

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DE 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 Construction mécanique

Comportement à la corrosion de l'acier inoxydable AISI 316

Présenté par :

CHIBA Salim

Encadreur :

Pr ZAZI Nacer

Co-encadreur :

Mlle BEN ABDESSELAM Djedjiga

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2021/2022

REMERCIEMENT :

Je tiens tout d'abord à remercier le bon dieu de m'avoir accordé la capacité et la volonté d'accomplir mes études et de réaliser tous mes projets.

Je remercie le professeur **ZAZI Nacer** qui a dirigé et qui a participé activement à mon encadrement tout au long de ce travail et qui m'a orienté pour atteindre au mieux mes objectifs tracés, ainsi que la doctorante et Co-promotrice **BEN ABDESSELAM Djedjiga** pour m'avoir soutenue et encouragée tout au long de la réalisation de mes expériences et de m'avoir orienté du mieux qu'elle pouvait.

Je remercie aussi tous les ingénieurs du laboratoire SDM de m'avoir aidé à réaliser toutes mes expériences.

Dédicaces

Je tiens à dédier, en signe de reconnaissance et de respect, ce travail modeste :

A mes très chers parents, qui m'ont toujours soutenue dans toutes les situations, qui m'ont toujours offert ce qui y'a de mieux pour moi, qui ont sacrifié beaucoup de chose pour ma réussite.

A ma très chère grande sœur, qui est toujours derrière moi pour m'épauler, toujours là pour me montrer le droit chemin, et qui n'a jamais cessé de croire en moi

A ma deuxième famille qui est mes chères ami(e)s, qui sans eux je n'aurais pas accompli tant de choses, aux familles : Djouder, Mesli, Ouazar, Benakli, Berkani, Belkadi, Hamour, Sokri, Yennek.

Table des matières

I.	Introduction :	6
II.	CHAPITRE 1 : Acier inoxydable.....	8
	I.1. Introduction:.....	8
	I.2. Acier :.....	8
	I.3. Acier inoxydable :.....	8
	I.4. Composition de l'acier inoxydable :.....	8
	I.5. System fer-chrome:.....	9
	I.5.1 Influence des éléments d'alliage :.....	9
	I.6. Eléments alpha gène et Gama gène :.....	10
	I.6.1. Les éléments alpha gène sont :.....	10
	I.6.2. Les éléments gamma gènes sont :.....	11
	I.7. Classification des aciers inoxydables :.....	14
	I.7.1. Familles des inox :.....	14
	I.7.2. Normes de classification :.....	15
	I.8. Phénomène de passivation :.....	16
	I.8.1. Film passif :.....	17
	I.9. Passivation de l'acier inoxydable :.....	17
	I.10. Influence du pourcentage du chrome dans les inox :.....	17
	I.11. Domaine d'utilisation :.....	17
	I.12. Choix de la nuance d'inox :.....	18
	I.13. Le amagnétisme :.....	19
III.	Chapitre 2 : la corrosion :.....	20
	II.1. La corrosion des métaux :.....	20
	II.2. Processus de corrosion dans un milieu aqueux :.....	20
	II.3. Corrosion des aciers inoxydable :.....	20
	II.4. Types de corrosion :.....	21
	II.4.1. Corrosion chimique :.....	21
	II.4.2. Corrosion biochimique :.....	22
	II.4.3. Corrosion électrochimique :.....	22
	II.5. Aspect morphologique de la corrosion :.....	22
	II.5.1. Corrosion localisée :.....	22
	II.5.2. Corrosion généralisée.....	26
	II.6. Facteur favorisant la corrosion :.....	26
	II.6.1. Le substrat.....	26

II.6.2. La température	27
II.6.3. Le PH.....	27
II.6.4. Le milieu corrosif	27
II.6.4.1. Influence de certains milieux :.....	28
II.6.5. L'agitation du milieu corrosif.....	29
II.6.6. Influence du champ magnétique :.....	29
II.7. Protection :.....	29
II.7.1. Protection cathodique :	30
II.7.2. Protection par courant imposé.....	30
II.7.3. Protection par anode sacrificielle.....	30
II.7.4. Protection anodique :	30
II.7.5. Protection par revêtement :.....	30
II.7.6. Protection par la forme des pièces :.....	31
II.7.7. Protection d'inhibiteur :.....	31
IV. Chapitre 3	32
III. procédure expérimentale :.....	32
III.1. Composition chimique :	32
III.2. Diffraction des rayons X :.....	32
III.3. Essai de dureté :.....	33
III.4. Procédure expérimentale :.....	36
III.4.1. Réalisation des échantillons :	36
III.4.2. Préparation de la solution pour les tests de corrosion :.....	41
III.5.1. Montage expérimental utilisé pour les essais :.....	41
III.5.2. Méthode de détermination du potentiel de piqûre :.....	43
III.6.1. Observations micrographiques :.....	43
V. Chapitre IV : résultats et discussion	45
VI. Conclusion :.....	71

Table des figures :

- 1I.1 Diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome, d'après BAIN ET ABORN 9
- 2I.2 Vue détaillée de la boucle gamma 9
- 3I.3 Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel pour des teneurs croissantes en nickel.
Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ 10
- 4I.4. Influence de la teneur en éléments d'addition sur la résistance mécanique 12
- 5I.5 diagramme de Pryce et Andrew [3] 13
- 6I.6. diagramme de Schaeffler[3] 13
- 7I.7 exemples de système de numérotation des aciers inoxydables selon les pays [8] 16
- 8I.8 quelques caractéristiques des familles de l'inox [5] 19
- 9II.1. comparaison entre l'acier et l'acier inoxydable au contact de l'humidité 21
- 10II.1. corrosion galvanique d'un acier inoxydable 23
- 11II.2. corrosion par piqure d'un acier inoxydable 23
- 12II.3. mécanisme de corrosion cavernueuse d'un acier inoxydable 24
- 13II.4. mécanisme de corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable 24
- 14II.5 corrosion intergranulaire d'un acier inoxydable 25
- 15II.6. représentation des différents types de revêtement 31
- 16II.7 classifications des inhibiteurs 31
- 17Figure.III.1 Diffractomètre D2 PHASER(BRUKER) 33
- 18Figure. III.2 : Présentation schématique du pénétrateur Vickers et de la forme d'une empreinte. 34
- 19Figure III.5 : Machine de mesure de la micro dureté modèle SHIMADZU. 36
- 20Figure III.6 : Machine de découpage une guillotine (BAYKAL, MGH3110). 36
- 21Figure III.7 : Échantillons d'acier inoxydable 316 avant enrobage 37
- 22Figure III.8: Échantillons d'acier inoxydable 316 après enrobage à la résine dentaire et démoulage. 37
- 23Figure III.9 : appareil de mesure de l'intensité du champ magnétique. TESLAMETER (PHYWE) 38
- 24Figure III.10 : Polisseuse STRUERS 39
- 25Figure III.11 : Évolution de l'état de surface des échantillons d'acier inoxydable 316 avec le polissage 40
- 26Figure III.12 : Balance électronique type Pionner. 41
- 27Figure III.13 : Potentiostat/galvanostat modèle AUTOLAB 42
- 28Figure III.14 : Cellule électrochimique réalisée à trois électrodes 42
- 29Figure III.14 : Schéma de principe d'un potentiostat [32] 43
- 30Figure III.16 : Dispositif réalisé pour la mesure d'une courbe de polarisation potentiostatique. 43
- 31Figure III.17 : Microscope optique de type « HUND WETZLAR ». 44
- 32Figure III.18 Échantillon d'acier INOXYDABLE«316 durant le traitement chimique 44

I. Introduction :

La corrosion est un phénomène naturel qui ronger et attaquer les matériaux. Ce phénomène cause une dégradation préjudice des métaux sous l'effet d'agent atmosphérique ou bien d'attaque chimique.

La corrosion des métaux entraîne de nombreuses catastrophes et problèmes dans les installations industrielles, tels que la détérioration des pièces métalliques, des conduites et des réservoirs pouvant entraîner des incendies, des explosions ou des pannes des installations. Son impact sur l'économie n'est pas d'autant négligeable, chaque année des millions de tonnes d'acier est détruite. C'est pour cela que la protection contre la corrosion est devenue une priorité.

La dégradation environnementale des matériau et l'apparition de corrosion est inévitable, mais d'une manière ou d'une autre elle peut être réduites, ce qui va engendré non seulement la réduction des couts mais aussi pour avoir un environnement plus stable et plus sécuriser.

Les matériaux métalliques utilisés dans le milieu naturel sont d'autant concernés par ces phénomènes de corrosion, qui peuvent affecter leur comportement et entraîner des modifications de leurs caractéristiques d'usage. Les améliorations de la microstructure, du traitement de surface et de la sélection des matériaux ont contribué à des progrès significatifs dans la résistance à la corrosion des métaux et de leurs alliages, augmentant ainsi leurs durabilités.

La corrosion des matériaux biologiques est critique, car ils sont nécessaires au bien-être humain, les matériaux utilisés pour les implants sont de divers matériaux métalliques, tels que l'acier inoxydable. Le comportement à la corrosion de ces implants est lié au film mince d'oxydes former à sa surface. Et c'est pour cela que la durée de vie de ces implants avant qu'ils ne deviennent un danger pour le patient, doit être minutieusement déterminée.

Sans doute les aciers inoxydables ont fait leurs preuves dans l'industrie et dans ces milieux agressifs, du fait qu'ils sont dotés d'une très grande résistance à la corrosion a l'aire libre, notamment grâce à la formation d'une couche de passivation sur leurs surfaces qui se régénère, les protégeant ainsi des attaques extérieures. Mais une fois cette fine couche est détériorée l'acier inoxydable devient sensible à certaines formes de corrosion.

Le but de ce travail est d'évaluer et de caractériser le phénomène de la corrosion des aciers inoxydables nuance 316 que nous proposons comme matériaux pour l'élaboration des implants, dans un milieu corrosif (NaCl), toute en ajoutant du glucose dans le milieu corrosif, avec et sans la présence d'un champ magnétique permanent de faible intensité, et ainsi observer la morphologie de la corrosion à la température corporelle.

Cette étude a été effectuée afin de mieux comprendre et de caractériser le comportement à la corrosion d'un acier inoxydable de nuance 316 dans un milieu assimilant le corps humain, et de savoir si avec un traitement chimique on peut augmenter la résistance de cet acier inoxydable à la corrosion.

Notre étude comprend quatre chapitres répartis comme ceci :

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur les aciers inoxydables, leurs caractéristiques, les nuances ainsi que leur structure.

Chapitre 2 : La corrosion, comment se forme-t-elle, sous quelles conditions se forme la corrosion des aciers inoxydables et quels sont les différents types de corrosion.

Chapitre 3 : Nous décrivons toutes les étapes effectuées au cours de l'élaboration de nos tests d'essai sur la corrosion des aciers inoxydables.

Chapitre 4 : On se consacrera à l'interprétation des résultats des essais effectués en laboratoire.

À la fin de ce travail on conclura grâce au résultat obtenu.

II. CHAPITRE 1 : Acier inoxydable

I.1. Introduction :

Durant le dix-neuvième siècle, nombreux sont les chercheurs qui travaillaient sur les aciers, parmi ces métallurgistes il y'avait l'allemand Hans Goldschmidt, breveteur de la thermitite en 1890 qui permettait d'obtenir du fer sans carbone.[1]

Entre 1904 et 1911 différents alliages ont été mis au point que l'on pourra maintenant qualifier d'acier inoxydable.

En 1911 c'est à l'allemand Philip Monnartz de mettre en évidence l'influence du taux de chrome sur leurs résistances à la corrosion.

C'est jusqu'en 1913 que ces aciers résistants à la corrosion soient officiellement appelés acier inoxydable après que Harry Brearley développa un acier appelé « Rustless » c'est-à-dire sans rouille. [1]

I.2. Acier :

C'est un alliage métallique constitué de fer en majorité et d'une quantité de carbone allant de 0.02 % à 2% en masse, ce dernier lui procure ses caractéristiques spécifiques dont il dispose.

L'acier étant employé dans presque tous les domaines, il est confronté à plusieurs sollicitations mécaniques ou chimiques soit elle, et pour remédier à ces sollicitations l'ajout d'additifs est nécessaire.

I.3. Acier inoxydable :

Couramment appelé inox, est un alliage d'acier qui contient un pourcentage de chrome qui lui procure la caractéristique de la résistance à la corrosion et la dégradation.

De nos jours on le retrouve partout et dans tous les domaines (industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transport, médecine...).

Son utilisation ne cesse d'augmenter, selon un rapport publié par « Grand View Research », le marché de l'acier inoxydable pourrait peser 127,19 milliards de dollars, soit 113,41 milliards d'euros d'ici 2024.[2]

La production mondiale d'acier inoxydable brut a augmenté de 4,8%, atteignant 52,43 millions de tonnes en 2018, la production devenant de plus en plus dominée par l'Asie avec sa part de la production mondiale d'environ 80%. [2]

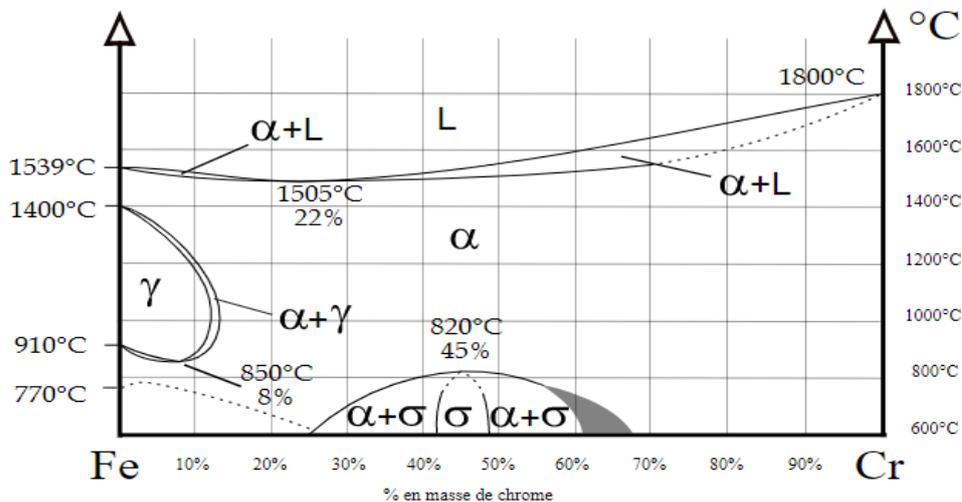
I.4. Composition de l'acier inoxydable :

Étant un alliage d'acier, composé essentiellement de fer (majoritairement) et de carbone à faible pourcentage (il ne dépasse pas 1.2 %), et de minimum 10.5% de chrome.

C'est en effet le chrome qui est principalement responsable à la création d'une couche protectrice d'oxyde de chrome appelée couche de passivation, c'est cette couche qui lui procure son caractère d'inoxidabilité.

Afin d'améliorer certaines caractéristiques, on ajoute certains composants, on peut citer certains des plus importants comme : Le nickel, Le molybdène ou le titane, Le vanadium et le tungstène, Le manganèse, Le silicium, l'aluminium, le tantale.

I.5. System fer-chrome :



11.1 Diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome, d'après BAIN ET ABORN

Le fer pur possède trois formes allotropiques en fonction de la température :

- Jusqu'à 910 °C (point A3) : forme alpha (α), ferrite (cubique centré)
- De 910 à 1400 °C (point A4) : forme gamma (γ), austénite (cubique à face centré)
- De 1400 à 1538 °C : forme delta (δ), ferrite (cubique centré) [3]

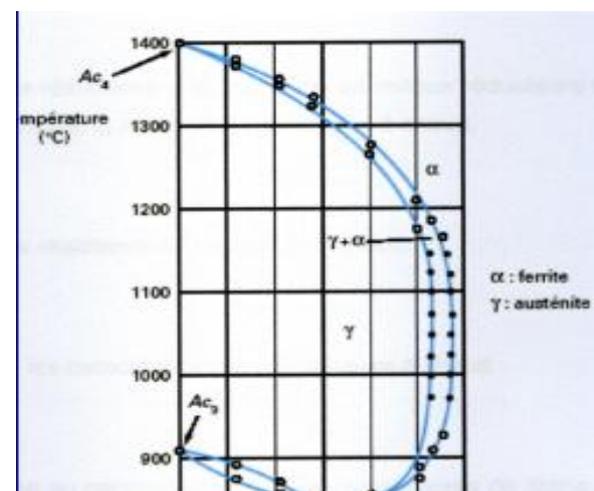
I.5.1 Influence des éléments d'alliage :

- Influence du chrome :

- Le chrome CFC élargit la phase alpha : c'est un élément alpha gène.
- % Cr < 13% possibilité d'être totalement ou partiellement austénisé à partir de 850 °C.
- %Cr > 13% alliage ferritique (possibilité d'une phase sigma à moins de 820 °C).

Le %Cr > 13%

- Alliage ferrite à toutes températures
- Ne peuvent pas subir de trempe



Martensitique.

- Phase sigma : phase intermédiaire dure
Et fragile

Le % Cr < 13%

- Pour % Cr < 10,5% on passe de α à γ au

Chauffage et au refroidissement

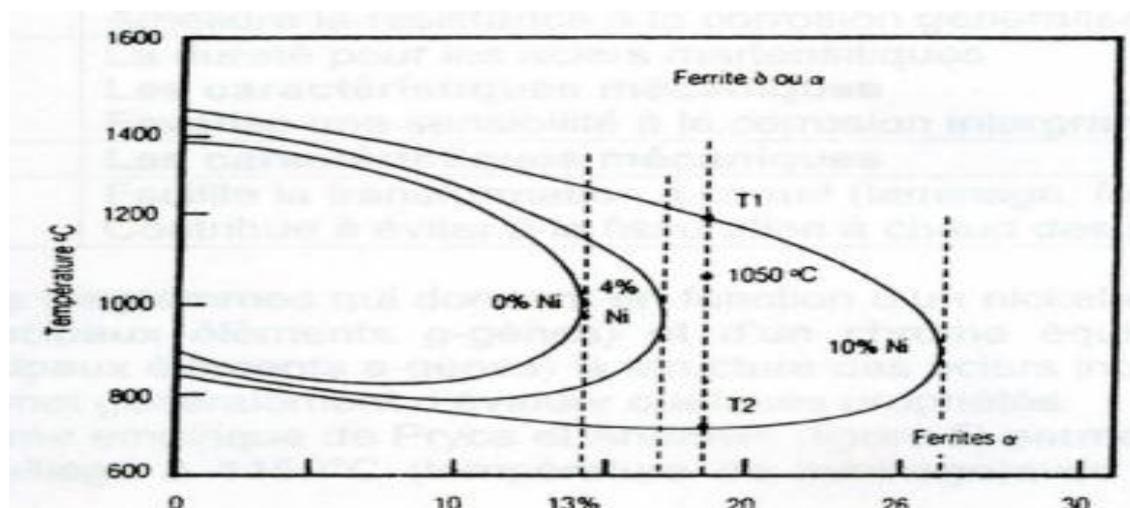
- Pour % 10,5 % < Cr < 11,5% on a coexistence
De $\alpha + \gamma$ à partir de 850 °C.
- Pour % Cr > 11,5 % on reste dans γ avec
Échauffement à partir de 910 °C.

- **Influence du nickel :**
(Système fer-chrome-nickel)

Le nickel est gamma gène

Il élargit, en teneur et en température le domaine austénitique.

L'addition de nickel augmente la taille de la boucle gamma.



3I.3 Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel pour des teneurs croissantes en nickel.
Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ

I.6. Eléments alpha gène et Gama gène :

I.6.1. Les éléments alpha gène sont :

- le chrome : Une teneur minimale d'environ 10,5 % est nécessaire pour former un film passif de chrome qui soit stable, suffisant pour protéger l'acier contre une

corrosion atmosphérique modérée. La résistance à la corrosion augmente avec la teneur en chrome.

- le molybdène et le titane : améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres qu'ambiante.

- le silicium : joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides fortement oxydant.

- le niobium : a un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

- le vanadium et le tungstène : éléments à haut point de fusion, accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme.

I.6.2. Les éléments gamma gènes sont :

- le nickel : améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier.

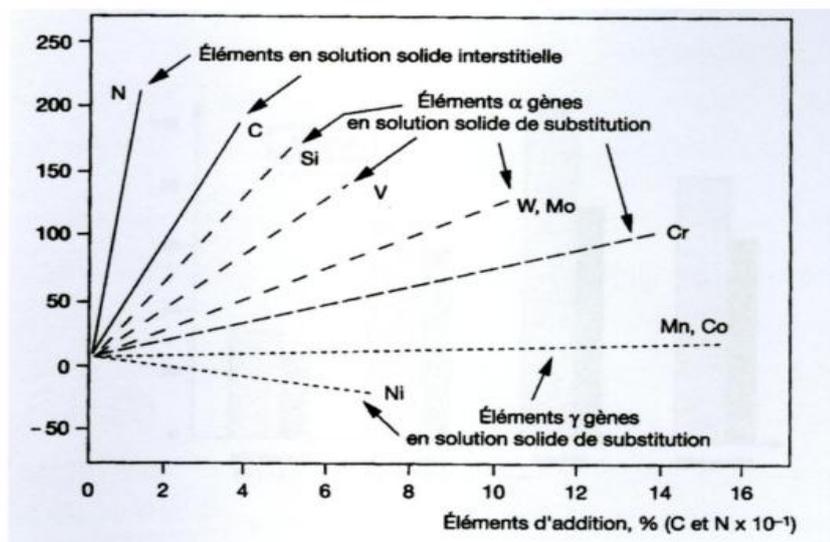
- le carbone : La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures.

- l'azote : La présence d'azote en forte teneur dans la matrice austénitique augmente les caractéristiques mécaniques. [4]

- le cobalt : il procure à l'acier inoxydable une très forte résistance à la cavitation érosive de forte intensité.

- le manganèse : est un substitut du nickel, pour faire face au coût élevé du nickel, dans des pays asiatiques tels que l'Inde et la Chine, des nuances d'acier ont été développées en remplaçant, en partie, le nickel par le manganèse, avec une présence d'azote et parfois de cuivre.

Résistance
Mécanique
Mpa



4I.4. Influence de la teneur en éléments d'addition sur la résistance mécanique

Afin de prévoir le comportement de l'alliage en fonction de la composition globale de ce dernier, plusieurs modèles ont été mis au point. Les teneurs sont affectées de coefficients établis par expérience afin de tenir compte du poids de chacun des éléments.

On en compte deux modèles :

- Le modèle de Pryce et Andrew :

Pour les produits laminés, Il donne ces deux équations : [3]

$$\text{Chrome équivalent} : (\text{Cr})_{\text{eq}} = (\% \text{Cr}) + 3(\% \text{Si}) + (\% \text{Mo})$$

$$\text{Nickel équivalent} : (\text{Ni})_{\text{eq}} = (\% \text{Ni}) + 0.5(\% \text{Mn}) + 21(\% \text{C}) + 11,5(\% \text{N})$$

On remarquera le poids important du carbone et de l'azote.

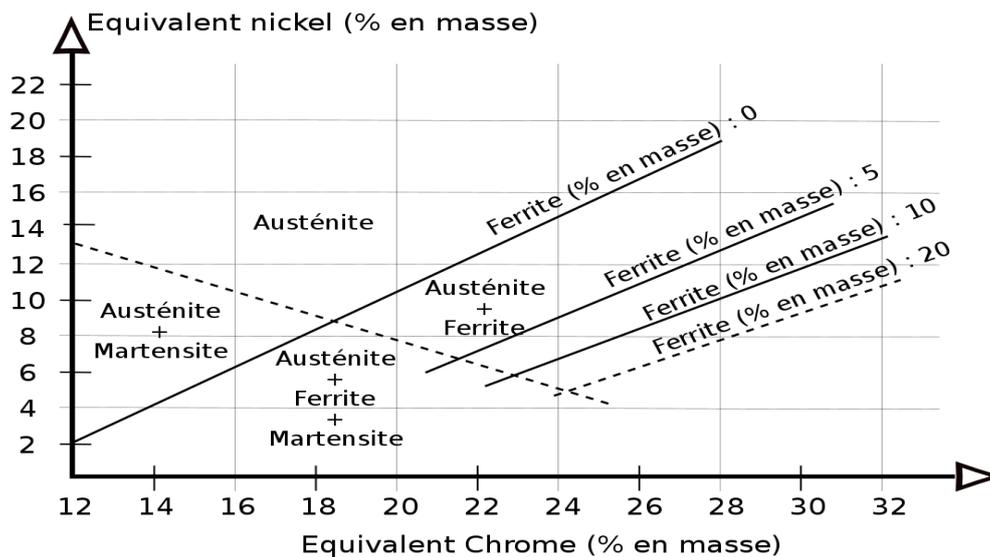


Diagramme de Pryce et Andrew

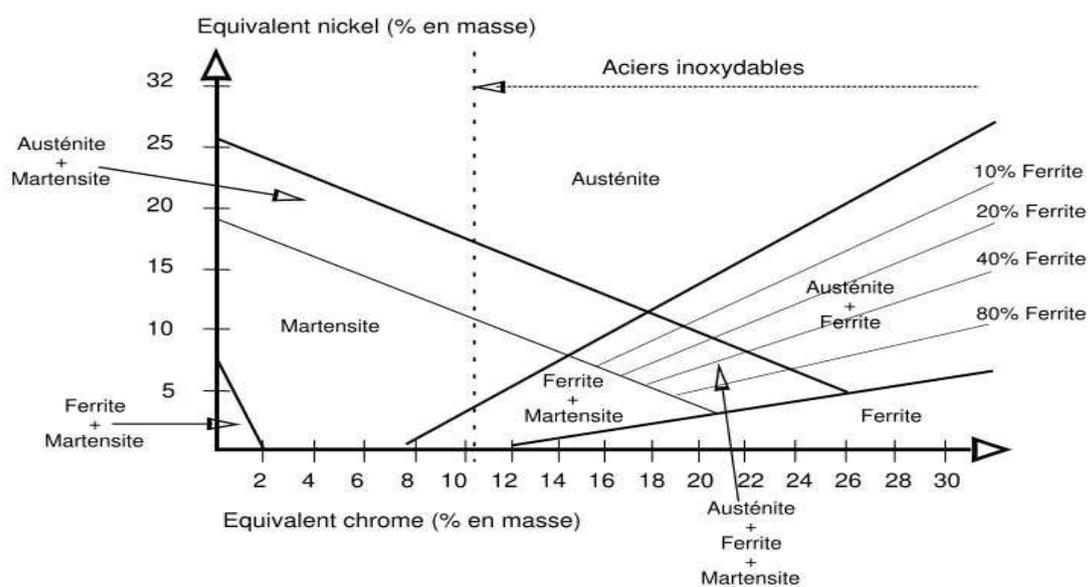
5I.5 diagramme de Pryce et Andrew [3]

- Le modèle de Schaeffler :

Pour les aciers inoxydables à l'état brut de soudage. [3]

Chrome équivalent : $(Cr)_{eq} = (\%Cr) + 1,5(\%Si) + (\%Mo) + 0,5(\%Nb)$

Nickel équivalent : $(Ni)_{eq} = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 30(\%C)$



6I.6. Diagramme de Schaeffler [3]

I.7. Classification des aciers inoxydables :

Il existe un grand nombre d'acier inoxydable, se différenciant ainsi par leurs microstructures complexe, ils peuvent être classer en plusieurs familles, avec différentes nuances classer selon des normes spécifiques

I.7.1. Familles des inox :

- Aciers ferritiques :

Ces aciers sont essentiellement des alliages de chrome dans une fourchette de 10,5% à 30%, mais à très faible teneur en carbone, ce qui les rend économiques et avec des propriétés de résistance à la corrosion et une bonne dureté. [5]

Contrairement aux austénitiques, ils sont magnétiques. Certains degrés peuvent contenir du molybdène, du silicium, de l'aluminium, du titane et du niobium qui leur confèrent des caractéristiques différentes.

