un manque d'oxygène sur une partie très réduite du métal, devenant anodique, tandis qu'une autre partie bénéficiant d'un excès d'oxygène devient cathodique. Ce processus crée une corrosion galvanique sur une surface très localisée du métal, pouvant se propager de manière insidieuse et produire une petite perte très localisée de métal, parfois obstruée par des produits de corrosion [12].

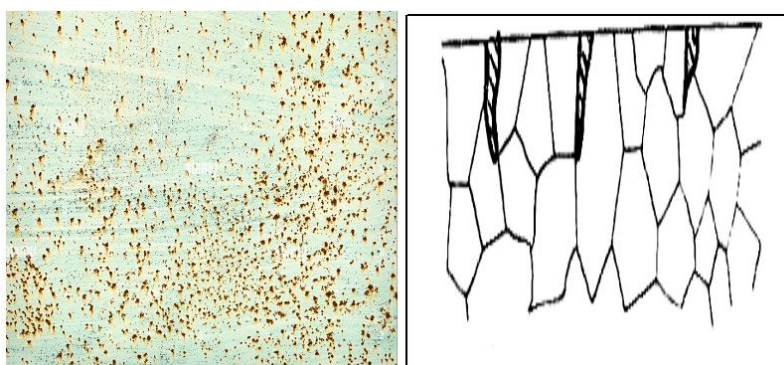


Figure II.20: Corrosion par piqûres.

II.4-2-2. La corrosion intergranulaire :

La corrosion intergranulaire correspond à une dissolution préférentielle des zones d'émergence des joints de grains à la surface des matériaux exposés à des milieux agressifs. Ces milieux peuvent être variés, incluant des gaz, des solutions, des sels fondus et des métaux



liquides. Les phénomènes observés ont plusieurs origines. Par exemple, la précipitation de phases étrangères à proximité des joints de grains peut entraîner, en fonction de la nature de l'environnement agressif, la dissolution préférentielle des précipités ou des zones avoisinantes, appauvries en un élément constituant la matrice [13].

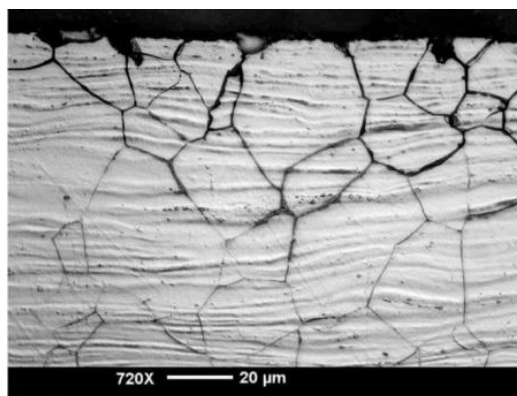


Figure II.21 : La corrosion intergranulaire.

II.4-2-3. La corrosion par crevasses :

La corrosion par crevasses se caractérise par la corrosion dans des espaces restreints, se produisant dans des zones stagnantes et moins oxygénées, comme les crevasses entre les surfaces métalliques ou sous les dépôts (sable, saleté, boue, etc.). La zone de jointure dans les crevasses a une teneur en oxygène inférieure par rapport à la zone extérieure, ce qui la fait agir comme l'anode, tandis que la zone extérieure sert de cathode. La corrosion par crevasses pose un défi pratique significatif, en particulier dans les applications marines [3].



Figure II.22 : La corrosion par crevasses.

II.4-2-4. La Corrosion galvanique :

La corrosion galvanique se réfère à des dommages causés lorsque deux métaux différents sont électriquement connectés et en contact avec un électrolyte corrosif commun.



Dans ce modèle de corrosion électrochimique, l'une des deux réactions partielles (la dissolution anodique du métal et la réduction cathodique de l'oxygène) se produit presque exclusivement sur un des métaux. Ce phénomène entraîne une accélération de la corrosion du métal moins noble, tandis que le métal plus noble est protégé [14].

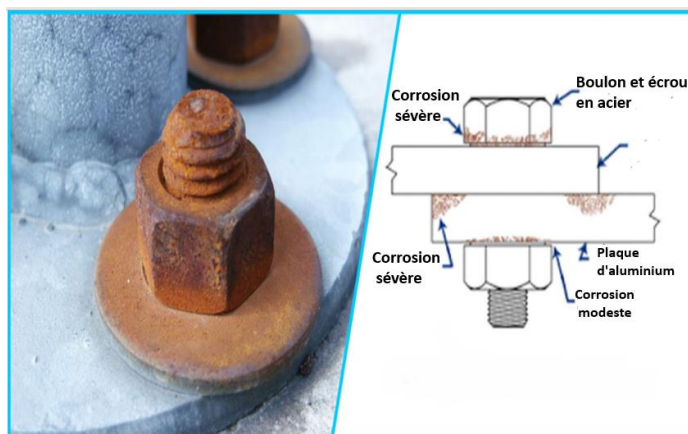


Figure II.23 : La corrosion galvanique.

II.4-2-5. La corrosion sous contraintes :

La corrosion sous contrainte (CSC) se produit lorsqu'une contrainte mécanique en tension (résiduelle ou appliquée) agit en combinaison avec un milieu agressif. Individuellement, ces facteurs ne suffisent pas à endommager la structure, mais ensemble, ils sont particulièrement dangereux. La CSC se manifeste par des fissures intergranulaires ou Trans granulaires, se propageant perpendiculairement à la contrainte principale. Les contraintes peuvent être résiduelles (comme le cintrage, l'écrouissage, ou le laminage à froid), thermiques (dilatation ou variation de pression), ou inhérentes à la fonction de l'installation (comme les câbles de ponts suspendus ou les structures de soutènement) [15].

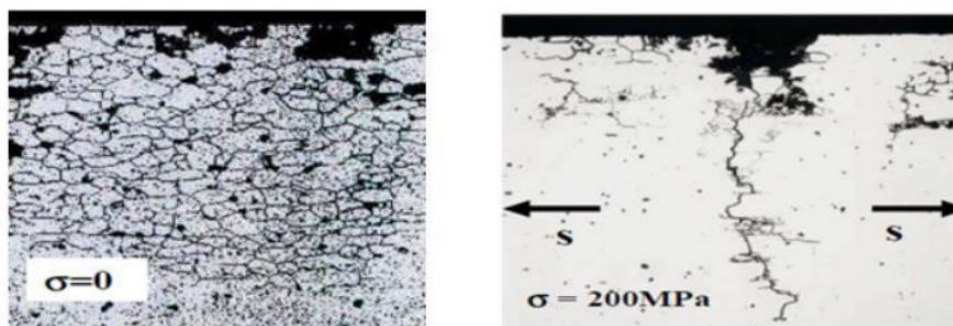


Figure II.24 : Représentation de la corrosion sous contrainte d'un alliage A-Mg.



II.4-2-6. La corrosion sélective :

La corrosion sélective se produit lorsque l'un des composants d'un alliage est oxydé préférentiellement, entraînant la formation d'une structure métallique poreuse. Un exemple typique est la dézincification du laiton, où le zinc se dissout, laissant une structure poreuse de cuivre. Ce type de corrosion affaiblit l'intégrité mécanique de l'alliage et peut causer des défaillances structurelles. Les facteurs qui contribuent à la corrosion sélective incluent la composition chimique de l'alliage, les conditions environnementales et les caractéristiques microstructurales du matériau. Des mesures de prévention, comme le contrôle de la composition de l'alliage et l'application de revêtements protecteurs, sont essentielles pour minimiser ce risque [16].

II.4-2-7. La corrosion par l'hydrogène :

L'hydrogène peut pénétrer dans le métal lorsqu'il est produit à l'interface métal/film d'oxyde lors de la réduction liée à la corrosion. Au fond de la fissure, le métal est exposé à nu. Il réagit avec l'eau, libérant de l'hydrogène naissant qui se concentre aux joints de grains, facilitant ainsi la décohésion inter cristalline [15].

II.4-2-8. La corrosion filiforme :

La corrosion filiforme est spécifique aux pièces peintes et survient lorsque la peinture est endommagée, permettant à un liquide corrosif, tel que l'eau de mer, de s'infiltrer entre l'aluminium et la peinture. Ce type de corrosion est principalement esthétique et reste superficiel, se propageant en filaments de quelques millimètres sous la peinture. Lorsque la corrosion se développe, l'oxydation s'étend et provoque le décollement de la peinture [17].

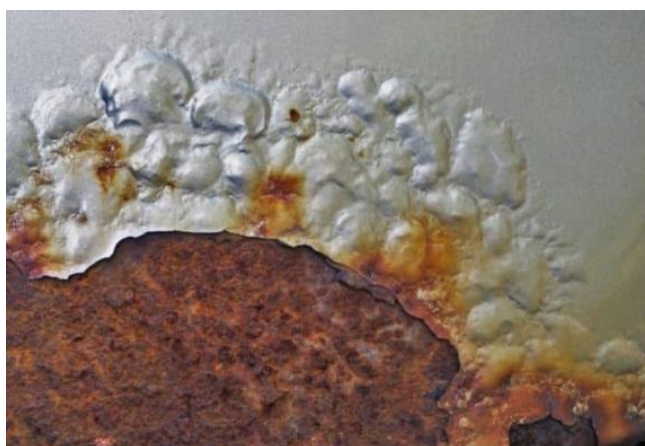


Figure II.25: Corrosion filiforme.



II.5-Corrosion du magnésium et ses alliages :

Les applications industrielles du magnésium sont limitées principalement en raison de sa forte susceptibilité à la corrosion. Étant le métal le plus actif utilisé dans les pièces mécaniques, le magnésium se corrode rapidement dans divers environnements et est souvent employé comme anode sacrificielle dans des structures telles que la distribution de gaz, les équipements en bord de mer et les bateaux. Cependant, il peut mieux résister à la corrosion atmosphérique que l'acier doux grâce à la formation naturelle d'un film d'oxyde MgO à température ambiante.

En milieu anhydre, ce film protecteur reste efficace jusqu'à 450 °C, au-delà de laquelle il se fissure, permettant la pénétration de l'oxygène et augmentant la corrosion sèche. L'humidité transforme cet oxyde en hydroxyde Mg (OH)₂, moins résistant. Les principales raisons de la faible résistance du magnésium à la corrosion sont les couplages galvaniques internes causés par les ségrégations d'impuretés et la faible résistance du film passif d'hydroxyde par rapport à ceux des alliages d'aluminium et des aciers inoxydables.

Le magnésium est instable dans l'eau à 25 °C (figure II.26), se dissolvant rapidement surtout au-dessus de 70 °C. Les films protecteurs qui se forment sur le magnésium sont légèrement solubles dans l'eau et vulnérables à certains ions comme les chlorures et les sulfates, ainsi qu'à des gaz acides tels que le CO₂. La corrosion du magnésium en milieu aqueux se fait par voie électrochimique selon la réaction : $Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2$, avec la formation d'hydroxyde et le dégagement d'hydrogène, menant à une corrosion rapide [18].

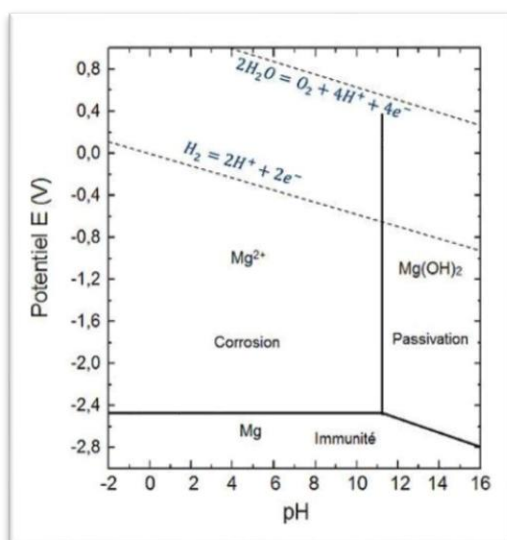


Figure II.26: Diagramme de Pourbaix potentiel-Ph du magnésium dans l'eau à 25°C.



Le potentiel standard de réduction du magnésium est de $-2,4\text{ V}$, et à des potentiels plus élevés, le magnésium se corrode rapidement, comme illustré dans le diagramme pourbaix. Ce n'est qu'à des potentiels très basiques, supérieurs à 11, qu'une couche stable d'hydroxyde $\text{Mg}(\text{OH})_2$ peut se former pour offrir une protection contre la corrosion. Cependant, cette protection est fortement dépendante des conditions environnementales et ne résiste pas en milieu neutre ou acide. Le tableau II.8 fournit des indications sur le taux de corrosion général du magnésium dans diverses conditions.

Tableau II.8: Vitesse de corrosion du magnésium dans un certain nombre de conditions.

Milieu	Vitesse de corrosion en mm/an
Atmosphère rurale faiblement humide	0,013
Air humide avec condensation	0,015
Atmosphère marine	0,018
Atmosphère urbaine	0,028
Eau distillée avec gaz acides	0,03 à 0,3
Eau de mer	0,25
Eau chaude désionisée (maintien 14 jours)	16

Les équipements en magnésium sont sujets à la fois à la corrosion générale et à la corrosion localisée. En raison de son potentiel très électronégatif, le magnésium est particulièrement vulnérable à la corrosion galvanique. Ce phénomène peut se produire en présence d'impuretés dans les zones ségréguées ou lorsqu'il est en contact avec d'autres métaux [18].

II.5-1. Corrosion du magnésium par couplage galvanique :

En raison de son caractère fortement électronégatif, le magnésium est particulièrement sensible à la corrosion galvanique lorsqu'il est en contact avec d'autres métaux en milieu aqueux. Il se comporte systématiquement comme une anode en présence d'un électrolyte. Ce couplage galvanique peut aussi se produire par simple contact en atmosphère humide, bien que cela diffère de l'immersion totale et continue. Dans un film liquide mince, la forte résistance limite la répartition des courants d'électrolyse, concentrant ainsi la corrosion sur les régions anodiques proches du partenaire cathodique [18].



II.5-2. Effet des éléments d'alliage :

La figure II.27, illustre l'effet de divers éléments d'addition sur la résistance à la corrosion des alliages de magnésium dans une solution de NaCl à 3%. Le fer, le nickel, le cobalt et le cuivre ont une influence très défavorable, car ils forment des composés hautement réactifs et induisent des effets de couplage galvanique. Ces éléments sont considérés comme des impuretés et leur concentration doit être rigoureusement contrôlée [18].

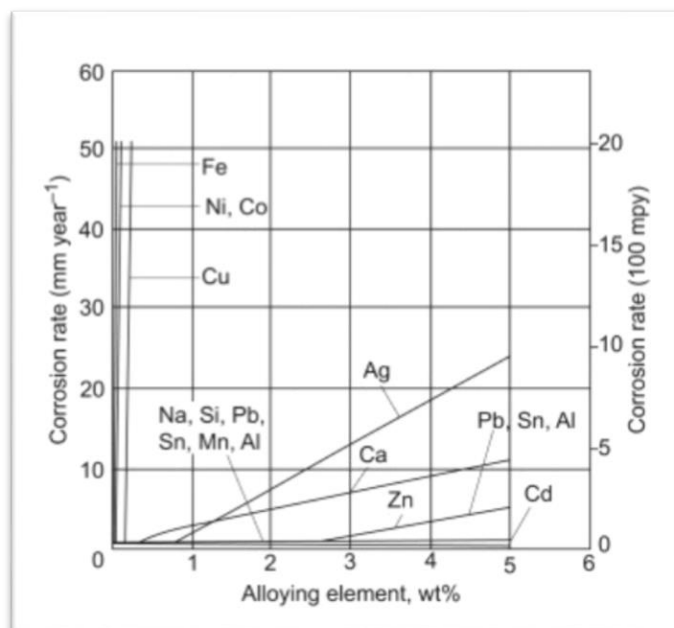


Figure II.27 : Effet des éléments d'addition sur la tenue à la corrosion d'alliages de magnésium binaires testés dans une solution à 3% NaCl.

II.6-Potentiel de corrosion :

Le potentiel de corrosion est le potentiel qu'un métal adopté par rapport à un électrolyte spécifique. Ce potentiel n'est pas une caractéristique intrinsèque du métal et varie en fonction des conditions expérimentales, telles que la nature, la concentration, et la température du réactif, ainsi que l'état de surface du métal. La réaction électrochimique devient non réversible avec le temps à cause des changements à l'interface métal-solution. Toutefois, le potentiel tend à se stabiliser à une valeur stationnaire, cette durée d'immersion dépendant du métal et du réactif.

II.6-1. Classification électrochimique des métaux :

Il est crucial de connaître ou de mesurer les potentiels des divers métaux par rapport à une solution donnée pour déterminer, lors du couplage de deux métaux, lequel constituera l'anode et lequel sera la cathode, établissant ainsi une "échelle galvanique". Une différence de



potentiel existe toujours entre deux métaux différents dans une solution corrosive ou conductrice. Si ces métaux sont en contact, cette différence produit un passage de courant entre eux, augmentant l'oxydation du métal le moins résistant (anode) et diminuant celle du métal le plus résistant (cathode). Les métaux avec un potentiel de corrosion plus négatif ont une plus grande tendance à se dissoudre. Le tableau II.9 montre le potentiel de dissolution de certains métaux dans une solution de 3 % NaCl, mesuré par rapport à une électrode au calomel saturé à 20°C [1].

Tableau II.9: Potentiel de dissolution de certains métaux dans une solution de 3 % NaCl.

Electrodes	Potentiels en V	Electrodes	Potentiels en V
Pt	+ 0,3	Pb	- 0,47
Au	+ 0,22	Cr actif	- 0,60
Cr passif	+ (0,2 à 0,25)	Fe	- (0,6 à 0,7)
Acier inox (18-8)	+ 0,10	Alliage Cu-Al	- (0,6 à 0,65)
Hg	0,00	Al	- 0,74
Ag	- 0,05	Cd	- 0,78
Cu	- 0,18	Alliage Al-Mg	- (0,77 à 0,8)
H ₂	- 0,25	Zn	- 1,06
Ni	- 0,27	Mg	- 1,63
Sn	- 0,44		

Le tableau II.10 indique le potentiel de certains métaux par rapport à l'électrode standard d'hydrogène.



