



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie Chimique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

❖ **BAGHBAGHA Ilyes**

❖ **BABAUSMAIL Mansor**

Thème

**Comportement de l'acier ASTM A915 dans un milieu corrosif :
influence des paramètres physico-chimiques**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mr : AMEUR kheira	MAA	Président
Mr : TAOUTI Mohamed Bachir	MAA	Examineur
Mr : BOUDELLIOUA Hichem	MCB	Rapporteur

Promotion : JUIN 2021

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la patience et le courage pour continuer nos études car grâce à lui nous avons mené à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à Dr. Boudellioua Hichem pour les précieux conseils, l'orientation et le suivi qu'il nous a fournis pour mener à bien ce travail.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Notre plus profonde gratitude et notre plus grand respect à tous les enseignants de la faculté de technologie, et plus particulièrement aux enseignants de Génie des procédés de l'Université de Laghouat, en particulier le Dr Nahoui Taher, qui a été notre soutien tout le long de Notre parcours universitaire.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de notre projet final et qui nous ont aidés de près et de loin à réaliser ce mémoire.

Ilyes . mansor

Dédicace 1

J'aimerais dédier ce mémoire :

A mon père Noureddine, qui est certainement fier de trouver ici le résultat de nombreuses années de sacrifice et le déni me donne le meilleur de lui. Que Dieu fasse en sorte que ce travail ait un bon résultat. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien que vous m'apportez.

A ma mère Bashira qui agonise devant ma réussite, son amour, son soutien, tous les sacrifices qu'elle a consentis et ses précieux conseils, pour toutes ses prières et tout ce qui est dans ma vie. Que vous receviez par cet acte, si humble soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle reconnaissance.

A mes frères qui m'ont soutenu, chacun en son nom : Majid ; Khadija ; Maryam ; Salima et Muhammad

À ma fiancée Nafisa qui appelle à mon succès de l'invisible.

A l'Association Sawt Al Hazar pour le Chant et au Club Islah pour le Karaté Do avec tous ses membres.

À mes professeurs du Département de génie des procédés qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

A toute ma famille... à tous mes amis et collègues, en particulier, je voudrais mentionner mon ami Mansor, avec qui j'ai des souvenirs inoubliables... à tous ceux qui sont chers et proches de moi... à tous ceux qui se sont plantés en moi... à tous ceux que j'aime.

Ayes

Dédicace 2

Je voudrais dédier ce mémoire à mes parents qui seront toujours.

Pour moi, un symbole de courage, de résistance, et mes frères et sœurs.

Et à Mes cousins avec qui j'ai partagé beaucoup de bonnes choses.

Je dédie ce modeste travail à ma fiancée.

Je dédie également ce travail à mes amis proches.

Je dédie également ce travail à mon ami *ilyes* qui a partagé avec moi tout mon parcours universitaire et qui nous a réunis dans la chambre "B 43" dans laquelle nous avons partagé de merveilleux moments et qui nous a réunis pour accomplir ce mémoire.

Mansor

Liste des Figures

Chapitre	N° Figure	Le titre de figurer	Page
Introduction	Figure 1	Image illustrative de l'état corrosif d'un morceau métallique.	02
I	Figure 2	Electrode de travail en acier ASTM A915, enrobée par de la résine époxy et portant une connexion électrique (face de devant).	06
	Figure 3	Schéma du montage électrochimique à trois électrodes.	07
	Figure 4	Détermination de la vitesse de corrosion par la méthode des droites de Tafel.	10
	Figure 5	Tracé pour la détermination de la résistance de polarisation.	11
	II	Figure 1	Evolution du potentiel de corrosion en circuit ouvert de l'acier dans une solution corrosive à différentes concentrations de NaCl (0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 et 1M) durant 2 heures d'immersion et sans agitation mécanique.
Figure 2		Courbes potentiodynamiques de l'acier à différentes vitesses de balayage dans 0,1 M NaCl.	14
Figure 3		Variation de la densité de courant (courant limite) en fonction de la racine carrée de la vitesse de balayage.	17
Figure 4		Courbes potentiodynamiques de l'acier à différentes vitesses d'agitation dans 0,1 M NaCl (de 50 à 500 tr/min).	18
Figure 5		Variation de la densité de courant (courant limite) en fonction de la racine carrée de la vitesse d'agitation.	20
Figure 6		Courbes de polarisation de l'acier à différentes concentrations de la solution NaCl.	21
Figure 7		Courbes potentiodynamiques de l'acier à différentes températures du milieu corrosif NaCl.	23
Figure 8		Evolution de Rp de l'acier dans 0,1 M NaCl en fonction du temps d'immersion (jusqu'à 7 jours).	26

Liste des Tableaux

Chapitre	N°Tableau	Le titre de tableau	Page
I	Tableau 1	Composition en éléments chimiques présents dans l'acier doux ASTM A915 (en masse %).	06
II	Tableau 1	Résultats des courbes de polarisation à différentes vitesses de balayage dans 0,1M NaCl.	15
	Tableau 2	Résultats des courbes de polarisation à différentes vitesses d'agitation dans la solution 0,1M NaCl avec une vitesse de balayage de 1 mV/s	19
	Tableau 3	Paramètres électrochimiques de l'acier dans une solution NaCl, à différentes concentrations	22
	Tableau 4	Paramètres électrochimiques de l'acier, obtenus à partir des courbes potentiodynamiques, après 20minutes d'immersion dans une solution 0,1M NaCl, à différentes températures.	24
	Tableau 5	Tableau montrant les changements des valeurs de la résistance de polarisation de l'acier en fonction du temps d'immersion	25

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	02
Partie expérimentale	
I.1. Matériel et méthodes expérimentales	05
I.1.1. Matériau utilisé	05
I.1.2. Cellule électrochimique	07
I.2. Techniques électrochimiques	08
I.2.1. Techniques stationnaires	08
I.2.1.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP)	08
I.2.1.2. Courbes de polarisation (méthode de Tafel)	09
I.2.1.3. Méthode de la résistance de polarisation (Stern et Geary)	10
Résultats et discussions	
II.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP) de l'acier dans une solution NaCl à différentes concentrations :	13
II.2. Effet de la vitesse de balayage dans 0,1 M NaCl	14
II.3. Effet de la vitesse d'agitation dans 0,1 M NaCl	18
II. 4. Effet de la concentration de NaCl	21
II. 5. Effet de la température de NaCl	23
II. 6. Effet du temps d'immersion dans 0,1 M NaCl	25
CONCLUSION GENERALE	27

الملخص: من أهم المخاطر التي تهدد المعادن والفولاذ، التآكل، وهو ظاهرة طبيعية تؤثر سلباً على الصناعة بشكل عام وتسبب خسائر اقتصادية كبيرة. الهدف من هذا العمل هو دراسة سلوك الفولاذ الكربوني ASTM A915 في بيئة عدوانية، وفي هذه الحالة البيئة الكلورية لمعرفة التأثيرات الفيزيائية والكيميائية عليها وتحديد العوامل التي يمكن أن تتحلل منها. للقيام بذلك، نراقب الفولاذ لدينا في المختبر من خلال مجموعة من الاختبارات الكهروكيميائية المعروفة، مثل مراقبة جهد الدائرة المفتوحة (OCP) ومنحنيات تافل من خلال العمل بشكل أساسي على تباين المعلمات. تركيز ودرجة حرارة الوسط ووقت الغمر. ندرس أيضاً تأثير سرعة الكنس والتحرك للمحلول على هذه المعلمات لفهم سلوك التآكل للفولاذ. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن العملية الكهروكيميائية تتم تحت سيطرة الحمل الحراري. وبالتالي، فإن زيادة التركيز ودرجة الحرارة ووقت الغمر يؤدي إلى مزيد من تدهور الفولاذ.

Résumé : Parmi les risques majeurs qui guettent les métaux et les aciers, la corrosion, qui est un phénomène naturel qui affecte négativement l'industrie en général et cause de grandes pertes économiques. Le but de ce travail est d'étudier le comportement de l'acier au carbone ASTM A915 dans un environnement agressif, en l'occurrence le milieu chloruré pour connaître les effets physiques et chimiques sur lui et déterminer les facteurs qui peuvent le dégrader. Pour cela, nous mettons à l'observation au laboratoire notre acier à travers un ensemble d'essais électrochimiques très connus, tels que le suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP) et les courbes potentiodynamiques de Tafel en agissant principalement sur la variation des paramètres physico-chimiques suivants : La concentration et la température du milieu et le temps d'immersion. Nous étudions également l'influence de la vitesse de balayage et d'agitation de la solution sur ces paramètres pour comprendre le comportement de l'acier à la corrosion. Les résultats obtenus montrent que le processus électrochimique se fait sous contrôle diffusionnel-convectif. Ainsi, l'augmentation de la concentration, température et la durée d'immersion provoquent plus de dégradation de l'acier.

Abstract: Among the major risks that threaten metals and steels, corrosion, which is a natural phenomenon that negatively affects industry in general and causes great economic losses. The aim of this work is to study the behavior of ASTM A915 carbon steel in an aggressive environment, in this case the chlorinated environment to know the physical and chemical effects on it and to determine the factors that can degrade it. To do this, we are observing our steel in the laboratory through a set of well-known electrochemical tests, such as monitoring of open circuit potential (OCP) and Tafel potentiodynamic curves by acting mainly on the variation of the parameters, following physicochemical: the concentration and temperature of the medium and the immersion time. We are also studying the influence of the sweeping and stirring speed of the solution on these parameters to understand the corrosion behavior of steel. The results obtained show that the electrochemical process takes place under diffusion-convective control. Thus, increasing the concentration, temperature and immersion time causes more degradation of the surface steel.