- Aciers austénitiques

Il a une teneur en nickel de plus de 7%, entre 16 et 28% de chrome, et une très faible teneur en carbone, ce qui les rend très résistants à la corrosion, ils ont une bonne malléabilité et soudabilité et excellentes propriétés mécaniques. [5]

- Aciers martensitiques :

Il a une teneur en carbone élevée ou faible, 12% de chrome et est construit autour du fer 410.

Sa structure de martensite quadratique centrée sur le corps, le rend durcissable par traitement thermique (par refroidissement), lui apporte de la dureté et de la résistance.

Il est principalement utilisé dans l'équipement médicale.

La martensite non trempé est de faible dureté. [5]

- Aciers austéno-ferritiques : (duplex)

Il a une teneur élevée en chrome (19–32%) et en molybdène (jusqu'à 5%) et une teneur en nickel inférieure à celle des aciers inoxydables austénitiques, ce qui le rend deux fois plus résistant.

Sa microstructure mixte offre une résistance améliorée à la fissuration par corrosion sous contrainte de chlorure par rapport aux aciers inoxydables austénitiques types 304 et 316, c'est en partie ce qui le rend plus cher. [5]

- Aciers inoxydables à durcissement structural :

Ils ont du chrome et du nickel, qui offrent une combinaison optimale des propriétés des aciers inoxydables martensitiques et austénitiques.

Avec les premiers, ils partagent leur capacité à obtenir une résistance élevée grâce au traitement thermique, et les seconds ont une grande résistance à la corrosion.

Ceci est réalisé après l'addition d'un ou plusieurs des éléments de cuivre, aluminium, titane, niobium et molybdène à une matrice martensitique ou austénitique soumise à un processus de traitement thermique qui conduit à son durcissement. [5]

I.7.2. Normes de classification :

La plupart des pays industrialisés ont développé leurs propres systèmes de norme, comme l'Allemagne (DIN), la France (AFNOR), les États-Unis (AMS)

Bien qu'il existe tant de systèmes, la norme la plus utilisée est le système de numérotation INOXYDABLE (American Iron and Steel Institute).

Suivant la norme européenne EN 10027 « Système de désignation des aciers », la désignation symbolique des aciers inoxydables commence par la lettre « X », représentant les aciers contenant au moins un élément d'alliage dont la teneur est égale ou supérieure à 5%. Le nombre indique la valeur multipliée par cent de la concentration en carbone exprimée en % en masse. Lettres précises, par leur symbole chimique, les éléments d'addition majoritaires, rangés en teneur décroissante. Le nombre séparé par des traits d'union : donnent les concentrations des éléments d'alliages, classés dans l'ordre des symboles préalablement décrits, exprimées en % en masse s'ils sont supérieurs à 5 %. [6]

Exemple :

X 2 CrNi 18-10 C : 0,02 %, Cr : 17 à 19 %, Ni : 9 à 11 %, utilisés en chaudronnerie nucléaire et autres usages civils. [7]

Quelques exemples des systèmes de numérotation dans le tableau suivant :

EN 10027 (européenne)	Afnor NF A 35573 (France)	AISI (États-Unis)
X12CrNi18-09	Z10CN18-09	302
X12CrNi18-08	Z10CNF18-09	303
X5CrNi18-10 1.4301	Z7CN18-09	304
X2CrNi18-09 1.4307	Z3CN18-10	304 L
X5CrNi19-11 1.4303	Z8CN18-12	305
X7CrNi23-14	Z12CNS25-13	309
X12CrNiSi25-20	Z12CNS25-20	310
X5CrNiMo18-10 1.4401	Z6CND17-11	316
X2CrNiMo17-12-02 1.4404	Z2CND17-12	316 L
X10CrNiMoTi18-10 1.4571	Z6CNDT17-12	316 Ti
X10CrNiTi18-09 1.4541	Z6CNT18-10	321
X7Cr13 1.4003	Z6C13	403
X10Cr13 1.4006	Z12C13	410
X12CrS13	Z12CF13	416
X20Cr13 1.4021	Z20C13	420
X30Cr13 1.4028	Z30C13	420 B
X6Cr17 1.4016	Z8C17	430
X12CrMoS17	Z10CF17	430 F
X22CrNi17 1.4057	Z15CN16-02	431
X105CrMo17 1.4125	Z100CD17	440 C

71.7 exemples de système de numérotation des aciers inoxydable selon les pays [8]

I.8. Phénomène de passivation :

La passivation représente un état des matériaux durant lequel leur vitesse de corrosion est considérablement ralentie grâce à la présence d'une couche de corrosion peu soluble dans le milieu aqueux environnant, cette couche s'appelle « film passif ».[10]

La surface des métaux est toujours oxydée, à l'exception des métaux noble tel que l'or.

L'amélioration de la résistance à la corrosion des matériaux métalliques par des modifications des films passifs nécessite des recherches spécifiques sur leurs compositions.

Un métal est passif : quand son potentiel est moins noble il forme une couche d'oxyde mince qui est protectrice, adhérente sur la surface ce qui tend son potentiel vers des valeurs

plus positives, ceci implique que la vitesse de dissolution décroît (faible vitesse de corrosion, potentiel noble).

Un métal est passif, s'il résiste à la corrosion dans un environnement où existe une grande tendance thermodynamique de réaction (faible vitesse de corrosion, potentiel actif).
[11]

I.8.1. Film passif :

Le film passif ou couche de passivation est caractérisé par sa faible épaisseur de l'ordre de 10 à 20 nm, en cas d'attaque extérieure accidentelle telle qu'une rayure, il se régénère en présence d'oxygène ou d'eau.

Il est fortement solidaire du substrat métallique, il rend insignifiant le contact entre l'alliage et les agents plus ou moins agressifs du milieu environnant.

I.9. Passivation de l'acier inoxydable :

Le phénomène de passivité présente une très grande importance dans la mesure où il constitue la base du mécanisme de résistance à la corrosion des aciers inoxydables.

Ce phénomène est résulté par le contact du chrome présent dans l'inox avec l'air ou l'eau du milieu environnant, tout compte fait, cette couche si elle est endommagée localement, une corrosion va apparaître.

I.10. Influence du pourcentage du chrome dans les inox :

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est principalement liée à leur teneur en chrome. On peut alors classer cette résistance à la corrosion en quatre types :

Médiocres pour des teneurs en chrome situées entre 11 à 13%.

Moyennes, pour les concentrations en chrome situées entre 14 à 15%.

Haut de gamme, pour les teneurs plus élevées de 16 à 18%.

Exceptionnelles, pour les concentrations supérieures de 21 à 25%.

A ces différents niveaux, des additions de molybdène ou de cuivre de quelques pour-cent améliorent le film passif, en particulier en milieux chlorurés et acides.

I.11. Domaine d'utilisation :

L'acier inoxydable est devenu indispensable dans de nombreux domaines : [9]

- Dans la cuisine (malgré sa conductivité thermique dix fois plus faible que celle de l'aluminium), on peut l'utiliser pour : rénover une table ancienne, faire une crédence sur mesure, habiller une hotte, ustensiles de cuisine.

- Objets usuels : Boîtes de conserve, couverts en acier inoxydable, trombones, stylos billes, ciseaux.

- Médecine et chirurgie : il entre dans la fabrication de matériel médical comme les endoprothèses coronaires, les tiges de prothèse de hanche et les prothèses de remplacement de disques intervertébraux, et dans celle de divers instruments chirurgicaux tels les bistouris et les forceps, ainsi que les tables d'opération.

- bâtiment et travaux publics : Dans la structure de ponts ou de passerelle, pour des garde-corps et mains courantes, dans la structure des clochetons de Cathédrale, pour recouvrir une façade, l'habillage des cabines d'ascenseurs.

- automobile, aéronautique, industries mécaniques, transports : éléments de systèmes d'échappement, des baguettes de seuil, des baguettes de protection, des baguettes et caches décoratives

- Agroalimentaires, chimiques : L'utilisation de l'acier inoxydable est tout à fait compatible avec les conditions de pression, de température et de pH imposées lors de la fabrication des produits alimentaires. Leur grande résistance mécanique, associée à une longévité avérée et un coût relativement réduit en font un matériau idéal pour la réalisation de cuves, de conduites, de pompes, d'échangeurs thermiques, de tanks de stockage, d'outils de découpe... etc.

I.12. Choix de la nuance d'inox :

Le choix de la nuance des aciers inoxydables est basé sur une série de critères qui dépend principalement :

- Des conditions atmosphériques et environnementales
- De la conception architecturale
- De l'aspect de surface à obtenir
- De la fréquence des entretiens

Sur ce Tableau on a un choix des nuances en fonction des principaux critères techniques pour les principales applications.

	Austénitique	Ferritique	Martensitique	Durci par précipitation	Duplex
Résistance à la corrosion	Haute	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Très haute
Réponse magnétique	Généralement non	Oui	Oui	Oui	Oui
Soudabilité	Très bonne	Basse	Basse	Haute	Haute
Résistance aux hautes températures	Très haute	Haute	Basse	Basse	Basse
Résistance aux basses températures	Très haute	Basse	Basse	Basse	Moyenne
Ductilité	Très élevée	Moyenne	Basse	Moyenne	Moyenne
Rythme de durcissement	très haut	moyen	moyen	moyen	moyen
Durcissable	À froid	Non	Par trempage et refroidissement	Par vieillissement	Non

81.8 quelques caractéristiques des familles de l'inox [5]

I.13. Le amagnétisme :

Seuls les austénitiques ne sont pas attirés par un aimant. Les inox austénitiques présentent à température ambiante une structure austénitique qui leur permet d'être paramagnétiques. Ces inox ne prennent pas l'aimant. Cependant, certains inox austénitiques peuvent devenir légèrement ferromagnétiques après une déformation importante (exemple : mise en forme d'un tube). En effet, la déformation peut provoquer une modification partielle de la structure austénitique en une structure martensitique (martensite de déformation) et devenir ainsi un peu magnétique.

III. Chapitre 2 : la corrosion :

II.1. La corrosion des métaux :

La corrosion des métaux est essentiellement de nature électro-chimique, avec un oxydant (le dioxygène et le cation H⁺ en majorité), elle intervient à l'interface entre le métal et le milieu extérieur.

Les métaux, à l'exception des métaux précieux tels que l'or et le platine, que l'on trouve à l'état naturel sont toujours extraits de minerais, les métaux ont donc toujours tendance à évoluer vers un état stable, qui correspond à leur état d'origine, c'est-à-dire à leur forme oxydée, et ainsi à subir une dégradation de leurs propriétés. On pourra alors dire que la corrosion est un phénomène naturel et courant. [12]

La corrosion est un problème industriel important : le coût de la corrosion, qui recouvre l'ensemble des moyens de lutte contre la corrosion, le remplacement des pièces ou ouvrages corrodés et les conséquences directes et indirectes des accidents dus à la corrosion, est estimé à 3,4 % du produit brut mondial en 2013. Chaque seconde, ce sont quelque cinq tonnes d'acier qui sont ainsi transformées en oxydes de fer.[13]

II.2. Processus de corrosion dans un milieu aqueux :

La corrosion des métaux dans les milieux aqueux est un processus électrochimique mettant en œuvre des ions et des électrons.

Le métal en s'oxydant produit des ions qui migrent vers les milieux aqueux, et des électrons qui sont évacués par le métal. C'est une réaction dite anodique :



Des ions ou des molécules dissoutes dans le milieu aqueux peuvent être réduites en captant les électrons libérés par la réaction anodique. C'est la réaction dite cathodique :



Les électrons étant mobiles au sein du métal et les ions étant mobiles au sein du milieu aqueux, les réactions anodiques et cathodiques peuvent se produire à des endroits différents.

Ce processus constitue ce qu'on appelle une pile de corrosion dans laquelle :

- Le courant dit anodique va du métal vers la phase aqueuse aux endroits où il se corrode (zones anodiques)

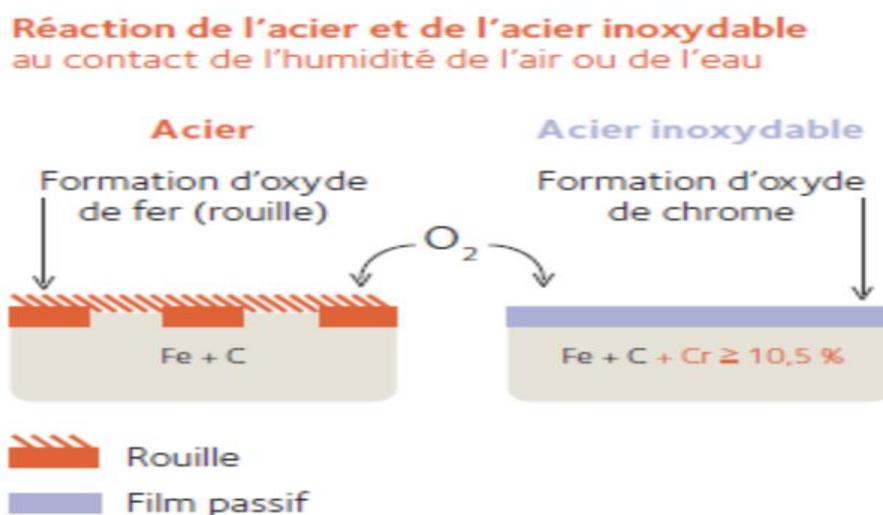
- Et le courant dit cathodique entre dans le métal aux endroits où le ou les espèces oxydantes se réduisent (zones cathodiques).

En l'absence de courant électrique extérieur les courants anodique et cathodique sont égaux et de sens opposés.[14]

II.3. Corrosion des aciers inoxydable :

Au contact de l'oxygène, une couche d'oxyde de chrome va se créer à la surface du matériau. Cette couche passive le protège et a la particularité de pouvoir s'auto-régénérer.

Les aciers inoxydables sont des matériaux utilisés dans de nombreux domaines industriels du fait de leur très grande résistance à la corrosion généralisée. Celle-ci est due à la formation d'une couche protectrice, appelée film passif, de quelques nanomètres d'épaisseur à la surface de l'alliage. Ces aciers, en contrepartie, peuvent être sensibles à la corrosion localisée, en particulier la corrosion par piqûres (CPP) et la corrosion cavernueuse (CC), avec pour conséquence un endommagement et des dégradations parfois importantes. La détection de ces types de corrosion joue donc un rôle important dans la prévention des risques tant sur le plan économique, qu'environnemental et sécuritaire. [15]



9II.1. Comparaison entre l'acier et l'acier inoxydable au contact de l'humidité

II.4. Types de corrosion :

Les types de corrosion varient en fonction des matériaux et des milieux et chaque type ne peut être évalué correctement que si la méthode de caractérisation utilisée est appropriée.

Pour ces raisons l'identification du type de corrosion est importante.

II.4.1. Corrosion chimique :

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolyte ou sur action des gazes (gaz d' O_2 , gaz H_2S et gaz CO_2). Lorsque le réactif est gazeux ou cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée : Corrosion sèche ou corrosion à haute température. L'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non aqueuse (Al dans CCl_4) peut être considérée comme une corrosion chimique. Elle est généralement rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides. Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en une seule action, c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques [16]

II.4.2. Corrosion biochimique :

La corrosion bactérienne est due à la présence de colonies importantes de bactéries dites anaérobiques qui se développent dans les eaux contenant des sulfates. La lutte contre cette forme de corrosion est à l'heure actuelle essentiellement d'ordre biologique, elle est réalisée par injection de produits bactéricides dans les milieux corrosifs. Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement (ex : production de H_2SO_4 par certains types de bactéries) [17]

II.4.3. Corrosion électrochimique :

Si le réactif est liquide, il est en général, accompagné d'une corrosion électrochimique, appelée corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes. Par ailleurs, elle se produit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique). L'existence de ces hétérogénéités, soit dans le métal ou dans le réactif, détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Elle nécessite la présence d'un réducteur ; H_2O , H_2 Sans celui-ci, la corrosion du métal (réaction anodique) ne peut se produire. [16]

II.5. Aspect morphologique de la corrosion :

II.5.1. Corrosion localisée :

La corrosion qui n'est pas uniformément répartie sur une surface, mais se concentre sur une petite surface, est définie comme « corrosion localisée ». Il s'agit souvent de la forme la plus grave de corrosion car elle entraîne des dégradations sous la forme de pénétrations profondes, pouvant « s'autoperpétuer » et entraîner la destruction rapide des composants. [17]

- Corrosion galvanique :

Cette forme de corrosion se produit lorsque des métaux différents en contact électrique sont immergés dans une solution conductrice. Elle résulte de la différence de potentiel électrochimique des deux métaux. Le métal le moins noble subit une corrosion d'autant plus sévère que sa surface est faible par rapport à celle du métal plus noble, la corrosion galvanique étant maximum au point de jonction des deux métaux.



10II.1. Corrosion galvanique d'un acier inoxydable

- Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres est une forme de corrosion localisée qui produit des trous ou des creux à la surface du métal. En pratique, on parle de piqûre lorsque la profondeur de l'attaque est supérieure à sa largeur. La piqûre est souvent le résultat d'une inhibition incomplète de corrosion. Dans le cas de l'acier au carbone des corrosions par piqûres ont été imputées à un mauvais dosage d'inhibiteurs anodiques (chromate ou nitrite). L'emploi d'inhibiteurs cathodiques en association avec des inhibiteurs anodiques a été mis en œuvre avec succès pour combattre ce type de corrosion par piqûres.

La corrosion par piqûres est également le résultat de concentrations locales excessives d'ions corrosifs (par exemple Cl^-). Les nuances d'acier inoxydable « inférieures » (ex. 304) sont particulièrement sensibles à la corrosion par piqûres à des concentrations élevées de chlorures.

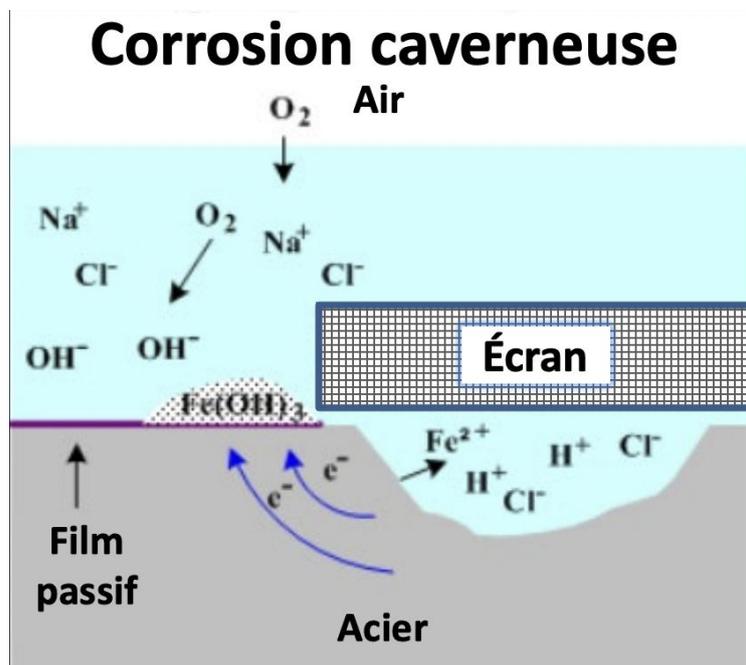


11II.2. Corrosion par piqure d'un acier inoxydable

- Corrosion caverneuse :

Cette corrosion est provoquée par la formation d'une petite masse d'eau stagnante dans une anfractuosité privée d'oxygène et où peuvent se concentrer des anions corrosifs comme les chlorures. On rencontre la corrosion caverneuse au niveau de soudures qui ne sont pas

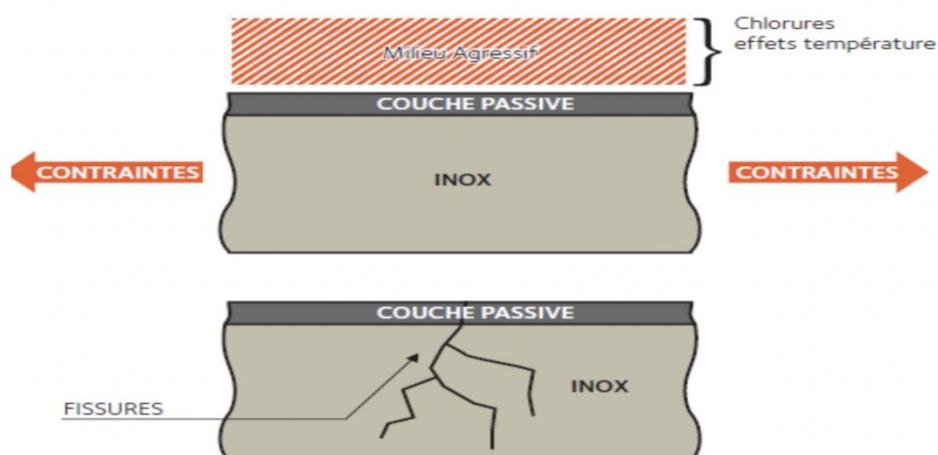
parfaitement pénétrantes, de joints de recouvrement ou autres joints mécaniques sous lesquelles l'eau peut stagner.



12II.3. Mécanisme de corrosion caverneuse d'un acier inoxydable

- Corrosion sous contrainte :

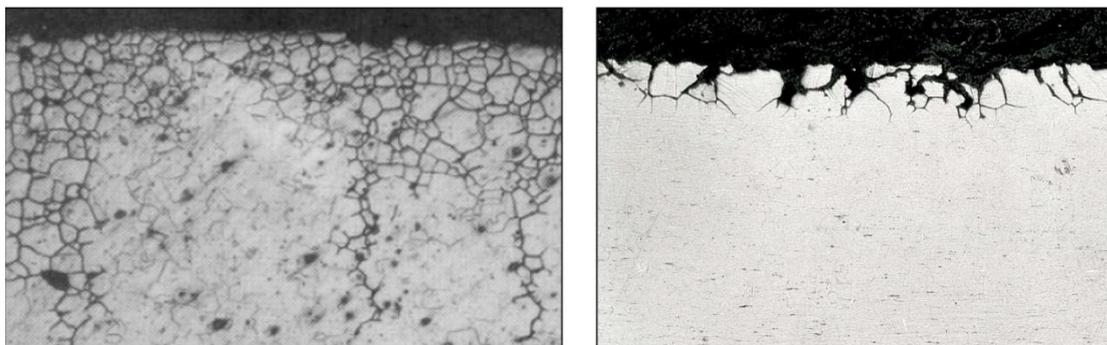
La corrosion sous contrainte résulte de l'interruption de films protecteurs de surface par une déformation due à une contrainte. Cette forme de corrosion produit fréquemment des fissures qui peuvent entraîner le bris de l'élément affecté.



13II.4. Mécanisme de corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable

- **Corrosion intergranulaire :**

Si les métaux présentent un aspect homogène à l'œil nu, de nombreux alliages tels que les aciers inoxydables sont en réalité constitués de grains de composition bien déterminée interconnectés par des sections de métaux de différentes compositions (joints de grains). Les effets des joints de grains sont la plupart du temps insignifiants. Cependant, dans la mesure où ceux-ci ont une structure élémentaire différente de celle des grains, ils peuvent parfois être plus réactifs à la corrosion que les grains, ce qui peut conduire au développement d'une corrosion galvanique appelée corrosion intergranulaire par laquelle l'alliage se désintègre.