Tableau II.10: le potentiel de certains métaux par rapport à l'électrode standard d'hydrogène.

Electrodes	E° en V	Electrodes	E° en V
$\text{Li}^+ + e = \text{Li}$	- 3,045	$\text{Pb}^{2+} + 2e = \text{Pb}$	- 0,125
$\text{Ca}^{2+} + 2e = \text{Ca}$	- 2,84	$2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2$	0
$\text{Na}^+ + e = \text{Na}$	- 2,714	$\text{H}_2\text{MoO}_4 + 6\text{H}^+ + 6e = \text{Mo} + 4 \text{H}_2\text{O}$	0,114
$\text{Mg}^{2+} + 2e = \text{Mg}$	- 2,356	$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	0,340
$\text{Al}^{3+} + 3e = \text{Al}$	- 1,67	$\text{H}_2\text{CrO}_4 + 6\text{H}^+ + 6e = \text{Cr} + 4 \text{H}_2\text{O}$	0,326
$\text{Ti}^{2+} + 2e = \text{Ti}$	- 1,63	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e = 4 \text{OH}^-$	0,401
$\text{Mn}^{2+} + 2e = \text{Mn}$	- 1,18	$\text{Cu}^+ + e = \text{Cu}$	0,520
$\text{Cr}^{2+} + 2e = \text{Cr}$	- 0,90	$\text{Hg}^{2+} + 2e = \text{Hg}$	0,796
$\text{Cr}^{3+} + 3e = \text{Cr}$	- 0,74	$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag}$	0,799
$\text{Zn}^{2+} + 2e = \text{Zn}$	- 0,76	$\text{Pd}^{2+} + 2e = \text{Pd}$	0,915
$\text{Fe}^{2+} + 2e = \text{Fe}$	- 0,44	$\text{Pt}^{2+} + 2e = \text{Pt}$	1,188
$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	- 0,403	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$	1,229
$\text{Ni}^{2+} + 2e = \text{Ni}$	- 0,257	$\text{Au}^{3+} + 3e = \text{Au}$	1,52
$\text{Mo}^{3+} + 3e = \text{Mo}$	- 0,20	$\text{Au}^+ + e = \text{Au}$	1,83
$\text{Sn}^{2+} + 2e = \text{Sn}$	- 0,136		

Ces séries de potentiels, appelées potentiels standards ou forces électromotrices, déterminent le comportement des métaux dans une pile galvanique. Lorsque deux métaux sont associés, celui avec le potentiel le plus négatif agit comme l'anode et se corrode, principalement utilisé dans la protection cathodique [1].

Par exemple, dans un couple cuivre-fer, le cuivre agit comme la cathode et le fer comme l'anode. En solution saline, la différence de potentiel de la pile, calculée comme $\Delta E = E_{\text{Cu}} - E_{\text{Fe}} = (-0,18) - (-0,7) = +0,52 \text{ V}$, indique la corrosion du fer.



II.7-Protection contre la corrosion :

La protection contre la corrosion englobe toutes les mesures prises pour préserver les matériaux métalliques de l'action corrosive de leur environnement. La première mesure de protection consiste à choisir des métaux ou des alliages résistants aux milieux agressifs. De la conception des équipements à leur entretien quotidien, la prévention de la corrosion doit être prise en compte pour éviter divers problèmes et prolonger leur durée de vie [19].

Les différentes stratégies de lutte contre la corrosion comprennent :

- La conception des pièces selon une géométrie favorable ;
- La protection électrochimique ;
- L'application de revêtements protecteurs ;
- L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion ;

II.7-1. La conception des pièces selon une géométrie favorable :

Pour réduire la corrosion, adapter la forme des objets aux conditions d'utilisation est crucial. Par exemple, pour prévenir la corrosion atmosphérique due à l'humidité, il faut concevoir des composants évitant les zones de rétention d'eau. Cela implique un bon drainage et une géométrie favorisant la vidange complète des récipients (figure II.28) [19].

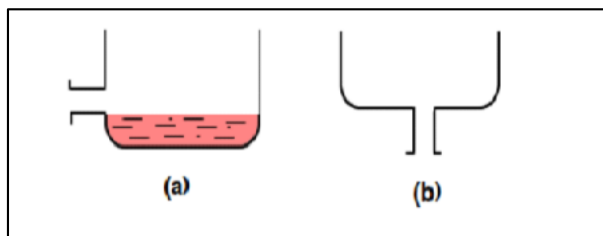


Figure II.28: Prévention par la forme du récipient (a) : mauvais. (b) : correct

II.7-2. L'application de revêtements protecteurs :

Un revêtement vise à séparer le métal du milieu corrosif en formant une barrière protectrice. Il doit être uniforme, bien adhérent à la surface métallique et chimiquement inertes par rapport à l'environnement corrosif.

II.7-2-1. Revêtements non métalliques :

- Peintures.
- Matières plastiques.



II.7-2-2. Revêtements métalliques :

- Immersion dans un bain fondu.
- Electrolyse.
- Métallisation au pistolet.
- Métallisation sous vide.
- PVD (dépôt en phase vapeur).
- CVD (dépôt en phase chimique).

II.7-3. L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion :

Un inhibiteur de corrosion est une substance chimique ajoutée en faible quantité à un milieu corrosif pour ralentir ou neutraliser son action destructrice sur le métal. Il n'altère généralement pas la nature ou la concentration du milieu. Les inhibiteurs de corrosion fonctionnent en formant une couche protectrice entre le métal et le milieu corrosif, se liant à la surface métallique sous une forme déterminée par leur composition chimique [1].

II.7-4. La protection électrochimique :

La protection électrochimique, également connue sous le nom de protection cathodique ou anodique, utilise des méthodes électriques pour prévenir la corrosion. Dans la protection cathodique, le métal à protéger est transformé en une cathode en le connectant à un matériau plus réactif qui devient l'anode. Cela dévie le courant électrique de la corrosion du métal vers l'anode. À l'inverse, dans la protection anodique, un courant électrique est appliqué pour favoriser la formation d'une couche protectrice sur le métal à protéger, empêchant ainsi la corrosion [19].

II.8- L'impact de la corrosion sur l'économie :

La corrosion est un phénomène naturel qui cause la dégradation des matériaux, notamment les métaux, sous l'effet de réactions chimiques avec leur environnement. Ce processus, bien qu'inévitable, a des conséquences économiques considérables. Voici un aperçu de l'impact économique de la corrosion, ainsi que des coûts directs et indirects associés à ce problème mondial.

- Proportion du PIB (Produit Intérieur Brut) :



- Selon l'Organisation Mondiale de la Corrosion (OMC), la corrosion représente un coût annuel équivalent à 3 à 4 % du PIB des pays industrialisés.
- Au niveau mondial, la corrosion engendre une perte estimée à 2,5 billions de dollars, soit 3,4 % du PIB mondial.
- Coût aux États-Unis :
 - Aux États-Unis, la corrosion coûte plus de 300 milliards de dollars par an.
- Perte de Production d'Acier :
 - Chaque année, environ un quart de la production mondiale d'acier, soit environ 150 millions de tonnes (ou 5 tonnes par seconde), est détruit par la corrosion.

II.8-1. Coûts Directs et Indirects :

- Pertes Financières :
 - Arrêts de production entraînant des pertes financières importantes.
 - Perte d'efficacité des infrastructures.
- Entretien et Remplacement :
 - Frais élevés pour l'entretien et le remplacement des structures métalliques endommagées.
- Accidents et Sécurité :
 - Coûts associés aux accidents causés par la défaillance des équipements corrodés.
- Inspection et Surveillance :
 - Frais récurrents pour l'inspection et la surveillance des structures afin de détecter et prévenir la corrosion.
- Impacts Environnementaux :
 - Dégradation environnementale due à la corrosion, nécessitant des mesures correctives coûteuses.
- Dépréciation des Actifs :
 - Perte de valeur des actifs industriels et infrastructures affectées par la corrosion.



II.8-2. Secteurs Affectés :

- Industriel : Usines, raffineries et autres installations industrielles.
- Infrastructures : Ponts, pipelines, bâtiments, etc.
- Transport : Aéronefs, navires, véhicules terrestres.
- Énergie : Centrales électriques, éoliennes, installations pétrolières et gazières.



II.9-Références bibliographiques :

- [1] « corrosion.pdf ». Consulté le: 25 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/corrosion.pdf>
- [2] « lait_51_1971_507_19.pdf ». Consulté le: 25 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://lait.dairy-journal.org/articles/lait/pdf/1971/507/lait_51_1971_507_19.pdf
- [3] J. K. Balangao, « Corrosion of Metals: Factors, Types and Prevention Strategies », 2024.
- [4] C. de F. Barros, « Mécanismes électrochimiques de la corrosion des alliages de magnésium en milieu cimentaire ».
- [5] R. Mehibil. «Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits nonpolluantssur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium»,Mémoire de magister, Université de Skikda,(2008)
- [6] D. Nadir ; R. Rabah. «Introduction à la corrosion et aux inhibiteurs de corrosion»,(2004).
- [7] H. MAHFOUD, «Inhibition de la corrosion de l'acier (A 516 -70)de la plante LamiumflexuosumTendans l'acide chloridrique», Mémoire de master, Université de Tébessa, (2016).
- [8] « 2010-01-Beacon-French (Canada).pdf ». Consulté le: 27 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aiche.org/sites/default/files/2010-01-Beacon-French%20%28Canada%29.pdf>
- [9] « 7 Usure et proprietes des materiaux 28 pages.pdf ». Consulté le: 27 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/7%20Usure%20et%20proprietes%20des%20materiaux%2028%20page.s.pdf>
- [10] S. KHERRAF, « comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux.Influence de quelques inhibiteurs », Mémoire de magister. Université de Skikda, (2008).
- [11] BeCloud.com. (n.d.). Corrosion localisée en traitement de l'eau. Memento degremont® de SUEZ. Retrieved July 7, 2022, from <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-etgeneralites/corrosion-des-metaux-et-betons/morphologie-des-corrosions/corrosion-localisee>
- [12] « Corrosion par piqûres », *Wikipédia*. 7 février 2024. Consulté le: 27 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Corrosion_par_piq%C3%BBres&oldid=212230283
- [13] M. Froment, « CORROSION INTERGRANULAIRE.SUR LE MÉCANISME DE LA CORROSION INTERGRANULAIRE DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES », *J. Phys. Colloques*, vol. 36, n° C4, p. C4-371-C4-385, oct. 1975, doi: 10.1051/jphyscol:1975438.
- [14] B. Houria, «Etude et caractérisation de la protection du cuivre et del'alliage cuivre-zinc par des couches minces auto assemblées d'alcanethiols .Effet des espèces sulfurées», mémoire de Magister, université de M'sila, (2013).
- [15] R. Ouazar, « Elaboration de l'alliage AlSi10MgZn, par l'ajout du Zinc a l'alliage AlSi10Mg et caractérisation de la corrosion, de la microstructure et de la dureté », Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou, 2020. Consulté le: 27 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.ummtto.dz/handle/ummtto/14449>



[16] « Daraf_Mourad_&_Rechid_Sohaib.» Étude électrochimique de l'efficacité inhibitrice des huiles sur la corrosion de l'aluminium.2020

[17] :Beaulieu, D. (2013) Les caractéristiques de l'aluminium structural (2e Édition) Chicoutimi (Québec) : Les presses de l'aluminium

[18] Guy Murry, Robert Lévêque Dans« Aide-mémoire - Métallurgie (2023) », pages 337 à 353

[19] J. Mazari, « Etudes de la corrosion de l'acier inoxydable 304L dans une solution de 9% en masse de NaCl », UMMTO, 2019. Consulté le: 28 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.ummtto.dz/handle/ummtto/14242>



CHAPITE III :

Le champ magnétique



III.1-Introduction :

Le champ magnétique est un phénomène fondamental en physique, omniprésent dans notre vie quotidienne et dans la nature. Depuis l'Antiquité, les hommes ont observé qu'un minéral naturel appelé "magnétite" (principalement constitué d'oxyde de fer) possède la capacité d'attirer de petits morceaux de fer. Cette interaction, connue sous le nom de magnétisme, désigne les solides capables d'attraction magnétique comme des aimants. Ces observations ont conduit à la compréhension que certains matériaux peuvent générer des champs magnétiques capables d'exercer des forces à distance sur d'autres objets magnétiques ou ferromagnétiques[1].

Le champ magnétique est principalement engendré par le mouvement des charges électriques, comme les courants électriques, et par les moments magnétiques intrinsèques des particules élémentaires. Les lignes de champ magnétique, visualisées à l'aide de limaille de fer, révèlent une structure complexe et fascinante, avec des pôles nord et sud distincts. Une propriété remarquable des champs magnétiques est que même lorsque l'aimant est brisé, chaque fragment possède toujours un pôle nord et un pôle sud, illustrant la nature dipolaire du magnétisme.

L'influence des champs magnétiques sur la corrosion est un domaine de recherche en pleine expansion. Les champs magnétiques peuvent affecter la vitesse et les mécanismes de corrosion par plusieurs voies. Par exemple, ils peuvent modifier la distribution des ions dans les électrolytes, influencer les réactions électrochimiques à la surface des métaux, et affecter le transport des espèces corrosives. En appliquant un champ magnétique, il est possible de modifier la cinétique de ces réactions et d'influencer le comportement électrochimique des matériaux en cours de corrosion.

Les études expérimentales et théoriques montrent que les champs magnétiques peuvent soit accélérer, soit ralentir les processus de corrosion en fonction des conditions spécifiques, telles que l'intensité du champ, la composition de l'alliage métallique, et la nature de l'électrolyte[2] [3].

Dans ce chapitre, nous étudierons les fondements du champ magnétique, ses sources et ses effets, notamment son influence sur la corrosion des matériaux, et sur le magnésium en particulier.



III.2-Définition du champ magnétique :

Le champ magnétique, ou induction magnétique, est une grandeur physique définie par son intensité et sa direction en tout point de l'espace. Il est généré par des phénomènes tels que le mouvement des charges électriques et les moments magnétiques des particules. Il est influencé par des aimants, des électroaimants et le déplacement de charges électriques[4].

Son unité est tesla (T), noté généralement par la lettre **B** empruntée à James Clerk Maxwell.

- 1 tesla = 10 000 gauss

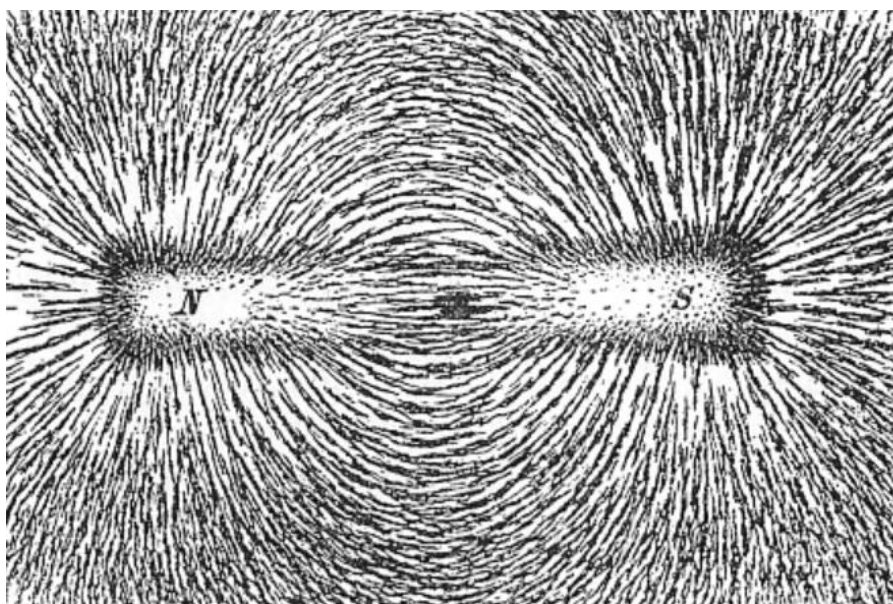


Figure III.29 : Visualisation du champ magnétique créé par un aimant droit.

III.3-Sources du champ magnétique :

Un champ magnétique peut être créé par :

- **Un matériau ferromagnétique :**

C'est un matériau dont les atomes possèdent des électrons non appariés. Les spins de ces électrons peuvent s'aligner dans la direction d'un champ magnétique extérieur appliqué et interagir entre eux, conservant cette orientation même après la suppression du champ magnétique externe. On distingue :

- Les matériaux ferromagnétiques durs possèdent un champ rémanent intense qui persiste longtemps, même en présence de faibles champs magnétiques externes. Ils sont utilisés pour fabriquer des aimants permanents. Exemples : alliage AlNiCo, magnétite, et aciers spéciaux comme l'alliage néodyme-fer-bore.



- Les matériaux ferromagnétiques doux ont un champ rémanent fort, mais qui peut être facilement réorienté par l'application d'un champ magnétique extérieur. Ils sont utilisés dans les moteurs, les transformateurs et les alternateurs, où ils sont soumis à des champs magnétiques variables. Exemples : le fer et les aciers spéciaux dits « fer doux » (alliages fer-nickel-molybdène, fer-silicium, etc.).
- **Un courant :**
 - Une spire parcourue par un courant crée un champ **B** perpendiculaire à la spire. On le détermine avec la règle de la main droite : le courant I sort par les ongles des quatre doigts (de l'index à l'auriculaire), et le champ **B** est indiqué par le pouce.

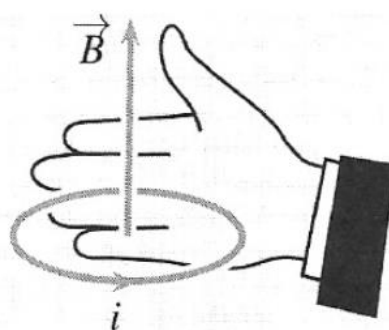


Figure III.30 : La règle de la main droite.

- Un fil parcouru par un courant crée un champ **B** qui s'enroule autour du fil. On utilise également la règle de la main droite : le courant I sort par l'ongle du pouce, et les quatre autres doigts indiquent le sens du champ **B**.



Figure III.31: La règle de la main droite.