INTRODUCTION GENERALE

Plusieurs matériaux sont utilisés dans beaucoup d'ouvrages qu'on rencontre dans notre vie quotidienne (immeubles, ponts, usines, etc). L'acier est sans conteste le plus largement utilisé d'entre eux, dû à sa disponibilité sur le marché et ses qualités d'usinage et mécaniques, notamment son excellente soudabilité, sa résistance de traction et son coût relativement faible [1]. Cependant il est présentatif de l'inconvénient majeur d'être sensible aux attaques chimiques, surtout en présence de l'air et l'eau, ou d'autres espèces corrosives, telles que les chlorures [2].



Figure I.1 : Image illustrative de l'état corrosif d'un morceau métallique.

Par définition, la corrosion est le résultat d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement appliquée aux métaux à la suite de réactions qui leur sont appliquées.

Les répercussions de ce phénomène sont importantes dans divers domaines, notamment dans l'industrie, et ne peuvent pas être négligées, car ils posent des problèmes industriels pouvant conduire à des arrêts de production et des risques de pollution avec de graves effets négatifs affectant la santé du personnel travailleur et l'économie nationale du pays.

La corrosion étant fondamentalement un phénomène redox, on peut jouer sur le potentiel électrochimique de la surface. En termes simples, lors de l'oxydation, les espèces chimiques

présentes dans l'environnement arrachent des électrons de la substance métallique. Si par contre nous pouvons fournir ces électrons par d'autres moyens (un générateur électrique ou une autre réaction chimique par exemple), alors nous pouvons empêcher le matériau de perdre ses électrons, et par conséquent de réduire le phénomène de corrosion.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude du comportement de l'acier ASTM A915, dans le milieu corrosif NaCl, et aux effets physico-chimiques qui peuvent l'affecter.

Ainsi, outre l'introduction générale, ce mémoire a été dispatché en deux chapitres essentiels :

Chapitre I : la partie expérimentale, où l'on rapporte quelques informations sur les aciers en général, et en particulier notre acier échantillon ASTM 915, et les différentes techniques électrochimiques appliquées.

Chapitre II : la partie résultats et discussions, où l'on tient à étudier expérimentalement l'influence sur le comportement corrosif de l'acier, des paramètres suivants :

- ✓ Les vitesses de balayage et d'agitation de la solution
- ✓ La concentration du milieu
- ✓ La température du milieu
- ✓ Le temps d'immersion de l'acier jusqu'à sept (07) jours

Enfin, le mémoire se clôt avec une conclusion générale, où l'on met l'accent sur les points forts de cette étude.

Chapitre I
Partie expérimentale

Ce que nous allons faire dans ce chapitre est de présenter le matériau utilisé, les solutions électrolytiques utilisées et les différentes techniques expérimentales d'électrochimie que nous allons employer dans cette étude. Ainsi nous avançons les définitions du contrôle de tension en circuit ouvert, de la polarisation linéaire, de la courbe de Tafel et quelques expériences qui feront l'objet d'étude dans le deuxième chapitre.

I.1. Matériel et méthodes expérimentales

I.1.1. Matériau utilisé

L'échantillon d'acier à étudier est prélevé sous forme cylindrique dont le diamètre de la base est de 1 cm, soit une surface de $0,95 \text{ cm}^2$. La pièce "échantillon" de l'acier ASTM A915 est d'une épaisseur d'environ 1,5 cm. La pièce a ensuite été bien soudée à l'extrémité d'un fil conducteur, enduite de la résine époxy pour éviter toute éventuelle infiltration d'électrolyte, tout en gardant une petite "brèche" nue s'ouvrant sur la surface de la pièce (c'est à dire sans résine), qui permet la pénétration de l'électrolyte pendant nos tests pilotes de laboratoire. La **figure I.2** ci-dessous représente l'électrode de travail utilisée pour mener cette étude.

Nos échantillons ont été ensuite poncés avec du papier verre, d'une granulométrie allant de 320 à 2000 grades, après avoir été lavés à l'eau distillée, dégraissés à l'éthanol, lavés à nouveau à l'eau distillée pour éliminer les traces d'éthanol, et enfin séchés à l'air chaud. Cette étape de préparation est effectuée immédiatement avant que les échantillons ne soient immergés dans la solution.

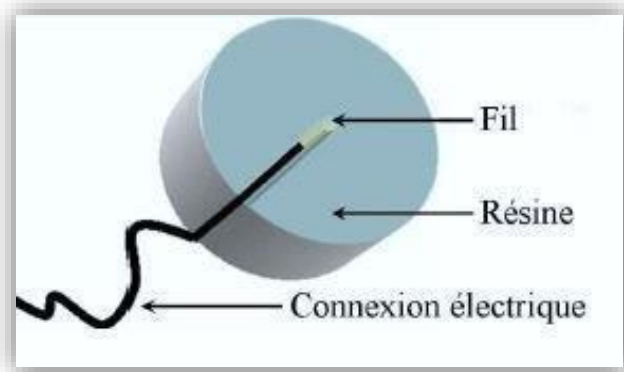


Figure I.2 : Electrode de travail en acier ASTM A915, enrobée par de la résine époxy et portant une connexion électrique (face de devant).

Le **tableau I.1** montre la composition chimique de l'acier doux ASTM A915. Cet acier est caractérisé par sa concentration moyenne en carbone, sa teneur élevée en fer, avec d'autres ratios minéraux.

Tableau I.1 : Composition en éléments chimiques présents dans l'acier doux ASTM A915 (en masse %).

C	Si	Mn	S	Cr	P	Al	V	Sn	Mo
0,33	0,24	0,65	0,024	1,06	0,017	0,007	0,022	0,001	0,015
W	Ni	Cu	Co	Ti	Nb	B	Ta	Fe	
0,256	0,003	0,088	0,001	0,001	0,003	0,002	0,014	reste	

On observe une diminution de la proportion des différents éléments (Si, Mn, P, S, Cr, Mo, W). En sidérurgie, les limites sont à peine compensées dans le schéma fer-carbone. Cependant, malgré leurs faibles teneurs, les éléments restants peuvent affecter le comportement mécanique et électrochimique de l'acier.

I.1.2. Cellule électrochimique

Au cours des expériences au laboratoire, des tests électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'un ensemble tripolaire conventionnel.

Nous avons effectué ces tests électrochimiques dans une cellule en verre (voir **figure I.3**), qui contient l'électrolyte. Cette technique nécessite l'insertion de trois électrodes usagées : l'électrode de travail, l'électrode de référence et la contre-électrode.

Les trois électrodes utilisées dans notre assemblage sont les suivantes :

- Une électrode de référence au calomel saturé en KCl (ECS).
- Électrode à fil de platine (contre électrode).
- Électrode de travail (notre matériau est ASTM A915).

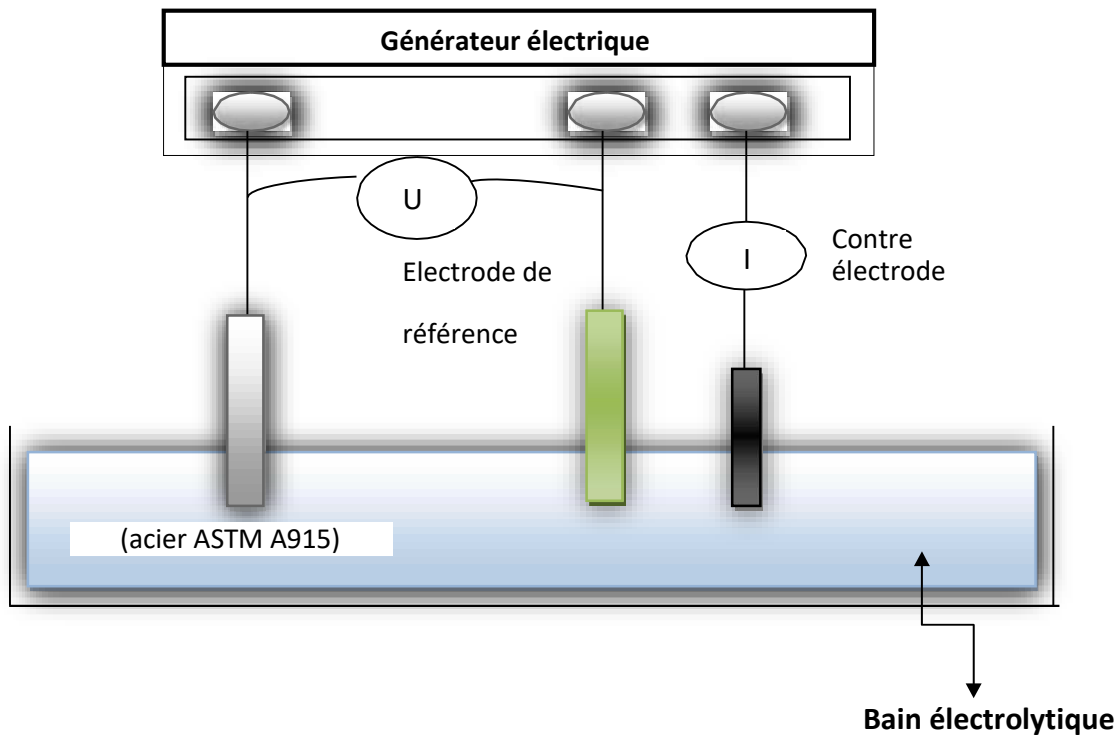


Figure I.3 : Schéma du montage électrochimique à trois électrodes

Tous les tests électrochimiques sont effectués en présence d'une solution de chlorure de sodium ; le pH de la solution de NaCl est proche de la neutralité ($\approx 6,8$ pour 0,1 M).