14II.5 corrosions intergranulaire d'un acier inoxydable

Les aciers austénitiques sont sensibles à la corrosion intergranulaire. La théorie admise est l'appauvrissement en chrome dans les zones intergranulaires. En fait, la corrosion intergranulaire a aussi été observée au voisinage de soudures mal recuites d'aciers inoxydables.

D'autres alliages tels que l'aluminium haute résistance et certains alliages à base de cuivre sont également connus pour présenter une tendance à la corrosion intergranulaire.

- **Érosion-corrosion :**

La corrosion-érosion a été définie comme la dégradation accélérée d'un matériau due à l'action combinée de l'érosion physique et de la corrosion chimique. Elle se traduit par l'élimination des produits de corrosion inhibiteurs provoquée par l'action érosive du fluide ou des matières en suspension de ce fluide. La dégradation est plus manifeste dans les zones caractérisées par une circulation intense voire des turbulences telles que tés, joints, coudes ou éléments de pompes.

- **Corrosion par cavitation :**

Voisin du précédent cas, la cavitation qui se traduit par la libération et l'implosion de petites bulles de vapeur provoque des tensions physiques très importantes sur les surfaces affectées. Ce phénomène entraîne une forme de corrosion connue sous le nom de « corrosion par cavitation ». On le rencontre très couramment sur les éléments soumis à de grandes vitesses ou d'importantes vibrations, comme les roues de pompes ou les composants de moteurs à explosion.

II.5.2. Corrosion généralisée

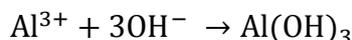
Si les produits de la réaction de corrosion sont solubles et si le matériau corrodé est de composition uniforme, la corrosion sera uniforme sur toute la surface. Ce type d'attaque est connu sous le nom de « corrosion généralisée ». En voici quelques exemples. [18]

- Corrosion acide

Il y a corrosion acide lorsque la concentration en H^+ du milieu aqueux est suffisamment faible pour permettre la réduction cathodique de l'eau en hydrogène. La corrosion acide est habituellement « généralisée » dans la mesure où les produits de corrosion sont suffisamment solubles dans le milieu acide pour qu'il n'y ait pas dépôt d'oxyde métallique. Dans le cas de la corrosion acide, la réaction cathodique produit de l'hydrogène moléculaire qui diffusant dans le métal peut entraîner sa fragilisation et des bris observés à haute température ou en présence de pH très acide (décapage...).

- Corrosion alcaline

La corrosion alcaline résulte de la nature amphotère de certains métaux. Par exemple, l'hydroxyde d'aluminium précipite et forme une couche inhibitrice suivant la réaction :



Cependant, à pH élevé, l'hydroxyde d'aluminium peut se resolubiliser suivant la réaction :



Dans des solutions fortement alcalines, cette resolubilisation a pour résultat une corrosion alcaline. L'aluminium et le zinc sont particulièrement sensibles à ce type de corrosion, et même le fer dans les chaudières :

- soit suite à un pH trop élevé dans les eaux en circulation.
- soit à une surchauffe localisée et à la surconcentration associée en ions OH^- dans l'eau.

- Corrosion complexant

Les complexants sont des agents chimiques formant des complexes solubles et stables avec les ions métalliques. Ils sont utilisés dans les chaudières ou autres applications pour empêcher d'éventuels dépôts ou dissoudre les dépôts existants. La plupart d'entre eux réagissent sur les couches passives, et peuvent donc provoquer ou contribuer à la corrosion du métal de base.

II.6. Facteur favorisant la corrosion :

II.6.1. Le substrat

Le substrat n'a pas vraiment d'influence dans le milieu neutre et aéré, le facteur contrôlant ce phénomène dans ce cas-là c'est l'oxygène, la température et l'agitation du milieu. Par contre, en milieu acide, le substrat est particulièrement important car le système H^+ / H_2 est un système lent, c'est à dire un système tel que la valeur du courant d'échange et la surtension varient en fonction du matériau sur lequel la réduction se produit. Ainsi, la surtension d'hydrogène sera différente selon les éléments d'alliages, impuretés et phase cristallines de l'acier, les plages de cémentite (Fe_3C) ou carbures agissent généralement comme cathodes

efficaces, à plus faible surtension d'hydrogène. Dans le cas de la corrosion en milieu acide, les traitements thermiques et mécaniques deviennent donc importants car ils conditionnent la répartition et la taille des phases. Il peut y avoir en plus création de piles locales stables entraînant des phénomènes de corrosion localisée.

On ce qui concerne les aciers inoxydables dont la teneur en chrome (>12%) permet la formation à la surface du métal d'un film passif protecteur améliorant très fortement sa tenue à la corrosion uniforme. [19]

II.6.2. La température

En général, la température a un effet important sur les phénomènes de corrosion : la vitesse de corrosion augmente lorsque la température augmente. On peut expliquer ce phénomène par le fait que les processus anodiques et cathodiques sont activés thermiquement. Le courant d'échange qui en résulte et qui représente la vitesse de corrosion, augmente avec la température. Dans la pratique industrielle, on considère généralement qu'une élévation de 10 à 20°C conduit à multiplier par deux la vitesse de corrosion lorsque l'on est en situation de « corrosion active ». En milieu aéré, une élévation de température facilite la diffusion de l'oxygène dans la solution et engendre une augmentation de la valeur du courant limite. Cependant, la solubilité de l'oxygène diminue, ce qui a l'effet inverse sur la cinétique de corrosion. Cela permet d'expliquer la différence de comportement en système ouvert et fermé. [19]

II.6.3. Le PH

On ce qui concerne le PH, la réaction anodique peut se trouver affectée, par une variation locale de ce paramètre. C'est le cas du phénomène connu d'aération différentielle découvert par U.R. Evans en 1923, lorsqu'une pièce de fer est plongée dans un milieu neutre non tamponné (par exemple NaCl), on observe un accroissement de la vitesse de corrosion dans les zones non aérées et au contraire une diminution de l'attaque dans les zones aérées.[20]

Le pH de la zone aérée (cathodique) devient plus élevé et contribue à passiver le métal. La corrosion dans les recoins commence souvent par cette étape (corrosion par effet de crevasse). Pour un milieu acide, l'aération contribue au contraire à accroître la vitesse de corrosion des zones aérées (en l'absence de passivation). Parmi les études réalisées dans des électrolytes simulants les sols. Il apparaît que V_{corr} augmente quand le pH diminue (milieux plus acides) et diminue avec le temps (formation de la couche de produits de corrosion) [21]

II.6.4. Le milieu corrosif

Dans le milieu corrosif le caractère oxydant de certains ions augmente le potentiel qui peut placer le matériau dans son domaine de passivité, réduisant ainsi la vitesse de corrosion. Les cations présents en solution ont une grande influence sur les phénomènes observés car ils peuvent jouer un rôle bénéfique ou aggravant. La présence d'anions dans le milieu corrosif conditionne la solubilité des produits de corrosion et l'existence de dépôts, et plus la valence des anions en solution est élevée, plus leur concentration sera élevée dans le liquide au voisinage du dépôt. Les ions halogénures particulièrement chlorures et fluorures ont une

influence particulière sur la corrosion, leur présence induit un risque de corrosion localisé (piqûre, crevasse et même fissuration sous contrainte dans certains cas). [19]

II.6.4.1. Influence de certains milieux :

Eaux industrielles : l'eau pure est sans effet mais les chlorures (et dans une moindre mesure beaucoup d'autres sels), même à l'état de traces, sont particulièrement néfastes pour les aciers inoxydables ; les nuances contenant du molybdène sont alors les plus indiquées. [25]

Vapeur d'eau : normalement sans effet, elle peut toutefois poser des problèmes si elle contient certaines impuretés.

Atmosphères naturelles : à l'exception des atmosphères marines, elles posent d'autant moins de problèmes que l'acier contient davantage d'éléments nobles et que la surface est mieux polie.

Atmosphères marines et industrielles : les aciers au chrome s'altèrent très lentement et on préfère en général utiliser des aciers au molybdène.

Acide nitrique : il attaque la plupart des métaux industriels mais l'acier inoxydable en général lui résiste particulièrement bien, par suite de la passivation de sa surface : le molybdène n'est intéressant que si l'acide contient des impuretés.

Acide sulfurique : la résistance dépend beaucoup de la concentration et la présence d'impuretés oxydantes améliore la passivation. D'une manière générale les nuances austénitiques contenant du molybdène sont les meilleures.

Acide phosphorique : la résistance est généralement bonne mais il faut surveiller les impuretés, en particulier l'acide fluorhydrique.

Sulfites acides : la corrosion peut être catastrophique car ces solutions, que l'on rencontre souvent dans les papeteries, comportent beaucoup d'impuretés ; là encore les alliages au molybdène sont préférables.

Acide chlorhydrique : la corrosion augmente régulièrement au fur et à mesure que la concentration augmente, l'association est donc à éviter.

Acides organiques : ils ne sont généralement pas aussi corrosifs que les acides minéraux et ceux que l'on rencontre dans l'industrie alimentaire (acides acétique, oxalique, citrique, etc.) sont pratiquement sans effet.

Solutions alcalines : les solutions froides n'ont pratiquement pas d'action mais il n'en est pas de même pour les solutions concentrées et chaudes.

Solutions salines : le comportement est généralement assez bon, sauf en présence de certains sels comme les chlorures ; les nitrates au contraire favorisent la passivation et améliorent la tenue. L'acide nitrique en mélange avec des saumures saturées peut provoquer des destructions de l'acier inox (même des nuances en 316L).

Produits alimentaires : il n'y a généralement aucun problème de corrosion sauf avec certains produits qui contiennent des composants sulfureux naturels ou ajoutés, comme la moutarde et les vins blancs.

Produits organiques : ils sont généralement sans action sur les aciers inoxydables, sauf s'ils sont chlorés et à chaud (l'eau de Javel à plus de 60 °C et à des concentrations élevées peut détruire [piques noires] l'acier inox). Les colles, savons, goudrons, produits pétroliers, etc. ne posent aucun problème.

Sels et autres produits minéraux fondus : les produits alcalins corrodent tous les aciers inoxydables mais pas les nitrates, cyanures, acétates, etc. La plupart des autres sels et des métaux fondus produisent des dégâts rapides.

II.6.5. L'agitation du milieu corrosif

L'agitation du milieu corrosif n'a pas d'influence. Lorsque la vitesse de corrosion est contrôlée par un processus de transfert de charge.

Sauf que, lorsque la réaction est contrôlée par un processus de transfert de matière l'agitation a une certaine influence. En effet en solution aérée, la grandeur δ (longueur caractéristique du transport de matière par diffusion) étant inversement proportionnelle à la vitesse de circulation de l'électrolyte, le courant de corrosion sera important avec l'augmentation de la vitesse. En d'autres termes, l'agitation facilite l'accès de l'oxygène dissous vers la surface du métal, la circulation de l'électrolyte augmente la vitesse de corrosion.

En revanche, en milieu acide, ce paramètre est moins influant et un débit élevé empêche simplement la formation d'un film superficiel d'hydroxyde ferreux, susceptible de limiter la vitesse de corrosion. Lorsque les débits sont très élevés, le mode de corrosion peut être modifié, à cause de la formation d'un dépôt ou à cause de l'intervention d'un autre mécanisme appelé érosion - corrosion.

Ce phénomène est dû à l'existence d'une contrainte de cisaillement exercée par le mouvement du fluide sur la surface, qui provoque une détérioration mécanique de l'éventuelle couche protectrice qui la recouvre. Le renouvellement du milieu accroît la corrosion. Pratiquement, les vitesses de corrosion des aciers dans l'eau sont toujours plus élevées en régime dynamique, avec renouvellement continu du milieu, qu'en régime statique.

En résumé, plus la vitesse de circulation de l'eau augmente, plus la corrosion est élevée, moins la couche d'oxyde est épaisse et plus la perte de métal dans l'eau est importante. [22]

II.6.6. Influence du champ magnétique :

La présence d'un champ magnétique influe considérablement sur la cinétique et la morphologie de la corrosion, et à potentiel imposé, élève la densité de courant enregistré. Une étude potentiostatiques et la mesure potentielle de corrosion libre ont montrés que la présence d'un champ magnétique de faible intensité et d'un potentiel imposé influent sur la cinétique et la morphologie de la corrosion.[23]

II.7. Protection :

La protection contre la corrosion représente toutes les mesures qu'on peut prendre pour protéger les matériaux métalliques contre l'action corrosif du milieu. La protection la plus immédiate est de choisir des métaux ou alliages résistant aux milieux agressifs. Aussi, dès la

conception des équipements jusqu'à leur entretien quotidien, la protection contre la corrosion doit être envisagée pour éviter de nombreux problèmes et augmenter leur durée de vie.

II.7.1. Protection cathodique :

Les électrons étant mobiles au sein du métal et les ions étant mobiles au sein du milieu aqueux, les réactions anodiques et cathodiques peuvent se produire à des endroits différents. Ce processus constitue ce qu'on appelle une pile de corrosion dans laquelle : [24]

- le courant dit anodique va du métal vers la phase aqueuse aux endroits où il se corrode (zones anodiques), et le courant dit cathodique entre dans le métal aux endroits où le ou les espèces oxydantes se réduisent (zones cathodiques).

En l'absence de courant électrique extérieur les courants anodique et cathodique sont égaux et de sens opposés. La protection cathodique consiste à inverser la pile de corrosion de telle manière que l'équipement à protéger devienne le siège des réactions cathodiques.

II.7.2. Protection par courant imposé

Le métal à protéger est couplé à une anode auxiliaire dite "déversoir".

Un générateur de courant impose son potentiel à l'équipement à protéger, en faisant circuler un courant entre celui-ci et l'anode auxiliaire.

Le courant peut être de 0,05 à 5A/m² pour des milieux faiblement corrosifs.

II.7.3. Protection par anode sacrificielle

Le métal à protéger est couplé à un métal moins noble ; pour protéger les équipements contenant du fer, il faudra choisir entre le magnésium, l'aluminium, ou le zinc.

Celui-ci devient alors l'anode et la structure à protéger la cathode du système.

L'anode se corrode, et il faut la remplacer périodiquement.

Cette méthode, peu coûteuse, ne conviendra qu'aux équipements de faible surface et confrontés à un milieu faiblement résistif (sols très conducteurs).

II.7.4. Protection anodique :

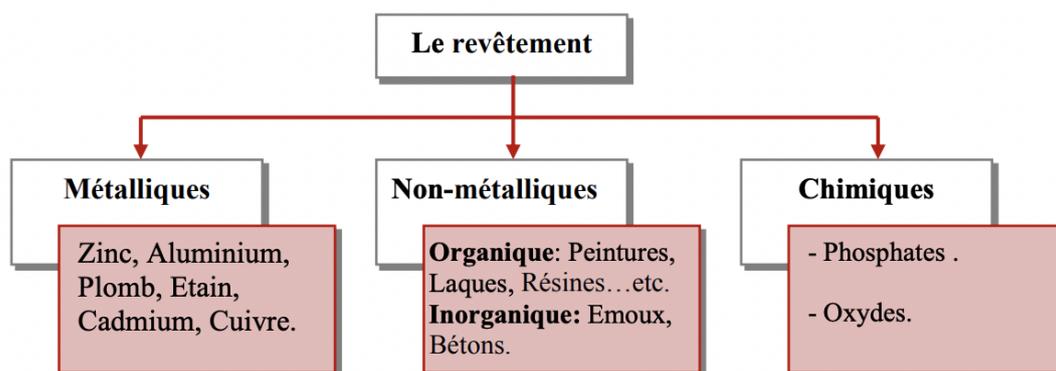
Cette méthode n'est applicable qu'aux métaux passivables.

A l'aide d'un générateur de courant, on provoque dans un premier temps la passivation du métal par un courant relativement intense (environ 5A/m²), puis on entretient cette passivation par un courant plus faible (<1A/m²).

Cette méthode n'est employée que pour les milieux très corrosifs, pour lesquels la protection cathodique nécessite des intensités trop élevées. [25]

II.7.5. Protection par revêtement :

Un revêtement consiste à isoler le métal du milieu corrosif, il doit être continu, adhérent et inerte par rapport à l'environnement. Pour cela, il faut préparer soigneusement les surfaces à traiter, en excluant toute trace d'oxydation, de graisse ou de tout autre corps étranger, afin que le revêtement joue totalement son rôle de barrière au passage des électrons. Par exemple, on trouve des revêtements métalliques comme l'application du chrome sur les robinets, et revêtements organiques comme les peintures et vernis.[26]



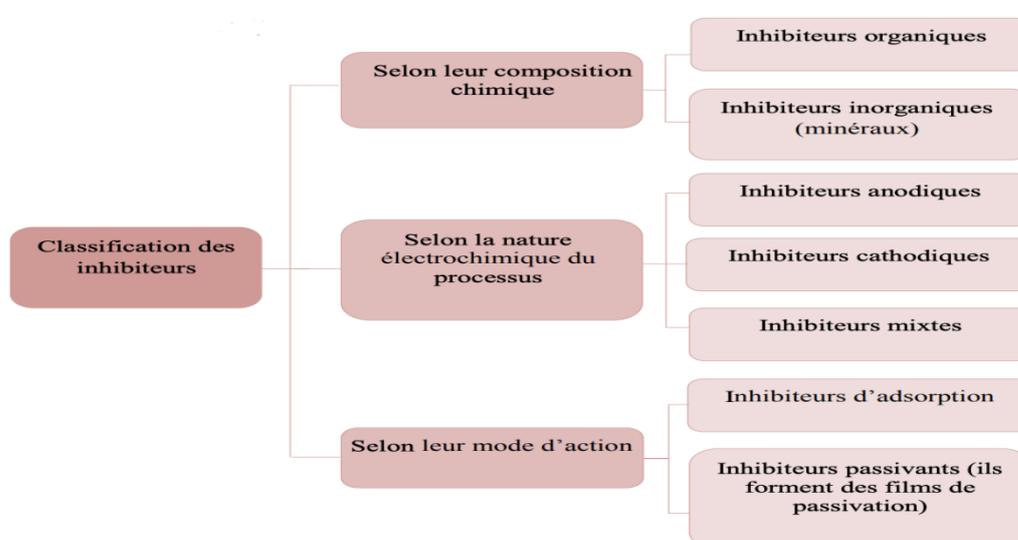
15II.6. Représentation des différents types de revêtement

II.7.6. Protection par la forme des pièces :

En donnant une forme adaptée aux objets, on peut diminuer les risques de corrosion car la forme d'un objet peut influencer sa durée de vie de façon déterminante. La distribution des contraintes dans une pièce influence sa sensibilité à la corrosion sous contrainte. Ainsi annulant la conception des pièces contenant des angles pour éviter la concentration des contraintes tel que la tête d'un boulon. [27]

II.7.7. Protection d'inhibiteur :

Un inhibiteur de corrosion est donc un produit chimique (molécule organique ou inorganique) qui est ajouté en faible quantité au milieu corrosif (en général milieu liquide, plus rarement milieu gazeux) et qui vient protéger le métal contre la corrosion en recouvrant celui-ci d'une barrière isolante (locale ou complète) vis-à-vis du milieu agressif. [28]



16II.7 classifications des inhibiteurs

IV. Chapitre 3

III. procédure expérimentale :

III.1. Composition chimique :

Le matériau choisis pour cette étude est l'acier inoxydable de type austénitique (cubique centré à la face, non ferromagnétique) 316, avec 16,65% de Cr, qui est le responsable sur la passivation des aciers inoxydables, en formant sur la surface du matériau, une couche d'oxyde mince et protectrice. Il contient également 10.43% Ni, c'est ce dernier qui confère aux aciers inoxydables leur structure austénitique (CFC), et il n'est pas présent dans la composition de la couche passive. La composition chimique détaillée de cet acier est présentée au tableau.1.

L'analyse chimique a été effectuée au moyen de la spectrométrie d'émission optique (OES).

Éléments	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Co (%)	Cu (%)	Nb (%)	Ti (%)	V (%)
INOXYDABLE E316	0.049	0.63	0.95	0.007	0.004	16.65	2.19	10.43	0.003	0.31	0.12	0.016	0.006	0.066

Tableau. III.1 : Composition en % massique de l'acier inoxydable 316

III.2. Diffraction des rayons X :

L'acier inoxydable austénitique 316 a été analysé par diffraction des rayons X (DRX) en utilisant un diffractomètre D2 PHASER (marque : BRUKER) figure. III.1, possédant une anti cathode en cuivre dont la longueur d'onde est égale à $\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$. Configuration détecteur : PSD continue rapide. Le diffractogramme obtenu a été enregistré dans un domaine angulaire $10^\circ \leq 2\theta \leq 110^\circ$ avec un pas de 0.02° et une vitesse d'avancement du détecteur de 0.5s/pas.



17Figure.III.1Diffractomètre D2 PHASER(BRUKER)

III.3. Essai de dureté :

La dureté est la résistance mécanique d'un matériau à la pénétration mécanique d'un autre corps plus dur. Le matériau naturel le plus dur est le diamant. Ce dernier est utilisé comme pénétrateur (diamant industriel).

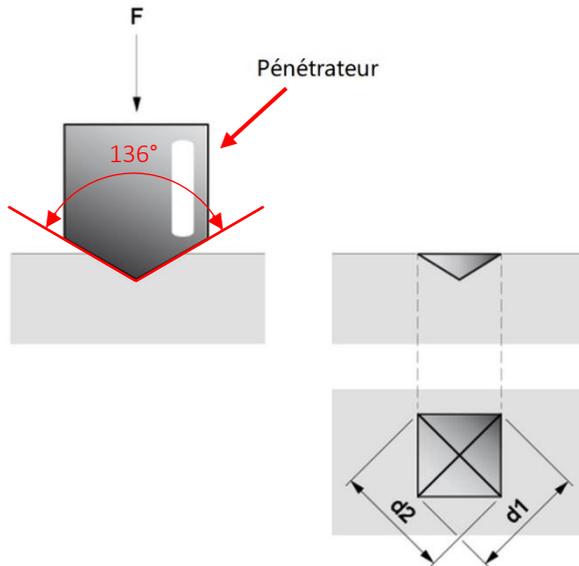
L'essai de dureté, qui généralement s'effectue sur des machines d'essai appelées duromètres. C'est un moyen de contrôle non destructif utilisé dans la production pour un contrôle rapide de la qualité des produits finis car il permet d'évaluer les propriétés d'un matériau tel que sa résistance à la traction, sa ductilité et sa résistance à l'usure.

Selon les normes, la dureté est exprimée comme un nombre sans dimension.

Les essais les plus courants sont les essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell. Dans notre étude nous utiliserons l'essai de dureté de Vickers.

- III.3.1. Principe d'essai de dureté de Vickers :

L'essai de dureté de Vickers consiste à appliquer une charge en douceur, sans impact, en poussant un pénétrateur en diamant dans l'échantillon, comme le montre la figure. III.2. Le diamant Vickers laisse une empreinte en forme pyramidale avec une base carrée. Le pénétrateur est maintenu en place pendant 10 à 15 secondes avant d'être relâché complètement



18Figure. III.2 : Présentation schématique du pénétrateur Vickers et de la forme d'une empreinte.

Dans notre étude nous avons utilisé le dispositif HOMMEL pour appliquer la charge (Figure.III.3) et le dispositif KARL FRANK GMBH pour la mesure de l'empreinte (figure.III.4).



Figure III.3 : Dispositif
HOMMEL



Figure III.4 : Dispositif
KARL

La valeur de la dureté Vickers HV (Hardness Vickers) se définit comme étant le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte S soit :

$$HV = \frac{F}{S}$$

La surface est calculée en fonction des diagonales de l'empreinte grâce au microscope optique. On mesure la première diagonale d_1 puis la seconde d_2 et on calcule la valeur moyenne d :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ (mm)}$$

La valeur de la surface est donc :

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

Avec γ l'angle de la pyramide, dans notre cas $\gamma = 136^\circ$

Le rapport de la charge et de la surface devient :

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

Où F est exprimé en Kg.

III .3.2. Micro dureté Vickers :

La micro dureté Vickers est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges. La micro dureté est une mesure de la résistance opposée par la surface d'un matériau à la pénétration d'un indenteur plus dur, sous faible charge (de 0.01N à 10N). Le teste de micro dureté permet de mesurer la dureté des différentes phases d'une microstructure, d'établir le profil de dureté de la couche déformée sous la surface usée et dans les revêtements, de contrôler la qualité des traitements de surface et des revêtements. La machine de mesure de la micro dureté utilisée modèle SHIMADZU est présentée dans la figure III.5. Elle permet de mesurer la micro dureté Vickers, grâce à une pyramide diamantée qui est imprimée dans le matériau à évaluer. On obtient ainsi une empreinte de forme carrée dont on peut mesurer les diagonales. A partir de la longueur de la diagonale, et connaissant la charge appliquée à la pyramide, on peut en déduire

la micro dureté Vickers. Cette machine qui est connecté à un ordinateur permet l'obtention automatique des valeurs de micro dureté Hv.



19Figure III.5 : Machine de mesure de la micro dureté modèle SHIMADZU.