Tout circuit électrique, parcouru par un courant est source de champ magnétique ;



- **Le noyau de la terre :**

Le noyau externe de la Terre, principalement constitué de fer en fusion en raison des températures élevées, génère un champ magnétique à travers les mouvements de convection du magma. Ces mouvements agissent comme des courants, produisant ainsi un champ magnétique. Bien que la carte de ce champ soit assez complexe, on peut globalement le modéliser comme celui d'un aimant droit, avec son pôle Nord magnétique situé près du pôle Sud géographique.

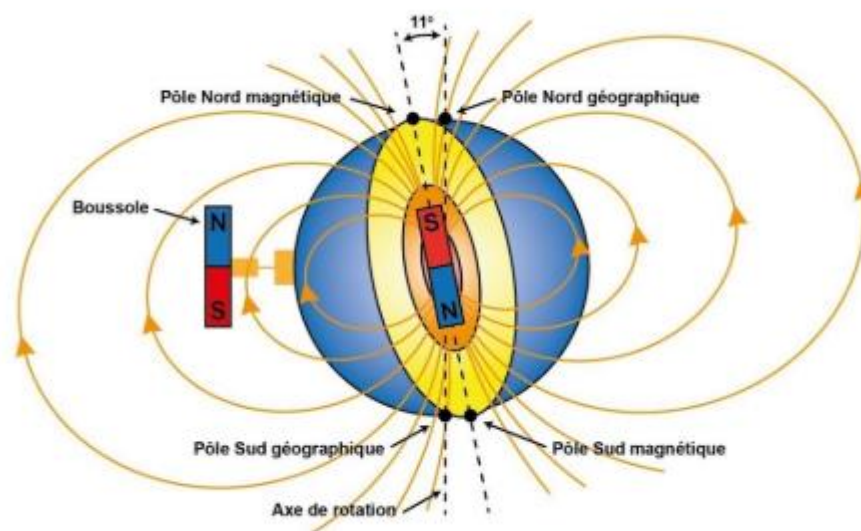


Figure III.32 : Schéma du champ magnétique terrestre.

III.4-Classification des Champs Magnétiques : Statiques et Dynamiques :

- **Champ magnétique statique :** Un champ magnétique statique est constant dans le temps, ce qui signifie qu'il ne varie ni en amplitude ni en direction. Les champs magnétiques statiques sont généralement produits par des aimants permanents ou des matériaux magnétiques qui conservent leur aimantation indéfiniment. Ces champs magnétiques sont utilisés dans une variété d'applications, notamment les aimants de réfrigérateur, les moteurs électriques, et les scanners d'IRM[5].
- **Champ magnétique dynamique :** Un champ magnétique dynamique varie dans le temps, soit en amplitude, soit en direction, soit les deux. Les champs magnétiques dynamiques sont souvent générés par des courants électriques alternatifs ou des processus naturels tels que les éruptions solaires. Ces champs magnétiques sont



essentiels dans de nombreuses technologies modernes, notamment les transformateurs électriques, les générateurs d'énergie électrique, les antennes radio, etc.[6].

III.5-Comportements des matériaux en réponse à un champ magnétique :

Les matériaux présentent une diversité de réponses face à un champ magnétique, leur comportement étant largement classifié en catégories distinctes. Cette variabilité résulte de plusieurs facteurs, notamment la nature intrinsèque du matériau, l'intensité ainsi que la direction du champ magnétique, et les conditions environnementales dans lesquelles le matériau est soumis. Ainsi, la réaction d'un matériau à un champ magnétique est le fruit d'une combinaison complexe de paramètres, influençant sa capacité à conduire ou à repousser les lignes de force magnétique, et cela définit en grande partie ses propriétés magnétiques globales[7].

- a) **Ferromagnétiques** : Les matériaux ferromagnétiques, tels que le fer, le nickel et le cobalt, s'aimantent fortement en présence d'un champ magnétique. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué, les moments magnétiques des atomes individuels s'alignent avec le champ, entraînant une magnétisation spontanée[8].
- b) **Paramagnétiques** : Les matériaux paramagnétiques, tels que le cuivre et l'argent, sont sensibles au champ magnétique, mais ne s'aimantent pas fortement. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué, les moments magnétiques des atomes individuels s'alignent partiellement avec le champ, entraînant une induction magnétique proportionnelle à la force du champ.
- c) **Diamagnétiques** : Les matériaux diamagnétiques se distinguent par leur capacité à générer un champ magnétique de polarité opposée en réaction à un champ externe, ce qui induit une légère force de répulsion entre eux et le champ magnétique appliqué.
- d) **Amagnétiques** : Les matériaux amagnétiques se distinguent par leur quasi-absence d'interaction avec les champs magnétiques. Ils ne démontrent ni aimantation spontanée ni réponse mesurable face aux champs magnétiques externes. Cette caractéristique les place en marge des réactions typiques des autres matériaux, illustrant ainsi leur nature résolument indifférente aux influences magnétiques.
- e) **Magnétostrictifs** : Les matériaux magnétostrictifs, tels que certains alliages de fer et de cobalt, changent de forme en réponse à un champ magnétique. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué, les moments magnétiques des atomes individuels s'alignent avec le champ, entraînant une déformation mécanique[9].



- f) **Quantiques** : Les matériaux quantiques, notamment les superconducteurs, peuvent manifester des comportements magnétiques extraordinaires, notamment des états de phase quantiques, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique[10].

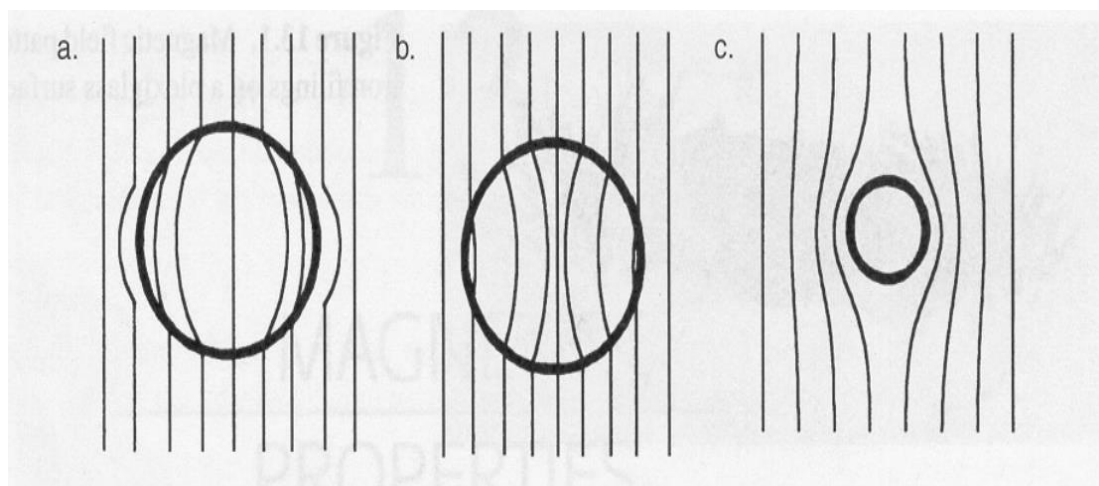


Figure III.33 : Contours de densité de flux magnétique dans a) un matériau diamagnétique, b) un matériau paramagnétique, c) un matériau superconducteur.

III.6-Effets des champs magnétiques sur les matériaux :

Les champs magnétiques ont des effets significatifs sur les matériaux, notamment :

- **Aimantation** : Les matériaux ferromagnétiques peuvent s'aimanter fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, ce qui permet de les utiliser dans des applications telles que les aimants, les magnétores, et les machines électriques.
- **Induction magnétique** : Les matériaux peuvent être induits à une forte induction magnétique sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, ce qui permet de les utiliser dans des applications telles que les bobines, les solénoïdes, et les transformateurs.
- **Susceptibilité magnétique** : Les matériaux peuvent avoir une susceptibilité magnétique positive (ferromagnétiques) ou négative (diamagnétiques), ce qui influence leur comportement magnétique.
- **Courbe d'aimantation** : Les matériaux ferromagnétiques ont une courbe d'aimantation qui montre leur réponse à un champ magnétique extérieur, avec une saturation à un champ critique.



- **Hystérésis** : Les matériaux ferromagnétiques peuvent présenter une hystérésis, c'est-à-dire une perte de magnétisation lorsqu'un champ magnétique est appliqué et ensuite retiré[11].

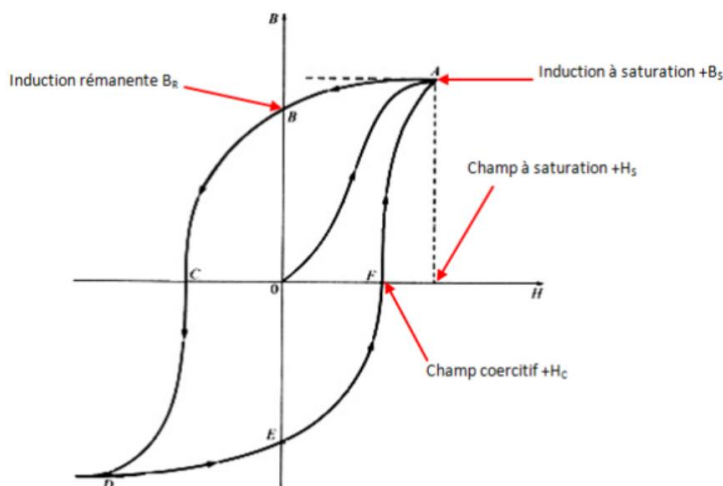


Figure III.34 : Boucle d'hystérésis.

- **Effets sur les implants médicaux** : Les champs magnétiques statiques puissants peuvent déplacer des implants ferromagnétiques, tandis que les champs magnétiques variables peuvent causer des dysfonctionnements électriques et électroniques dans les implants actifs[12].
- **Effets sur les matériaux vivants** : Les champs magnétiques peuvent influencer les matériaux vivants, notamment en modifiant les forces mécaniques sur les particules chargées en mouvement, ce qui peut affecter la conduction de l'influx nerveux[13].

Ces effets dépendent de la nature du champ magnétique, de la nature du matériau, et des conditions d'exposition.

III.7-Effet du champ magnétique sur la corrosion des métaux et du magnésium en particulier :

Le champ magnétique peut influencer la corrosion des métaux en modifiant la réactivité des surfaces métalliques. Les études montrent que la présence d'un champ magnétique peut accélérer ou ralentir la corrosion, en fonction de la nature du métal et de la force du champ magnétique.

La corrosion du magnésium est souvent initiée par une réaction chimique entre le métal et l'oxygène, suivie par une réaction électrochimique. Le champ magnétique peut influencer ces



réactions en modifiant la réactivité des surfaces métalliques et en créant des courants électriques qui peuvent accélérer ou la corrosion[14].

III.8-Applications du champ magnétique :

Les champs magnétiques trouvent une multitude d'applications dans divers domaines :

- Les plaques de cuisson à induction tirent parti d'électroaimants pour chauffer les récipients métalliques sans surchauffer la surface de cuisson elle-même.
- Le rechargement sans fil, ou rechargement par induction, élimine le besoin de connecteurs physiques entre le chargeur et l'appareil à recharger en utilisant des champs magnétiques pour induire un courant électrique dans l'appareil.
- Les moteurs électriques exploitent les champs magnétiques pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils se déclinent en différentes variantes telles que les moteurs alternatifs synchrone et asynchrone, les moteurs à courant continu et les moteurs pas à pas.
- Les trains à sustentation magnétique, en lévitation au-dessus des rails grâce à des forces magnétiques, offrent une solution de transport innovante sans contact avec le sol, assurant une conduite silencieuse et efficace.
- La propulsion magnétique propulse les trains à sustentation magnétique sans aucun frottement, ce qui leur permet de se déplacer rapidement et efficacement grâce à l'utilisation de forces magnétiques.



III.9-Références bibliographiques :

- [1] « chap22_champ_B_cours.pdf ». Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://physique.mp2i-champo.fr/chap22_champ_B_cours.pdf
- [2] S. Zhao *et al.*, « The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater », *RSC Advances*, vol. 10, n° 4, p. 2060- 2066, 2020, doi: 10.1039/C9RA09079G.
- [3] C. Zhu *et al.*, « Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys LaFe_{13.9}Si_{1.4} under paramagnetic states », *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 968, p. 171901, déc. 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.171901.
- [4] «  Champ magnétique - Définition et Explications », Techno-Science.net. Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Champ-magnetique.html>
- [5] « Expo_CMS_140422_VF.pdf ». Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.inelfe.eu/sites/default/files/2022-04/Expo_CMS_140422_VF.PDF
- [6] « Champ magnétique », *Wikipédia*. 24 avril 2024. Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Champ_magn%C3%A9tique&oldid=214538474
- [7] A. Nouri, « Etude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie ».
- [8] « chapitre 13.pdf ». Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://zhao.recherche.usherbrooke.ca/cours/chapitre%2013.pdf>
- [9] M. Rekik, O. Hubert, L. Daniel, T. Waeckerle, et M. Tunizini, « Comportement magneto-mécanique dissipatif des matériaux ferromagnétiques sous chargement mécanique multiaxial. », *Mecatmat2012*, p. ?, janv. 2012.
- [10] « Le comportement mystérieux d'un matériau magnétique quantique découvert par une équipe de l'EPFL », rts.ch. Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rts.ch/audio-podcast/2024/audio/le-comportement-mysterieux-d-un-materiau-magnetique-quantique-decouvert-par-une-equipe-de-l-epfl-28061484.html>
- [11] « Identification des matériaux - Les propriétés magnétiques ». Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteA/co/A_4_C_4.html
- [12] « Champs électromagnétiques. Effets sur la santé - Risques - INRS ». Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/effets-sante.html>



[13] P. Galle et J. F. Cavellier, « Effets et risques liés à l'utilisation des champs magnétiques dans les explorations par résonance magnétique nucléaire chez l'homme », *Radioprotection*, vol. 20, n° 2, p. 97- 115, avr. 1985, doi: 10.1051/radiopro/19852002097.

[14] R. Slimani, N. Zazi, K. Chakkai, et H. Boukharoub, *EFFET D'UN FAIBLE CHAMP MAGNETIQUE ET DU POTENTIEL IMPOSE SUR COMPORTEMENT A LA CORROSION DE D'ALUMINIUM (AA1370)*. 2019.



CHAPITRE IV :

Matériels et méthodes expérimentales



IV.1-Introduction :

Ce chapitre décrit les matériels et méthodes utilisés pour étudier la corrosion d'un alliage de magnésium dans une solution de 0,9 % NaCl, en présence d'un champ magnétique. Nous préciserons les caractéristiques de l'alliage, les conditions expérimentales, ainsi que les techniques d'analyse employées pour évaluer l'effet du champ magnétique sur la corrosion.

IV.2-Organigramme :

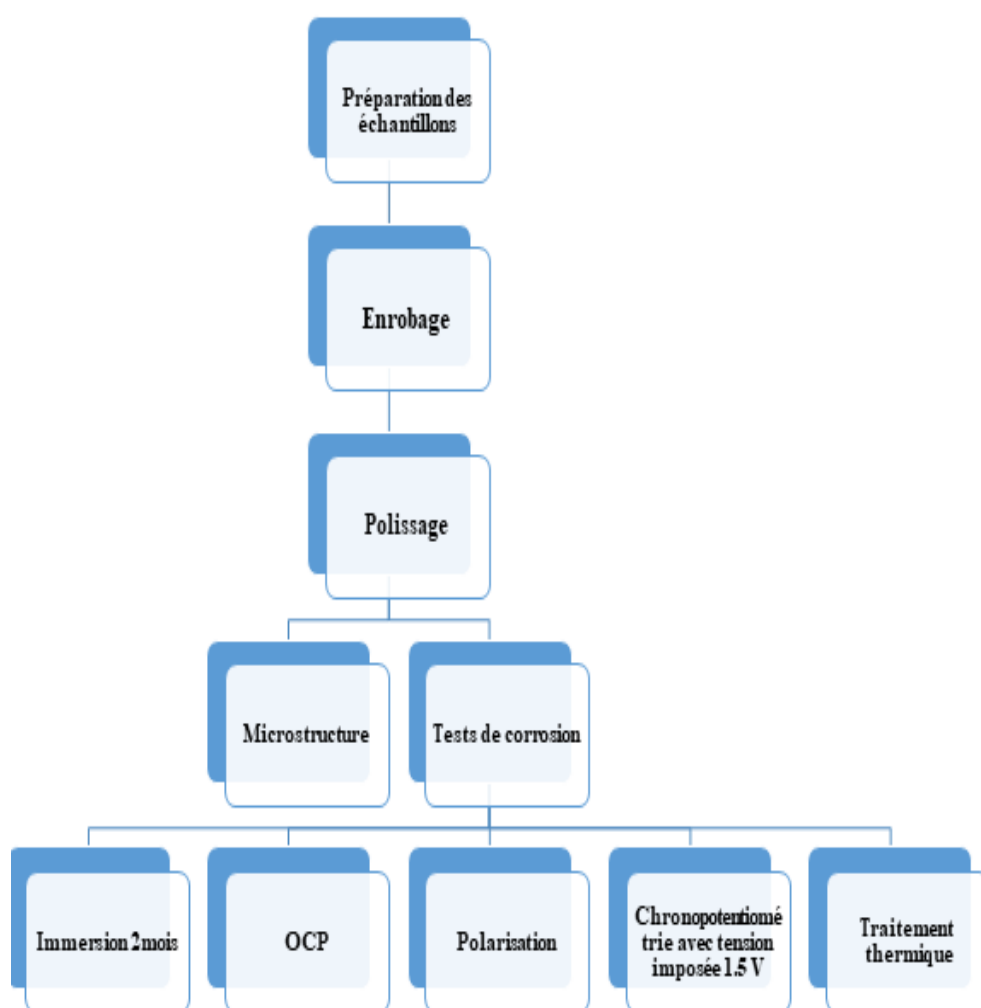


Figure IV.35 : Organigramme de travail.



IV.3-Alliage étudié :

Le matériau choisi pour cette étude est un alliage de magnésium qui contient 98% de Mg. L'analyse chimique a été faite par la méthode de la spectrométrie d'émission optique (OES). La composition chimique détaillée de cet alliage est exposée dans le tableau IV.11.