Ces trois électrodes sont immergées dans une cellule électrochimique qui contient l'électrolyte de l'environnement d'étude (NaCl dans notre cas). Le potentiostat/galvanostat utilisé est le PGZ 301 (modèle voltalab 40), et il est contrôlé par un micro-ordinateur à l'aide du logiciel **Volta**

Master 4.

I.2. Techniques électrochimiques

Les méthodes électrochimiques utilisées dans le présent travail sont appelées techniques stationnaires.

I.2.1. Techniques stationnaires

Les techniques statiques permettent d'étudier un système en quasi-équilibre thermodynamique d'un état car ils travaillent sur des équations redox. Ils tiennent compte de tous les retours Redox, qui se produisent à l'interface substance / électrolyte [3].

I.2.1.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP)

L'importance de ce processus est de mesurer la tension de fuite de l'électrode de travail en fonction du temps d'immersion. Cette possibilité est appelée potentiel d'abandon. Il correspond au cas d'un circuit ouvert, dans lequel le courant provenant de l'électrode est nul. Cette technique simple, qui consiste à suivre le potentiel en fonction du temps d'immersion dans le milieu, est la seule procédure qui n'entraîne aucune perturbation de l'état du système de surveillance. Il est analysé par rapport à un potentiel de référence, dans ce cas l'électrode au calomel saturé en KCl. La surveillance du potentiel de circuit ouvert fournit des informations initiales sur la nature des processus se produisant à l'interface Métal / électrolyte (corrosion, passivation, etc.). Cette mesure permet également de connaître le temps d'immersion nécessaire pour établir l'état stationnaire nécessaire à l'utilisation d'autres techniques électrochimiques (méthode Tafel et résistance électrochimique). Un équilibre du système électrochimique est atteint lorsque les potentiels sont quasi-constants en fonction du temps.

I.2.1.2. Courbes de polarisation (méthode de Tafel)

Il s'agit d'une méthode d'extrapolation basée sur l'équation Butler-Volmer $I = f(E)$ (**équation 1**). Par conséquent, les hypothèses nécessaires pour prouver cette équation sont à l'origine des limites liées à l'exploitation de cette technologie.

$$I(\eta) = Ia + Ic = (\exp(anF/\eta RT) - \exp(-(1-a)nF\eta/RT)) \dots\dots\dots (\text{Eq 1}) \text{ Avec :}$$

n : nombre d'électrons mis en jeu et nous avons pris une valeur de **n = 1**

I : densité de courant global (A/cm²)

α : coefficient de transfert de charge ($0 < \alpha < 1$) nous avons pris une valeur **$\alpha = 0,5$**

η : surtension appliquée à l'électrode (V)

I_{corr} : densité de courant de corrosion (A/cm²)

R : constante des gaz parfaits (8,314 J.mol⁻¹ .K⁻¹)

T : température (K)

F : constante de Faraday (96485 Coulomb/mol)

Supposons que nous voulions représenter la courbe de polarisation obtenue en coordonnées :

Le premier log (densité de courant) = f (E) (**Figure I.4**), l'intersection des lignes anodiques et donne à la cathode, stabilisée au potentiel de corrosion, la densité de courant de corrosion I_{corr} (A/cm²).

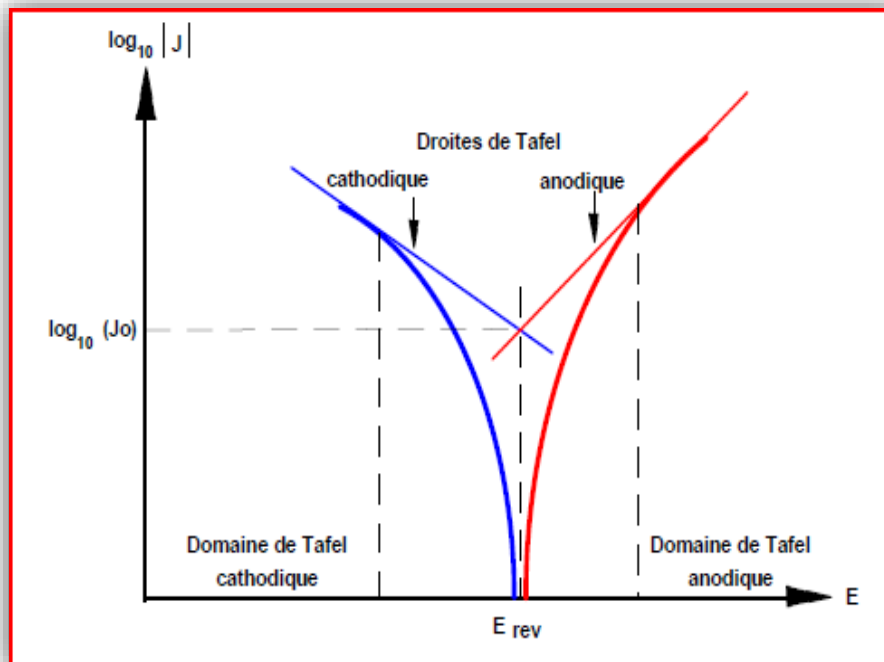


Figure I.4 : Détermination de la vitesse de corrosion par la méthode des droites de Tafel.

Pour tracer les courbes de polarisation, il faut passer du champ cathodique au champ anodique, c'est ce que nous avons fait dans notre expérience où nous avons pris une vitesse de balayage de 1 mV / s. Dans l'étude des vitesses de balayage et d'agitation, nous étudions la probabilité est de -300 à $+1200$ mV / E_{corr} . Et pour les essais de l'effet de la concentration et température, nous utilisons la surtension de -250 à $+250$ mV / E_{corr} .

À partir aux courbes de polarisation, plusieurs paramètres électrochimiques peuvent être extraits, à savoir : la densité de courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes anodiques et cathodiques du Tafel (β_a et β_c) et la résistance de polarisation (R_p). Par conséquent, cette technique est idéale, ce qui lui confère rapidité et facilité de réalisation des mesures.

I.2.1.3. Méthode de la résistance de polarisation (Stern et Geary)

La résistance de polarisation (R_p) est un paramètre important dont le changement doit être pris en compte car ses valeurs sont déterminées à partir de la courbe $E = f(I)$, et nous estimons le potentiel de corrosion entre (± 20 mV / E_{corr}) faible surtension à une vitesse de balayage de 0,1667 mV/s (voir **figure I.5**) et enfin, la résistance de polarisation est exprimée par une équation appelée équation **Stern et Jerry** (équation 2).

$$R_p = \Delta E / \Delta I = (B_a * B_c) / (2,303 * (B_a + B_c) * i_{corr}) \dots\dots\dots (Eq 2)$$

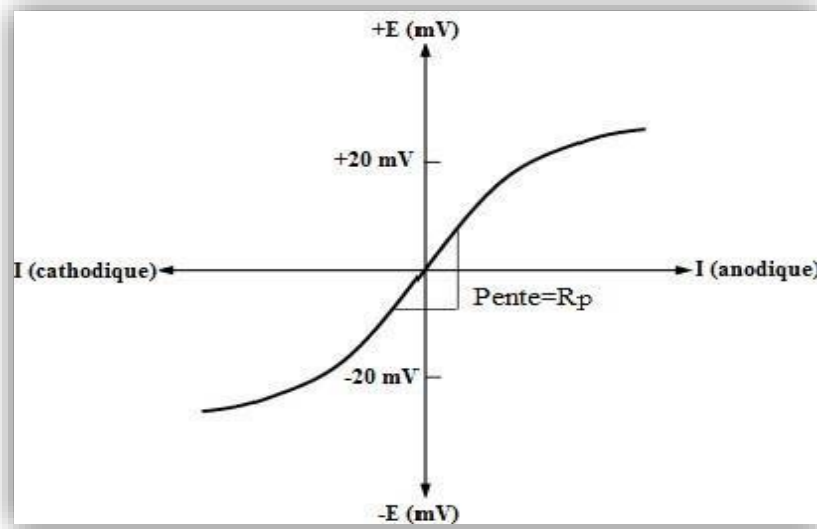


Figure I.5 : Tracé pour la détermination de la résistance de polarisation.

La pente $\Delta E/\Delta I$ (équation 3) de la courbe de polarisation représente la résistance de polarisation R_p (également appelée polarisation linéaire), et son unité est $\Omega.cm^2$. [4]

$$R_p = \Delta E/\Delta I \dots\dots\dots (Eq 3)$$

Chapitre II

Résultats et discussions

II.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP) de l'acier dans une solution NaCl à différentes concentrations

La **figure II.1** montre les courbes d'évolution du potentiel de corrosion en circuit ouvert de l'acier dans une solution corrosive à différentes concentrations de NaCl (0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 et 1 M), durant 2 heures d'immersion et sans agitation, des échantillons de l'acier ASTM A915.