III.4. Procédure expérimentale :

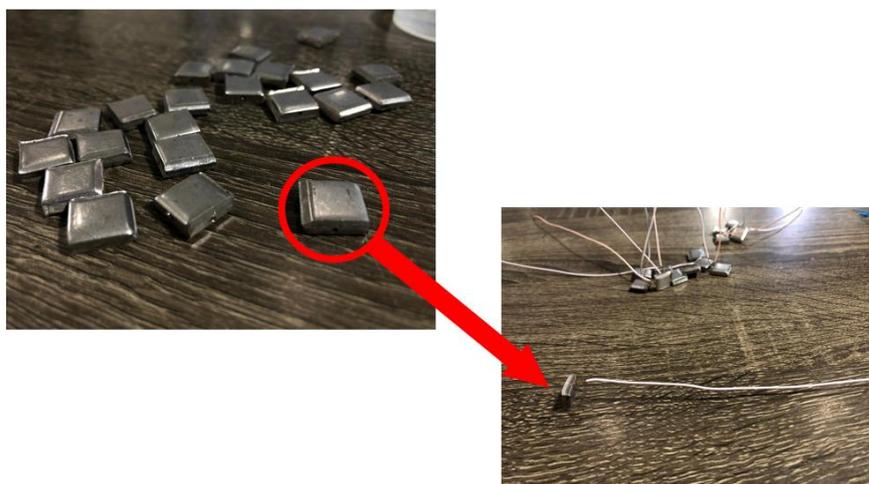
III.4.1. Réalisation des échantillons :

Des échantillons de dimensions 10 x 10 x 4 mm sont découpés dans une tôle industrielle d'acier inoxydable 316. La découpe étant réalisée à froid à l'aide d'une guillotine (Figure III.6) Dans le but d'éviter toute surchauffe et ne pas altérer les propriétés mécaniques de l'acier.



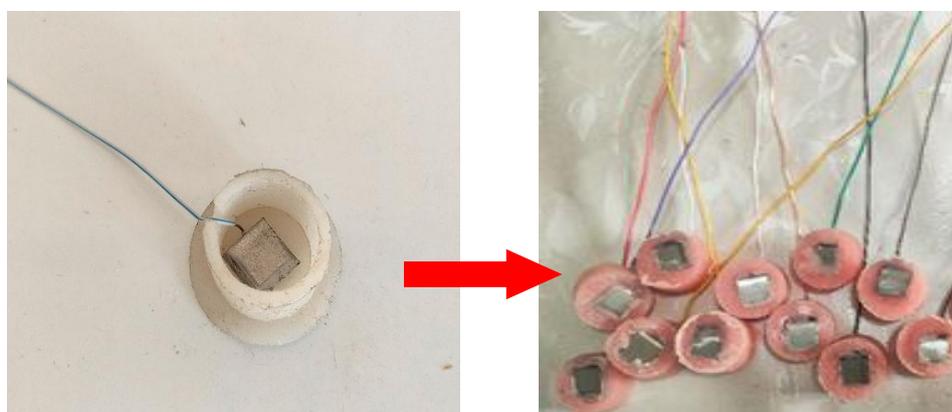
20Figure III.6 : Machine de découpe une guillotine (BAYKAL, MGH3110).

Le contact électrique étant assuré par un fil de cuivre gainé de caoutchouc. Le fil électrique est introduit dans un trou percé sur l'épaisseur de l'échantillon (Figure III.7). La continuité électrique est vérifiée avant l'enrobage.



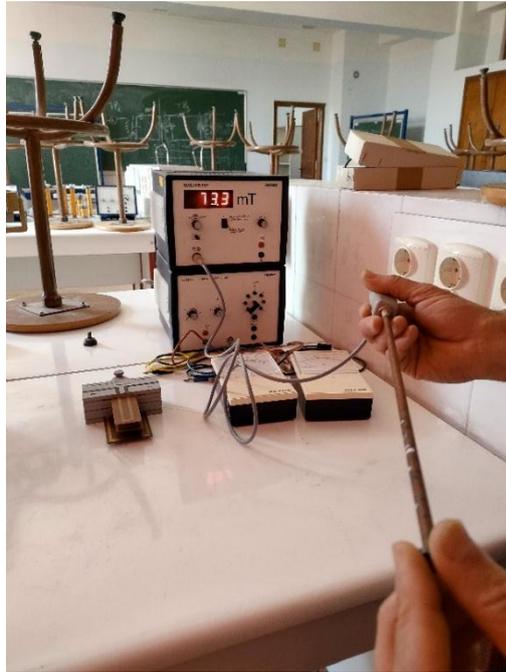
21 *Figure III.7 : Échantillons d'acier inoxydable 316 avant enrobage*

Les échantillons sont ensuite enrobés, à froid, dans de la résine dentaire (figure III.8), non contaminable pour les solutions étudiées.



22 *Figure III.8: Échantillons d'acier inoxydable 316 après enrobage à la résine dentaire et démoulage.*

La moitié des échantillons ont été enrobés avec un aimant possédant une intensité du champ magnétique de 73,3 miliTesla.



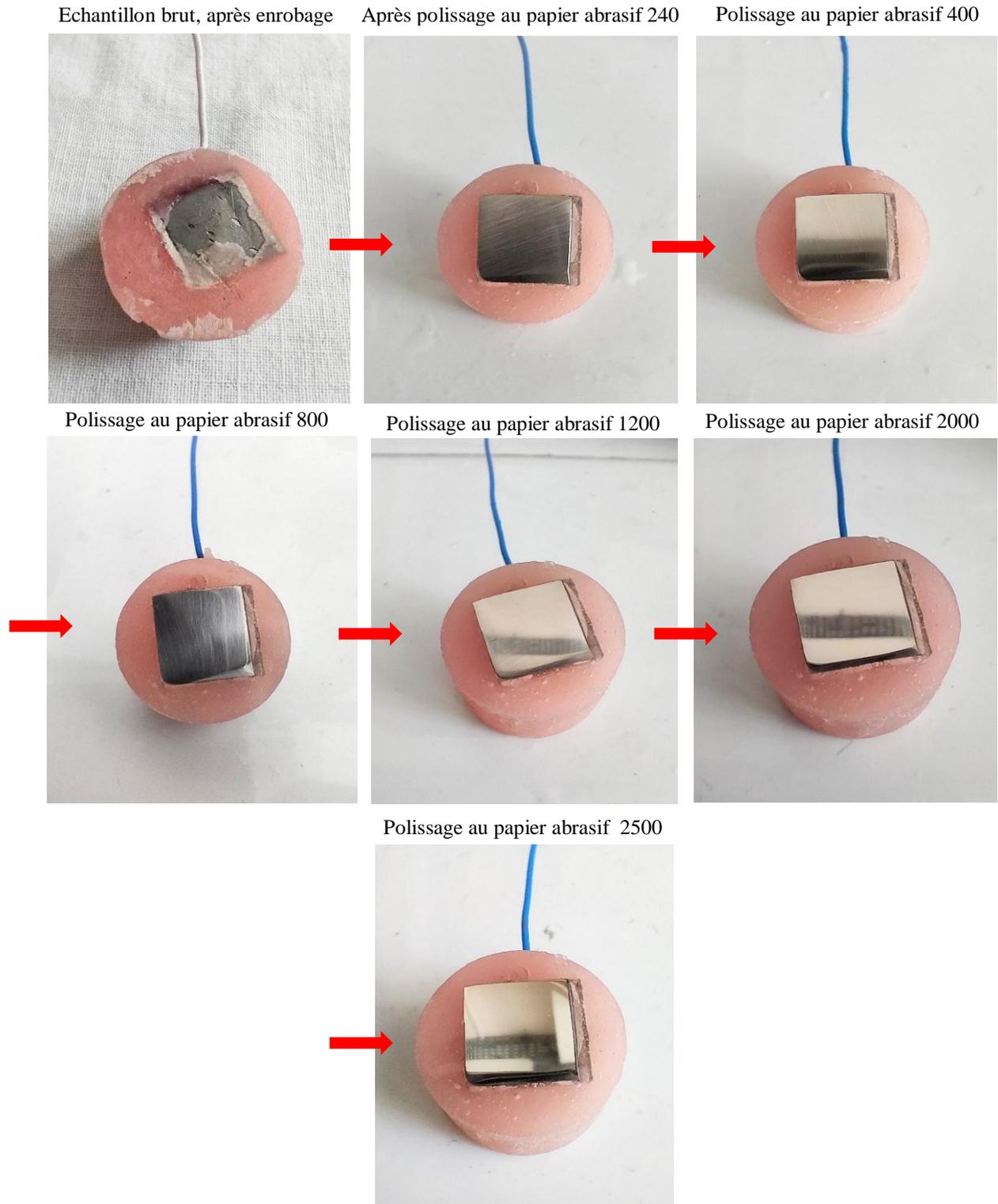
23 *Figure III.9 : appareil de mesure de l'intensité du champ magnétique. TESLAMETER (PHYWE)*

Les essais sont réalisés sur des échantillons polis mécaniquement à l'aide d'une polisseuse à jet d'eau et de papiers abrasifs.



24 *Figure III.10 : Polisseuse STRUERS*

Le polissage est réalisé avec du papier au carbure de silicium de grade 240, 400, 800, 1200, et 2000. Un dernier polissage a été effectué avec un papier de grade 2500 pour éliminer un maximum de rayures. Le résultat obtenu est une surface finie à l'état miroir pour une observation optimale au microscope.



25 Figure III.11 : Évolution de l'état de surface des échantillons d'acier inoxydable 316 avec le polissage

III.4.2. Préparation de la solution pour les tests de corrosion :

Afin de reproduire au mieux l'environnement biologique, deux solutions ont été préparées :

- Une première solution composée de 0,9 % en masse de NaCl, pour ce faire 9 grammes de NaCl sous forme de poudre cristallisée ont été dissous dans 1 litre d'eau déminéralisé.
- Une deuxième solution, identique à la précédente, à laquelle nous avons ajouté 1 gramme de glucose ($C_6H_{12}O_6$).

La pesée de la poudre de NaCl a été effectuée sur une balance électronique modèle PIONNER (Figure III.12).

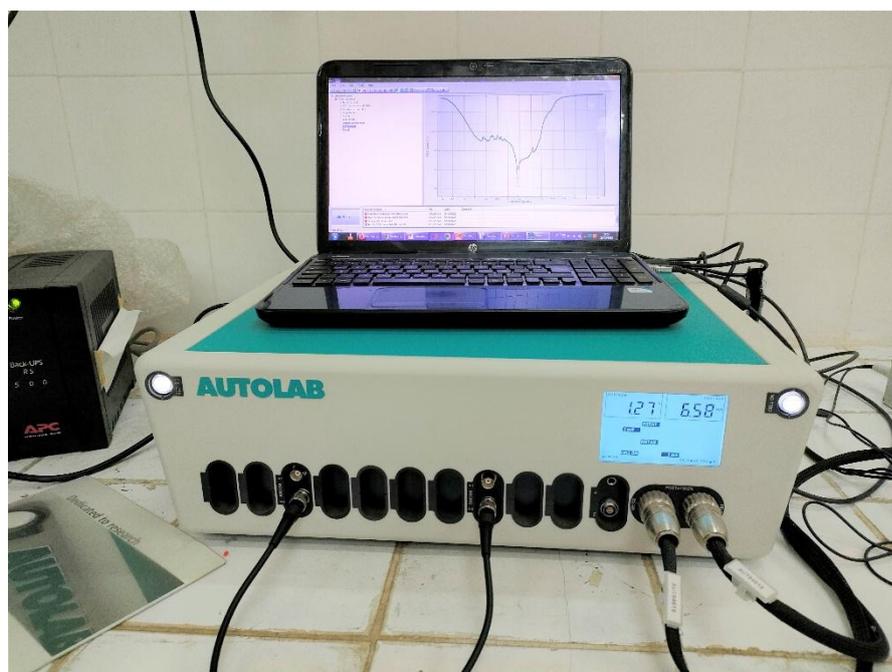
Tous les essais ont été réalisés à la température de 37° représentant la température moyenne corporelle. Les solutions pour les tests ont un pH variant entre 7 et 8 représentant un pH très proche du pH corporel.



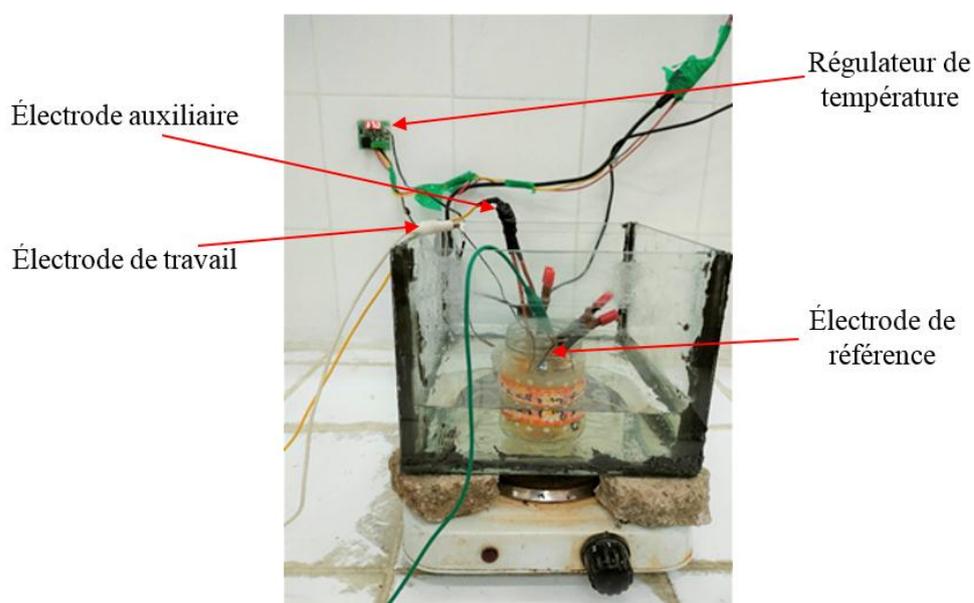
26Figure III.12 : Balance électronique type Pionner.

III.5.1. Montage expérimental utilisé pour les essais :

Nous avons utilisé pour réaliser les essais électrochimiques un potentiostat/galvanostat modèle AUTOLAB (Figure III.13) relié à une cellule électrochimique à trois électrodes : électrode de travail (échantillon), une électrode de référence en Ag/AgCl chlorure d'argent et une contre-électrode en graphite (Figure III.14).

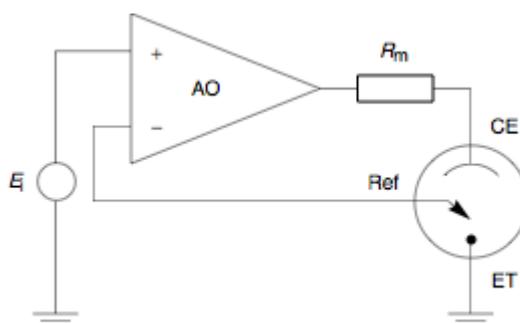


27Figure III.13 : Potentiostat/galvanostat modèle AUTOLAB



28Figure III.14 : Cellule électrochimique réalisé à trois électrodes

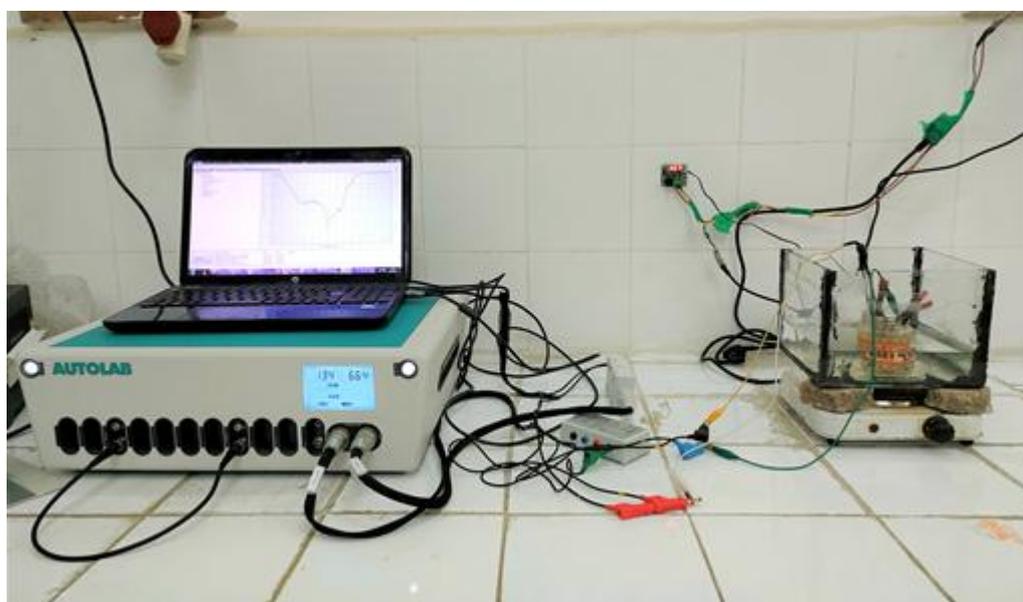
Dans son principe, un potentiostat mesure la différence de potentiel entre les électrodes de travail (ET) et de référence (Réf) d'une cellule à trois électrodes (figure III.14), fait passer un courant I_C dans la cellule par l'intermédiaire de la contre électrode (CE) et mesure le courant à l'aide de la chute ohmique $I_C R_m$ aux bornes de la résistance R_m [32].



29 Figure III.14 : Schéma de principe d'un potentiostat [32]

III.5.2. Méthode de détermination du potentiel de pic :

Le montage utilisé est représenté dans la figure III.16. Après immersion de l'échantillon d'acier inoxydable dans la solution, le potentiel du métal, mesuré à l'aide du potentiostat est enregistré en fonction du temps. L'enregistrement des courbes de polarisation anodique $i = f(E)$ dont l'origine correspond au potentiel de corrosion, et à une intensité de courant, est obtenue en faisant progresser le potentiel imposé dans le temps.



30 Figure III.16 : Dispositif réalisé pour la mesure d'une courbe de polarisation potentiostatique.

III.6.1. Observations micrographiques :

La surface des échantillons est observée au microscope (Figure III.17) avant et après les essais électrochimiques. Cet examen permet de voir l'évolution et la morphologie de la corrosion après les tests électrochimiques.



31 Figure III.17 : Microscope optique de type « HUND WETZLAR ».

III.3.3 Traitement chimique :

L'industrie utilise une grande variété de traitements de surface des métaux. Ces traitements modifient ou confèrent une propriété superficielle. Les traitements chimiques s'appliquent sur presque tous les métaux usuels pour en améliorer l'aspect décoratif, la résistance à la corrosion, la tenue aux frottements ou l'aptitude à l'accroche des peintures.

Le traitement s'effectue, le plus souvent, en plusieurs opérations élémentaires :

- Conditionnement de la surface (décapage, dégraissage...)
- Traitement chimique proprement dit
- Finition (colmatage, séchage...)

Entrecoupées d'autant de rinçages qu'il est nécessaire.

Dans notre traitement chimique, nous utiliserons de l'acide pour augmenter le potentiel de l'acier INOXYDABLE et réduire sa vitesse de corrosion. Les échantillons ont été placés dans un bain d'acide nitrique, pour une durée de 3 jours, et ainsi forcer la réaction de passivation.



32 Figure III.18 Échantillon d'acier AISI «316 durant le traitement chimique

V. Chapitre IV : résultats et discussion

IV.1. Microstructure de l'acier 316 avant traitement chimique ni électrochimique :

La Fig. IV.1 a) montre la microstructure de l'acier inoxydable 316 sans attaque, ni chimique ni électrochimique, et b) montre la microstructure de l'acier 316 obtenue après une heure d'OCP + une polarisation entre un potentiel du -1.5 V au potentiel 1.5 V, dans l'acide nitrique. Les deux images sont obtenues au microscope optique. Nous avons constaté sur la Fig. IV.1 a) que la surface de l'acier 316 ne présente ni fissure, ni piqûres ni dégradation, et sur la Fig.1.b), nous constatons que les joints des grains sont attaqués, et les grains ont un diamètre moyen de 100 μ m.

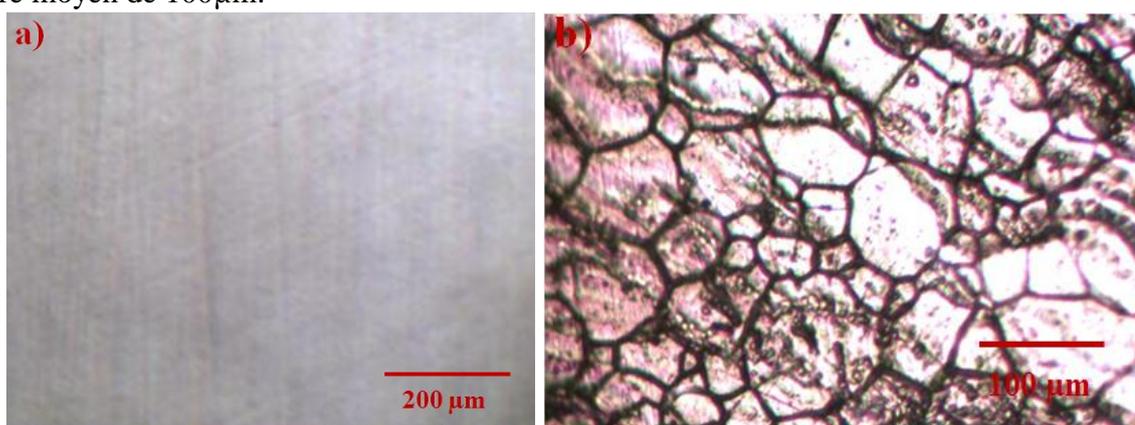


Figure IV.1 : observation optique de l'échantillon a) sans attaque, b) après une heure d'OCP dans l'acide nitrique suivi d'une polarisation dans l'acide nitrique.

IV.2. Diffraction des rayons X :

L'acier inoxydable austénitique étudié a été analysé par diffraction des rayons X (DRX) et le résultat de la diffraction est représenté sur la Fig. IV.2, qui montre 6 pics de diffraction ce qui nous a permis de distinguer les phases suivantes $Fe_{4,00}$, $CrFe_4$, $Fe_{0,64}Ni_{0,36}$.

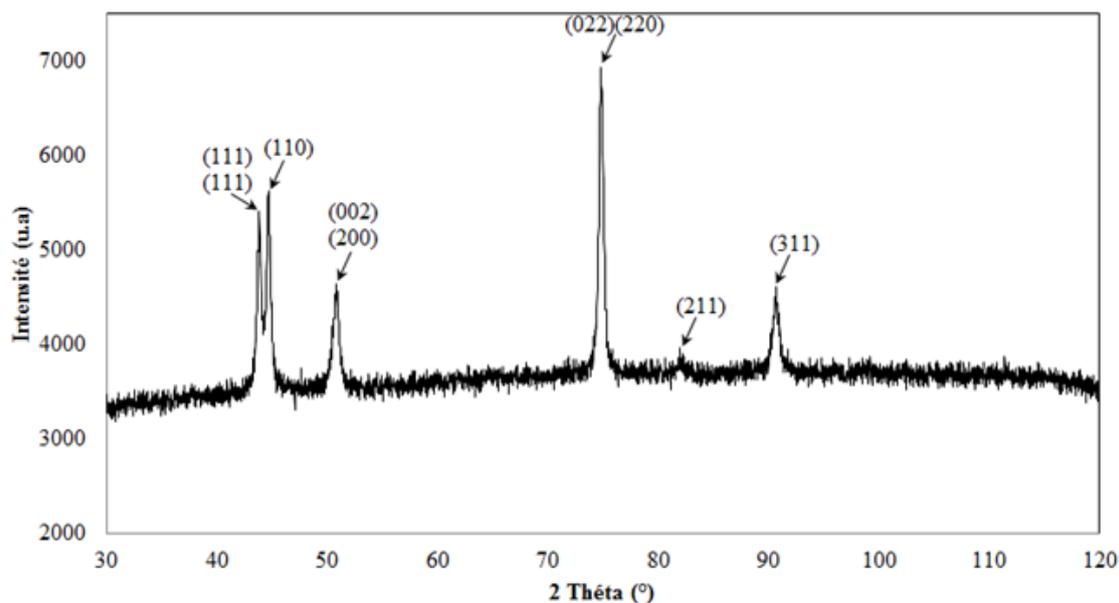


Figure IV.2 : Diffractogramme de l'acier inoxydable austénitique 316.

IV.3. Evolution du potentiel de corrosion libre de l'acier avant l'immersion dans l'acide nitrique :

La Fig. IV.3 a) et b) représente l'OCP (potentiel en circuit ouvert) de l'acier 316, après une heure et huit jours d'immersion, dans la solution de 0.9 % NaCl en masse sans et avec un gramme glucose, en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité. La figure montre qu'au début d'immersion, le potentiel libre de corrosion n'est pas le même pour tous les échantillons, ceci est peut-être dû soit, aux phases qui constituent l'acier étudié ou bien aux conditions de corrosion. L'échantillon en absence du champ magnétique présente un potentiel plus noble au moment d'immersion. Pendant les quinze premières minutes d'immersion le potentiel libre de corrosion diminue pour tous les échantillons, en suite il augmente. Sauf pour l'échantillon en immersion dans la solution de 0.9% en masse de chlorure de sodium en présence du champ magnétique, le potentiel commence à augmenter après environ huit minutes d'immersion, et ce dernier devient le plus noble après vingt minutes d'immersion. La présence du champ magnétique augmente le potentiel libre de corrosion de l'acier inoxydable 316 durant la première heure d'immersion. En effet, le potentiel libre est le plus noble en présence du champ magnétique. Après quelques jours d'immersion, nous constatons que l'acier 316 en immersion dans la solution de NaCl en présence du champ magnétique de faible intensité présente constamment un potentiel de corrosion le plus noble, en revanche, l'acier 316 en immersion dans la solution de NaCl

contenant du glucose sous un faible champ magnétique montre un potentiel de corrosion libre le moins noble pour huit jours d'immersion.