Tableau IV.11: La composition chimique de l'alliage de magnésium

Eléments	(%)
Si	0,01448
Sn	0,01415
Fe	0,00822
Cu	<0,00046
Mn	1,14533
Mg	98,1508
Ti	<0,00052
Cr	0,0024
Pb	0,00763
Na	0,00041
Al	0,6556

IV.4-Méthodes d'élaboration :

IV.4-1-Préparation des échantillons :

1. Nous avons découpé notre bloc de magnésium en petits cubes de 1cm^3 manuellement à l'aide d'une scie à métaux.



Figure IV.36: Bloc de magnésium



2. Les échantillons en cubes ont été perforés au centre à l'aide d'une perceuse équipée d'une mèche de 1.5 mm de diamètre.
3. Nous avons connecté nos échantillons à un fil de cuivre (Fig. IV.37), gainé de caoutchouc, permettant ainsi la circulation du courant. La continuité électrique est vérifiée avant et après l'enrobage.



Figure IV.37: Echantillon découpé et connecté à un fil en cuivre.

IV.4-2-Enrobage des échantillons :

Les échantillons sont ensuite enrobés avec une résine à froid (comme illustré dans la figure. IV.38), une substance imperméable, non contaminable pour la solution étudiée.

Trois catégories distinctes d'échantillons ont été préparées :

- Sans champ magnétique, agissant de manière individuelle ;
- Ceux avec des aimants de petite taille (40 mT) ;
- Ceux accompagnés d'aimants de grande taille (47 mT).

Cette diversité d'échantillons permettra d'examiner et de comparer l'impact du champ magnétique sur la résistance et la morphologie de corrosion de l'alliage du magnésium.

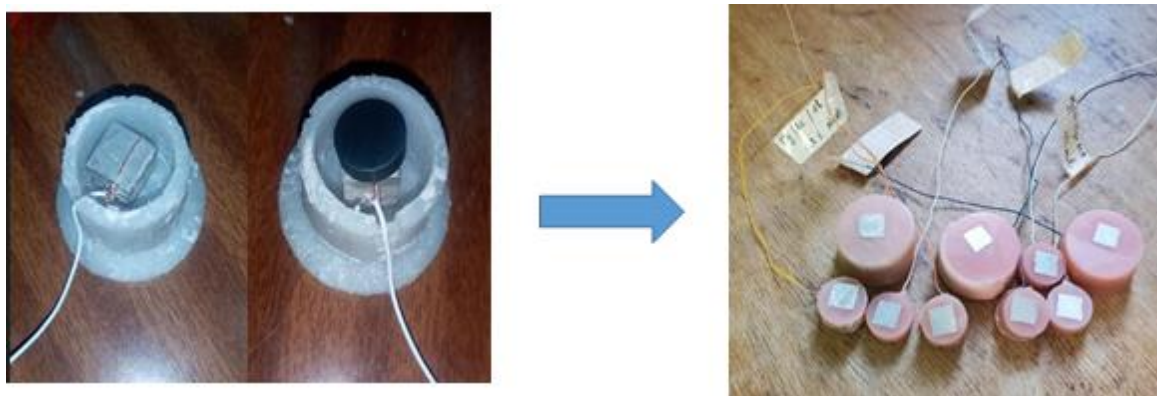


Figure IV.38 : Echantillons enrobés.



IV.4-3-Polissage :

Pour examiner la microstructure de ces échantillons, il est essentiel de procéder à une préparation minutieuse de leur surface. Dans cette optique, nous avons opté pour la méthode du polissage mécanique. Cette technique implique une série d'étapes visant à éliminer progressivement les micro-défauts de la surface à l'aide de papiers abrasifs de différentes granulométries, allant de 200 à 4000 placés dans une polisseuse de type STRUERS à jet d'eau (figure IV.39).

Chaque phase du polissage nécessite l'utilisation séquentielle de papiers abrasifs, débutant par un grain grossier (200) et en progressant vers des grains plus fins (400,800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 4000).

À chaque changement de papier abrasif, nous effectuons une rotation de 90 degrés afin d'éviter toute formation de rayures directionnelles sur la surface. Cette rotation régulière garantit une préparation uniforme de la surface pour une observation microscopique précise.



Figure IV.39 : Polisseuse STUERS

IV.4-4-Attaque chimique :

L'attaque chimique prépare la surface de l'échantillon en accentuant les contrastes et en révélant sélectivement les constituants. C'est une étape cruciale avant l'observation au microscope optique, car elle permet de révéler la microstructure des métaux et alliages.

Nous avons utilisé une solution d'acide nitrique (HNO_3) dilué à 10% dans de l'eau. Ce choix est judicieux car l'acide nitrique pur est trop agressif pour le magnésium.



IV.4.4.1-Préparation de la solution :

L'acide nitrique disponible dans notre laboratoire est à 65% de concentration. Pour préparer une solution à 10% à partir d'un acide à 65%, nous devons déterminer le volume d'acide concentré nécessaire et compléter avec de l'eau distillée pour obtenir le volume final désiré.

Utilisons la relation de dilution : $C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$

Où :

- C_1 = Concentration initiale (65%)
- V_1 = Volume de l'acide concentré (à déterminer)
- C_2 = Concentration finale (10%)
- V_2 = Volume final de la solution (par exemple, 100 mL)

En réarrangeant la formule pour V_1 :

$$V_1 = \frac{C_2 \times V_2}{C_1}$$

Pour un volume final de 100 mL :

$$V_1 = \frac{10\% \times 100\text{mL}}{65\%} = \frac{10 \times 100}{65} = 15,38\text{mL}$$

Nous avons mesuré 15,38 mL d'acide nitrique concentré (65%) à l'aide d'une pipette que nous avons versé dans un bécher contient 84,62 mL (100mL - 15,38mL) d'eau distillée ou déminéralisé. Puis nous avons agité la solution pour assurer un mélange homogène et conservé dans un flacon étiqueté. Enfin nous avons réalisé une attaque chimique avec l'acide nitrique à 10% durant 4 secondes.

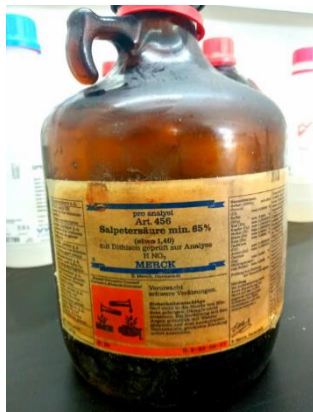


Figure IV.40 : Acide nitrique à 65%.



IV.4-5-Examen au microscope optique :

L'examen métallographique permet d'observer la microstructure d'un métal à l'aide d'un microscope optique. Pour notre étude, nous avons utilisé un microscope optique (figure IV.41) de marque HUND (WETZLAR) offrant un agrandissement maximal de 400x. Ce microscope est équipé d'une caméra qui transmet les images à un écran d'ordinateur, où elles sont analysées à l'aide du logiciel d'acquisition et de traitement d'image PICED CORA.

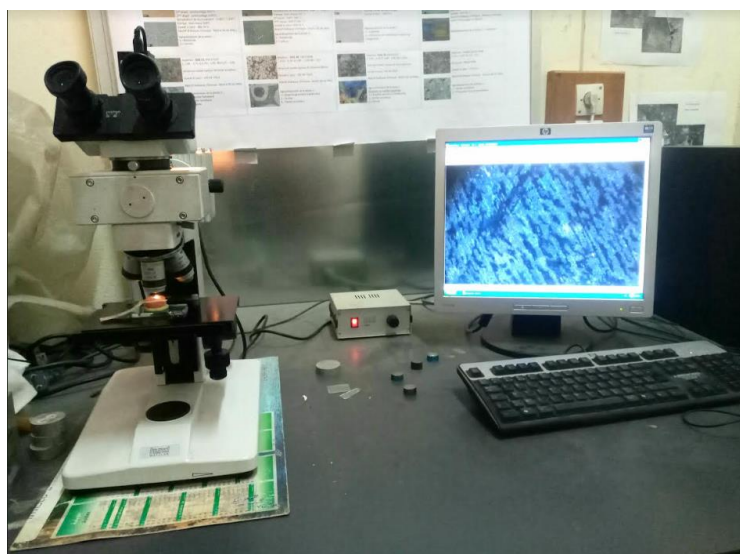


Figure IV.41 : Microscope optique de type « HUND WETZLAR ».

IV.4-6-Mesure de la masse volumique :

Pour déterminer la masse volumique de notre échantillon, nous avons mesuré sa masse et son volume. La masse a été mesurée à l'aide d'une balance analytique précise. Pour mesurer le volume, nous avons utilisé un pied à coulisse afin de mesurer les dimensions de l'échantillon, et nous avons calculé la moyenne des surfaces des faces pour estimer le volume.

La masse de notre échantillon (figure IV.42), est égale à : $m=95,32g$.



Figure IV.42 : Dimensions du bloc du magnésium.



Calculons le volume :

$$1) \quad 35,50 \times 49 = 1739,5$$

$$50,30 \times 35,60 = 1790,68$$

$$S1 = \frac{1739,5 + 1790,68}{2} = 1765,09 \text{ mm}^2$$

$$2) \quad 33,84 \times 35,50 = 1201,32$$

$$34,98 \times 35,60 = 1245,288$$

$$S2 = \frac{1201,32 + 1245,288}{2} = 1223,304 \text{ mm}^2$$

$$V1 = S1 \times h1 \quad (h1 = 34,98 \text{ mm})$$

$$V1 = 1765,09 \times 34,98 \text{ mm}^3$$

$$V1 = 61742,8482 \text{ mm}^3$$

$$V2 = S2 \times h2 \quad (h2 = 50,30 \text{ mm})$$

$$V2 = 1223,304 \times 50,30$$

$$V2 = 61532,1912 \text{ mm}^3$$

$$V = \frac{61742,8482 + 61532,1912}{2} = 61637,5197 \text{ mm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{95,32}{61637,5197} = 0,0015464607 \text{ g/mm}^3$$

$$\rho = 1,5464607 \text{ g/cm}^3$$

Ainsi, la masse volumique de notre alliage est estimée à 1,55 g/cm³.



IV.4-7-Mesure de la dureté :

La dureté d'un métal se réfère à sa résistance face à la pénétration d'un matériau plus dur. Différents tests de dureté sont utilisés, partageant un principe commun mais variant dans la forme et la charge du pénétrateur utilisé.

Dans notre étude nous avons déterminé la dureté Vickers de notre échantillon.

Les essais de dureté Vickers consistent à appliquer pénétrateur en diamant de forme pyramidale sur la pièce à tester sous une charge F . La pyramide est droite à base carrée. Après le retrait de la charge, on mesure les diamètres d_1 et d_2 de l'empreinte laissée sur la surface de la pièce.



Figure IV.43 : Duromètre HOMMEL.

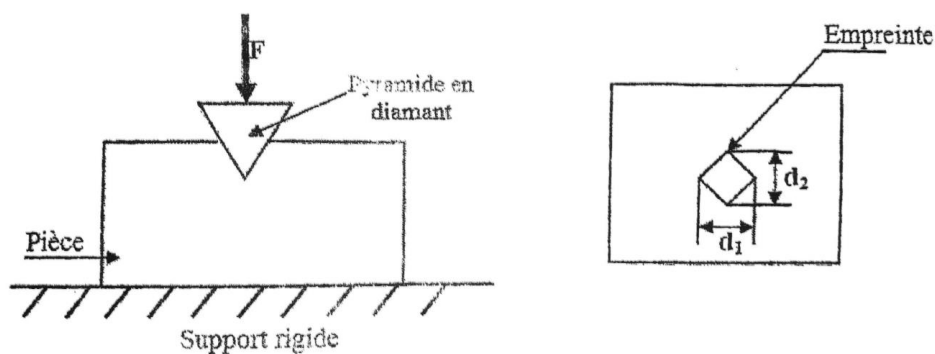


Figure IV.44 : Principe de l'essai de dureté Vickers.



La valeur de la dureté Vickers se définit comme étant le rapport entre la charge appliquée à la surface de l'empreinte, selon la relation suivante :

$$HV = \frac{F}{S} \quad (F=15\text{kg})$$

La surface est calculée en fonction des diagonales de l'empreinte mesurées. On mesure les deux diagonales d_1 et d_2 et on calcule la moyenne d : $d = \frac{d_1+d_2}{2}$ (en mm).

La valeur de la surface de forme pyramidale est donnée par la relation :

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \gamma / 2} = \frac{d^2}{1,8544}$$

Avec γ est l'angle de la pyramide égal à 136° .

Ce qui donne le rapport de la charge à la surface : $HV = 1,8544 \frac{F}{d^2}$

IV.5-Préparation de la solution d'immersion :

Pour préparer une solution de NaCl à 0,9% :

1. Peser 9 grammes de NaCl à l'aide d'une balance de précision électronique (figure IV.45) ;
2. Dissoudre les 9 grammes de NaCl dans environ 800 mL d'eau distillée ;
3. Transférer la solution dans une fiole jaugée de 1 litre ;
4. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre 1 litre ;
5. Agiter bien pour homogénéiser la solution.



Figure IV.45 : Balance électrique.



IV.6- Mesure du potentiel de corrosion libre (OCP) :

Dans le domaine de la corrosion, OCP signifie **Open Circuit Potential**, également connu sous le nom de **potentiel de circuit ouvert**. Il s'agit du potentiel électrique mesuré entre une électrode (ou un matériau en cours d'étude) et une électrode de référence lorsqu'aucun courant externe ne circule dans le circuit.

L'OCP est utilisé pour évaluer la tendance naturelle d'un matériau à corroder dans un environnement donné. En mesurant l'OCP, on peut suivre et obtenir des informations sur le comportement électrochimique du matériau et sur son état de corrosion.

IV.6-1-Méthode expérimentale utilisée :

Pour mesurer le potentiel de corrosion libre, nous avons réalisé un test de chronopotentiométrie. Ce test consiste à immerger une électrode de travail (notre alliage de magnésium) dans un électrolyte et à suivre l'évolution de son potentiel en fonction du temps, avec ou sans application de courant électrique. En circuit ouvert ($i=0$), l'électrode métallique acquiert un potentiel par rapport à la solution, appelé potentiel à circuit ouvert, également connu sous le nom de potentiel de corrosion libre. Ce potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence, qui est une électrode Ag/AgCl dans notre cas. La solution corrosive utilisée est une solution de NaCl à une concentration de 0.9%.

Tous les essais ont été réalisés à une température de 37°C, représentant la température moyenne du corps humain.

IV.6-1-1-Corrosion libre (Chronopotentiometrie) :

Nous avons réalisé des essais de potentiel de corrosion libre (OCP) pour les différents échantillons (sans champ, avec petit champ, avec grand champ) pendant différentes durées : une heure, vingt-quatre heures, cinq jours et dix jours.

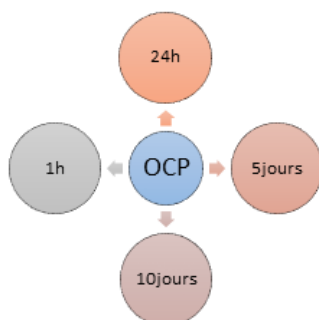


Figure IV.46 : Tests de corrosion réalisés.



IV.6-1-2-Chronopotentiometrie sous tension imposée 1.5V :

Pour réaliser un test de potentiométrie avec un potentiel imposé de 1,5 V nous avons monté le circuit suivant :

- Immerger l'électrode de travail (notre alliage), l'électrode de référence (Ag/AgCl), et la contre-électrode dans la solution à 0.9%NaCl ;
- Connecter la borne positive de la pile à l'électrode de travail ;
- Connecter la contre-électrode à la borne négative de la pile ;
- Connecter l'électrode de référence au voltmètre pour mesurer le potentiel de l'électrode de travail par rapport à l'électrode de référence.

Le branchement est illustré dans la figure IV.47.

A l'instant 0 d'immersion de l'électrode de travail on révèle la valeur du potentiel et du courant affichés. Nous enregistrons par la suite le potentiel et le courant pendant 1heure.

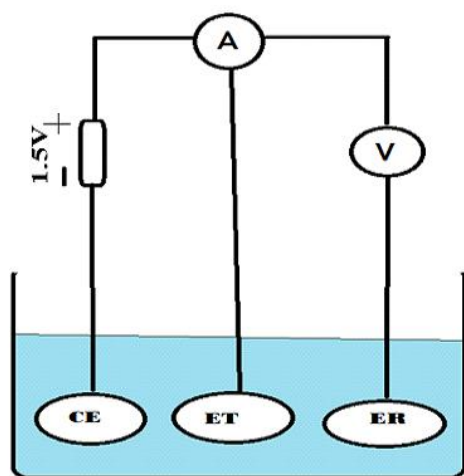


Figure IV.47 : Schéma de la chronopotentiometrie sous tension imposée 1.5V.

IV.6-1-3-Test d'immersion pendant deux mois :

Nous avons soumis un échantillon à un test d'immersion dans une solution de NaCl à 0,9% pendant deux mois.

Avant son immersion, nous avons mesuré le poids de l'échantillon afin d'évaluer toute variation de poids après cette période d'exposition à la solution corrosive.

$$m = 1,68610 \text{ g.}$$



Figure IV.48 : Balance d'analyse de type KERN.

IV.7-Tracer les courbes de polarisation :

La polarisation électrochimique est une technique utilisée pour perturber l'état d'équilibre d'un système électrochimique en appliquant un potentiel électrique externe à une électrode. Elle permet d'étudier les réactions électrochimiques, d'évaluer la résistance à la corrosion des matériaux et de comprendre les mécanismes de corrosion. En imposant un potentiel et en mesurant le courant résultant, elle permet également de déterminer la résistance de polarisation et le potentiel de corrosion du métal.

Pour réaliser les tests de polarisation nous avons utilisé :

- Un potentiostat/galvanostat Autolab ;
- Une cellule électrochimique ;
- Une électrode de travail (magnésium) ;
- Une électrode de référence (Ag/AgCl) ;
- Une contre-électrode (graphite) ;
- Une solution électrolytique (solution de NaCl à 0,9%) ;
- Un ordinateur avec logiciel Autolab (NOVA).