Nous remarquons qu'à mesure que la concentration de la solution de NaCl augmente, le potentiel diminue vers des valeurs plus électro-négatives dans la période des 20 premières minutes. Ce qui est dû à l'effet du processus de pénétration des ions Cl^- dans l'acier, avant qu'il ne commence à se stabiliser progressivement (- 425 ; - 475 ; - 550 ; - 575 et - 600 V/ECS) avec la concentration de la solution de NaCl (0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 et 1 M) respectivement ; ceci est dû à la formation et la stabilité de produits de corrosion sur la surface de l'acier. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante (voir **figure II.1**).

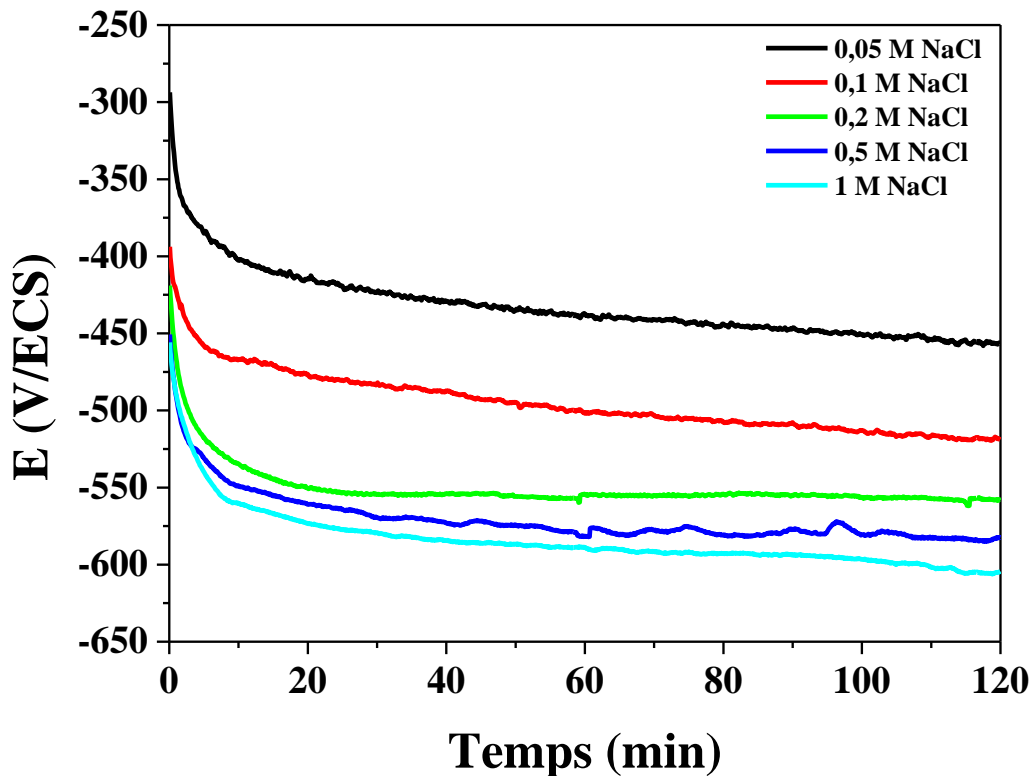


Figure II.1 : Evolution du potentiel de corrosion en circuit ouvert de l'acier dans une solution corrosive à différentes concentrations de NaCl (0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 et 1M) durant 2 heures d'immersion et sans agitation mécanique.

II.2. Effet de la vitesse de balayage dans 0,1 M NaCl

Le choix de la vitesse de balayage est très important dans l'étude des systèmes électrochimiques. Alors si on remarque que la surface du substrat est détruite et se dégrade en augmentant la durée du test, il faut réduire cette durée pour éviter tous les problèmes éventuellement envisagés, qui peuvent entraver le déroulement du travail.

La **Figure II.2** montre les courbes potentiodynamiques de l'acier à différentes vitesses de balayage choisies (0,5 ; 1 ; 2 ; 5 et 10 mV/s) dans 0,1 M NaCl, à la température ambiante, en milieu aéré et après 20 min d'immersion de l'électrode dans la solution corrosive montre les courbes suivantes.

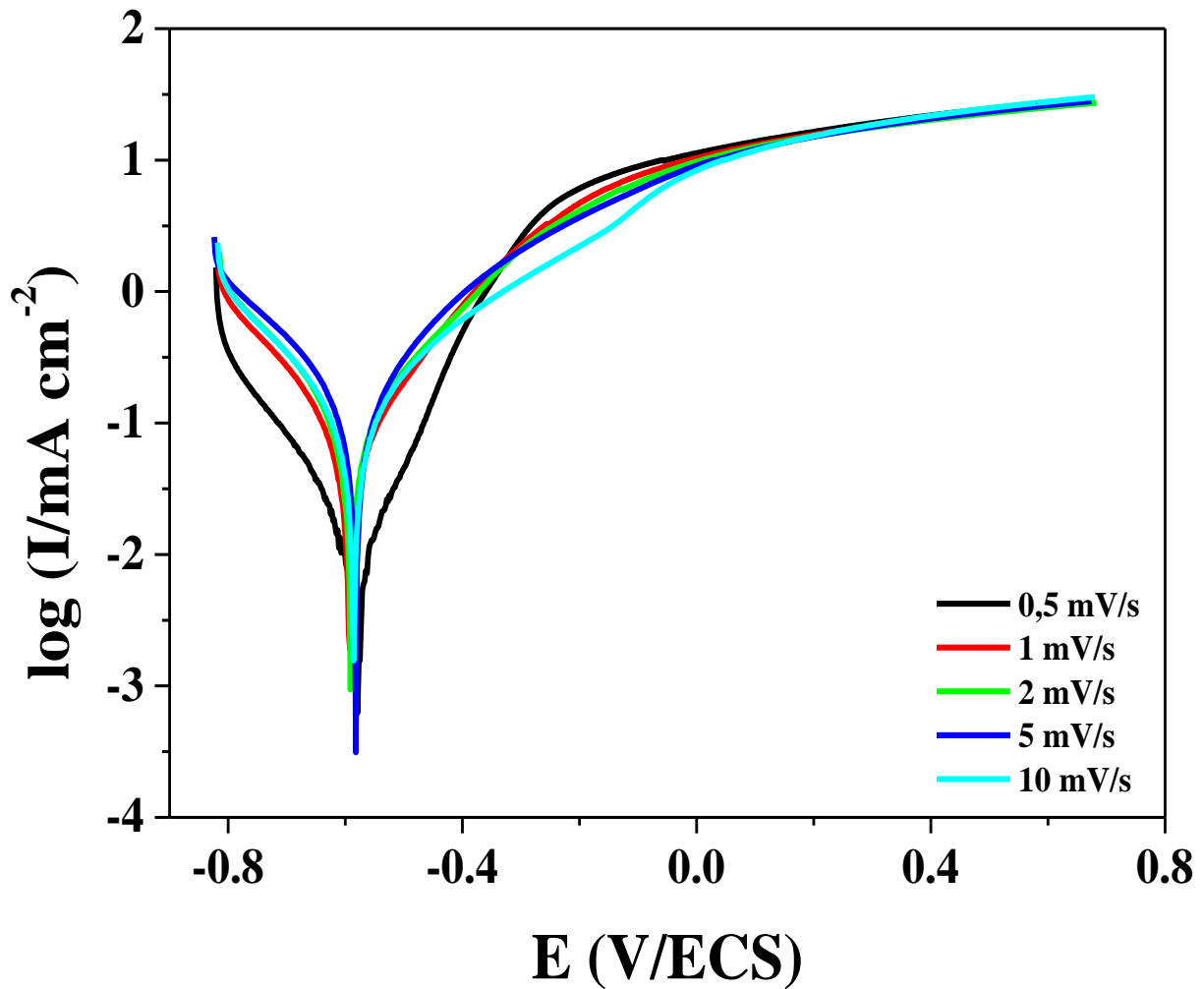


Figure II.2 : Courbes potentiodynamiques de l'acier à différentes vitesses de balayage dans 0,1 M NaCl.

Pour calculer la densité de courant nous utilisons l'équation de Stern and Geary (équation 4) [5].

$$I_{corr} = Ba \cdot Bc / 2.3 R_p (Ba+Bc) \text{ (éq 4)}$$

Et le **Ba** ; **Bc** et **E_{corr}** sont obtenus à partir du logiciel (EC-Lab) et les résultats sont présentés dans le **tableau II.1**.

Tableau II.1 : Résultats des courbes de polarisation à différentes vitesses de balayage dans 0,1M NaCl.