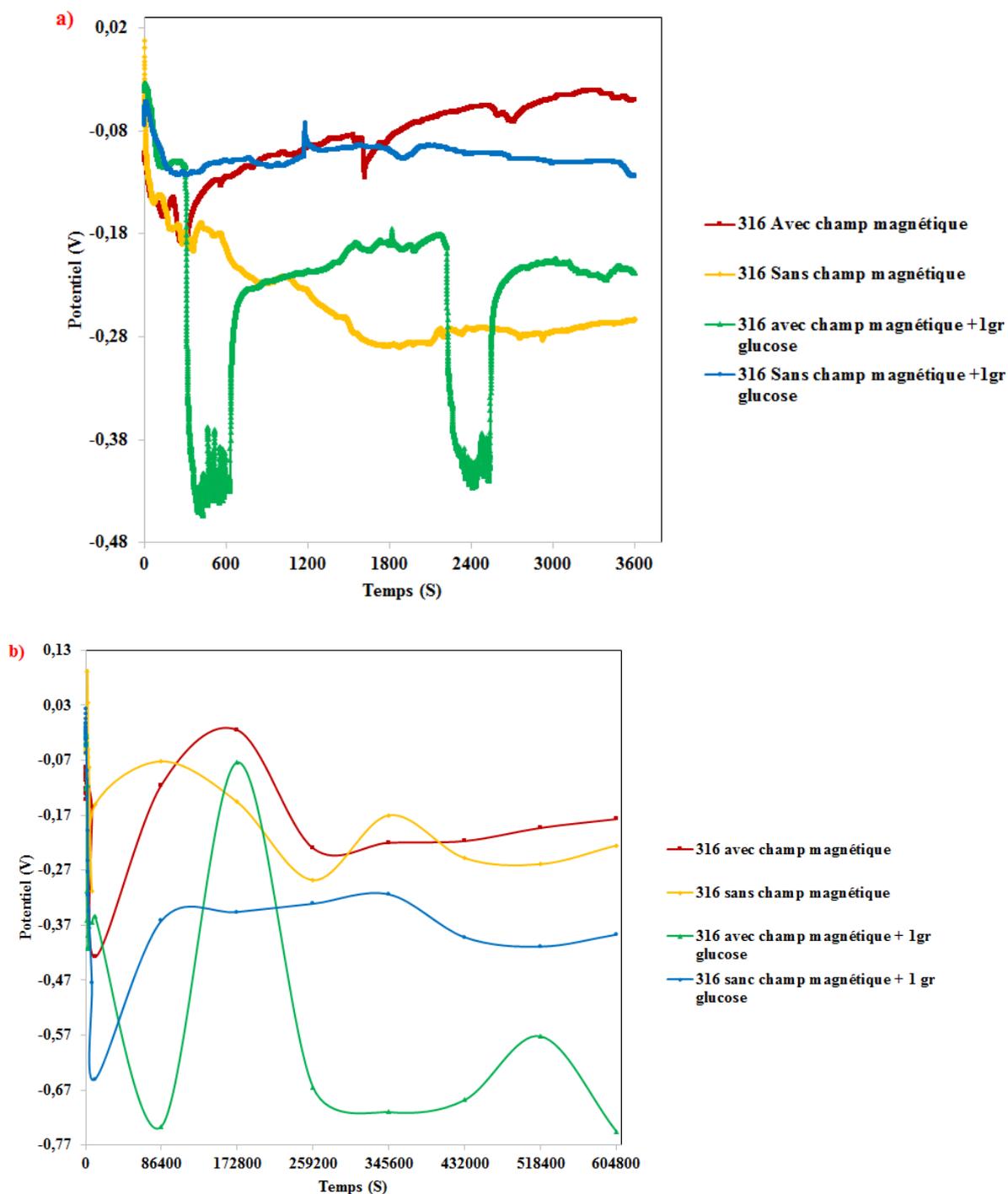
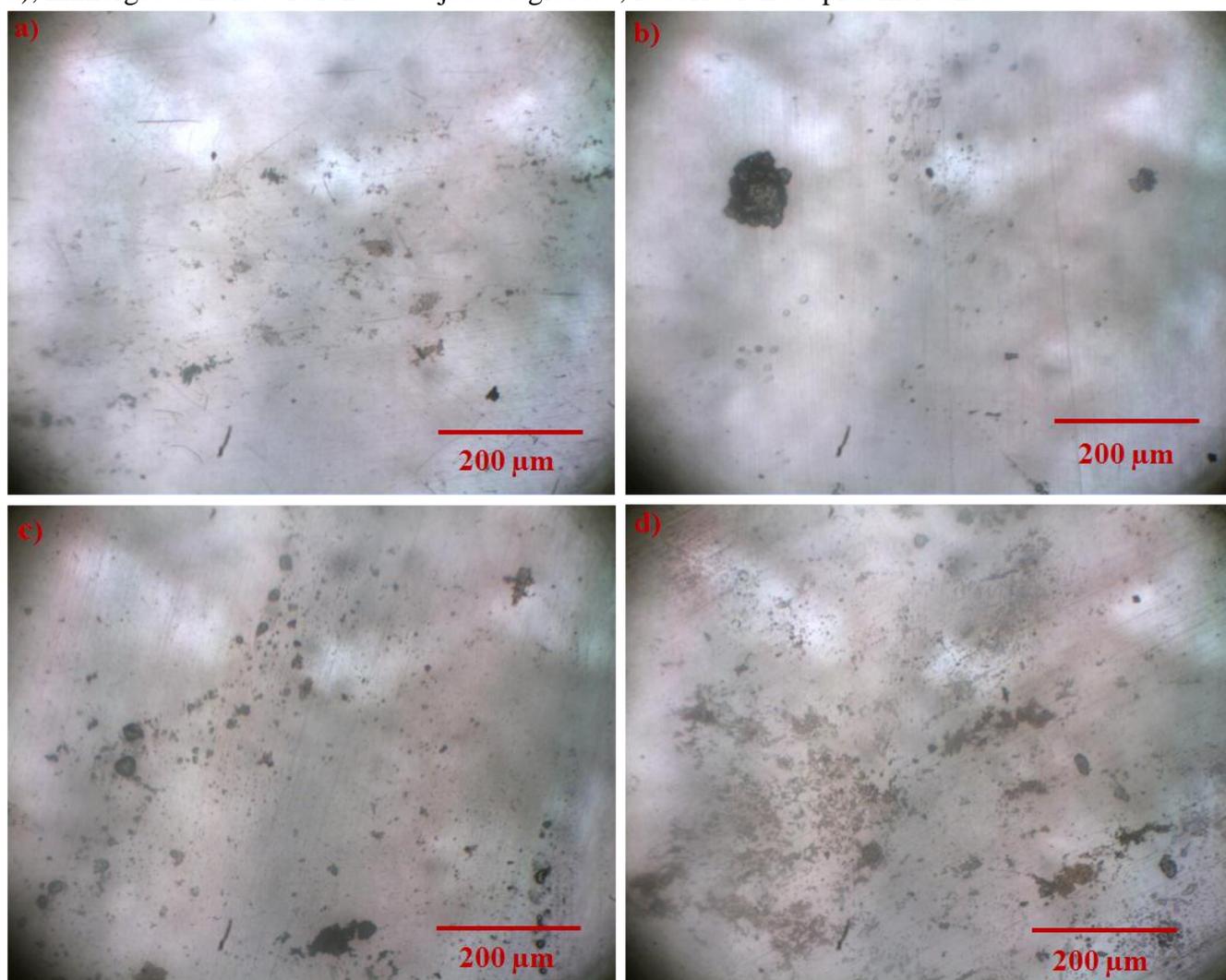


Figure IV.3 : Potentiel en circuit ouvert de l'acier 316 dans la solution 0.9% NaCl en masse sans et avec un gramme du glucose, en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité : a) une heure d'OCP, b) huit jours d'OCP.

IV.4. Evolution de la morphologie de corrosion en absence de l'immersion dans l'acide nitrique :

La Fig. IV.4 montre la morphologie de la corrosion de l'acier étudié, après une heure d'OCP dans la solution de 0.9% en masse NaCl : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec l'ajout d'un gramme du glucose et en présence du champ magnétique et d) avec l'ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique.

Nous avons constaté une apparition d'une corrosion localisée sur la surface des quatre échantillons. Les phases qui sont moins noble que la matrice se corrodent et se dissous, en compensation, les phases qui sont plus noble que la matrice sont protégées et leurs contours sont corrodés. Nous distinguons, pour les deux échantillons représentés par les Fig. (IV. C et d), immergés dans la solution avec ajout de glucose, la corrosion est plus insistante.



La Figure IV.4 : Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après une heure de corrosion dans la solution de 0.9% NaCl en masse : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec l'ajout d'un gramme du glucose en présence du champ magnétique et d) avec l'ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique.

La Fig. IV.5 montre la morphologie de la corrosion de l'acier austénitique 316, après huit jours d'OCP dans la solution de 0.9% NaCl en masse : a) en présence du champ

magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec un gramme glucose en présence du champ magnétique et d) avec un gramme glucose en absence du champ magnétique.

Nous avons constaté qu'après huit jours d'immersion la surface des échantillons, en immersion dans la solution de NaCl en présence d'un champ magnétique de faible intensité, présentés par la fig. (IV. a et b), présente une corrosion qui tend vers une corrosion généralisée, plus une corrosion localisée. En reprise, la surface d'échantillon en immersion en absence du champ magnétique, présenté sur la fig. (IV. b), présente uniquement une corrosion localisée. Les phases qui sont moins noble que la matrice se corrodent, en contrepartie, les phases qui sont plus noble que la matrice sont protégées et leurs contours sont corrodés. Et la surface de l'échantillon, présenté sur la fig. (IV. d), immergé dans la solution avec l'ajout d'un gramme de glucose en absence du champ magnétique de faible intensité, montre une corrosion localisée sous une forme dendritique, ceci est peut-être dû à l'ajout du glucose dans la solution. Le champ magnétique modifié considérablement la morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316.

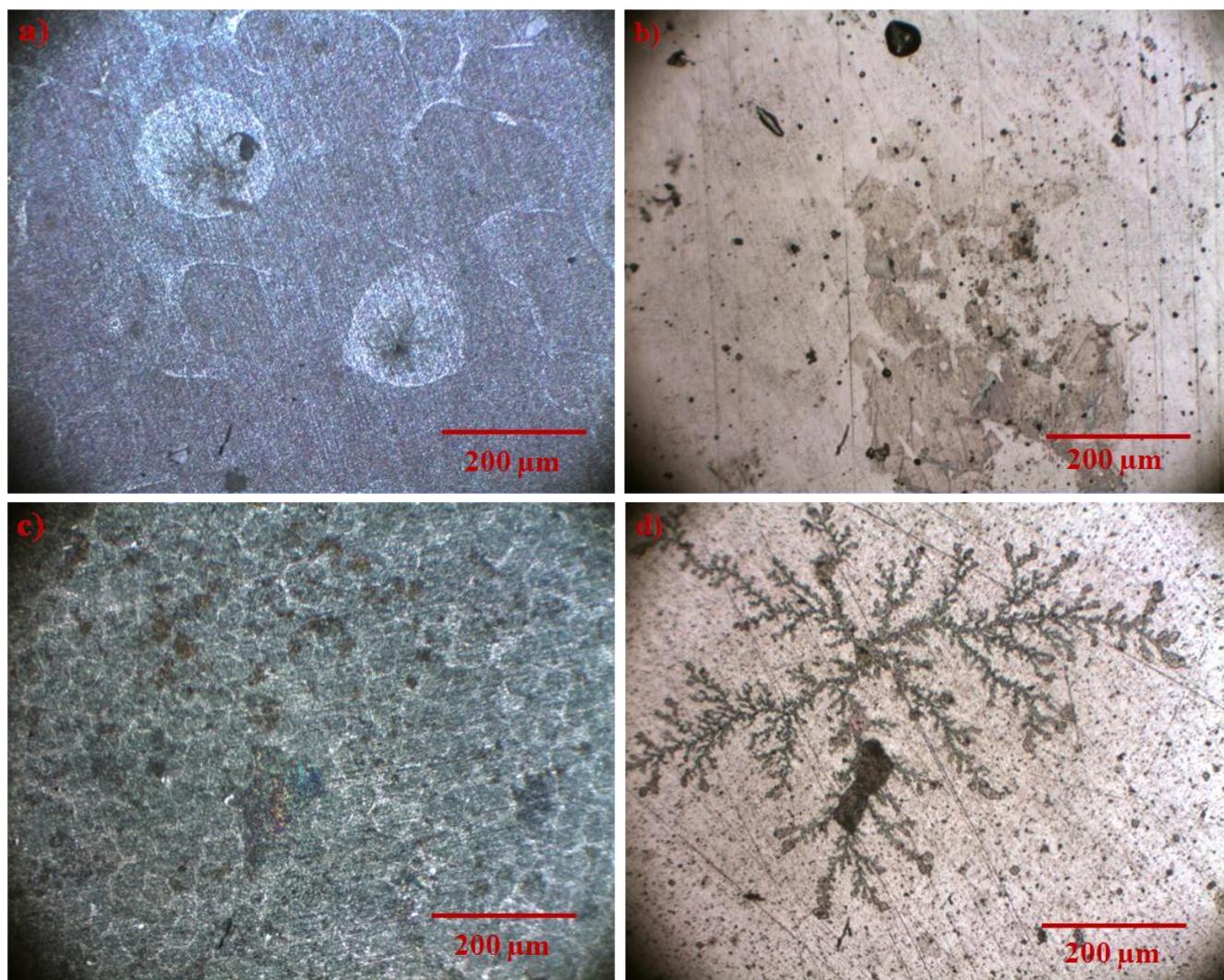


Figure IV.5: Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après huit jours de corrosion dans la solution de 0.9% NaCl en masse : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec l'ajout d'un gramme du glucose en présence du

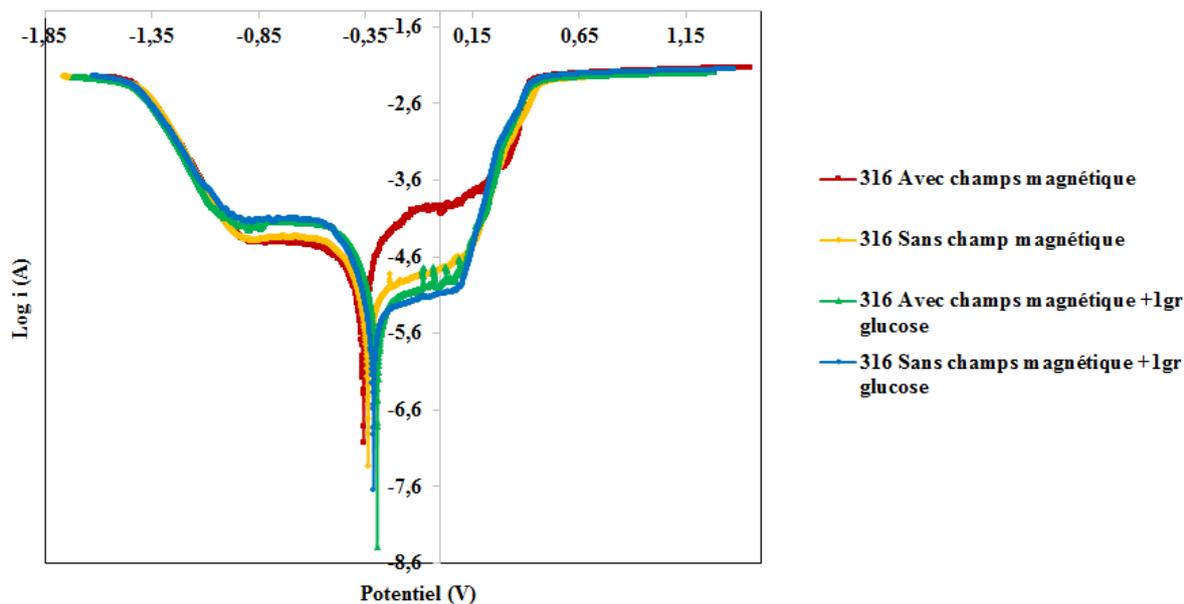
champ magnétique et d) avec l'ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique.

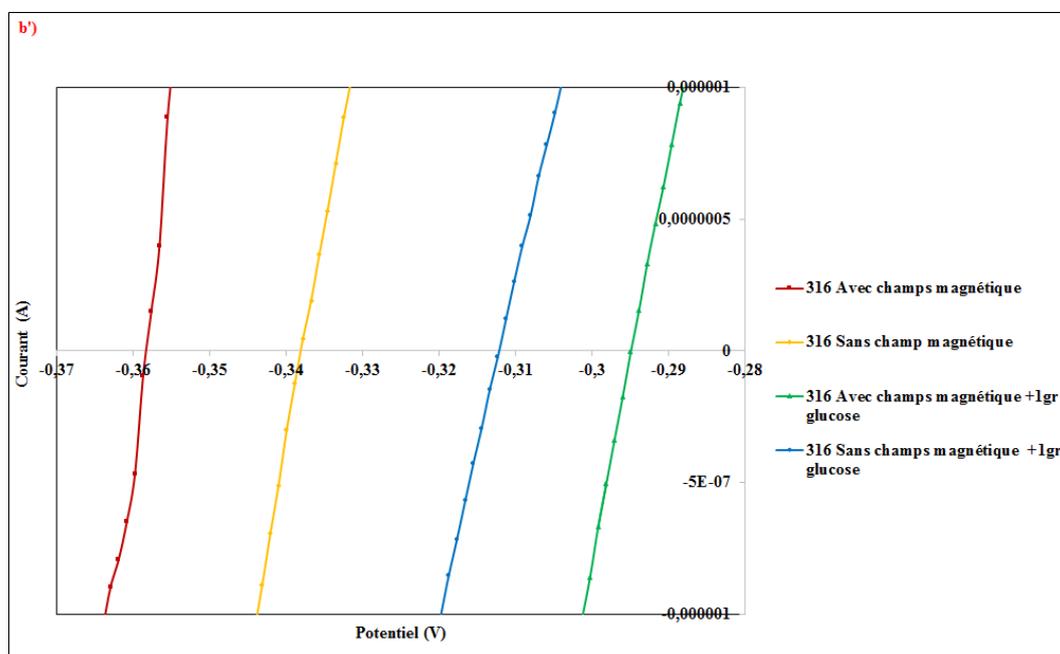
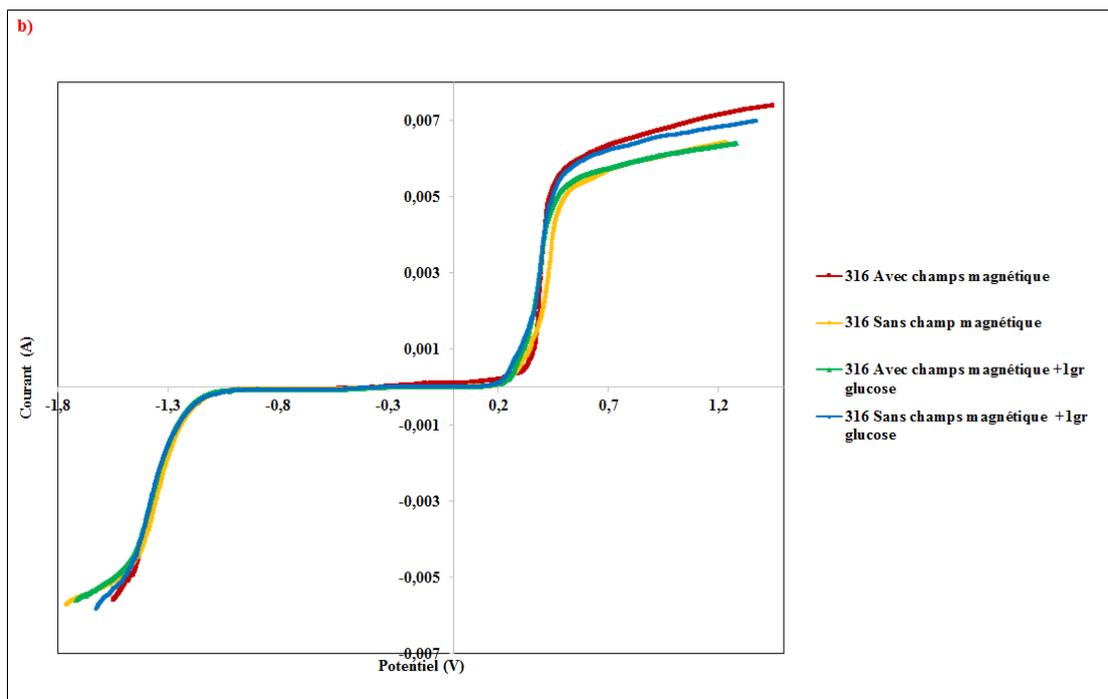
IV.5. Résultats potentiodynamiques (Courbes intensité-potentiel) sans immersion dans l'acide nitrique :

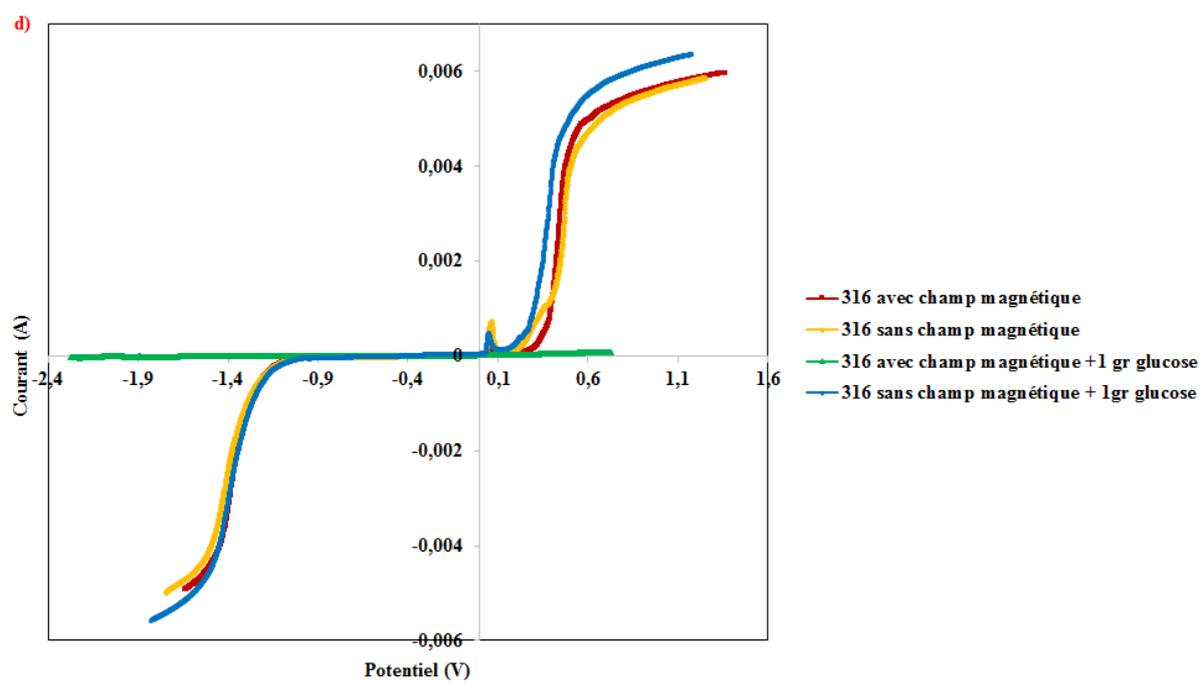
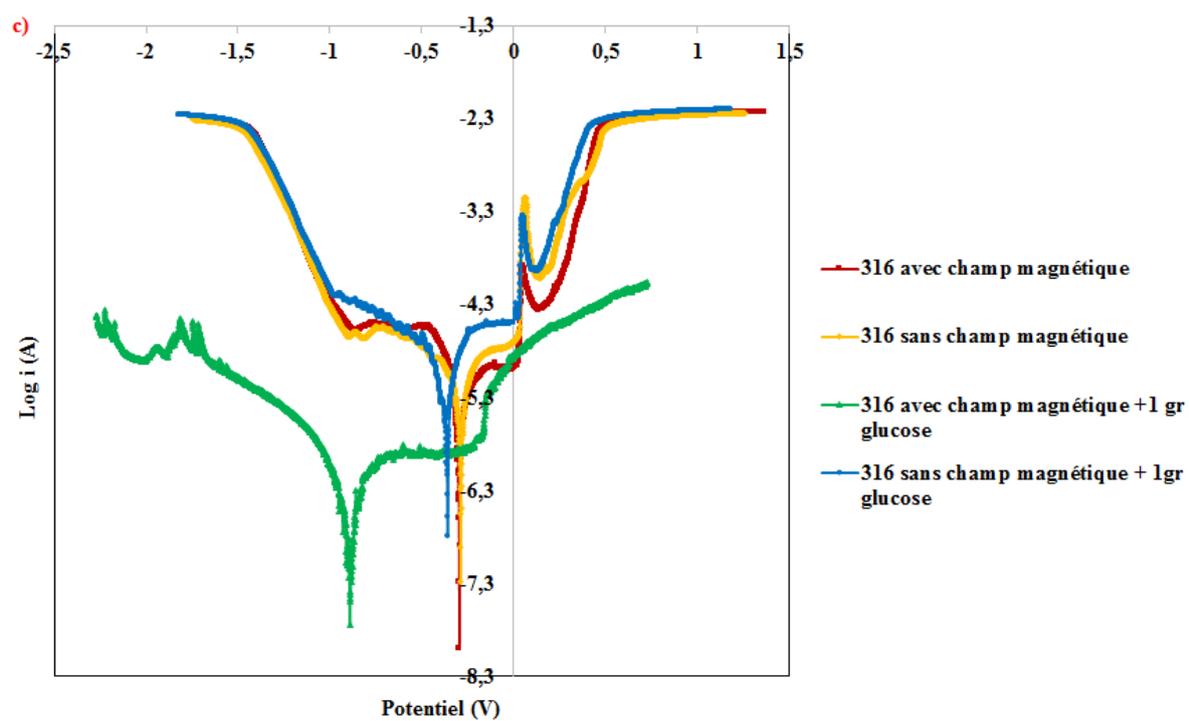
La Fig. IV.6, représente les résultats des essais de polarisation potentiodynamique de l'acier austénitique 316, dans la solution de 0.9% NaCl en masse avec et sans ajout du glucose, en présence et en absence du champ magnétique, après une heure et huit jours de corrosion. La Fig.6 (a-c) représente les courbes de polarisation ($\log(i)=f(E)$), après 1 heure et 8 jours de corrosion respectivement. La Fig. (b-d) montre les courbes de polarisation ($i=f(E)$) et les courbes (b'-d') montrent l'effet loupe des courbes de polarisation ($i=f(E)$) après une heure et huit jours respectivement.