IV.7-1-Etapes de réalisation :

1. Remplir la cellule électrochimique avec la solution de 0.9%NaCl ;
2. Placer l'électrode de travail, l'électrode de référence (Ag/AgCl), et la contre-électrode dans la solution. En s'assurant que les électrodes sont correctement immergées et ne se touchent pas ;
3. Connecter l'électrode de travail au câble correspondant du potentiostat (généralement marqué WE pour Working Electrode) ;
4. Connecter l'électrode de référence au câble correspondant (RE pour Reference Electrode) ;
5. Connecter la contre-électrode au câble correspondant (CE pour Counter Electrode) ;
6. Ouvrir le logiciel NOVA sur l'ordinateur ;
7. Créer une nouvelle procédure de polarisation en sélectionnant le type d'expérience approprié (Linear polarisation) ;
8. Configurer les paramètres de l'expérience, tels que le potentiel initial (= -1 V), le potentiel final (= 1 V) ;
9. Enregistrer et nommer la procédure ;
10. Démarrer l'expérience en exécutant la procédure configurée dans le logiciel NOVA ;
11. Le logiciel enregistrera les données de polarisation, telles que les courants et les potentiels, tout au long de l'expérience ;
12. Une fois l'expérience terminée, les données sont exportées vers Excel et transformées en courbes pour une interprétation visuelle.

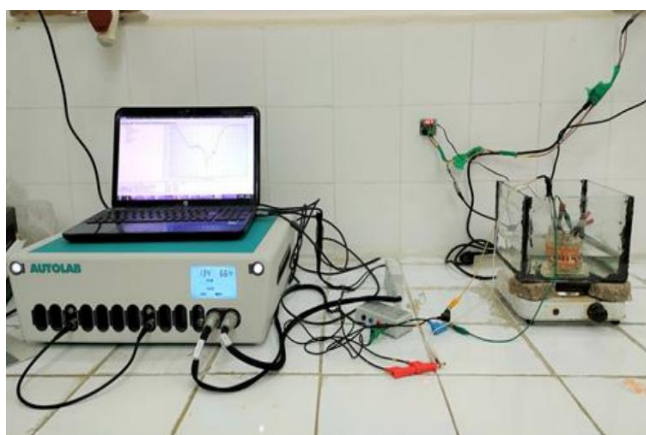


Figure IV.49 : Dispositif réalisé pour la mesure d'une courbe de polarisation potentiostatique.



IV.8-Traitement thermique :

Nous avons soumis deux échantillons à des traitements thermiques de recuit distincts dans un four (figure IV.50) : l'un à 200°C et l'autre à 300°C, avec un maintien de 30 minutes suivi d'un refroidissement dans le four (figures IV.51 et IV.52).

Ensuite, les échantillons ont été immergés dans une solution de NaCl à 0.9% pendant cinq jours. Durant cette période, nous avons mesuré le potentiel de corrosion libre, suivi de tests de polarisation pour tracer les courbes de polarisation.



Figure IV.50 : Four électrique.

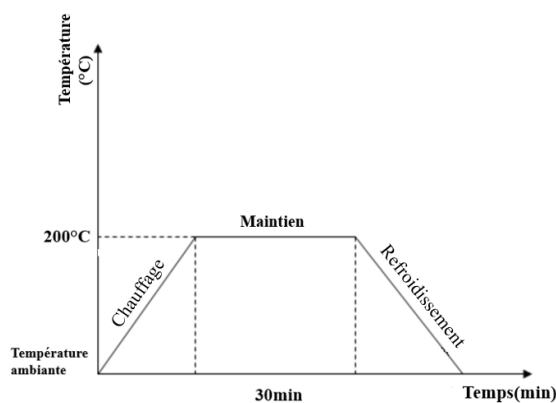


Figure IV.51 : Traitement de recuit à 200°C.

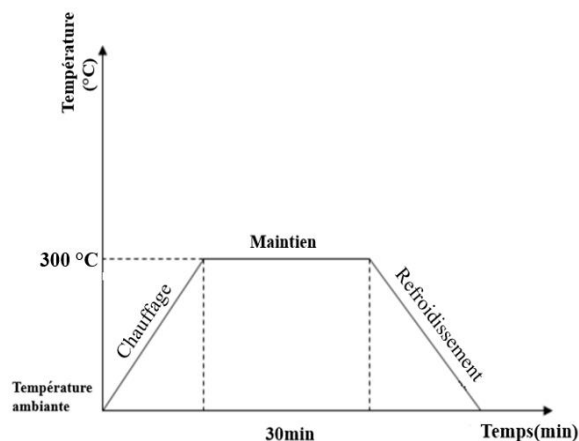


Figure IV.52 : Traitement de recuit à 300°C.

Cette approche nous a permis de comparer l'effet des différents traitements thermiques sur la résistance à la corrosion du magnésium.

IV.9-Mesure de l'intensité du champ magnétique :

Nous avons mesuré l'intensité du champ magnétique des deux aimants (petit et grand) à l'aide d'un teslamètre de type PHYWE. Les mesures ont été effectuées à différentes distances pour chaque aimant. Nous avons obtenu les courbes suivantes :

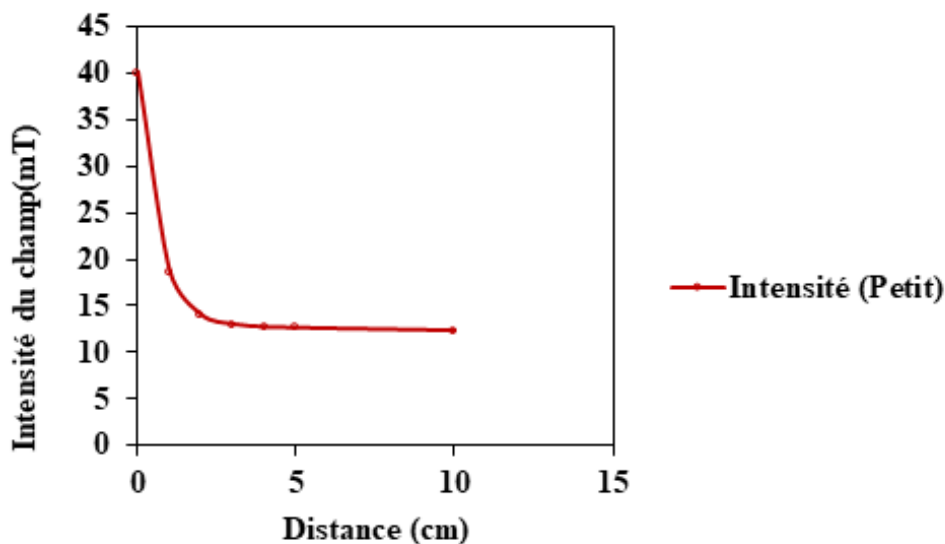


Figure IV.53 : Intensité du petit aimant.

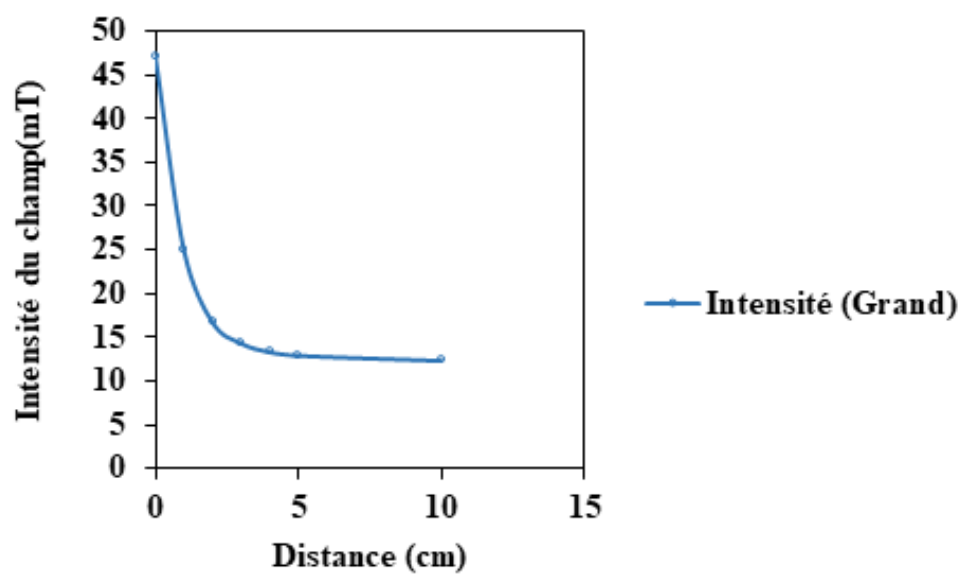


Figure IV.54 : Intensité du grand aimant.



CHAPITRE V :

Résultats et interprétation



V.1-Microstructure de l'alliage de magnésium :

V.1-1. Sans traitement :

La Figure V.55 montre la microstructure du magnésium sans traitement et après polissage. Nous avons constaté à partir de la Figure (V.55) l'échantillon de référence du magnésium ne présente pas de corrosion sur la surface. Ceci dit, la corrosion de ce matériau n'est pas rapide.

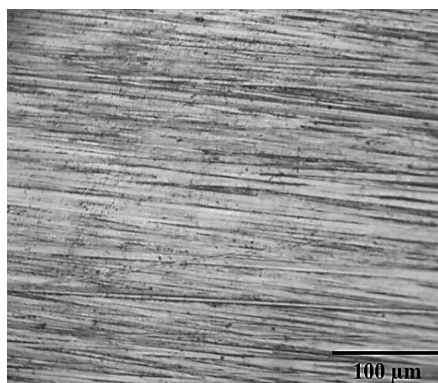


Figure V.55 : Microstructure du magnésium sans traitement.

V.1-2. Après attaque chimique :

La Figure V.56 montre la microstructure du magnésium après l'attaque chimique dans l'acide nitrique dilué pendant quatre secondes. L'acide nitrique provoque une corrosion au niveau des joints des grains, et une corrosion localisée au niveau des grains.

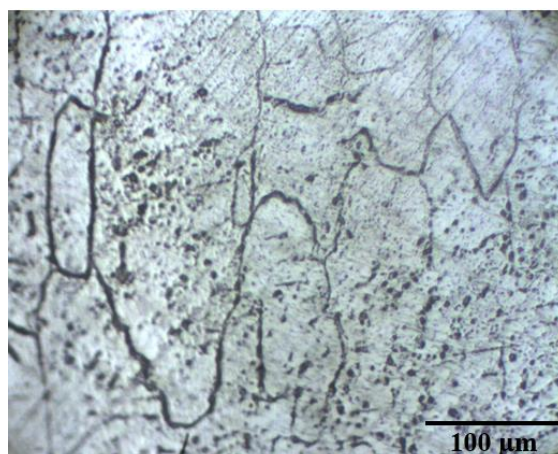


Figure V.56: Microstructure du magnésium après quatre secondes d'attaque chimique dans l'acide nitrique dilué.

V.2-Calcul de la dureté :

Après le retrait de la charge, nous avons mesuré les diamètres d_1 et d_2 des empreintes laissées sur la surface de l'échantillon. Les résultats sont montrés dans le tableau V.12.



La dureté Vickers est ensuite mesurée par la relation :

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} (F=15\text{kg})$$

Ainsi les résultats sont montrés dans le tableau V.12.

Tableau V.12 : Dureté Vickers du magnésium.

Empreintes	d1(mm)	d2(mm)	Moyenne($\frac{d1+d2}{2}$)	Dureté de chaque test	Dureté moyenne
1	0.88	0.92	0.9	34.34	33.44 HV
2	0.92	0.90	0.91	33.59	
3	0.92	0.94	0.93	32.16	
4	0.96	0.94	0.95	30.82	
5	0.90	0.85	0.875	36.33	

V.3- Evolution du potentiel de corrosion libre :

V.3-1. Après une heure de corrosion à circuit ouvert (OCP) :

La Figure (V.57) représente les courbes de potentiel de corrosion libre de l’alliage du magnésium dans la solution de 0.9% de NaCl durant une heure en présence et en absence du champ magnétique de différentes intensités (40 mT) et (47 mT).

La figure montre que le potentiel libre de corrosion diffère pour les trois échantillons dès le début de l’immersion, ce qui peut être attribué aux conditions de corrosion.

Au début de l’immersion, le potentiel de corrosion libre de l’échantillon sans champ magnétique était le plus noble, avec une valeur initiale de $E=-1.701$ V. Ce potentiel s’est ensuite relativement stabilisé à $E=-1.632$ V jusqu’à la fin de l’expérience.

En revanche, l’échantillon soumis à un champ magnétique de (40 mT) a initialement présenté le potentiel le moins noble. Ce potentiel a augmenté pour devenir plus noble après environ deux minutes, puis il a diminué et s’est stabilisé pendant environ quarante minutes, avant d’augmenter pour atteindre $E=-1.282$ V après une heure d’immersion.

Nous avons également observé que le potentiel de corrosion libre de l’échantillon soumis à un champ magnétique de (47 mT) est le moins noble après une heure d’immersion.

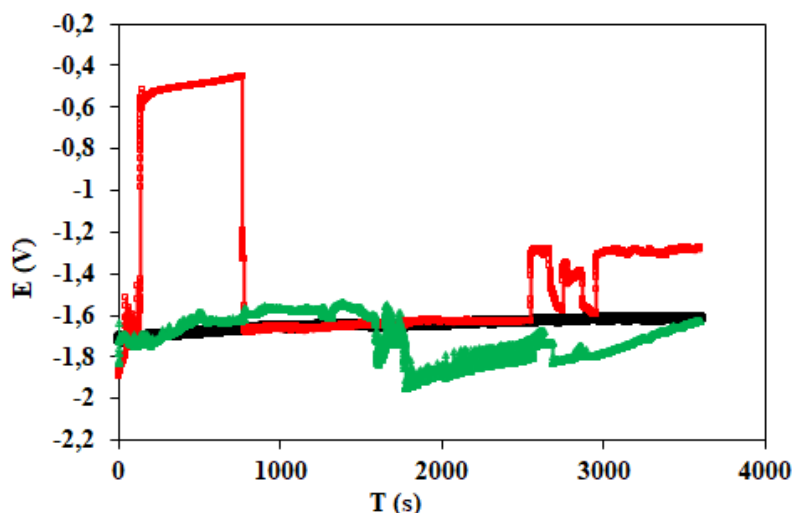


Figure V.57 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant une heure pour les trois échantillons.

Noir) en absence du champ **rouge)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **vert)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.3-2. Après vingt- quatre heures d'OCP :

La Figure (V.58) représente les courbes de potentiel de corrosion libre du magnésium dans une solution de 0.9% de NaCl durant vingt-quatre heures d'immersion en présence et en absence du champ magnétique de différentes intensités (40 mT) et (47 mT).

La figure V.4 montre qu'au début d'immersion, les échantillons ont le même comportement que ceux de la figure précédente.

Nous avons constaté que l'échantillon en absence du champ magnétique présente un potentiel égal à $E = -1.62$ V après trois heures d'immersion qui se stabilise jusqu'à la fin de l'expérience.

En revanche, l'échantillon soumis à un champ magnétique de (40 mT), exhibe un potentiel plus noble égal à $E = -1.2$ V, après deux heures d'immersion, toutefois, ce potentiel a diminué progressivement pour atteindre $E = -1.63$ V après vingt-quatre heures.

L'échantillon soumis à un champ magnétique d'intensité (47 mT) présente toujours le potentiel le moins noble pour durant vingt-quatre heures.

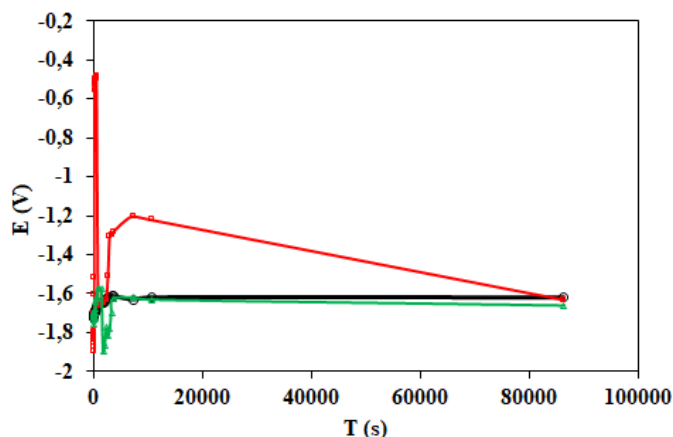


Figure V.58 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant vingt-quatre heures des trois différents échantillons.

Noir) en absence du champ **rouge)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **vert)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.3-4. Après cinq jours OCP :

La Figure (V.59) représente les courbes du potentiel de corrosion libre de du magnésium dans une solution de 0.9% de NaCl pendant cinq jours en présence et en absence du champ magnétique d'intensités (40 mT) et (47 mT).

La figure montre qu'au début d'immersion, que les échantillons ont le même comportement que ceux des figures précédentes.

Nous avons constaté que les trois échantillons présentent des potentiels très proches à partir du troisième jour jusqu'au cinquième jour d'immersion de valeur égale à $E = -1.58$ V.

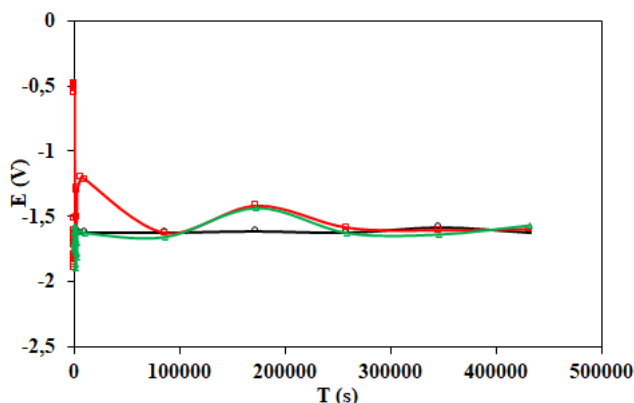


Figure V.59 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant cinq jours des différents échantillons.



Noir) en absence du champ **rouge)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **vert)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.3-4. Après dix jours de corrosion à circuit ouvert (OCP) :

La Figure (V.60) représente les courbes de potentiel de corrosion libre du magnésium dans une solution de 0.9% de NaCl pendant dix jours en présence et en absence du champ magnétique d'intensités (40 mT) et (47 mT).