Vitesse de balayage (mV/s)	E _{corr} (mV/ECS)	I _{corr} (mA/cm ²)	R _p (Ω/cm ²)	Ba (mV/dec)	Bc (mV)
0,5	- 579,832	16,16.10 ⁻²	167,01	110	142,6
1	- 592,827	30,19.10 ⁻²	150,94	209	210,3
2	- 590,652	38,27.10 ⁻²	144,96	265,2	246
5	- 582,090	41,59.10 ⁻²	139,25	255,4	278,2
10	- 585,507	49,63.10 ⁻²	130,25	313,5	282,9

D'après les valeurs du **tableau II.1** et de la **figure II.2**, nous concluons que la vitesse de balayage a un effet léger sur le potentiel de corrosion (E_{corr}), qui se déplace vers les valeurs plus électro-négatives, de -579,832 mV pour 0,5 mV / s à -585, 507 mV / ECS pour 10 mV / s ; ceci s'accompagne d'une augmentation de la densité de courant (I_{corr}) (16,16.10⁻² ; 30,19.10⁻² ; 38,27.10⁻² ; 41,59.10⁻² et 49,63.10⁻² mA/cm²), et une diminution de la résistance de l'acier **R_p** (167,01; 150,94 ; 144,96 ; 139,25 et 130,25 Ω/cm²) avec les vitesses de balayage (0,5 ; 1 ; 2 ; 5 et 10 mv/s) respectivement.

Cela signifie que la vitesse de réaction électrochimique augmente avec la diminution de la densité de courant, indiquant une détérioration supplémentaire de la surface de l'acier.

Dans le même contexte, et à partir du phénomène contrôlé par le processus cathodique, nous considérons l'équation de Randlis-Sevcik, pour tracer le comportement linéaire de la densité de courant spécifique (**I_{lim}**) en fonction de la racine carrée du grand taux (\sqrt{V}).

- L'équation de Randles-Sevcik, liée au système lent ou irréversible (équation 5) [6].

$$I_{lim} = 2,99 * 10^5 * n * \sqrt{\alpha * n} * C * \sqrt{D} * \sqrt{V} \text{ (eq 5)}$$

Avec :

- **a** : Coefficient de transfert de charge ($0 < a < 1$).
- **D** : Coefficient de diffusion ($1,612.10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$) à $T= 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (cas du NaCl). [7]
- **C** : La concentration de la solution corrosive ($0,1 \text{ mol/L}$).
- **n** : Nombre d'électrons transférés ou échangés à l'électrode.
- **V** : La vitesse de balayage (V/s).
- $2,99.10^5$: c'est un terme lié à la résolution mathématique dans le cas d'un système irréversible.

La vitesse de balayage étant affectée négativement par la vitesse de corrosion de l'acier dans un milieu corrosif, nous devons choisir une vitesse appropriée et suffisante pour travailler dans notre système électrochimique. Et voici ce que nous avons fait. Nous avons tracé la droite qui représente la densité de courant (courant limite) en fonction de la racine carrée des valeurs de la vitesse de balayage de 0,5 à 10 mV/s.

Le processus de corrosion est cinétiquement contrôlé par le phénomène de transfert de masse vers la surface conduit depuis la plus élevée concentration vers la plus basse concentration (processus de diffusion).

La **Figure II.3** montre que la variation de la densité de courant (courant limite I_{lim}) en fonction de la racine carrée de la vitesse de balayage est avec une pente égale à 0,846 et un coefficient de régression $R^2 = 0,999$. La droite passe presque par l'origine, ce qui montre que le processus de corrosion est sous contrôle diffusionnel.

Pour la suite des essais électrochimiques, il faudra choisir une vitesse de balayage faible et adéquate avec notre travail. Alors, la valeur de 1 mV/s permet à la réaction électrochimique d'avoir lieu sans modifier la surface du matériau, nous avons pris la valeur de la vitesse de balayage 1mv/s pour nous permettre de tracer plus facilement le comportement de l'acier dans le milieu expérimental.

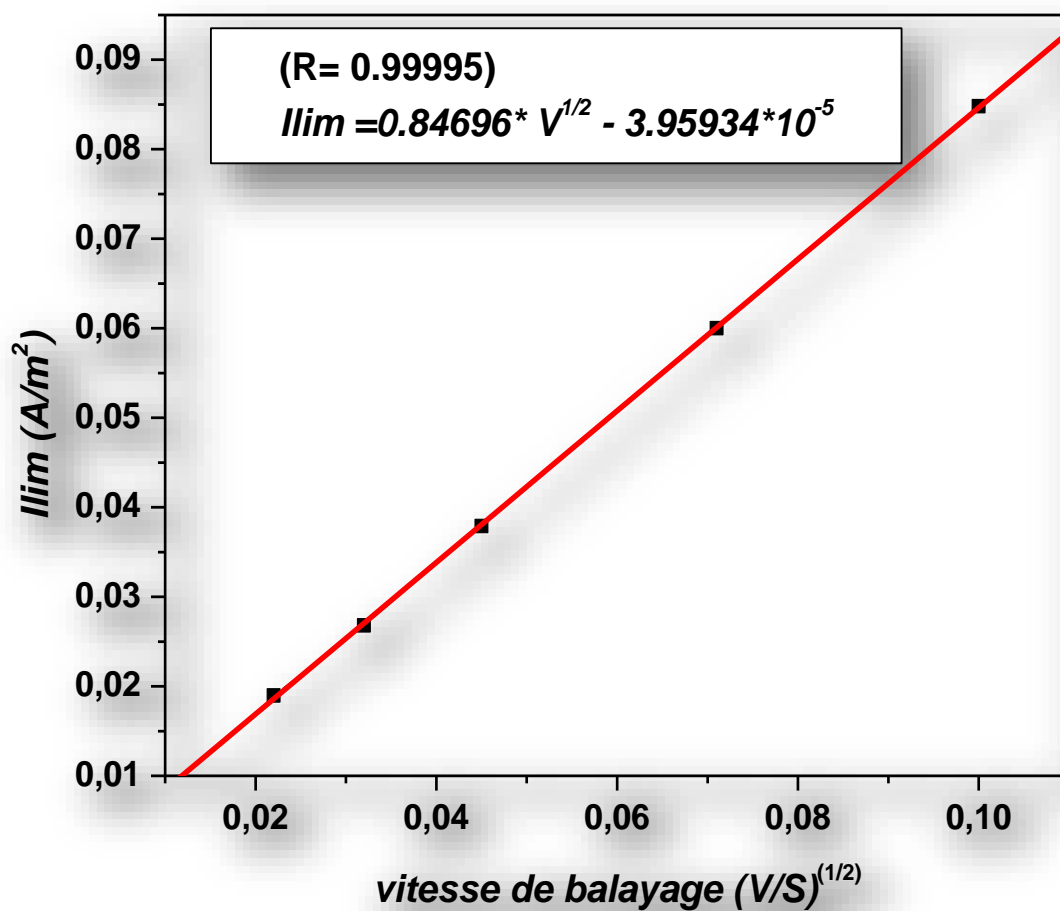


Figure II.3 : Variation de la densité de courant (courant limite) en fonction de la racine carrée de la vitesse de balayage.

II.3. Effet de la vitesse d'agitation dans 0,1 M NaCl

Dans cette expérience, nous étudions l'effet d'agitation sur le comportement de l'acier ASTM A915 en solution corrosive NaCl de 0,1 M, à cet effet, les tests ont été effectués en changeant l'agitation de 50 à 500 tours par minute, avec une vitesse de balayage de 1 mV/s. Les résultats sont obtenus à partir de la **figure II.4**. Les paramètres électrochimiques de cette figure sont présentés dans le **tableau II.2**.

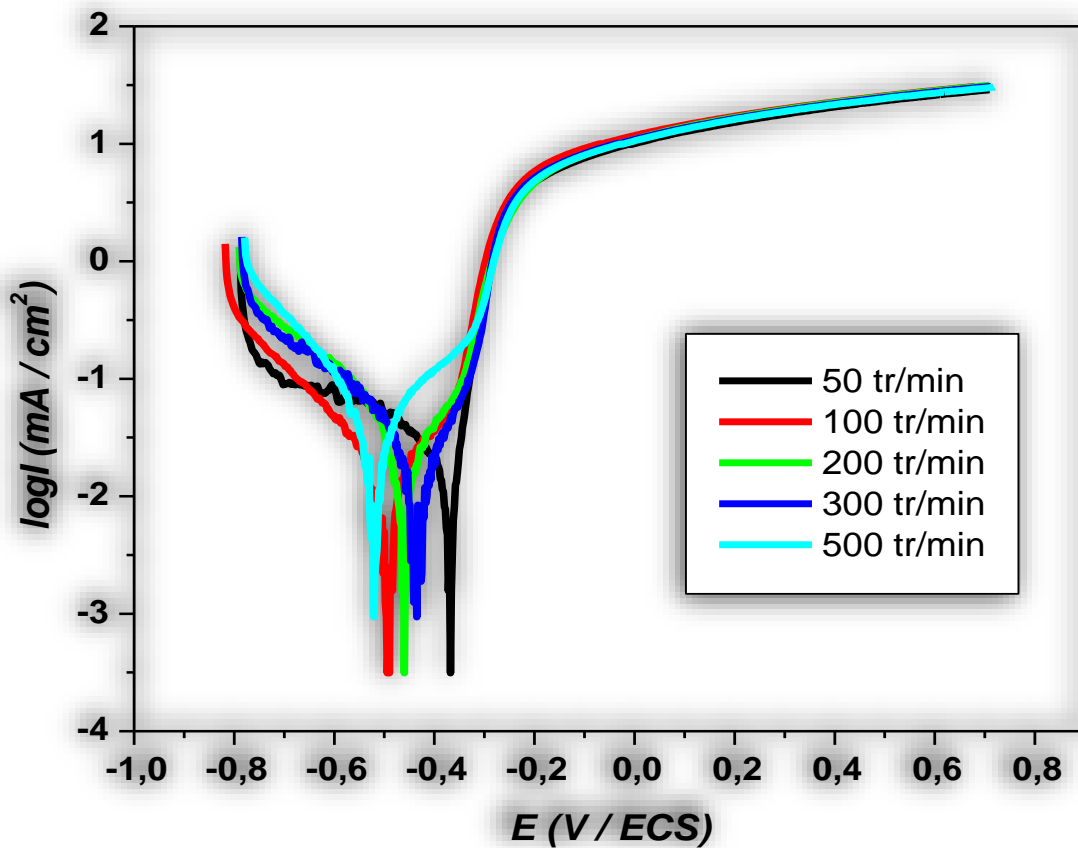


Figure II.4 : Courbes potentiodynamiques de l'acier à différentes vitesses d'agitation dans 0,1 M NaCl (de 50 à 500 tr/min).