Nous avons constaté à partir de ces courbes que, les potentiels de corrosion pour les échantillons en immersion dans la solution avec l'ajout d'un gramme de glucose en présence et en absence du champ magnétique sont proches et plus noble, notamment dans le cas de polarisation après 1 heure de corrosion. Les courbes de polarisation des deux échantillons en immersion dans la solution de 0.9% NaCl en présence du champ magnétique et sans champ magnétique, sont très proches pour le cas de polarisation après huit jours d'immersion et de même pour les potentiels de corrosion et ils ont plus noble. Pour huit jours d'immersion les courbes de polarisation montrent la passivation de tous les échantillons.

a)







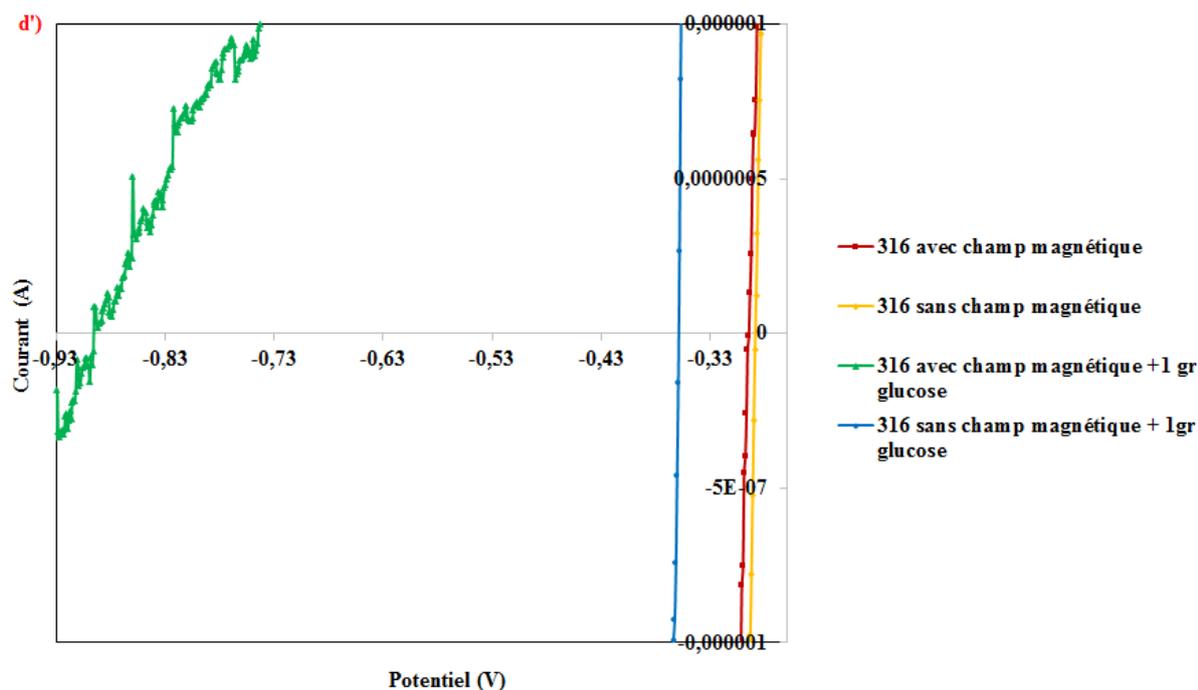


Figure IV.6 : Courbes de polarisation d'acier austénitique 316, dans la solution de 0.9% NaCl en masse avec et sans ajout du glucose, en présence et en absence du champ magnétique, après une heure et huit jours de corrosion, (a-c) Courbes ($\log(i)=f(E)$), (b-d) courbes de polarisations ($i=f(E)$) et (b'-d') effet loupe des courbes de polarisations ($i=f(E)$), pour une heure et huit jours respectivement.

IV.6. Micrographie optique après polarisation et sans traitement :

Afin de voir l'effet de l'ajout d'un gramme de glucose, et de la présence du champ magnétique sur la morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, des observations au microscope, ont été faites après chaque test de polarisation dans la solution de 0.9% NaCl en masse avec et sans ajout du glucose, en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité, dans les mêmes conditions de balayage du potentiel (-1.5 V et 1.5 V). Les résultats de l'observation sont représentés sur la Fig. IV.7. Et IV.8. Ces figures, montrent la morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après une heure et huit jours respectivement, d'OCP suivie de la polarisation dans la solution de chlorure de sodium : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec l'ajout d'un gramme du glucose en présence du champ magnétique et d) avec l'ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique. Nous avons constaté sur la fig.IV.7, la surface de tous les échantillons montre une corrosion localisée. Pour les échantillons en immersion dans une solution de NaCl en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité, la corrosion est localisée est plus insistante et uniformément distribuée sur la surface. En contrepartie, les échantillons en immersion dans la solution de NaCl contenant un gramme de glucose en présence et en absence du champ magnétique présentent à la surface une corrosion localisée (piqûration), mais juste dans certaines régions. L'ajout de glucose dans la solution modifié considérablement la morphologie de corrosion de l'acier inoxydable 316 et il a un effet inhibiteur de corrosion dans ce cas.

Nous avons constaté sur la fig. (IV.8), que la surface de l'échantillon en immersion dans la solution de 0.9% NaCl en présence du champ magnétique de faible intensité, présentée sur la fig. IV.8 (a), présente une corrosion localisée moins importante, mais le restes des échantillons en immersion dans la solution contenant du glucose en présence et en absence du champ magnétique et sans glucose en absence du champ magnétique les fig. (IV.8 b, c, d), présentent sur leur surface une corrosion généralisée plus une corrosion localisée les phases les moins noble se corrode .

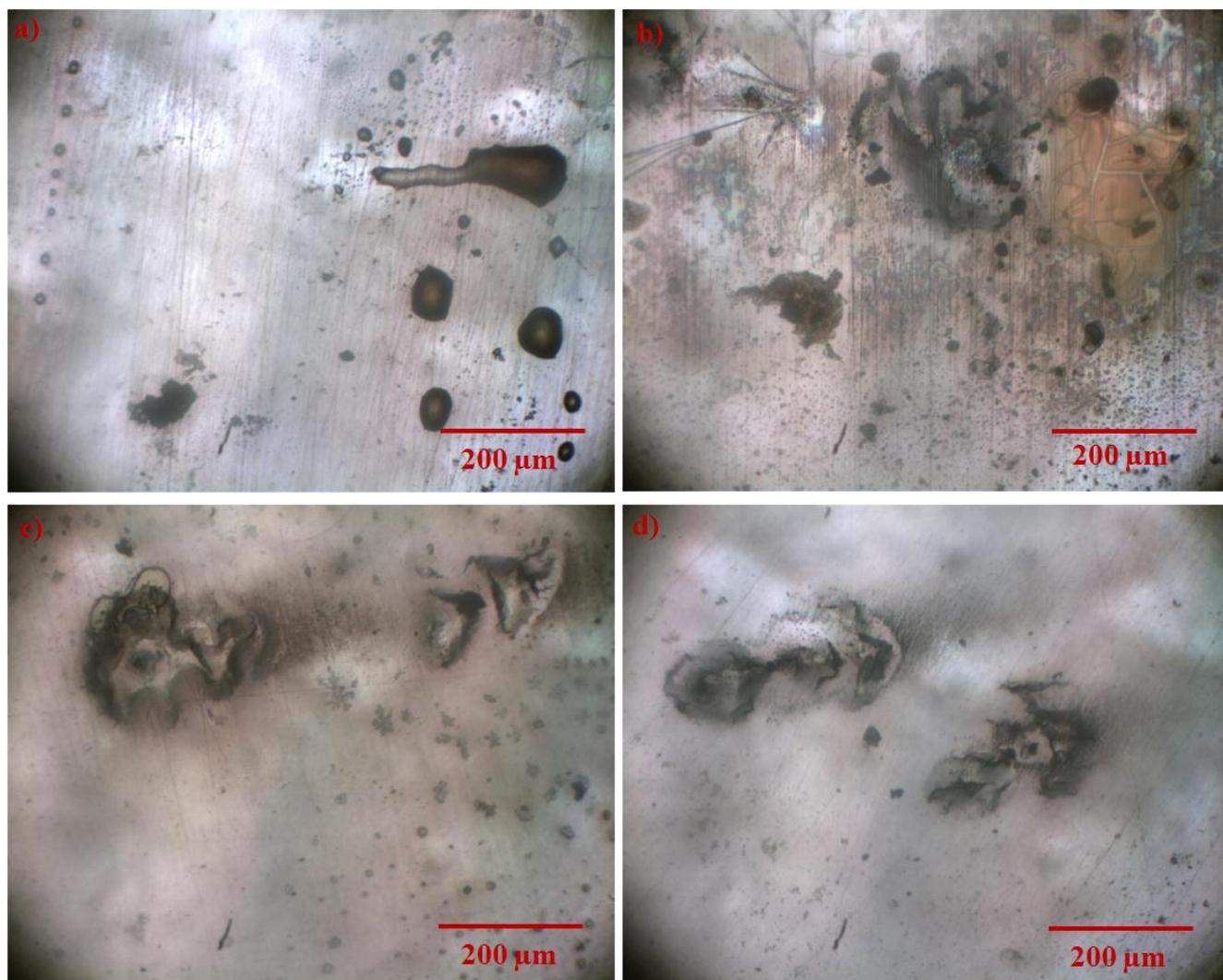


Figure IV.7 : Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après une heure d'OCP et polarisation dans la solution de 0.9% en masse de chlorure de sodium : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec un gramme glucose en présence du champ magnétique et d) avec un gramme glucose en absence du champ magnétique.

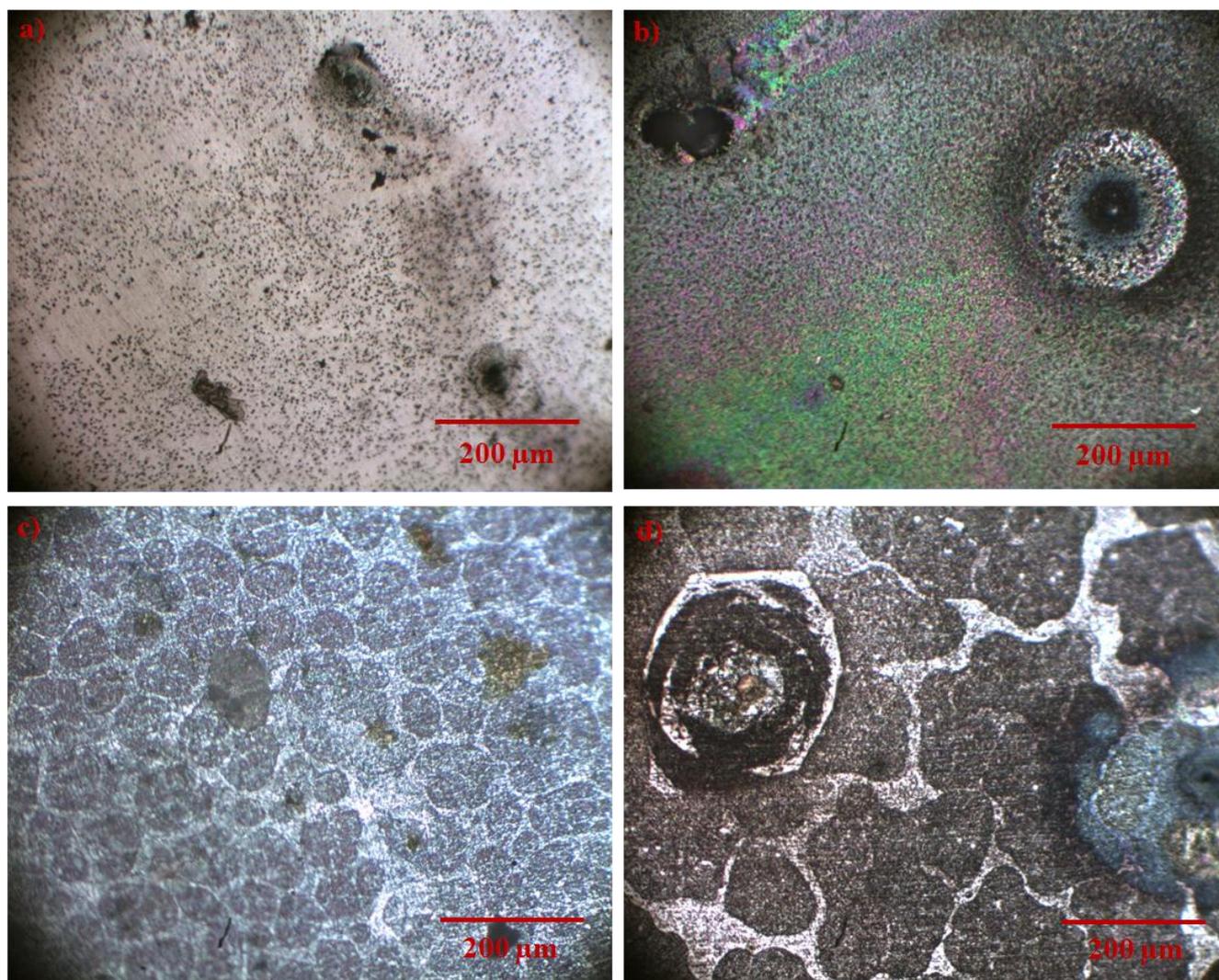
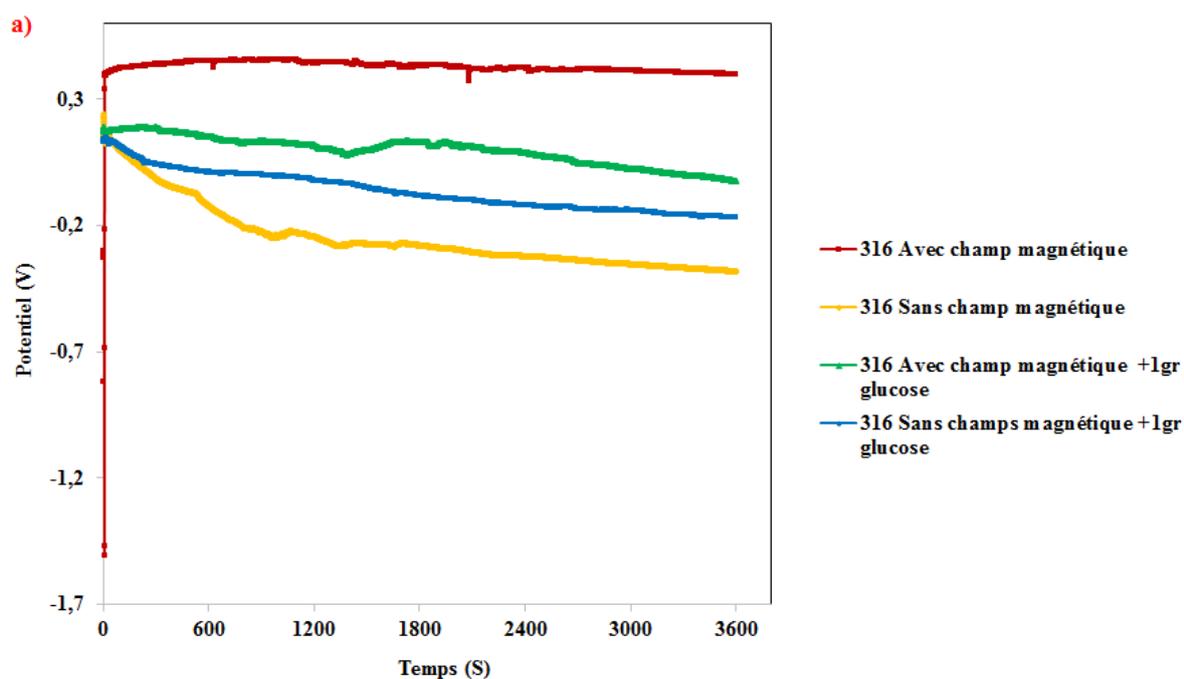


Figure IV.8 : Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après huit jours d'OCP et polarisation dans la solution de 0.9% en masse de chlorure de sodium : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec un gramme glucose en présence du champ magnétique et d) avec un gramme glucose en absence du champ magnétique.

IV.7. Evolution du potentiel de corrosion libre de l'acier inoxydable 316 après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique :

La Fig. IV.9 a) et b) représente le potentiel en circuit ouvert (OCP) de l'acier 316, après immersion de trois jours dans l'acide nitrique, suivi d'immersion d'une heure et huit jours, dans une solution de 0.9% en masse NaCl, sans et avec ajout d'un gramme de glucose, en présence et en absence du champ magnétique. La Fig. IV.9 (a et b) montre que l'immersion préalable de l'acier 316 dans l'acide nitrique, suivi de l'immersion de cet alliage dans une solution de NaCl avec ou sans ajout du glucose en la présence du champ magnétique, modifie le potentiel libre de corrosion de l'acier inoxydables 316. Nous

observons que le potentiel de corrosion libre est plus noble, pour l'échantillon en immersion dans la solution en absence du champ magnétique, lors des premières minutes d'immersion, puis diminue. En revanche, les potentiels de corrosion d'échantillon, en immersion dans la solution en présence du champ magnétique de faible intensité et celui en immersion dans la solution contenant du glucose et en présence du champ magnétique, est les moins noble lors des premières minutes d'immersion, puis ils augmentent et après environ 2 minutes de corrosion ils deviennent les plus noble et se stabilise pour une heure de corrosion. A partir de cette dernière ils diminuent encore une autre fois, par la suite, à partir de troisième jour d'immersion, le potentiel libre de corrosion de ces échantillons deviennent moins noble, que le potentiel de corrosion de l'échantillon en immersion dans la solution de 0.9% NaCl sans glucose et sans champ magnétique, qui devient le plus noble, jusqu'au cinquième jour d'immersion, ou il diminue, et au-delà, le potentiel libre de corrosion des deux échantillons en présence du champ magnétique soient les plus noble. Nous avons constaté, à partir de la figure IV.9 (a-b), que l'ajout de glucose a la solution et la présence du champ magnétique à un effet adéquat sur le potentiel libre de corrosion de l'acier 316, suite à l'immersion dans l'acide nitrique.



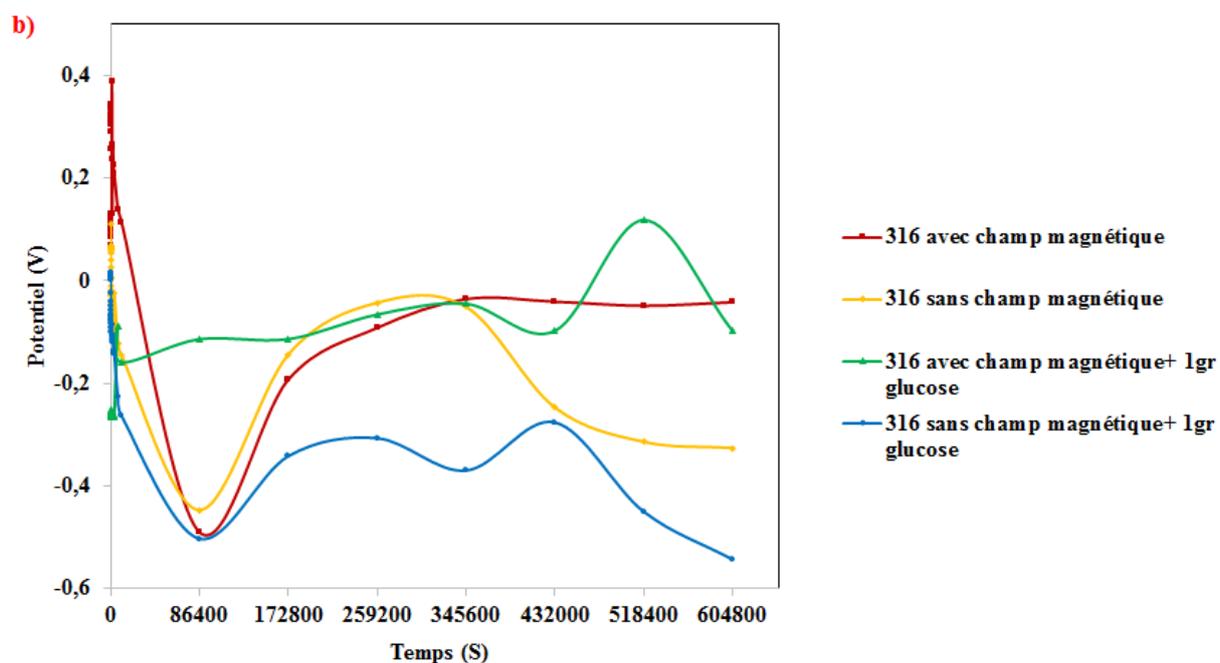


Figure IV.9 : Potentiel de circuit ouvert de l'acier 316, dans la solution 0.9% NaCl sans et avec un gramme du glucose, en présence et en absence du champ magnétique, après immersion dans l'acide nitrique : a) après une heure d'OCP, b) après huit jours d'OCP.

IV.9. Microstructure de l'acier 316 après immersion dans l'acide nitrique :

La Fig. IV.10 montre la morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après 3 jours d'immersion dans l'acide nitrique suivi d'un rinçage à l'eau distillée, pour les échantillons : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, nous observons la formation de piqûres sur la surface des deux échantillons, et elle est plus marquée pour l'échantillon en absence du champ magnétique.

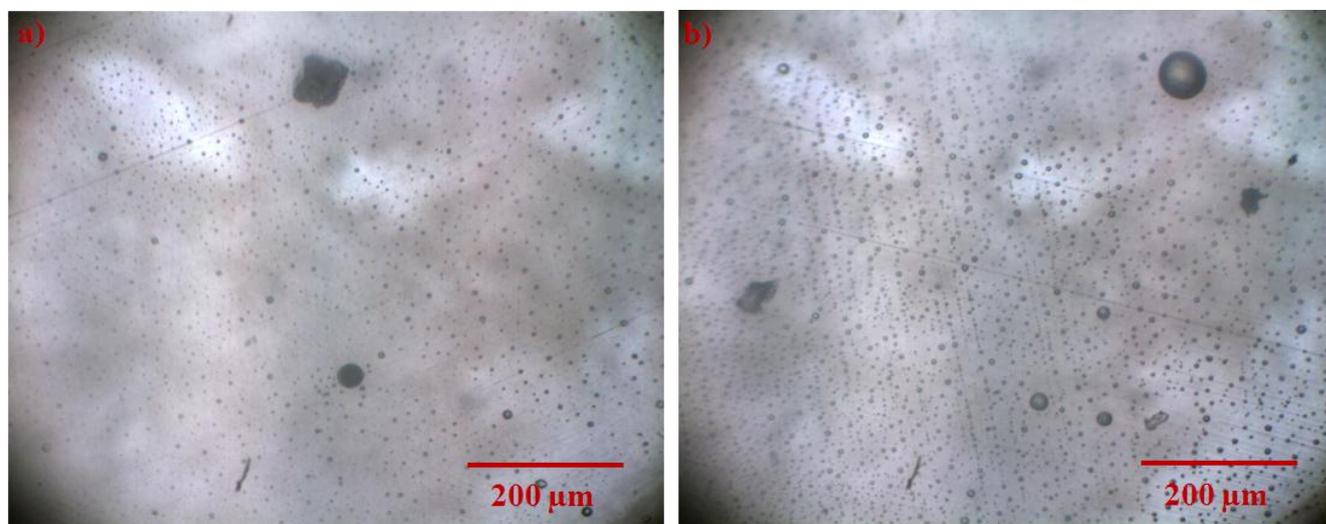
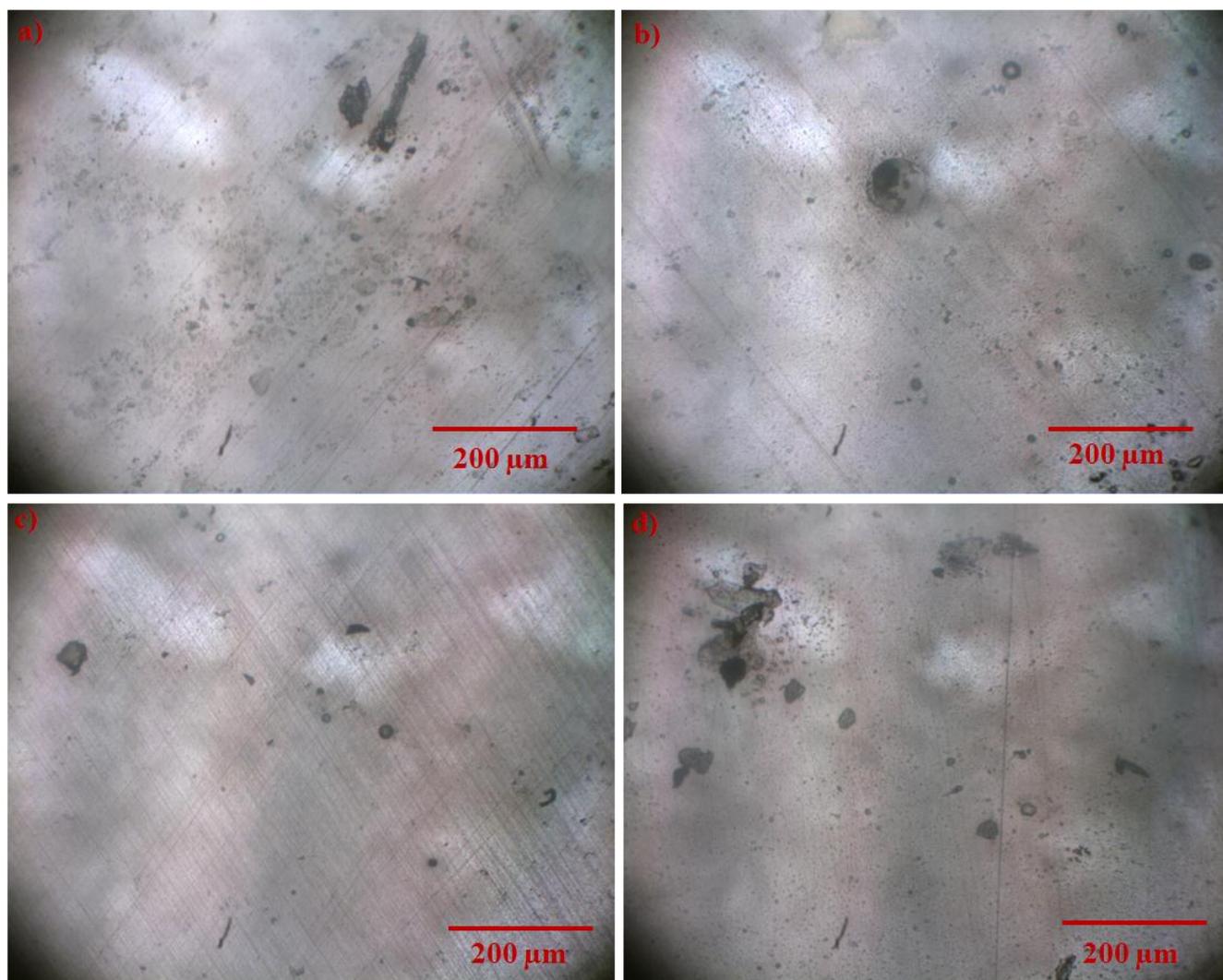


Figure IV.10 : Morphologie de corrosion de l'acier étudié, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique suivi d'un rinçage à l'eau distiller, a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique.