La figure montre qu'au début d'immersion, les échantillons ont le même comportement que ceux des figures précédentes.

Nous avons constaté qu'à partir du troisième jour d'immersion les trois échantillons présentent des potentiels très proches et stables jusqu'à la fin des expériences (dixième jour)

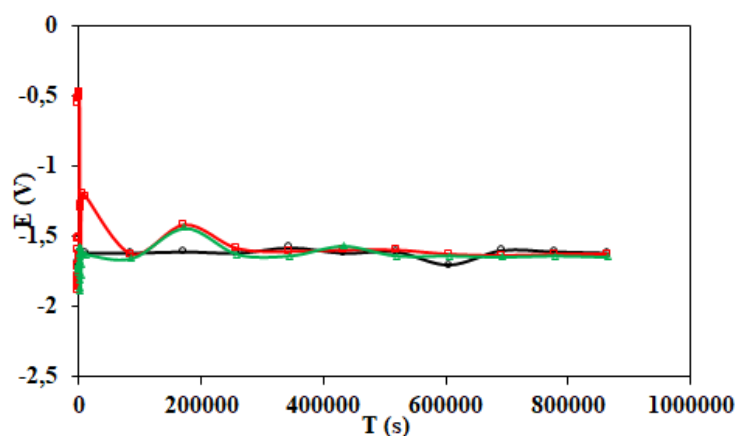


Figure V.60 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant dix jours des trois échantillons.

Noir) en absence du champ **rouge)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **vert)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.3-5. Effet d'une tension imposée de 1.5V sur le potentiel de corrosion libre :

La Figure (V.61) représente les courbes de potentiel de corrosion libre du magnésium dans une solution de 0.9% de NaCl pendant une heure, sous tension imposée de 1.5 Volt, en présence et en absence du champ magnétique d'intensités (40 mT) et (47 mT).

Nous avons observé sur la figure V.61 que le potentiel de corrosion, sous une tension imposée de 1.5 Volt, est presque le même pour les trois échantillons à l'immersion, soit environ $E = -0,7 \text{ V}$.



Après deux minutes, nous avons remarqué une augmentation brusque du potentiel de l'échantillon sans champ magnétique, atteignant une valeur égale à $E = 1.02 \text{ V}$ à dix minutes, puis il augmente légèrement pour atteindre $E = 1.12 \text{ V}$ après une heure d'immersion.

En revanche, le potentiel de l'échantillon avec un champ magnétique d'intensité (40 mT) augmente après six minutes pour atteindre la valeur de $E = 0.43 \text{ V}$, ensuite, il diminue et se stabilise à une valeur égale à $E = -0.836 \text{ V}$ après une heure d'immersion.

L'échantillon exposé au champ magnétique d'intensité (47 mT) présente le potentiel le plus faible, resté stable du début jusqu'à la fin d'immersion à une valeur de $E = -0.975 \text{ V}$.

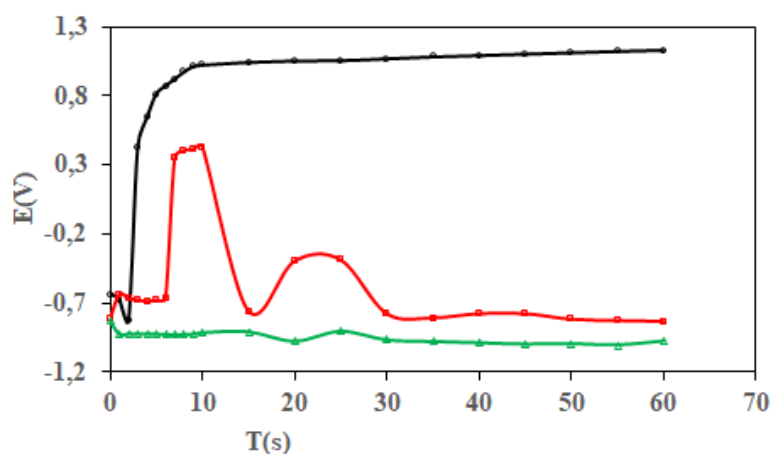


Figure V.61 : Suivi du potentiel de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant une heure sous tension imposée 1.5 V dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.

Noir) en absence du champ **rouge)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **vert)** en présence d'un champ de 47 mT.

Nous avons constaté qu'au début d'immersion les courants de corrosion des trois échantillons, sous une tension imposée de 1.5 Volt, sont différents contrairement aux potentiels de corrosion (figure V.61).

Nous avons remarqué que le courant de l'échantillon sans champ magnétique est initialement égal à $i = 78.5 \text{ mA}$, mais il diminue pendant quatre minutes jusqu'à $i = 0.18 \text{ mA}$, puis se stabilise jusqu'à la fin de l'expérience (figure V.62).

À l'inverse, le courant de l'échantillon avec un champ d'intensité (40 mT) diminue immédiatement après l'immersion, passant de 46.5 mA à 0.7 mA en dix minutes. Il augmente



ensuite à 38.5 mA à quinze minutes, diminue de nouveau à 0.6 mA à vingt-cinq minutes, puis remonte à 38.1 mA à trente minutes avant de se stabiliser pour le reste de l'expérience à une valeur de $i = 38\text{mA}$).

L'échantillon soumis à un champ magnétique d'intensité (47 mT) présente le courant le plus faible à l'immersion, avec $i = 29.7\text{ mA}$. Ce courant diminue légèrement et se stabilise ensuite jusqu'à la fin de l'expérience $i = 26\text{ mA}$.

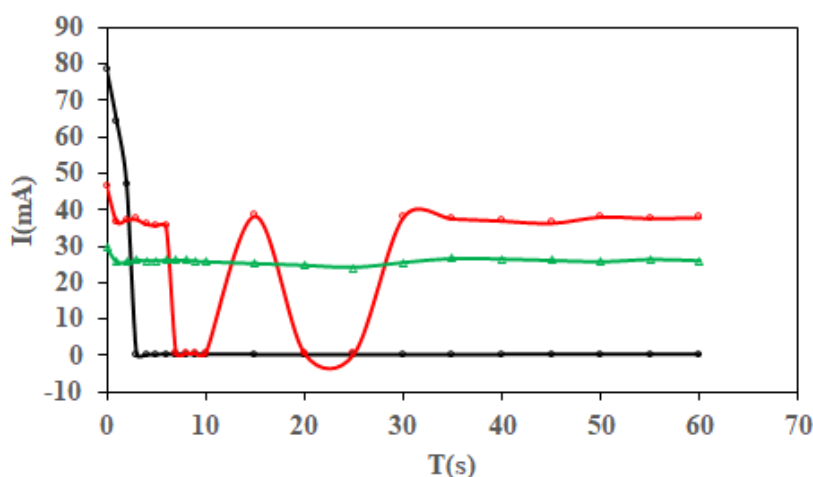


Figure V.62 : Suivi du courant de corrosion libre en fonction du temps d'immersion pendant une heure sous une tension imposée 1.5V dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.

Noir) en absence du champ **rouge)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **vert)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.3-6. Effet d'un traitement thermique sur le potentiel de corrosion libre :

La figure V.63 représente les courbes de potentiel de corrosion libre des échantillons sans et avec différents traitements thermiques (200°C et 300°C). Nous avons observé à partir des courbes, que l'échantillon non traité thermiquement et celui traité à 200°C présentent le même potentiel de corrosion tout au long de l'expérience, stable à $E = -1.62\text{ V}$. En revanche, l'échantillon traité à 300°C est le plus noble au début de l'expérience, puis, il augmente à $E = -0.01\text{ V}$ au cours des premières vingt-quatre heures, ensuite, il diminue pour se stabiliser à $E = -1.62\text{ V}$, comme les deux autres échantillons après cinq jours d'immersion.

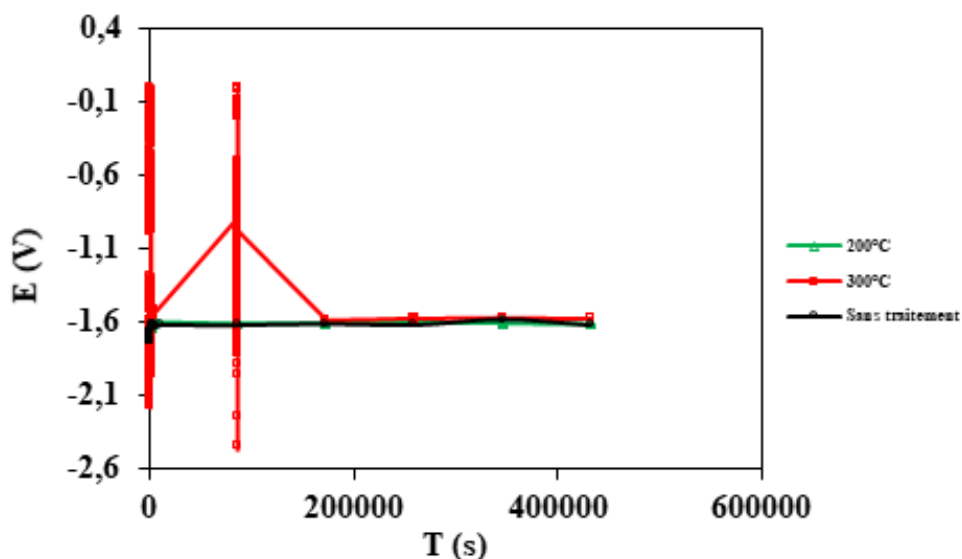


Figure V.63 : courbe de potentiel de corrosion libre après traitement thermique à 200°C et 300°C après 5 jours d'OCP dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.

V.4- Evolution de la morphologie de corrosion après immersion :

V.4-1. Morphologie de corrosion après une heure d'immersion :

La figure V.64 montre la morphologie de la corrosion du magnésium après une heure de corrosion libre (OCP) dans une solution de NaCl à 0,9 %. Les microstructures révèlent que la corrosion du magnésium est localisée.

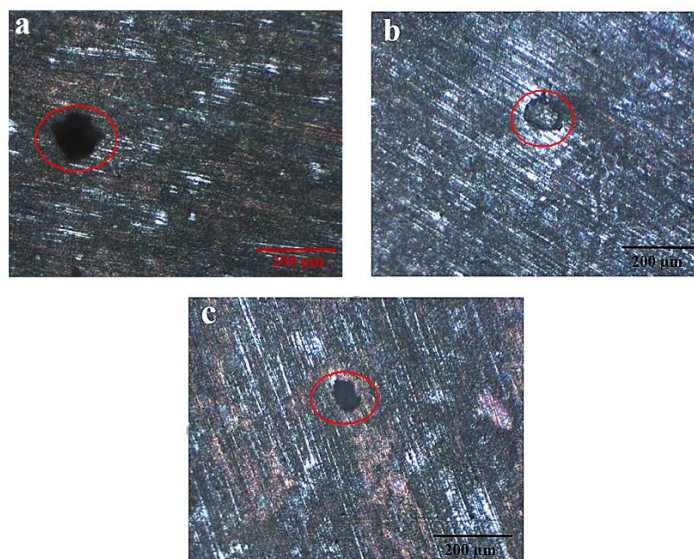


Figure V.64 : Microstructure du magnésium après une heure d'OCP,

a) en absence du champ b) en présence d'un champ d'intensité de 40 mT c) en présence d'un champ de 47 mT.



V.4-2. Morphologie de corrosion après vingt-quatre heures d'immersion :

La figure V.65 montre la morphologie de la corrosion du magnésium après vingt-quatre heures de corrosion libre (OCP) dans une solution de NaCl à 0,9 %. Nous avons observé une corrosion localisée sur la surface des trois échantillons, toutefois, cette corrosion est plus persistante sur l'échantillon avec un champ de (40 mT). De plus, nous avons noté un dépôt de NaCl sur la surface des différents échantillons.

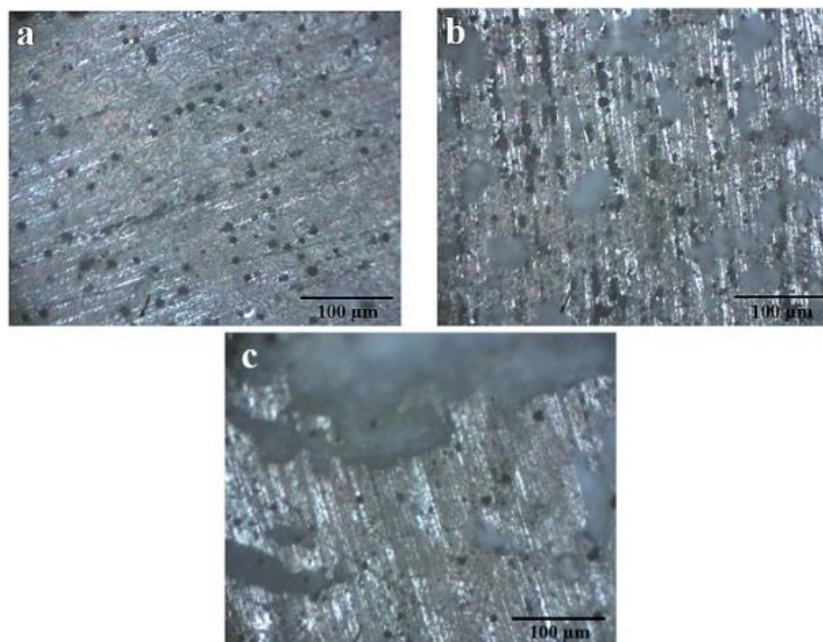


Figure V.65: Microstructure du magnésium après vingt-quatre heures d'OCP,

a) en absence du champ **b)** en présence d'un champ de 40 mT **c)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.4-3. Morphologie de corrosion après cinq jours d'immersion :

La figure V.66 montre la morphologie de la corrosion du magnésium après cinq jours de corrosion libre (OCP) dans une solution de NaCl à 0,9 %. Nous avons observé une corrosion localisée sur la surface des trois échantillons. La dimension des zones de corrosion localisées est plus importante que celles après une heure et vingt-quatre heures d'immersion. De plus, nous avons observé un dépôt de NaCl sur la surface de tous les échantillons.

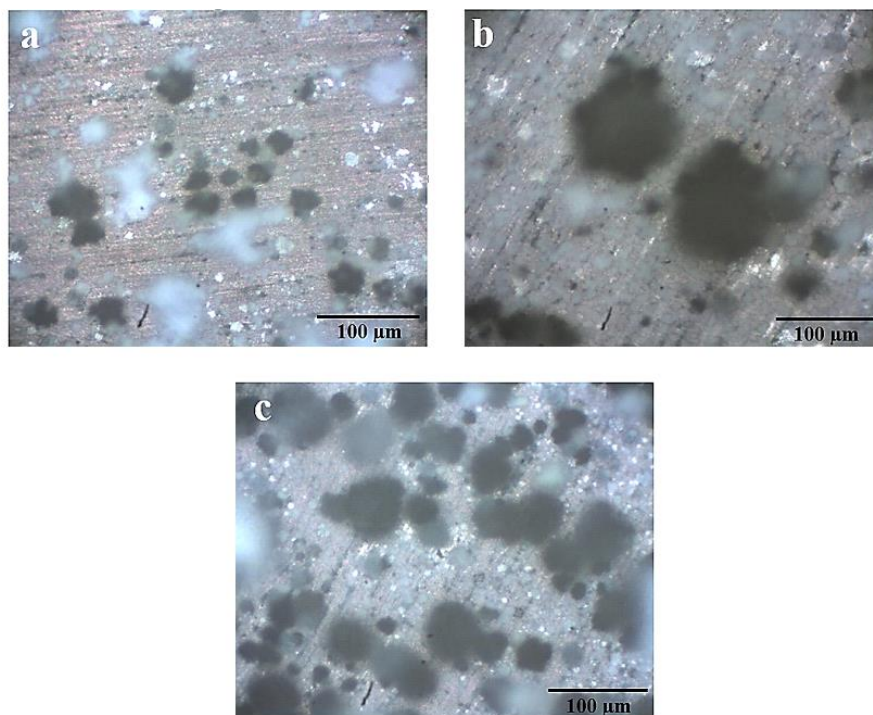


Figure V.66 : Microstructure du magnésium après cinq jours d'OCP.

- a) en absence du champ b) en presence d'un champ d'intensité de 40 mT c) en presence d'un champ de 47 mT

V.4-4. Morphologie de corrosion après dix jours d'immersion :

La figure V.67 montre la morphologie de la corrosion du magnésium après dix jours de corrosion libre (OCP) dans une solution de NaCl à 0,9 %. Ces microstructures montrent que la corrosion de magnésium après 10 jours tend vers une corrosion généralisée. De plus, nous avons observé un dépôt de NaCl sur la surface des échantillons.

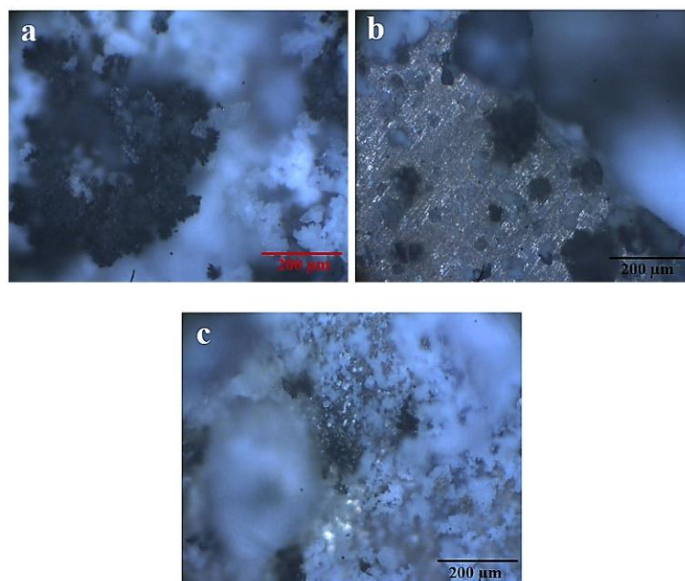


Figure V. 67 : Microstructure du magnésium après dix jours d'OCP.

- a) en absence du champ magnétique
- b) en présence du champ magnétique de 40 mT
- c) en présence du champ magnétique de 47 mT

V.4-5. Effet de la tension imposée de 1.5 V après une heure de corrosion sur le potentiel de corrosion libre :

La figure V.68 montre la microstructure du magnésium après une heure OCP sous tension imposée 1.5V qui montre une corrosion localisée distribuée uniformément sur toute la surface des trois échantillons.