Notons que lorsque la vitesse d'agitation augmente, le potentiel de corrosion se déplace vers les valeurs plus électrochimiquement négatives, en prenant l'exemple de 50 (tr/min) avec une valeur de -381,564 (mV/ECS) jusqu'à 500 tours par minute avec une valeur de -519,688, et ceci s'accompagne d'une augmentation de le courant de corrosion (I_{corr}) lorsqu'il passe de la valeur 0,1133 mA/cm² à

50 tr / min à la valeur 0,4829 mA/cm² à 500 tr / min; Ceci est dû à une augmentation de la quantité d'oxygène dissous [8-9], ce qui expose l'acier à l'attaque d'anions corrosifs (anions Cl⁻), ce qui conduit à une diminution de la résistance de l'acier de 160,99 (Ω/cm²) à 120,09 (Ω/cm²) pour 50 et 500 tr/min respectivement.

Tableau II.2 : Résultats des courbes de polarisation à différentes vitesses d'agitation dans la solution 0,1M NaCl avec une vitesse de balayage de 1 mV/s.

Vitesse d'agitation (tr/min)	E _{corr} (mV/ECS)	I _{corr} (mA/cm ²)	R _p (Ω/cm ²)	Ba (mV/dec)	Bc (mV)
50	-381,564	0,1133	160,99	43,6	1114,2
100	-488,761	0,1311	149,43	76,5	109,7
200	-458,812	0,1521	138,95	82,2	120,7
300	-434,839	0,147	125,79	66,8	117,7
500	-519,688	0,4829	120,09	333,1	222,5

On trace la fonction linéaire montrant Variation de la densité de courant (courant limite) en fonction de la racine carrée de la vitesse d'agitation, et cela élucide le concept de diffusion, dans lequel nous calculons le courant limite à partir de la loi de de Levich (équation 6) [10].

$$I_{lim} = 0,62. n. F. C.D^{2/3} .As. \nu^{-1/6}W^{1/2} \quad (\text{eq 6})$$

Avec :

n : Nombre de moles d'électrons transférés

F : Constante de Faraday (96485 Coulomb/mol)

C : La concentration de la solution corrosive (0,1 mol/L)

D : Coefficient de diffusion (1,612 10⁻⁵ cm²/s) à T= 25 °C (cas NaCl)

ν : La viscosité cinématique de la solution (16,723 cm² .s⁻¹) à T= 25 °C (cas NaCl)

W : La vitesse d'agitation de la solution (rad.s⁻¹), (1 rad.s⁻¹= 9,5493 tr/min) et (W=2πNt/60)

(Nt est le nombre de tours, en tr/min).

As : La surface active de l'échantillon (cm²)

0,62 : Terme lié à la résolution mathématique du système.

Les résultats de la **figure II.5** nous montrent que le courant spécifié est proportionnel à la vitesse d'agitation, cela est dû au transfert de masse qui contrôle le comportement de ce processus. Et il est lié à la réaction cathodique pour réduire l'oxygène dans le milieu réactif, ce qui confirme que la réaction cathodique sur ce type d'acier dans le milieu chloruré est contrôlée par un phénomène de transport par convection (la réaction sous contrôle convective).

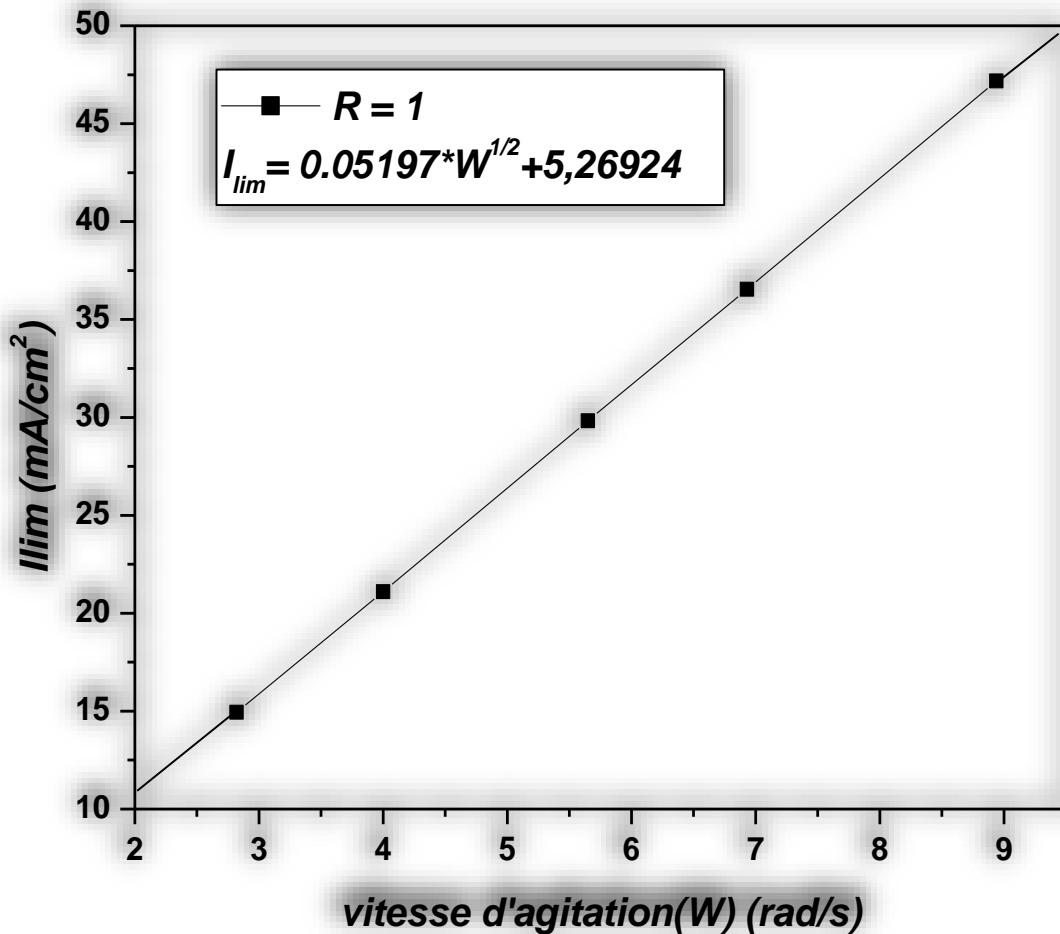


Figure II.5 : Variation de la densité de courant (courant limite) en fonction de la racine carrée de la vitesse d'agitation.

II. 4. Effet de la concentration de NaCl

Nous étudions ici l'effet de la concentration de la solution NaCl sur l'acier, après avoir l'imméré dans plusieurs solutions de différentes concentrations (0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 et 1 M). Les essais sont réalisés avec une vitesse de balayage de 1 mV/s et une vitesse d'agitation de 100 tr/min après 20 minutes d'immersion. Les courbes potentiodynamiques obtenues sont présentées dans la **figure II.6**, et les résultats issus de cette figure sont illustrés dans le **tableau II.3**.