IV.10. Morphologie de corrosion après une heure et huit jours de corrosion dans une solution de 0.9% NaCl en masse suite à trois jours d'immersion dans l'acide nitrique :

La Fig. IV.11 montre la morphologie de la corrosion de l'acier étudié, après immersion de 3 jours dans l'acide nitrique et rinçage avec l'eau distiller, suivi d'une heure d'immersion dans la solution de 0.9% NaCl : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec l'ajout d'un gramme du glucose en présence du champ magnétique et d) avec l'ajout d'un gramme de glucose en absence du champ magnétique.

La Fig. IV.11 (a, b et d) concerne les échantillons en immersion en présence et en absence du champ magnétique pour (a et b), et en immersion dans la solution contenant du glucose en absence du champ magnétique pour (d), nous avons remarqué une corrosion localisée accentuée et uniformément répartie sur la surface. Concernant la surface de l'échantillon en immersion dans la solution contenant d'un gramme de glucose et en présence champ magnétique, présenté sur la fig. IV.11 (c), présente une corrosion localisée moins importante. De ce fait nous pouvons dire que le glucose et le champ magnétique ont un effet d'inhibiteur sur la corrosion. Le matériau est mieux protégé après traitement chimique et en présence de ces deux facteurs glucose et champ magnétique pour une heure de corrosion.



La figure IV.11 : Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable étudié, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique, rincé à l'eau distiller, et suivi d'une heure d'immersion dans la solution de 0.9% en masse NaCl : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec l'ajout d'un gramme du glucose en présence du champ magnétique et d) avec l'ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique.

La Fig. IV.12 montre la morphologie de la corrosion de l'acier austénitique 316, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique et rincé par la suite à l'eau distiller, et suivi de huit jours d'immersion dans la solution de 0.9% NaCl : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec l'ajout d'un gramme du glucose en présence du champ magnétique et d) avec l'ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique.

La figure.12 (a-b) montre la morphologie de corrosion, en présence et en absence de champ magnétique après trois jours immersion dans l'acide nitrique, rinçage, et huit jours d'immersion dans la solution de 0.9 en masse % de NaCl. Cette figure montre que champ magnétique à un effet sur la morphologie de la corrosion, ceci-dit la surface de l'échantillon en immersion en présence du champ magnétique présentée sur la Fig. (a), montre une corrosion généralisée plus une corrosion localisée (piques). Tandis que, l'échantillon

présenté sur la fig. IV.12 (b), en immersion dans la solution en absence du champ magnétique, ça surface présente uniquement une corrosion localisée pour 8 jours d'immersion.

La Fig. (c-d) représente la morphologie de la corrosion avec l'ajout d'un gramme du glucose dans la solution, en présence et en absence du champ magnétique respectivement. Nous ne constatons que l'ajout du glucose à la solution et en présence du champ magnétique a un effet inhibiteur sur la morphologie de la corrosion de l'acier 316 après 8 jours d'immersion. En effet, pour le cas de l'ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique, la corrosion observée sur la Fig. (b) est plus remarquable. De ce fait nous pouvons dire que le glucose et le champ magnétique ont un effet d'inhibiteur sur la corrosion. Le matériau est mieux protégé après traitement chimique et en présence de ces deux facteurs glucose et champ magnétique pour 8 jours de corrosion.

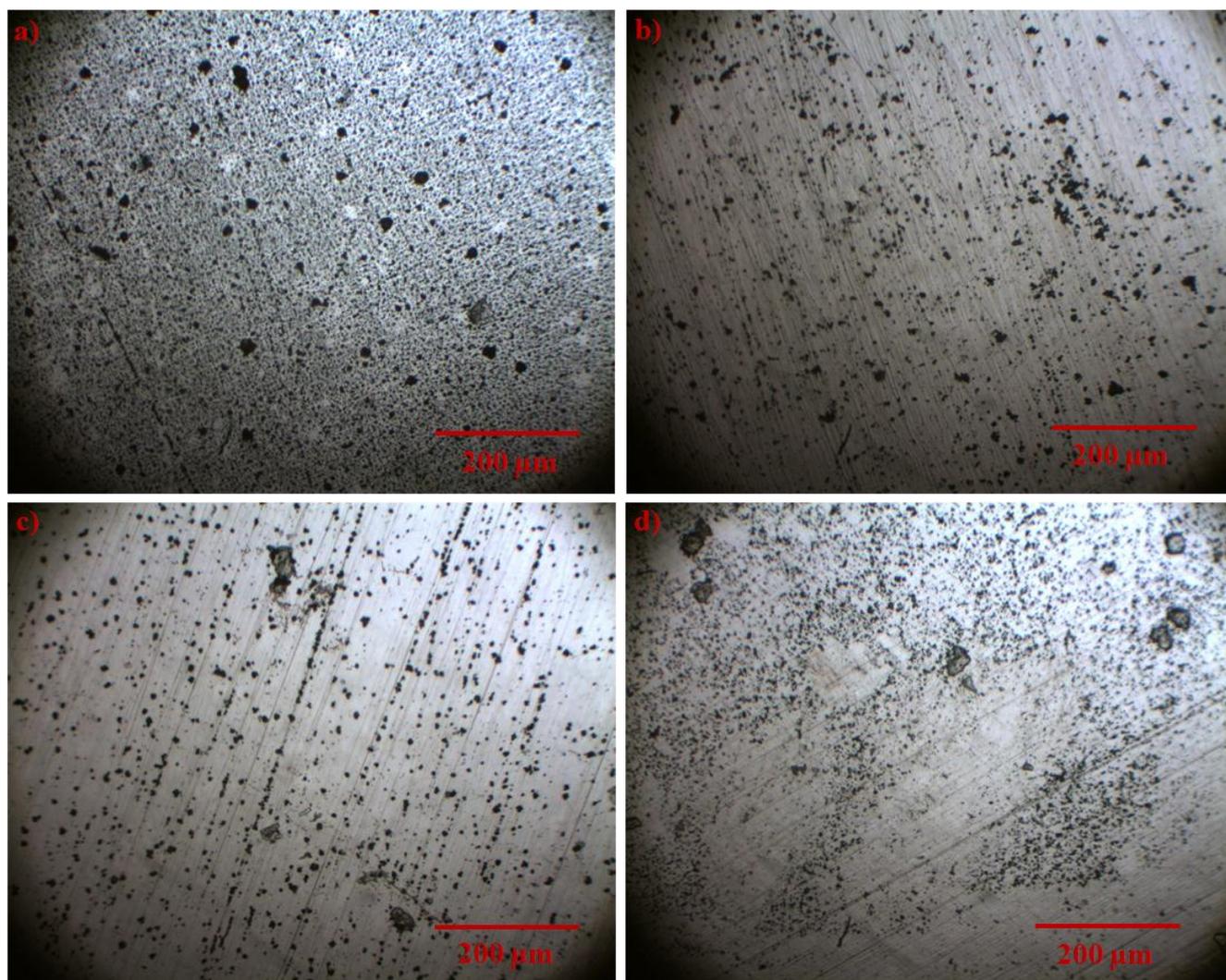


Figure IV.12 : Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique suivi de huit jours d'immersion dans la solution de 0.9% en masse de NaCl : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec un ajout d'un gramme du glucose en présence du champ magnétique et d) avec un ajout d'un gramme du glucose en absence du champ magnétique.

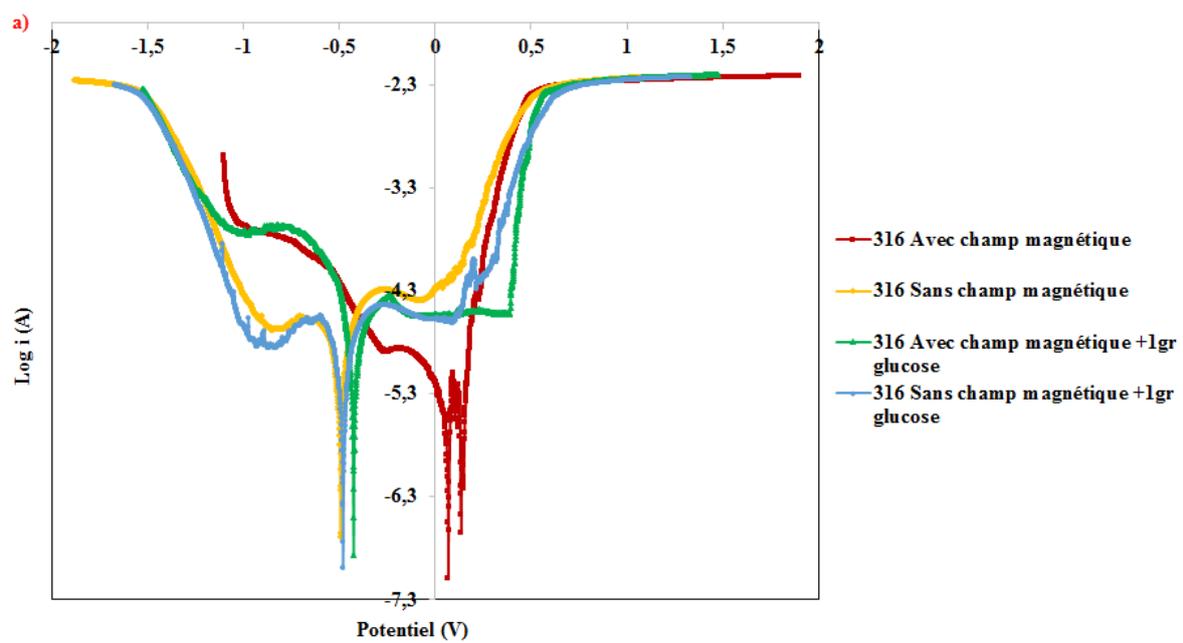
IV.11. Résultats potentiodynamiques (Courbes intensité-potentiel) après trois jours d'immersion préalable dans l'acide nitrique :

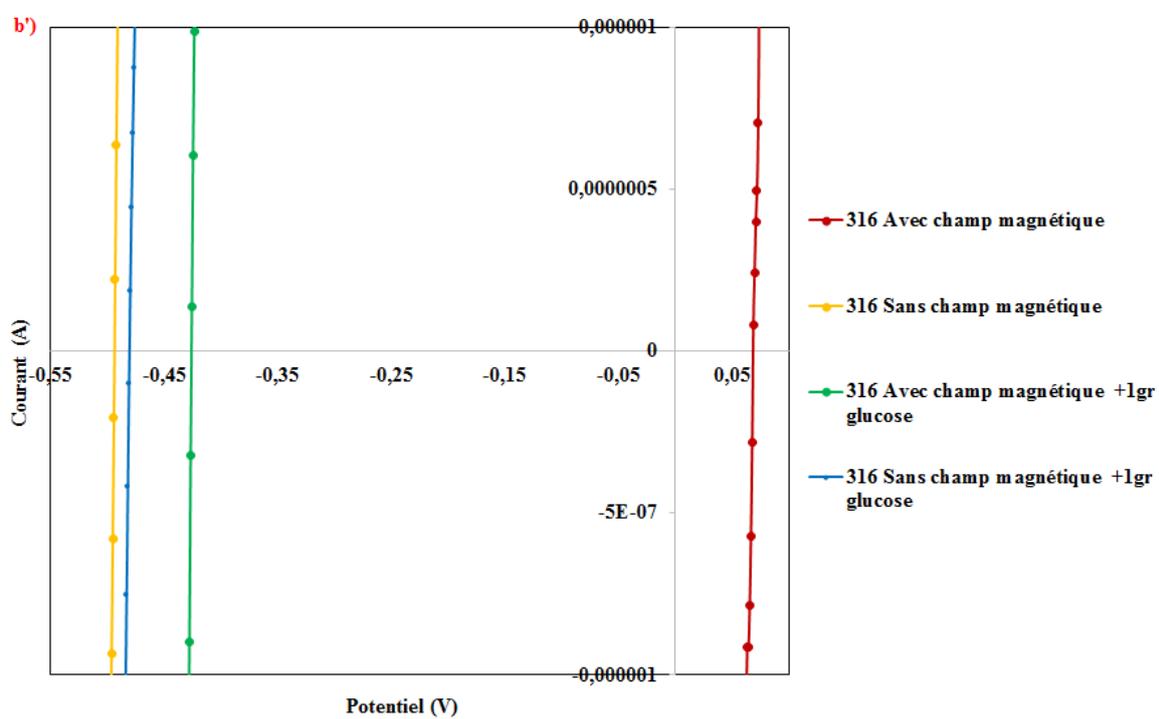
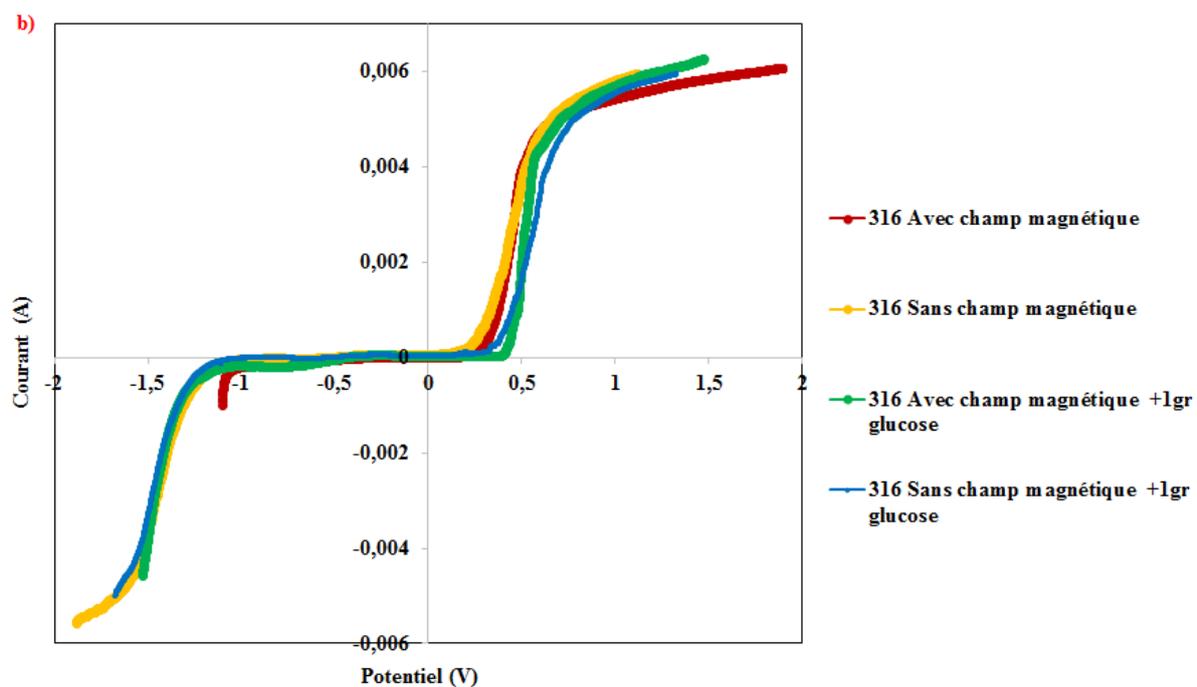
La Fig. IV.13, représente les résultats des essais de polarisation potentiodynamique de l'acier inoxydable 316, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique et immersion une heure et huit jours dans la solution de 0.9% NaCl avec et sans ajout du glucose, en présence et en absence du champ magnétique.

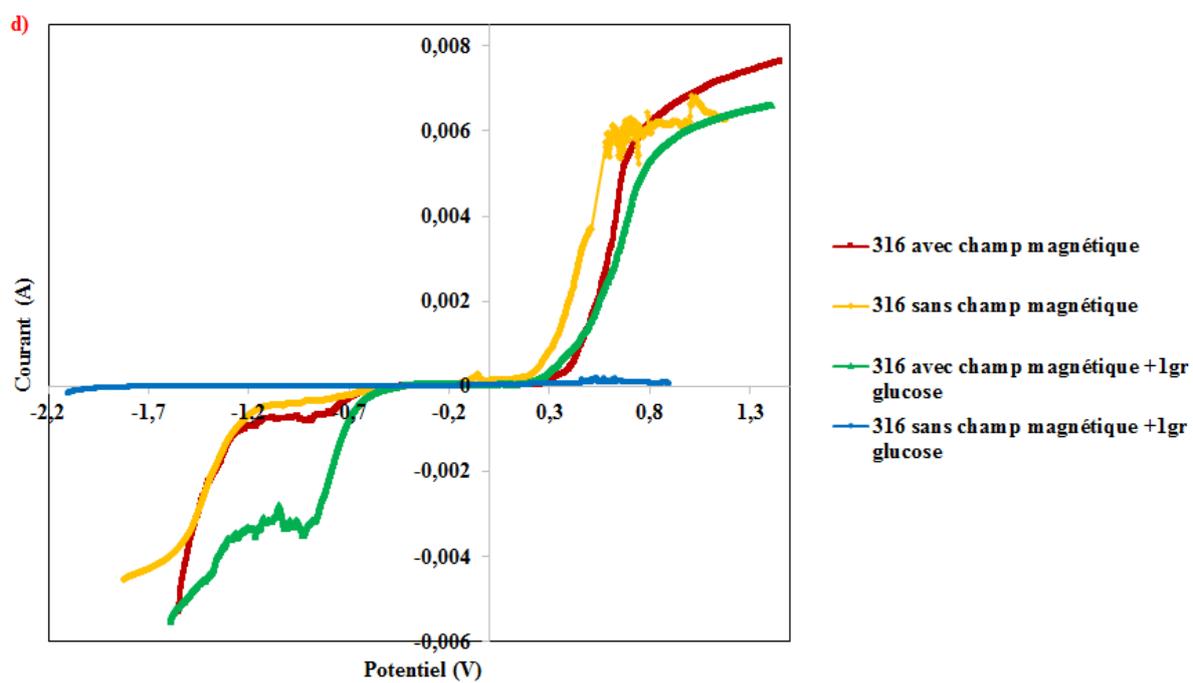
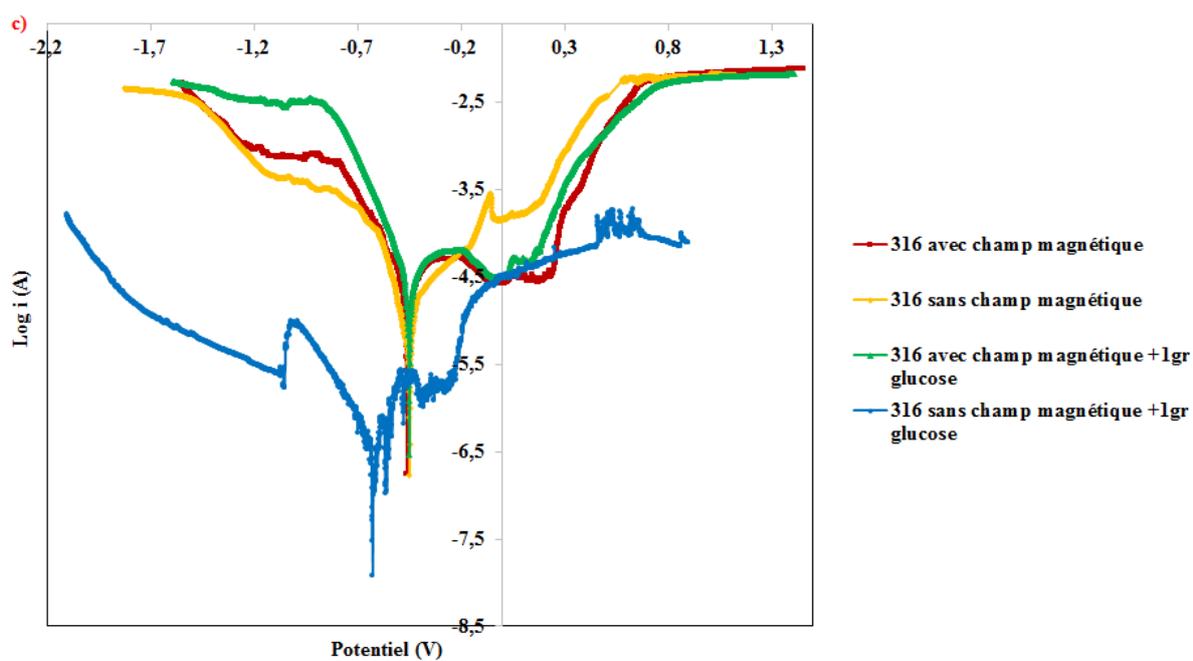
La figure IV.13 (a-c) représente les courbes de polarisation ($(\log(i)=f(E))$), après une heure et huit jours de corrosion respectivement. La figure IV.13 (b-d), montre les courbes de polarisation ($i=f(E)$) après une heure et huit jours de corrosion respectivement, et les courbes (b'-d') montrent l'effet loupe des courbes de polarisation ($i=f(E)$) après 1 heure et huit jours respectivement.

Le potentiel de corrosion de l'échantillon en immersion en présence du champ magnétique de faible intensité est le plus noble, et celui en absence du champ magnétique est le moins noble après 1 heure d'immersion. Par contre après huit jours de corrosion c'est le potentiel de l'échantillon en corrosion en absence du champ qui est le plus noble, et il est très proche de celui de l'échantillon en immersion en présence du champ et ajout de glucose. Et le potentiel qui est le moins noble c'est l'échantillon qui se corrode en absence du champ magnétique et avec ajout de glucose. De cet acte nous pouvons dire que le potentiel de corrosion de l'acier 316 est anobli avec le traitement chimique et la présence du champ magnétique pour une heure de corrosion. En contrepartie, pour 8 jours de corrosion le traitement chimique suffit pour que le potentiel, de l'acier inoxydable 316, devient plus élevé.

La résistance de polarisation peut être facilement déterminée pour tous les échantillons après une heure d'immersion. Cette dernière est difficile à déterminer pour l'échantillon qui s'est corrodé en absence du champ magnétique et avec ajout du glucose après huit jours de corrosion. Pour 8 jours d'immersion les courbes de polarisation montrent la passivation de tous les échantillons.