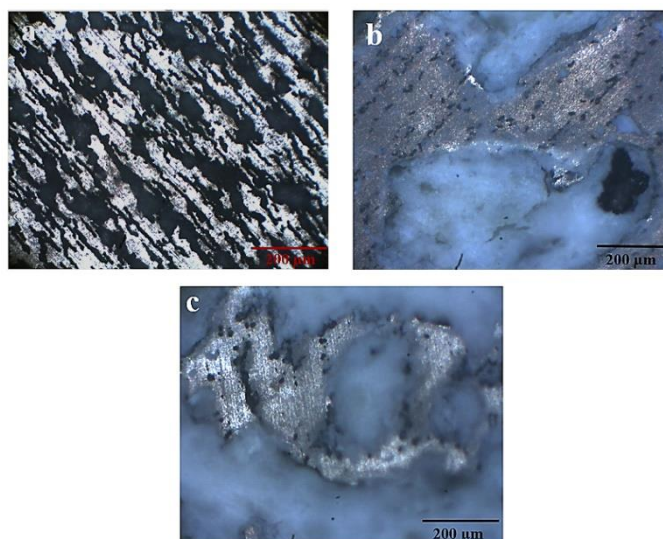


Figure V.68 : Microstructure du magnésium après une heure d'immersion sous tension imposée 1.5V dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.

- a) en absence du champ magnétique
- b) en présence d'un champ magnétique d'intensité de 40 mT
- c) en présence d'un champ magnétique d'intensité de 47mT .



4-6. Effet du traitement thermique sur la morphologie de corrosion :

La figure V.69 montre que l'échantillon ayant subi un traitement de recuit à 200°C, ce dernier s'est corrodé plus que l'échantillon ayant subi un recuit à 300°C, ce qui signifie que l'échantillon ayant subi un recuit à 300°C est plus noble.

Par conséquent, le traitement thermique à 300°C est moins sensible à la corrosion du matériau que l'échantillon recuit à 200°C.

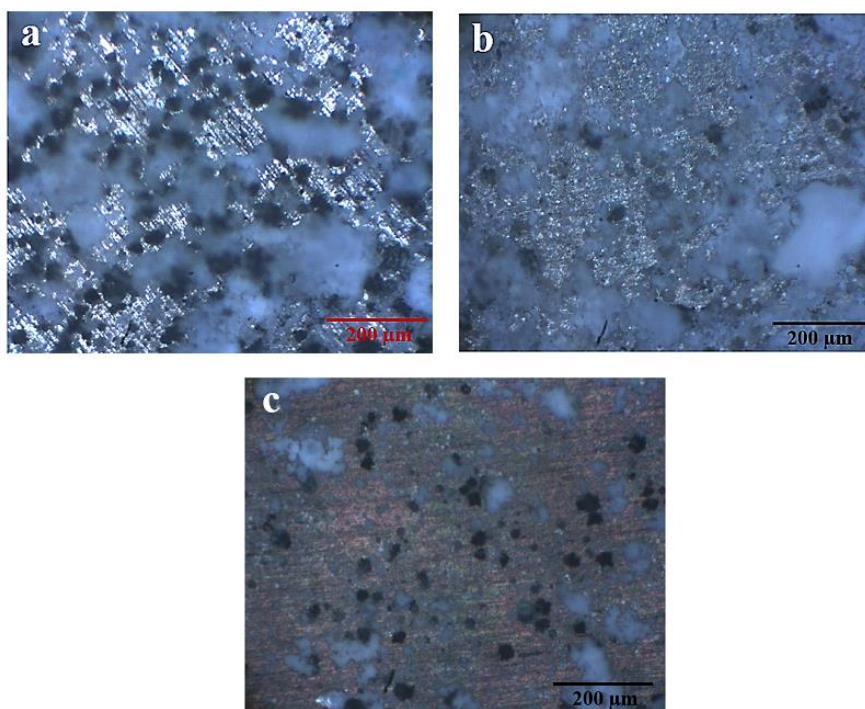


Figure V.69: Microstructure du magnésium après cinq jours OCP dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit : a) à 200°C b) à 300°C c) sans recuit.

V.5-Les courbes de polarisation :

V.5-1. Courbes de polarisation après vingt-quatre heures d'immersion :

La figure V.70 représente les résultats des courbes de polarisation du magnésium, après une heure d'immersion dans la solution de 0.9% NaCl en présence et en absence du champ magnétique : a- $i=f(E)$, b- effet loupe de $i=f(E)$, et c- $-\log(i)=f(E)$. A partir des courbes de la figure V.70 et les données du tableau V.13, nous avons constaté que le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation de l'échantillon en absence du champ magnétique est le plus élevé. Cet échantillon est le plus noble après une heure d'immersion.

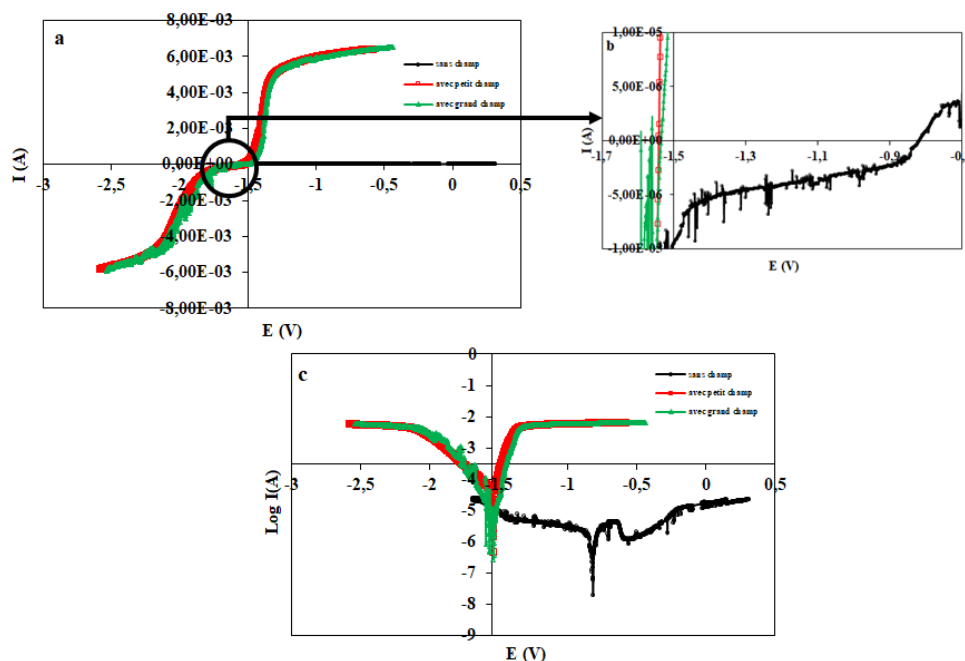


Figure V.70 : Courbe de polarisation après une heure d’immersion, a- $i=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$.

Tableau V.13 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après une heure OCP suivi d’un test de polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.

Echantillon	Temps d’immersion	Résistance de polarisation ($R_p(\Omega)$)	Potentiel de corrosion ($E_{\text{corr}}(\text{V})$)
En absence du champ magnétique	Une heure	13333	-0,8158
En présence d’un champ magnétique d’intensité de 40 mT	Une heure	330	-1,5422
En présence d’un champ magnétique d’intensité de 47 mT	Une heure	1641	-1,5355

V.5-2. Courbes de polarisation après vingt-quatre heures d’immersion :

La figure V.71 représente les courbes de polarisation du magnésium, après une heure d’immersion dans la solution de 0.9% NaCl en présence et en absence du champ magnétique. Les courbes sont étiquetées comme suit : a- $i=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$. En analysant les courbes de la figure V.71 et les données du tableau V.14, nous avons observé que le potentiel de corrosion de l’échantillon en immersion en absence du champ



magnétique est plus noble. La résistance de polarisation de l'échantillon soumis à un champ magnétique d'intensité (47mT) est la plus élevée après vingt-quatre heures d'immersion. De plus, nous avons remarqué que les trois courbes sont voisines les unes des autres.

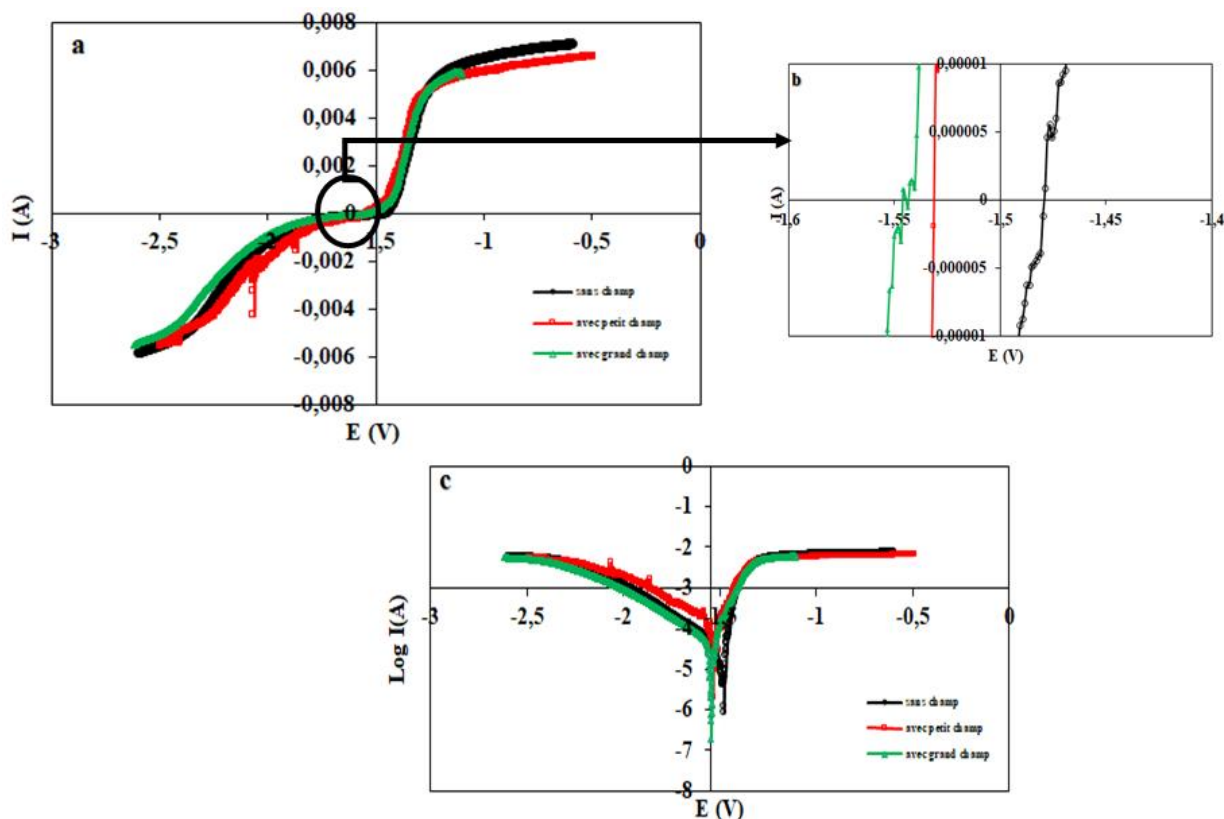


Figure V.71 : Courbe de polarisation après vingt-quatre heures d'immersion, a- $i=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$.

Tableau V.14 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après vingt-quatre heures d'immersion suivi d'un test de polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids.

Echantillon	Temps d'immersion	Résistance de polarisation ($R_p(\Omega)$)	Potentiel de corrosion ($E_{corr}(V)$)
En absence du champ magnétique	Vingt-quatre heures	513	-1,4792
En présence d'un champ magnétique d'intensité de 40 mT	Vingt-quatre heures	187	-1,5313
En présence d'un champ magnétique d'intensité de 47 mT	Vingt-quatre heures	1461	-1,5448



V.5-3. Courbes de polarisation après cinq jours d’immersion :

La figure V.72 représente les courbes de polarisation du magnésium, après cinq jours d’OCP dans la solution de 0.9% NaCl en présence et en absence du champ magnétique. Les courbes sont représentées comme suit : a- $(i)=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$.

D’après les courbes de la figure V.72 et les données du tableau V.15, nous avons constaté que le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation de l’échantillon en immersion en absence champ magnétique est le plus élevés. Par conséquent, nous pouvons affirmer que l’échantillon en absence du champ magnétique est le plus noble après cinq jours d’immersion.

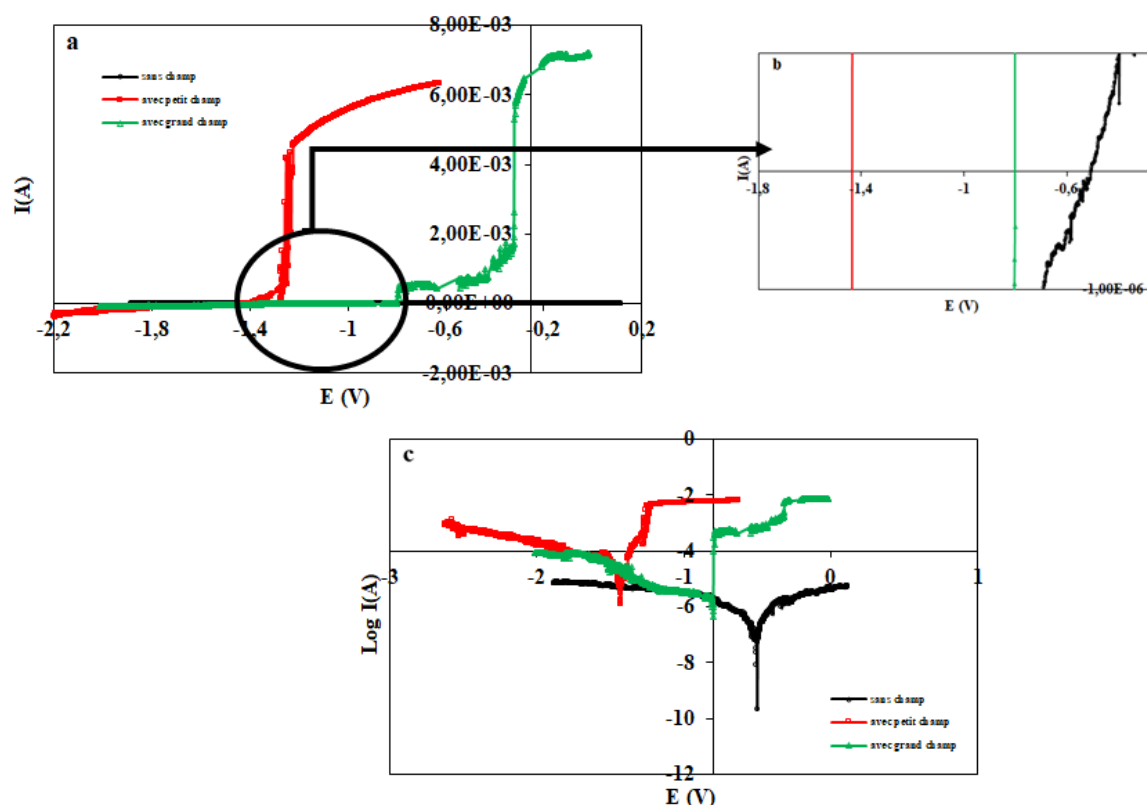


Figure V.72 : Courbe de polarisation après cinq jours d’immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids, **a-** $(i)=f(E)$, **b-** effet loupe et **c -** $\text{Log}(i)=f(E)$.

Tableau V.15 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après cinq jours d’immersion suivi d’un test de polarisation.

Echantillon	Temps d’immersion	Résistance de polarisation ($R_p(\Omega)$)	Potentiel de corrosion ($E_{corr}(V)$)
En absence du champ magnétique champ	Cinq jours	33034	-0,5024



En présence d'un champ magnétique d'intensité de 40 mT	Cinq jours	56	-1,2335
En présence d'un champ magnétique d'intensité de 47 mT	Cinq jours	23	-0,8006

V.5-4. Courbes de polarisation après cinq jours d'immersion :

La figure V.73 représente les courbes de polarisation du magnésium, après dix jours d'immersion dans la solution de 0.9% NaCl en présence et en absence du champ magnétique. Les courbes sont représentées comme suit : a- $(i)=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$. Ces courbes (figure V.73) et le tableau V.16, montrent que l'échantillon en immersion en absence du champ magnétique présente le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation les plus élevés. Tandis que celui en présence du champ magnétique de 47mT présente le moindre potentiel de corrosion.

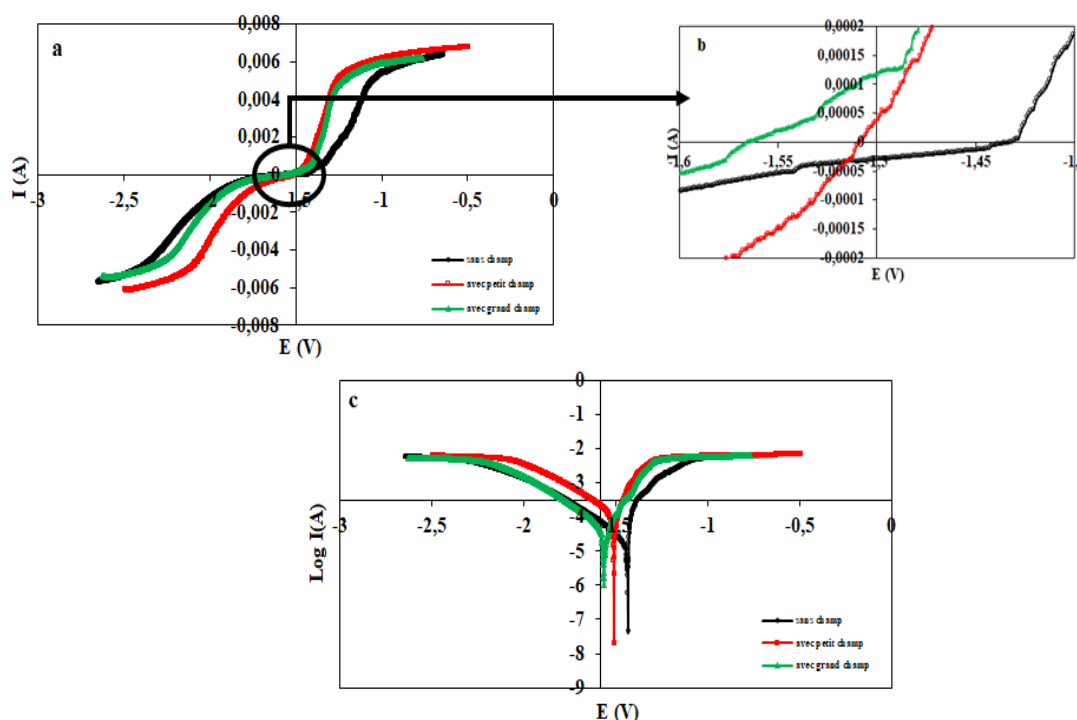


Figure V.73 : Courbe de polarisation après dix jours d'immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids, a- $(i)=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$.