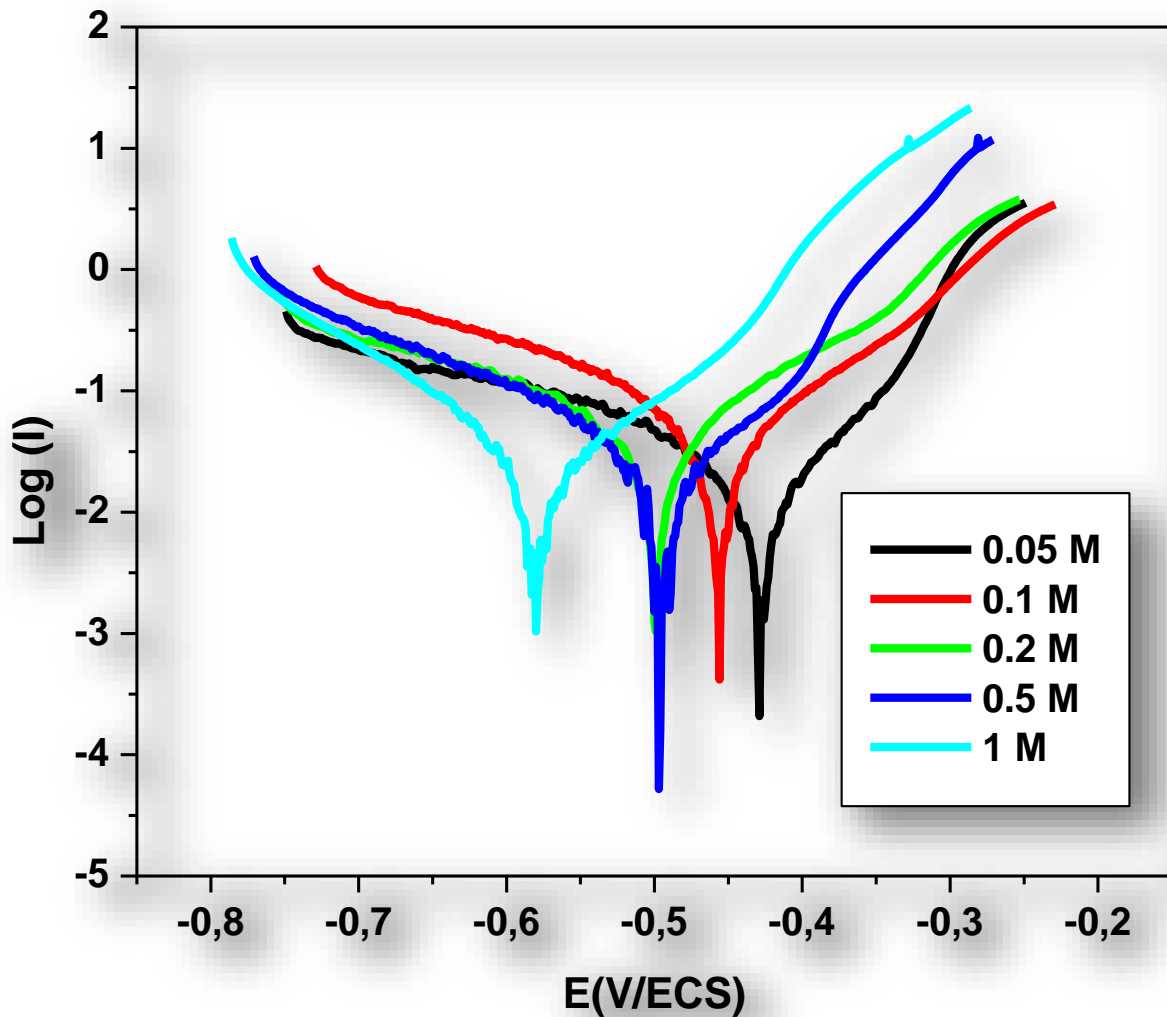


Figure II.6 : Courbes de polarisation de l'acier à différentes concentrations de la solution NaCl.

D'après la **figures II.6**, nous remarquons que l'augmentation de la concentration de la solution corrosive NaCl (0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 et 1 M) ; permet le déplacement du potentiel de corrosion (E_{corr}) vers le champ cathodique, ce qui permet une forte attaque de la surface de l'acier par les

ions Cl^- , et cela provoque une diminution de la résistance (R_p) de l'acier et augmentation du courant de corrosion (I_{corr}). Les résultats obtenus sont listés dans le tableau suivant.

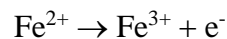
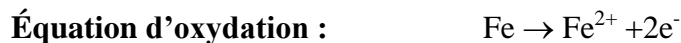
Tableau II.3 : Paramètres électrochimiques de l'acier dans une solution NaCl, à différentes concentrations.

Concentration du milieu corrosif (NaCl/M)	E_{corr} (mV/ECS)	I_{corr} (mA/cm²)	R_p (Ω/cm²)	Ba (mV/dec)	Bc (mV)
0,05	-428,460	$10,44 \cdot 10^{-2}$	221,92	71,2	211,7
0,1	-456,232	$19,85 \cdot 10^{-2}$	152,64	116,2	174,1
0,2	-499,196	$27,5 \cdot 10^{-2}$	143,61	143,9	246,4
0,5	-497,126	$35,9 \cdot 10^{-2}$	119,28	70,3	114,8
1	-578,894	$42 \cdot 10^{-2}$	102,83	90,8	97,8

La réduction de l'oxygène dissous en solution se fait au niveau de la cathode. La condition expérimentale est que l'acier se trouve dans un milieu neutre et aéré.



Par contre, la réaction anodique est représentée dans la dissolution du fer, sauf qu'elle se déroule sous la forme de deux transformations différentes.



Toutes ces réactions électrochimiques se déroulent à l'interface métal/électrolyte.

Comme il est considéré comme influençant les processus de corrosion, le processus cathodique est contrôlé par ‘réduction de l'oxygène’, et le processus anodique est contrôlé par ‘dissolution du métal’.

II. 5. Effet de la température de NaCl

L'augmentation de la température augmente la corrosion du métal, car c'est l'un des facteurs qui affectent la cinétique du processus de corrosion, chose que nous avons observé dans notre expérience dans les conditions expérimentales de vitesse de balayage de 1 mV/s et la vitesse d'agitation choisie 100 tr/min. Les températures utilisées sont les suivantes : 25 ; 35 ; 45 et 55 °C. Les courbes de polarisations présentées dans la **figure II.7** sont tracées après 20 minutes d'immersion dans une solution 0,1M NaCl. Les résultats issus de ces courbes sont listés dans le **tableau II.4**.

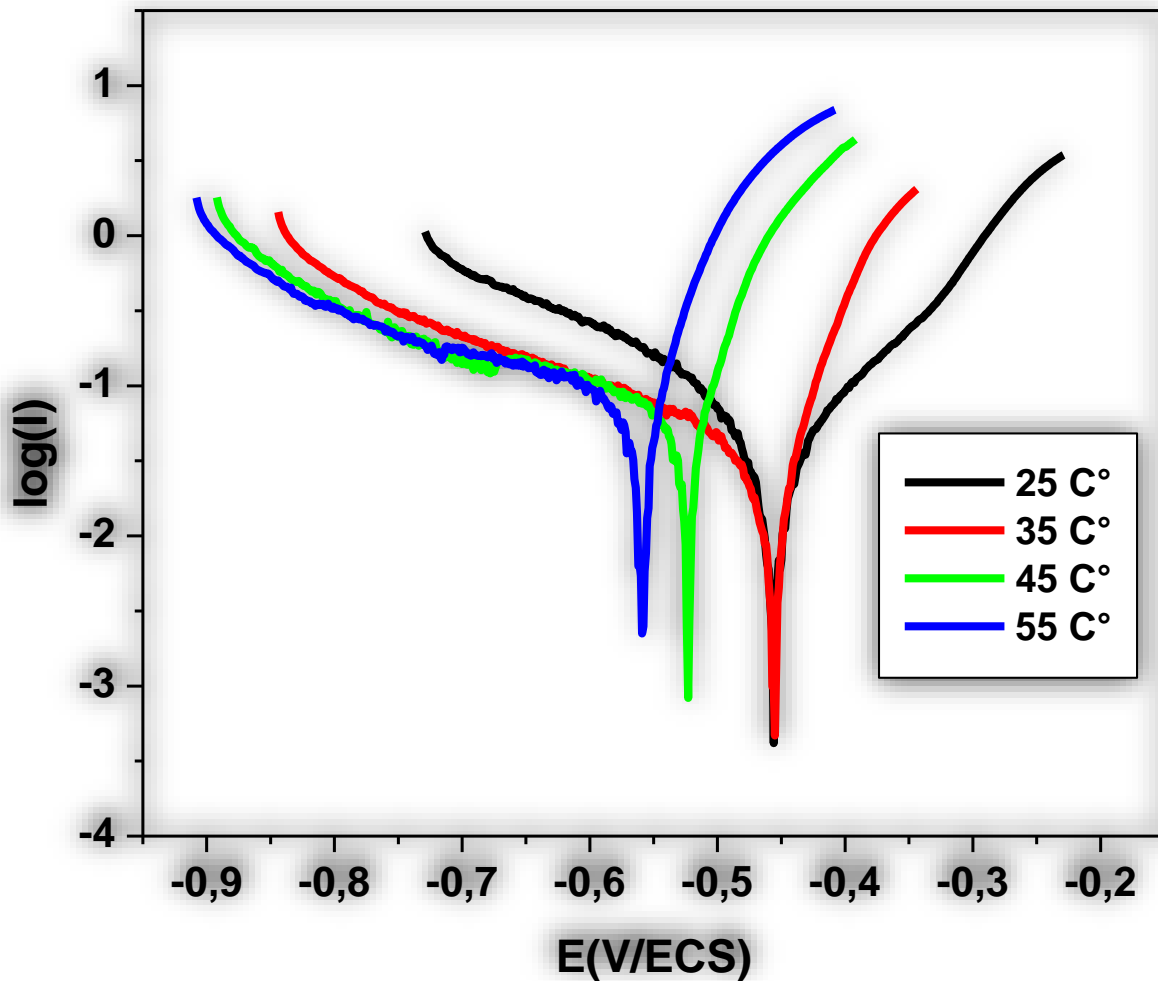


Figure II.7 : Courbes potentiodynamiques de l'acier à différentes températures du milieu corrosif NaCl.