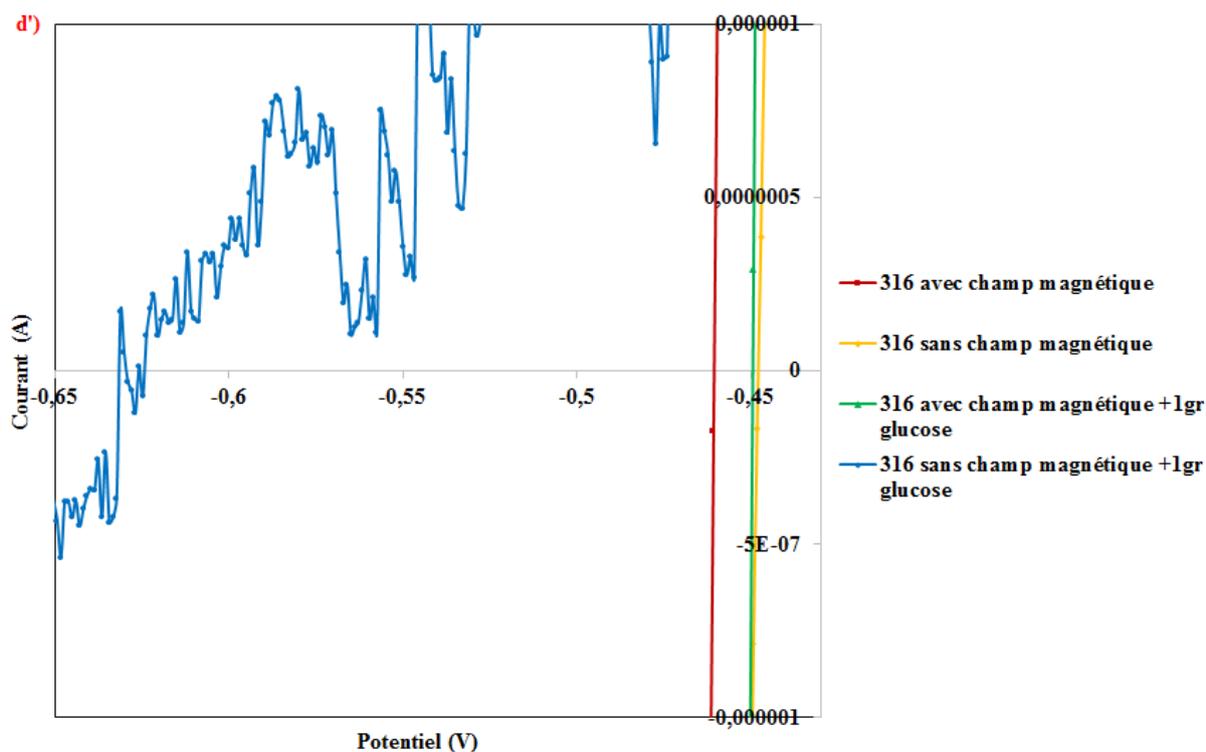


Figure IV.13 : Courbes de polarisation d'acier austénitique 316, dans la solution de 0.9% en masse NaCl avec et sans ajout du glucose, en présence et en absence du champ magnétique, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique : (a-c) Courbes ($\log(i)=f(E)$), (b-d) courbes de polarisations ($i=f(E)$) et (b'-d') effet loupe des courbes de polarisations ($i=f(E)$), pour une heure et huit jours de corrosion respectivement.

IV.12. Microstructure de l'acier inoxydable 316 après polarisation suite à trois jours d'immersion dans l'acide nitrique :

Afin de voir l'influence de trois jours d'immersion dans l'acide nitrique, de l'effet de l'ajout d'un gramme de glucose, et de la présence champ magnétique sur la morphologie de la corrosion. Des observations au microscope, ont été faites après chaque test de polarisation dans la solution de 0.9% NaCl avec et sans glucose, en présence et en absence du champ magnétique de faible intensité. Les résultats de l'observation sont représentés sur la Fig. IV.14 et 15.

Nous avons constaté sur la fig.IV.14, la surface de tous les échantillons montre une corrosion localisée. Et la surface de l'échantillon, présenté sur la fig. (IV.14. c), en immersion dans la solution contenant un gramme de glucose et en présence du champ magnétique de faible intensité, montre une corrosion localisée, en plus de la piqûration, une corrosion sous une forme dendritique, ceci est peut-être dû à l'ajout du glucose dans la solution.

La fig. IV.15 (a et c), montre que la surface des échantillons en immersion pendant huit jours, en présence du champ magnétique de faible intensité et ensuite polarisés, présente une corrosion moins marquée. En contrepartie, la surface des échantillons en immersion en absence du champ magnétique, présentée sur la fig. IV.15 (b et d), présente une corrosion plus

marquée, particulièrement, pour le cas avec ajout de glucose, la corrosion est généralisée. L'acier inoxydable 316 supporte mieux le balayage du potentiel entre -1.5V et 1.5 V en présence du champ magnétique.

Ceci nous a permis de dire que le traitement chimique dans l'acide nitrique est bénéfique pour l'acier inoxydable étudié, il l'a protégé.

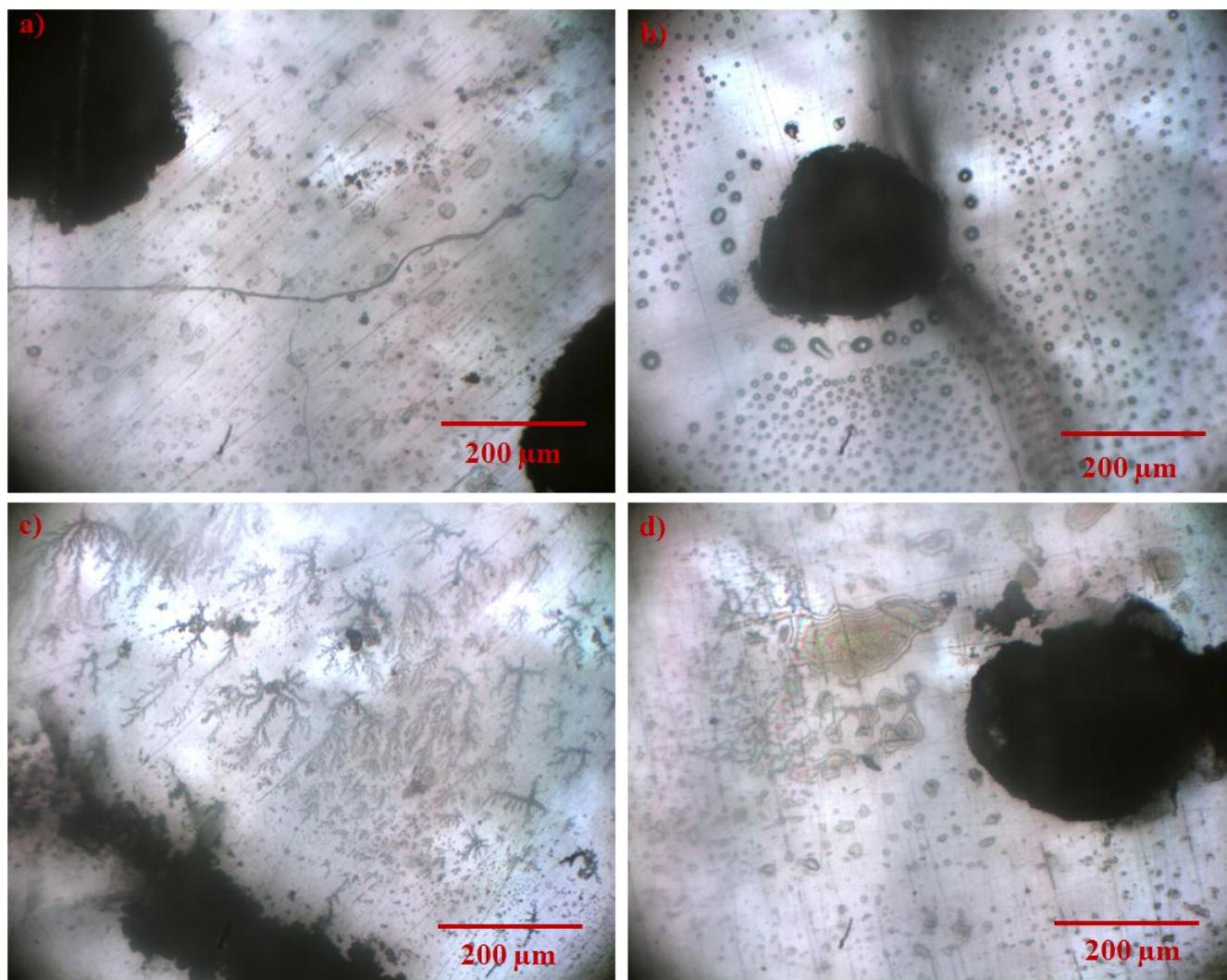


Figure IV.14 : Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après une heure d'OCP et polarisation dans la solution de 0.9% en masse de NaCl, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec un gramme de glucose en présence du champ magnétique et d) avec un gramme de glucose en absence du champ magnétique.

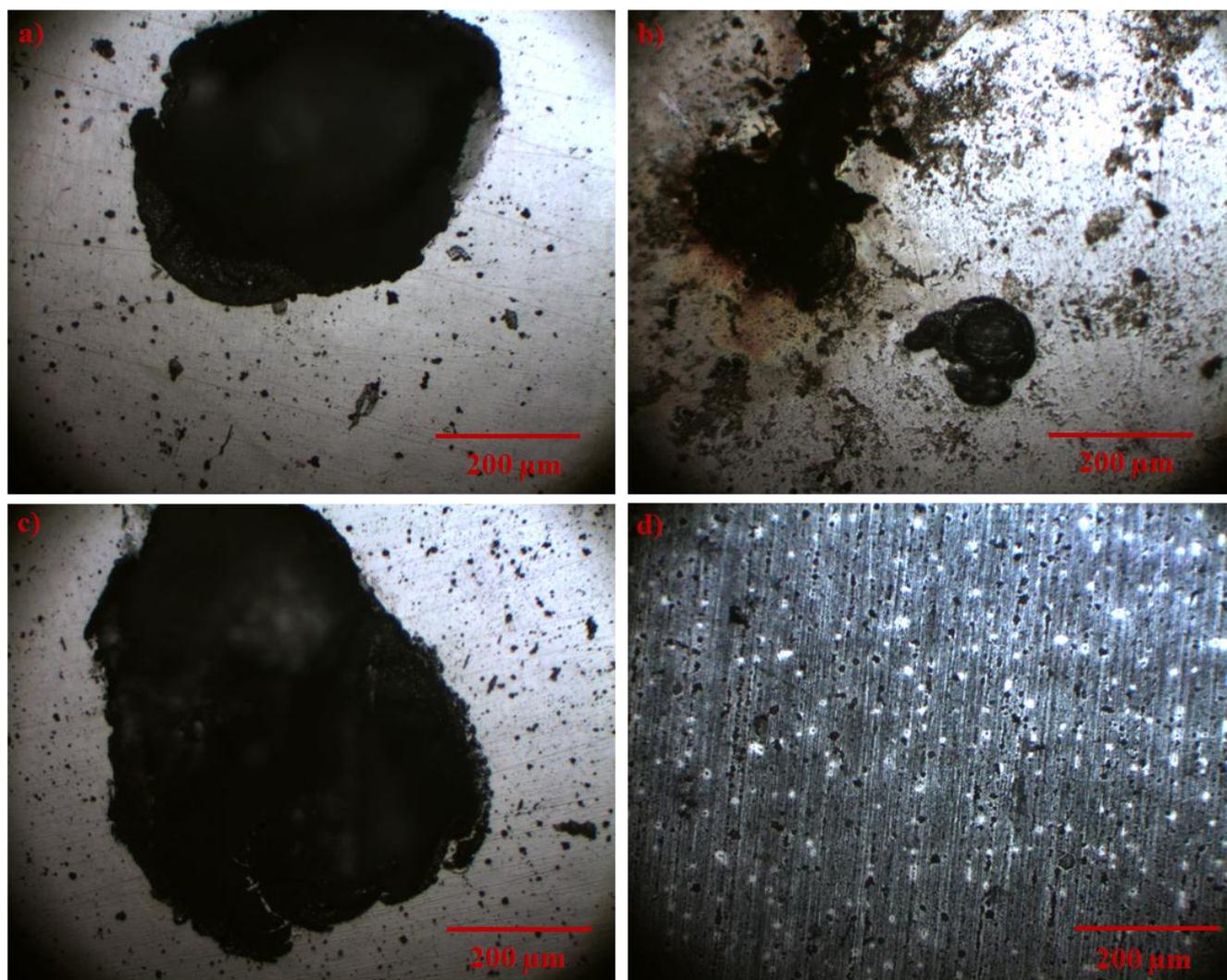


Figure IV. 15 : Morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable 316, après huit jours d'OCP et polarisation dans la solution de 0.9% en masse de NaCl, après trois jours d'immersion dans l'acide nitrique : a) en présence du champ magnétique, b) en absence du champ magnétique, c) avec 1g glucose en présence du champ magnétique et d) avec 1g glucose en absence du champ magnétique.

IV.13. Détermination de la résistance de polarisation R_p :

La résistance de polarisation est déterminée à partir de la courbe $I=f(E)$ au voisinage immédiat du potentiel de corrosion de l'échantillon (Fig. IV.13). La résistance de polarisation est l'inverse de la pente de la courbe de polarisation au voisinage de $i=0$ ($R_p=\Delta E/\Delta i$), l'unité de mesure est l'Ohm par centimètre carré (Ω/cm^2). La résistance de polarisation est inversement proportionnelle au courant de corrosion. Plus la valeur de cette résistance est élevée, plus faible est l'intensité du courant de corrosion.

Quand la densité de courant est égale à zéro, on peut déterminer le potentiel de corrosion (Fig. IV.16) à partir de ces mêmes courbes $i=f(E)$, (Fig. IV.13).

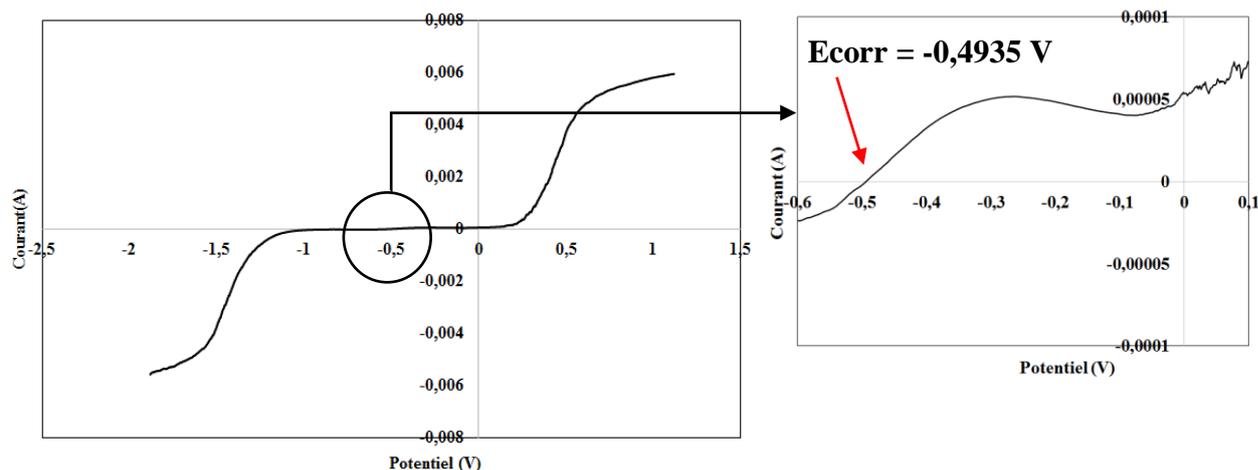


Figure IV.16 : Courbe de polarisation potentiodynamique $i = f(E)$

Le tableau IV.1 et 2, regroupent les valeurs des paramètres électrochimiques relevés sur les courbes de polarisation obtenues. L'application d'un champ magnétique de faible intensité et l'ajout du glucose et trois jours d'immersion dans l'acide nitrique, modifiés la résistance de polarisation et le potentiel de corrosion. (Tab. IV.1 et IV.2)

Tableau IV.1 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion de l'acier INOXYDABLE316, sans traitement chimique.

Echantillons	Temps de corrosion	Rp (Ω/cm^2)	Ecorr (v)
INOXYDABLE316 avec champ magnétique	Une heure	4358	-0.3581
INOXYDABLE316 sans champ magnétique	Une heure	6219	-0.3383
INOXYDABLE316 avec champ magnétique + 1gr glucose	Une heure	6765	-0,2949
INOXYDABLE316 sans champ magnétique +1gr glucose	Une heure	7446	-0,3123
INOXYDABLE316 avec champ magnétique	Huit jours	7671	-0,2944
INOXYDABLE316 sans champ magnétique	Huit jours	6058	-0,2888
INOXYDABLE316 avec champ magnétique + 1gr glucose	Huit jours	7306	-0,8953
INOXYDABLE316	Huit jours	2509	-0,3586

sans champ magnétique +1gr glucose			
--	--	--	--

Tableau IV.2 : Résistance à la polarisation et potentiel de corrosion de l'acier INOXYDABLE316, après trois jours d'immersion préalable dans l'acide nitrique.

Echantillons	Temps de corrosion	Rp (Ω/cm^2)	Ecorr (v)
INOXYDABLE316 avec champ magnétique	une heure	2935	0.0679
INOXYDABLE316 sans champ magnétique	une heure	2506	-0.4935
INOXYDABLE316 avec champ magnétique + 1gr glucose	une heure	2330	-0,4260
INOXYDABLE316 sans champ magnétique +1gr glucose	une heure	3737	-0,4802
INOXYDABLE316 avec champ magnétique	Huit jours	858	-0,4606
INOXYDABLE316 sans champ magnétique	Huit jours	1922	-0,4475
INOXYDABLE316 avec champ magnétique + 1gr glucose	huit jours	713	-0,0449
INOXYDABLE316 sans champ magnétique +1gr glucose	Huit jours	1988	-0,6316

IV.14. La dureté de l'acier inoxydable 316 :

Nous avons utilisé une charge de 60Kgf pour réaliser l'essai de dureté et nous avons obtenu 3 empreintes, tableau IV.3.

Tableau IV.3: Dureté de l'acier inoxydable INOXYDABLE316.

D1 (mm)	D2 (mm)	La charge de l'essai (60 kg)
0.82	0.82	60
0.78	0.80	60
0.74	0.76	60

La dureté minimale Vickers (aciers austénitiques) suivi de la lettre H indiquant la dureté [42].

Tableau IV.4 : La dureté minimale Vickers (aciers austénitiques) [42]

Classes de qualités	12H (doux)	21H (écroui à froid, dur)
Dureté Vickers, HV min	125	210

La dureté de l'acier étudié :

HV= 179,79

IV.15. Micro dureté de l'acier inoxydable étudié :

La micro dureté Vickers (HV) pour le matériau utilisé dans notre étude est donnée dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5: Micro dureté de l'acier inoxydable INOXYDABLE316.

Échantillon	Diagonale 1	Diagonale 2	HV (1.000)
INOXYDABLE 316	108.27	109.14	156
	109.14	108.81	156
	107.73	109.12	157
	107.15	106.04	163
	106.38	105.66	164
Moyenne			159.2

VI. Conclusion :

Ce travail avait pour but l'étude du comportement à la corrosion de l'acier inoxydable de type 316 dans une solution de 0,9% de NaCl en masse, avec et sans l'ajout de 1 gramme de glucose, en présence et en absence de champ magnétique de faible intensité, et avec un traitement chimique, afin d'évaluer si ça améliorera notre alliage mieux supporter les conditions biologiques à l'intérieur du corps humain.

Les résultats obtenus grâce au suivi de l'évolution du potentiel à circuit ouvert et le tracé des courbes de polarisation, la dureté et la micro-dureté, la diffraction des rayons X, ainsi que les observations microscopiques, nous ont permis de conclure ce qui suit :

- La corrosion localisée est présente dans tous les échantillons.
- Le champ magnétique modifie considérablement la morphologie de la corrosion de l'acier inoxydable INOXYDABLE316.
- Le glucose a un effet inhibiteur de corrosion dans le cas de non traitement chimique.
- L'acier 316 est mieux protégé après un traitement chimique et en la présence du glucose et du champ magnétique.
- Avec l'immersion dans l'acide nitrique, l'ajout du glucose à la solution et la présence de champ magnétique a un effet adéquat sur le potentiel libre de corrosion de l'acier 316.
- L'application d'un champ magnétique de faible intensité et l'ajout du glucose et l'immersion de trois jours dans l'acide nitrique a modifiés la résistance de polarisation et le potentiel de corrosion.
- Après une immersion de 8 jours, tous les échantillons sont passivés.
- Le traitement chimique de l'acier 316 l'a bien protégé.
- La dureté de l'acier inoxydable est parfaitement dans l'intervalle requis pour des implants dans un corps humain.

Références :

- [1] OUCHEN Mohamed, EFFET DU pH DU MILIEU SUR LA CORROSION DE L'ACIER INOXYDABLE 304 L, université HADJ LAKHDAR BATNA, département de mécanique, 2013.
- [2] Matériau de choix pour l'agroalimentaire, la consommation de l'inox devrait progresser en 2021. (s. d.). Agro Media. <https://www.agro-media.fr/dossier/materiau-de-choix-pour-lagroalimentaire-la-consommation-de-linox-devrait-progresser-en-2021-45190.html#:~:text=La%20production%20mondiale%20d'acier,mondiale%20d'environ%2080%20>
- [3] Techno-Science.net. (n.d.). . Techno. Retrieved July 7, 2022, from <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Acier-inoxidable-page-3.html>
- [4] Moteur de la recherche et de l'innovation. scanR. (n.d.). Retrieved July 7, 2022, from <https://scanr.enseignementsup-recherche.gouv.fr/publication/these1997INPG4212>
- [5] *Types d'acier inoxydable en usinage : Les Plus utilisés.* ferrosplanes. (2020, March 2). Retrieved July 7, 2022, from <https://ferrosplanes.com/fr/types-dacier-inoxidable-en-usinage-les-plus-utilises/>
- [6] Les Normes. (n.d.). Retrieved July 7, 2022, from <https://www.ugitech.com/fr/produits/produits/lacier-inoxidable/les-normes>
- [7] Aciers inoxydables. L'Élémentarium. (2021, September 30). Retrieved July 7, 2022, from: <https://lelementarium.fr/product/aciers-inoxidables/#:~:text=Les%20teneurs%20en%20chrome%20sont,'aciers%20inoxidables%2C%20en%202020>
- [8] L'inox : Comment Bien Le Choisir pour sa Cuisine Professionnelle ? Tout l'univers de la cuisine professionnelle. (2021, October 14). Retrieved July 7, 2022, from <https://blog.finarome.com/inox-comment-bien-le-choisir/>
- [9] John Steel. (2017, November 29). Quelles Sont Les utilisations de l'inox ? John Steel. Retrieved July 7, 2022, from <https://www.john-steel.com/fr/blog/conseils-metal/4-utilisations-de-inox>
- [10] TooEasy. (n.d.). Passivation Inox et Titane. Retrieved July 7, 2022, from <https://www.udt-meca.fr/passivation-inox-titane-valence-drome.html>
- [11] Kruger, J., Passivity, in Uhlig, S Corrosion Handbook, R. Winston Revrie, Editor. 2011, John Wiley & sons, Inc. p. 151].
- [12] Accueil. Vis Express - Visserie et Boulonnerie - Vente aux Professionnels et Particuliers. (n.d.). Retrieved July 7, 2022, from <https://www.vis-express.fr/fr/content/77-l-acier-inoxidable-et-la-corrosion>
- [13] Wikimedia Foundation. (n.d.). Corrosion. Wikipedia. Retrieved July 7, 2022, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion#:~:text=Corrosion%20is%20a%20natural%20process,electrochemical%20reaction%20with%20their%20environment.>

- [14] Protection cathodique. (n.d.). Retrieved July 7, 2022, from <http://processs.free.fr/Pages/VersionWeb.php?page=9121#menuright>
- [15] DORLOT, J.M., Bâillon, J.P. et Masounave. J. Des Matériaux 2e édition Ecole Polytechnique de Montréal, 1986, pp. 445-452.
- [16] -Hakim BENSABRA, Cours de Corrosion et Protection des Métaux, 2016.
- [17] 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-et-generalites/corrosion-des-metaux-et-betons/morphologie-des-corrosions/corrosion-localisee>
- [18] BeCloud.com. (n.d.). Corrosion généralisée en traitement de l'eau. Memento degremont® de SUEZ. Retrieved July 7, 2022, from <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/corrosion-des-metaux-et-betons/morphologie-des-corrosions/corrosion-generalisee>
- [19] - LIONEL JAUBERT, Etudes de la corrosion uniforme D'aciers non alliés et aciers inoxydables, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.
- [20] - GARY L. WINTERS AND MICHAEL J. NUTT, Stainless Steels for Medical and Surgical Applications, ASTM International, 2002.
- [21] RYM AKKOUCHE, Corrosion des aciers dans les sols : mécanismes et cinétiques associés aux périodes transitoires d'humidification-séchage, Université de La Rochelle, 2017.
- [22] - GRAS J. M, La corrosion généralisée des aciers au carbone dans l'eau a haute température, service réacteurs nucléaires et échangeurs Département Etude des Matériaux, © Copyright EDF1995.
- [23] NACER ZAZI, RABEH SLIMANI, KAMEL CHAKKAI, HANIA BOUKHAROU, Effet d'un faible champ magnétique et du potentiel impose sur comportement à la corrosion de d'aluminium (aa1370), Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction UMMTO, 2012.
- [24] Protection cathodique. (n.d.). Retrieved July 7, 2022, from <http://processs.free.fr/Pages/VersionWeb.php?page=9121>
- [26] NATACHA P.MALOU, Ecole supérieure Polytechnique, centre de THIES, étude de la corrosion et maintenance des installations pétrolières de Shell Sénégal, cas du dépôt de jetée Nord, 2003.
- [27] M. HÉLIE, Matériaux métalliques phénomènes de corrosion, Université d'Evry – Val d'Essonne Département Sciences des Matériaux,
- [28] HAIMER Siham, La synthèse d'un inhibiteur de corrosion et l'étude de son effet sur l'acier X42 dans un milieu aqueux, universiter de Biskra, domaine science et techniques, genie chimique, 2019.