Tableau V.16 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après dix jours d'immersion suivi d'un test de polarisation.



Echantillon	Temps d'immersion	Résistance de polarisation (Rp(Ω))	Potentiel de corrosion (Ecorr(V))
En absence du champ magnétique champ	Dix jours	1621	-1,4314
En présence d'un champ magnétique d'intensité de 40 mT	Dix jours	287	-1,5090
En présence d'un champ magnétique d'intensité de 47 mT	Dix jours	380	-1,5658

5-5. Courbes de polarisation après un recuit :

La figure V.74 représente les courbes de polarisation du magnésium, après cinq jours d'OCP dans la solution de 0.9% NaCl en présence et en absence du champ magnétique après un recuit à 200 et à 300°C. Les courbes sont étiquetées comme suit : a- $(i)=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$. D'après les courbes de la figure V.74 et les données du tableau V.17, nous avons constaté que le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation de l'échantillon n'ayant pas subi de recuit sont les plus élevés. Par conséquent, nous pouvons dire que l'échantillon n'ayant pas subi de recuit est le plus noble après cinq jours d'immersion.

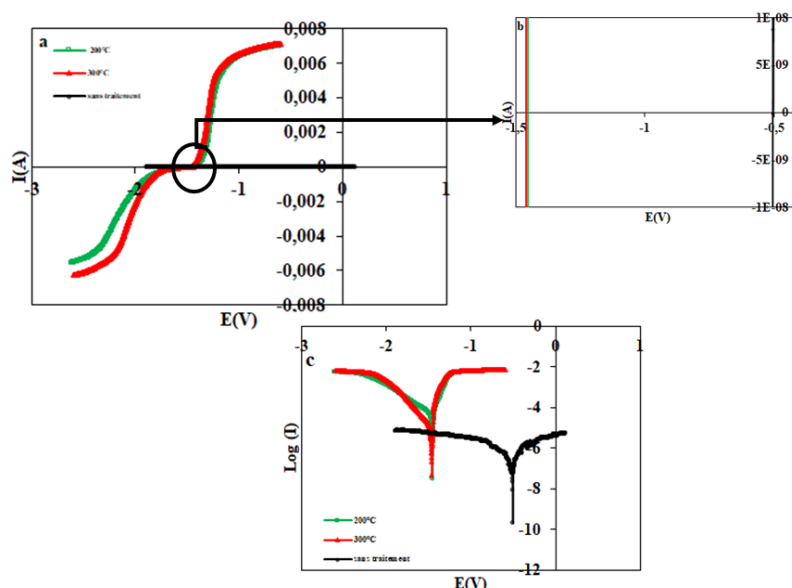


Figure V.74 : Courbe de polarisation après cinq jours d'immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit à 200 et 300°C, a- $(i)=f(E)$, b- effet loupe et c - $\text{Log}(i)=f(E)$.



Tableau V.17 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion du magnésium après cinq jours d'immersion et polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit à 200 et 300°C.

Echantillon	Temps d'immersion	Résistance de polarisation ($R_p(\Omega)$)	Potentiel de corrosion ($E_{corr}(V)$)
Sans recuit	Cinq jours	33034	-0,5024
Après recuit à 200°C	Cinq jours	4598	-1,45172
Après recuit à 300°C	Cinq jours	4086	-1,46118

V.6- Evolution de la morphologie de corrosion après polarisation :

V.6-1. Après une heure d'immersion suivi d'une polarisation :

D'après la figure V.75, nous avons remarqué qu'après une heure d'immersion il y a une présence d'une corrosion localisée sur les trois échantillons. Nous avons observé également que la corrosion sur l'échantillon en présence champ magnétique (47 mT) est moins intense que celle observée sur les deux autres échantillons. De plus, nous avons remarqué une légère.

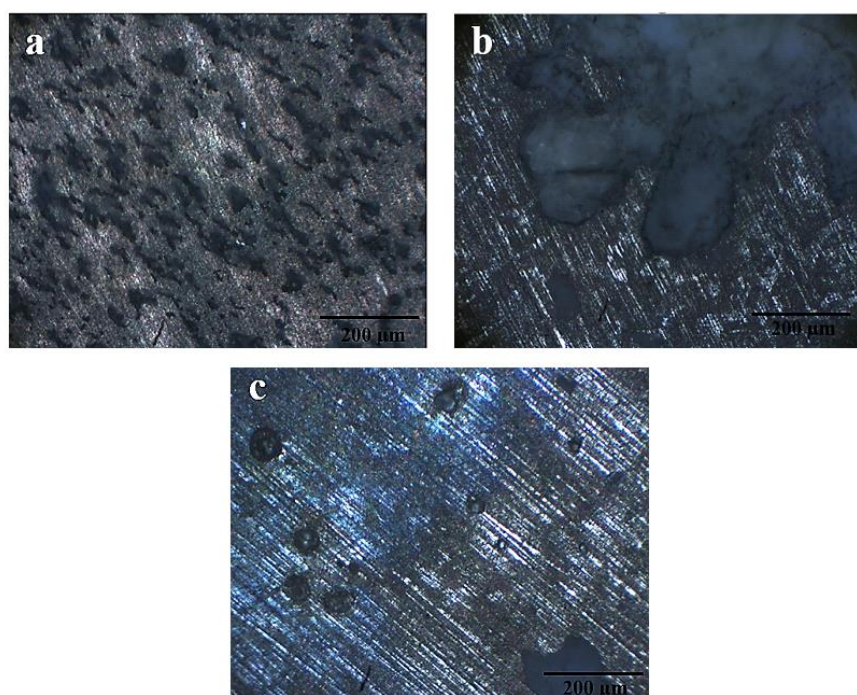


Figure V.75 : Morphologie de la corrosion du magnésium après polarisation suite à une heure d'immersion dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : **a**) en absence de champ **b**) en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **c**) en présence d'un champ de 47 mT.



V.6-2. Après vingt-quatre heures d'immersion suivi d'une polarisation :

La figure V.76 montre que, après vingt-quatre heures d'immersion suivi d'une polarisation, la surface des échantillons présente une corrosion localisée plus marquée.

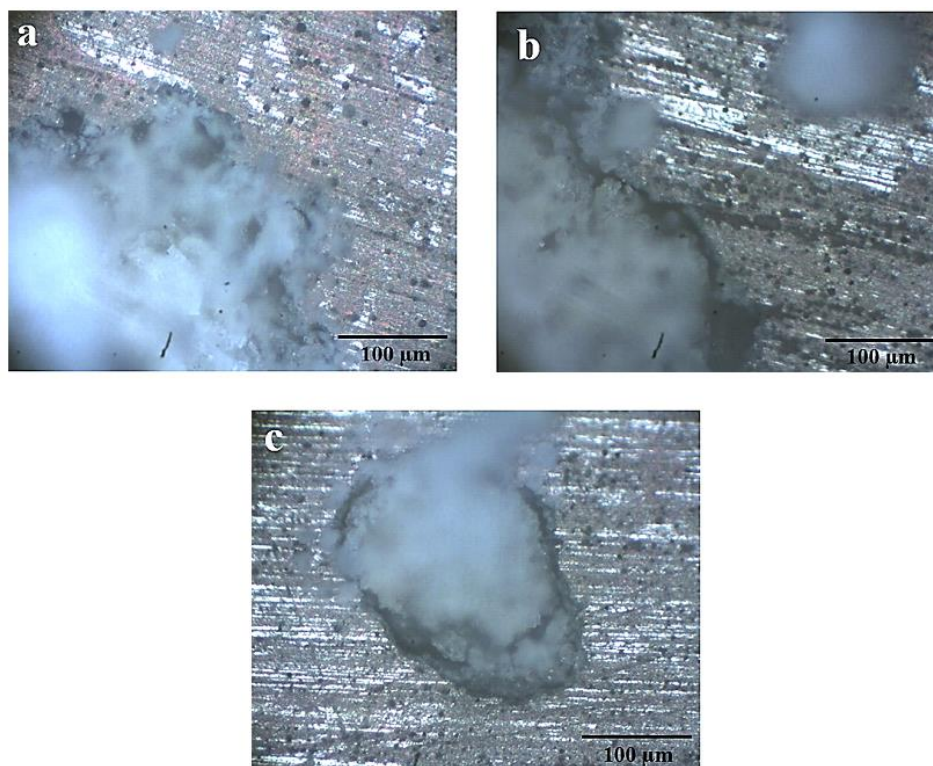


Figure V.76 : Morphologie de la corrosion du magnésium après 24 heures d'OCP et polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : **a)** en absence du champ **b)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **c)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.6-3. Après cinq jours d'immersion suivi d'une polarisation

La figure V.77 montre qu'après cinq jours d'immersion suivi d'un test de polarisation, la surface des trois échantillons présente une corrosion localisée de dimensions plus élevée sur les échantillons soumis à un champ magnétique (40 mT) et à un champ magnétique (47 mT) (figures b et c). Nous avons observé également que la corrosion sur l'échantillon avec un champ magnétique de 47 mT est plus intense (figure c).

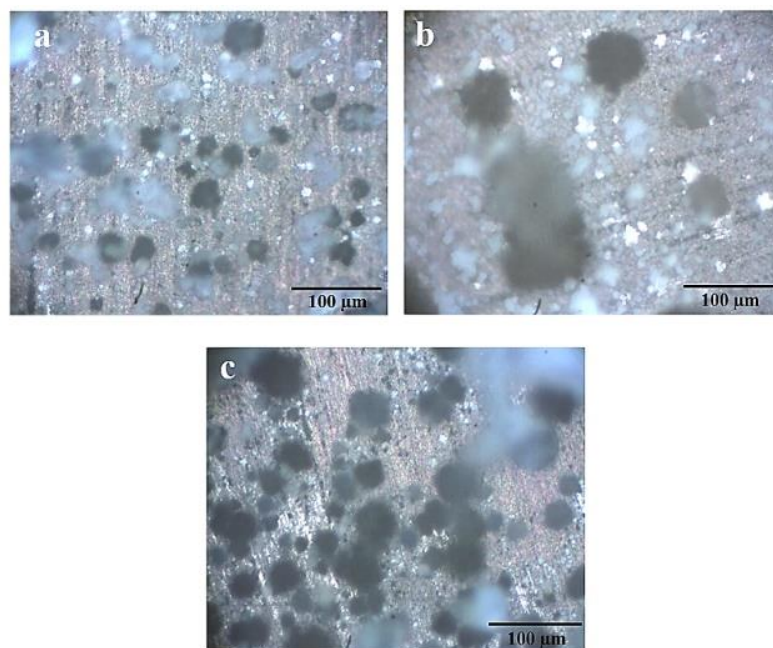


Figure V.77 : Morphologie de la corrosion du magnésium après cinq jours d'immersion suivi d'une polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : **a)** en absence du champ **b)** en présence d'un champ d'intensité de 40 mT **c)** en présence d'un champ de 47 mT.

V.6-4. Après dix jours d'immersion suivi d'une polarisation :

La figure V.78 montre qu'après dix jours d'immersion suivi d'une polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids, la surface des échantillons soumis à un champ magnétique de (40 mT) et un champ magnétique de (47 mT) (figures b et c) présente une corrosion localisée, tandis que la corrosion de l'échantillon sans champ tend vers une corrosion généralisée (figure a).

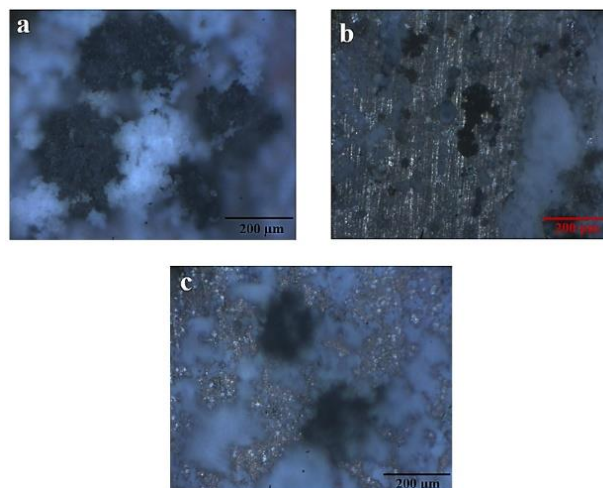


Figure V.78 : Morphologie de la corrosion du magnésium après dix jours d’immersion suivi d’une polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids : **a)** en absence du champ magnétique **b)** en présence d’un champ magnétique de 40mT **c)** en présence d’un champ magnétique de 47mT.

V.6-5. Morphologie de corrosion des échantillons recuit après cinq jours d’immersion suivi d’une polarisation :

Sur la figure V.79, nous remarquons que la corrosion de l’échantillon traité à 200°C après cinq jours OCP suivi d’une polarisation est plus significative que celle de l’échantillon traité à 300°C. Cela signifie que l’échantillon traité à 300°C est devenu plus noble.

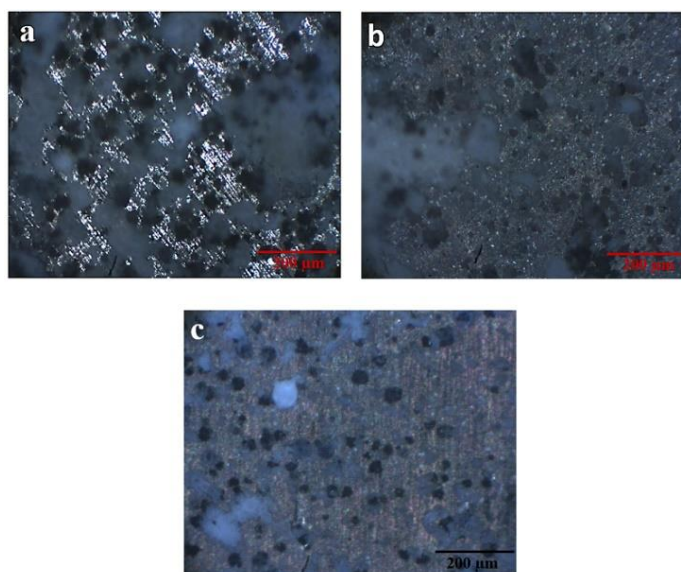


Figure V.79 : Microstructure du magnésium après cinq jours OCP et polarisation dans une solution de 0.9% de NaCl en poids après recuit : **a)** 200°C **b)** 300°C **c)** sans recuit.



V.7- Immersion pendant deux mois :

Avant l'immersion, le poids de l'échantillon était de 1,68610 g. Après deux mois d'exposition à la solution corrosive, le poids de l'échantillon était de 1,57702 g (figure V.80.a)

La variation de poids de l'échantillon peut être calculée comme suit :

$$\text{Variation de poids} = \text{Poids initial} - \text{Poids final}$$

$$\text{Variation de poids} = 1,68610 \text{ g} - 1,57702 \text{ g} = 0,10908 \text{ g}$$

La diminution de poids observée indique que l'échantillon a subi une corrosion notable.

La perte de 0,10908 g peut être utilisée pour évaluer le taux de corrosion.

$$\text{Perte en pourcentage} = \frac{\text{Variation de poids}}{\text{Poids initial}} \times 100$$

$$\text{Perte en pourcentage} = \frac{0,10908 \text{ g}}{1,68610 \text{ g}} \times 100 = 6,47\%$$

Ainsi, l'échantillon a perdu environ 6,47% de son poids initial au cours de deux mois d'immersion.

En plus de la perte de poids, des signes visuels de corrosion sont observés sur l'échantillon, comme l'illustre la figure V.80.b. Les zones affectées montrent des dégradations et des altérations superficielles qui confirment l'effet corrosif de la solution saline.



a)



b)

Figure V.80 : Résultat de l'immersion de 02 mois dans la solution de 0.9%NaCl.



Conclusion générale



Conclusion générale

Cette étude de la corrosion du magnésium en présence d'un champ magnétique perpendiculaire à la surface, recuit ou non a montré que :

- 1- La présence du champ magnétique de faible intensité modifie le potentiel de corrosion libre au cours des premières heures de corrosion, par la suite le potentiel de corrosion se stabilise à la même valeur que l'échantillon en immersion en absence du champ.
- 2- La tension imposée modifie les courbes de corrosion libre.
- 3- Le recuit et la présence du champ magnétique de faible intensité diminue la résistance de polarisation et diminue le potentiel de corrosion.
- 4- L'immersion du magnésium dans une solution de 0.9% NaCl en masse induit une corrosion localisée.
- 5- Dix jours de corrosion dans la solution de 0.9% NaCl en masse suivi d'une polarisation dans la solution de 0.9% NaCl en masse en présence d'un champ magnétique de faible intensité perpendiculaire induit une corrosion localisée, mais en absence de ce champ, induit une corrosion généralisée. Par contre après cinq jours de corrosion suivi d'une polarisation dans la même solution en présence et en absence du champ on observe la corrosion par pique.
- 6- Le magnésium recuit à 300°C est moins sensible dans la solution de 0.9% NaCl en masse à la corrosion que le magnésium recuit à 200°C après cinq jours d'immersion suivi d'une polarisation.
- 7- Deux mois d'immersion dans une solution de 0.9% NaCl en masse permis une perte de masse de 6,47% en poids de magnésium.