A partir des résultats déduits de cette figure, on note que lorsque la température augmente le potentiel de corrosion se déplace vers la branche cathodique (-456.232 ; -453.872 ; -568.644 ; -546.250 mV/ECS), ce qui signifie que le processus de corrosion est sous contrôle cathodique. On remarque également que l'augmentation de la température provoque l'augmentation de la densité de courant de corrosion (I_{corr}) (0,19 ; 0,12 ; 0,20 ; 0,26 mA/cm²) due à l'interaction de plus d'ions chlorures avec la surface de l'acier et par conséquent la diminution de la résistance de polarisation de l'acier (152. 64 ; 110,57 ; 80,12 et 69.32 Ω /cm²), pour les températures (25 ; 35 ; 45 et 55°C) respectivement,

En outre, on remarque une forte croissance du courant de la branche anodique avec l'augmentation de la température de la solution, ce qui indique que le processus anodique est activé grâce à l'effet thermique.

Tableau II.4 : Paramètres électrochimiques de l'acier, obtenus à partir des courbes potentiodynamiques, après 20minutes d'immersion dans une solution 0,1M NaCl, à différentes températures.

Température (°C)	E_{corr} (mV/ECS)	I_{corr} (mA/cm²)	R_p (Ω/cm²)	Ba (mV/dec)	Bc (mV)
25	-456,232	19,86.10 ⁻²	152,64	116,2	174,1
35	-453,872	12,54.10 ⁻²	110,57	32,4	2071,2
45	-568,644	20,08.10 ⁻²	80,12	37,7	2019,7
55	-546,250	26,34.10 ⁻²	69,32	42,6	2984,5

II. 6. Effet du temps d'immersion dans 0,1 M NaCl

Le but de cette partie est d'étudier l'effet du temps d'immersion sur le comportement de l'acier dans une solution NaCl de 0,1 M de concentration jusqu'à 7 jours d'immersion. Les valeurs de la résistance de polarisation (R_p) en fonction du temps sont listées dans le **tableau II.5**, et le graphe représentant ces valeurs en fonction du temps d'immersion est présenté dans la **figure II.8**.

Tableau II.5 : Tableau montrant les changements des valeurs de la résistance de polarisation de l'acier en fonction du temps d'immersion.

Temps d'immersion (heures)	R_p (Ohm.cm^2)
20 min	152,64
30 min	148,18
1	143,41
2	138,60
4	132,34
8	120,57
12	107,73
24 (1 jour)	106,88
48 (2 jours)	110,49
72 (3 jours)	108,68
120 (5 jours)	104,25
168 (7 jours)	120,01

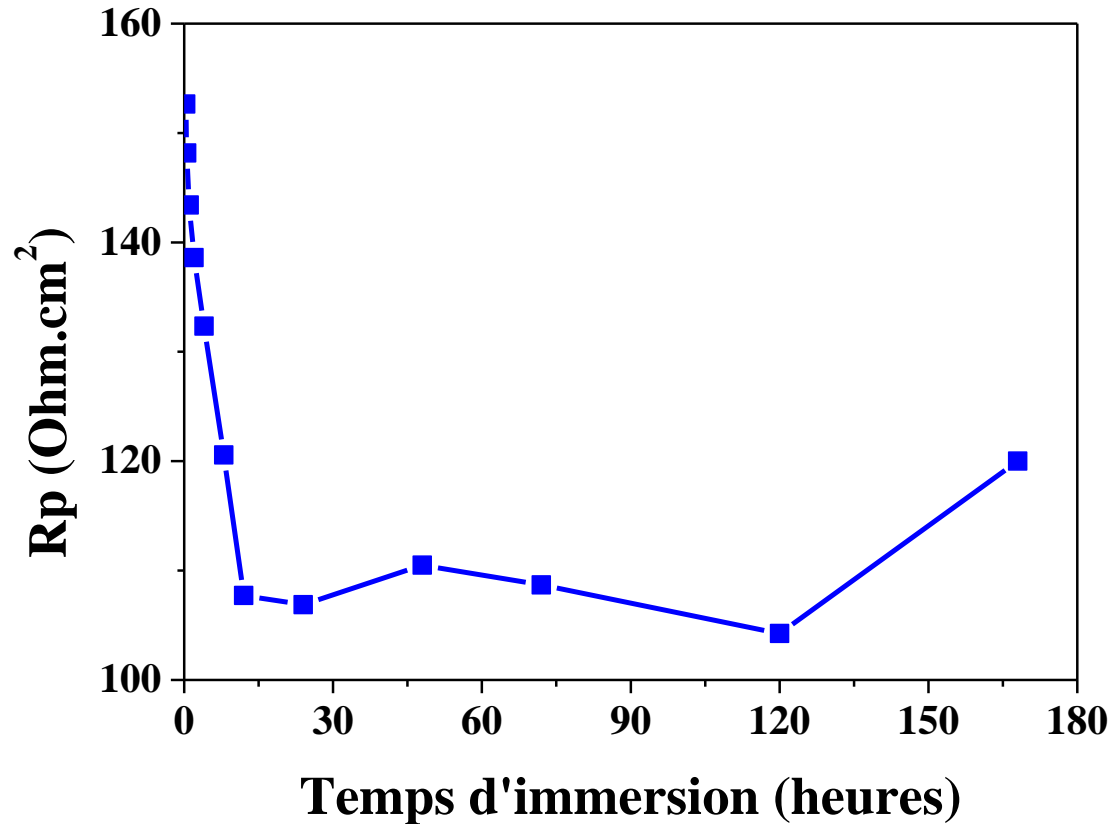


Figure II.8 : Evolution de Rp de l'acier dans 0,1 M NaCl en fonction du temps d'immersion (jusqu'à 7 jours).

L'acier subit plusieurs étapes de développement après avoir longtemps immergé dans le milieu corrosif NaCl, adoptant de nombreux comportements [11]. Où l'on constate une importante diminution de la valeur de la résistance de polarisation (Rp) en un jour (24 heures) de 152,64 à 106,88 (Ohm.cm²) ce qui indique la formation de produits de corrosion sur la surface du métal. Ensuite, au cours des 24 heures suivantes, la résistance de polarisation (Rp) passe à 110,49 et 104,25 (Ohm.cm²) après 48 heures (2 jours) et 72 heures (3 jours) respectivement, où on remarque la quasi-stabilité de la résistance, indiquant qu'il y a déposition de produits de corrosion sur l'acier, et cela conduit à ralentir le développement de la corrosion. Au bout de sept (07) jours, la résistance de corrosion augmente à la valeur 120,01 (Ohm.cm²), signifiant qu'il y a lieu d'une formation de film passif sur la surface de l'acier, jouant le rôle d'auto-protecteur.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail réalisé avait pour but d'étudier l'influence de certains paramètres physico-chimiques sur le comportement de l'acier ASTM A915 dans un milieu corrosif NaCl. L'examen des résultats obtenus permet de nous tirer les points suivants :

- L'augmentation de la vitesse de balayage de la réaction électrochimique provoque plus de dégradation de la surface de l'acier. Également, il a été constaté que le processus électrochimique est sous contrôle diffusionnel.
- L'augmentation de la vitesse d'agitation de la solution corrosive permet d'augmenter le courant de corrosion de l'acier. En outre, le processus électrochimique est sous contrôle convectif.
- L'augmentation de la concentration du milieu corrosif conduit à la diminution de la résistance de l'acier, suite à la croissance d'attaques sur la surface de l'acier par les ions chlorures.
- L'augmentation de la température du milieu corrosif permet une augmentation remarquable du courant de corrosion, indiquant l'activation de la branche anodique dû à l'effet thermique.
- Allonger le temps d'immersion conduit au développement de produits de corrosion sur la surface métallique, c'est-à-dire aggrave la détérioration du matériau, qui devient plus sensible aux attaques de l'environnement corrosif.

Références Bibliographiques :

- [1]. P. Zarras and J.D.S. Smith, Hand book of Smart Coatings for Materials Protection, Woodhead, Cambridge, 2014.
- [2]. M. Pourbaix, Gauthier-Villars, Paris, (1963) 312-313 (in french).
- [3]. D. G. Shchukin, M. Zheludkevich, K. Yasakau, S. Lamaka, M. G. S. Ferreira, H. Möhwald, Adv. Mater., 18 (2006) 1672-1678.
- [4]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00816003/document>
- [5]. M. Mekki daouadji. Les techniques de mesures de la vitesse de corrosion. Séminaire de l'institut algérien du pétrole, Boumerdès, 20 au 24 mars (2004).
- [6]. A. J. Bard et L. R. Faulkner, Electrochimie : Principes, méthodes applications, Edition Masson (1983).
- [7]. N. Boudhrioua, Etude des migrations de l'eau et du chlorure de sodium dans des gels alimentaires : influence de la composition du gel et du procédé appliqué, thèse en génie des procédés. Ecole nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires de Massy, Janvier (2004).
- [8]. T. Uchida, T. Nishiyama, T. Kawamura, in: Proceedings of the 7th European Symposium on Corrosion Inhibitors (7 SEIC), V. Suppl. 9 (1990) p471.
- [9]. M. Doubi, A. Dermaj, H. Ramli, D. Chebabe, N. Hajjaji et A. Srhiri, ScienceLib., Vol 5, 2111-4706.
- [10]. D. Landolt, Traité des matériaux, corrosion et chimie des surfaces des matériaux, Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1993) 490- 493.
- [11]. M. Prakash, A. P. Moon, K. Mondal, S. Shekhar., J. Mater. Eng. Perform., 24 (2015) 3643-3650.