

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**École Nationale Polytechnique**

**Département de Métallurgie**

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

---

**Étude, par simulation, de la fissuration d'une pièce en  
acier inoxydable, sous l'effet d'une attaque chimique  
suivie par une sollicitation mécanique**

---

**Réalisé par : MERGHEM Taki Eddine**

**Présenté et soutenu publiquement le 25/06/2022**

**Composition du jury :**

Président	M. Mohamed CHITROUB	Pr	ENP
Examineur	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	MCA	ENP
Promoteur	M. Fatah HELLAL	Pr	ENP
Promoteur	M. Hamid SEDJAL	MAA	ENP



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**École Nationale Polytechnique**

**Département de Métallurgie**

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

---

**Étude, par simulation, de la fissuration d'une pièce en  
acier inoxydable, sous l'effet d'une attaque chimique  
suivie par une sollicitation mécanique**

---

**Réalisé par : MERGHEM Taki Eddine**

**Présenté et soutenu publiquement le 25/06/2022**

**Composition du jury :**

Président	M. Mohamed CHITROUB	Pr	ENP
Examineur	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	MCA	ENP
Promoteur	M. Fatah HELLAL	Pr	ENP
Promoteur	M. Hamid SEDJAL	MAA	ENP

## REMERCIEMENT

En premier lieu je remercie Allah le Tout Puissant, de m'avoir donné le savoir, et le courage pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mes parents qui m'ont toujours soutenue et encouragée pendant toute ma scolarité et ma graduation aux études universitaires, aussi mes frères et sœurs qui sont toujours derrière moi ;

Au terme du travail, Je tiens à remercier mon promoteur Pr F. HELLAL, et mon Co-promoteur Dr H. SEDJAL, pour leur encadrement et leur disponibilité et leurs conseils, qui ont enrichi ma réflexion.

Je tiens à remercier également Pr M. CHITROUB pour m'avoir honoré en acceptant de présider le jury, Mr Y. BELKACEMI et Mr M. KASSER d'avoir accepté de juger mon humble travail ;

Je n'oublie pas de remercier les enseignants du département de Génie des matériaux à l'École Nationale Polytechnique pour m'avoir offert, ainsi qu'à tous mes camarades de la promotion, une bonne formation au bout des trois années qu'on a passé ensemble ;

Finalement, mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au déroulement de ce humble travail, tous mes camarades de classe dont l'amitié m'est très précieuse.

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة الشقوق في الفولاذ المقاوم للتأكسد AISI 316L المستخدم في زراعة مفصل الورك، ولهذا الغرض، تم إجراء اختبارات الاستقطاب الديناميكي لتحديد تأثيرات الشقوق، في ظل ظروف فسيولوجية تحاكي تلك الخاصة بجسم الإنسان (محلول كلوريد الصوديوم 0.9٪، جلوكوز 0.83 جم / لتر وحمض الكبريتيك عند درجة حموضة تتراوح من 1 إلى 5) من أجل تحديد الظروف التي تفضل تآكل الفولاذ تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هذا الأخير لديه مقاومة جيدة للتآكل المنتظم وأن وجود الشقوق يزيد من خطر التآكل النقري في الوسط الملحي. تم تصدير البيانات التي تم جمعها من الدراسة التجريبية إلى الدراسة العددية باستخدام برنامج ANSYS FLUENT لمحاكاة ظاهرة التآكل لتقدير سرعة التآكل. بعد ذلك، تم إجراء محاكاة التشقق باستخدام برنامج ANSYS MECHANICAL لدراسة انتشار الشق من حفرة ناتجة عن التنقير تحت تأثير الإجهاد الميكانيكي الساكن. حيث لوحظ أن الحفر تمثل مواقع مفضلة لبدء الشقوق.

**الكلمات المفتاحية:** AISI 316L، التآكل، النقر، الشق، المحاكاة.

## ABSTRACT

This work aims to study the cracking of a 316L austenitic stainless steel part used in implantology. For this, Potentiodynamic polarization tests were carried out to determine the effects of notches, under physiological conditions simulating those of the human body (solution of NaCl 0.9%, glucose 0.83 g/L and acid H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> with pH from 1 to 5), in order to determine the conditions favoring the corrosion of AISI 316L steel. The results obtained show that 316L steel has good resistance to generalized corrosion and that the presence of notches increases the risk of pitting corrosion in saline environment. The data collected from the experimental study were exported to the numerical study, using the ANSYS FLUENT software to simulate the corrosion phenomenon to estimate the corrosion rate. Subsequently, a simulation of the cracking of this grade using the ANSYS MECHANICAL software was carried out to study the propagation of a crack from a pit under the effect of a static mechanical stress. Where it has been observed that the pits represent preferential sites for the initiation of cracks.

**Keywords:** AISI 316L, corrosion, pitting, cracking, numerical simulation.

## RÉSUMÉ

Ce travail vise à étudier la fissuration d'une pièce en acier inoxydable austénitique 316L utilisé en implantologie, pour cela, des essais de polarisation potentiodynamique ont été réalisés pour déterminer les effets des entailles, dans des conditions physiologiques simulant celles du corps humain (solution de NaCl 0,9 %, glucose 0,83 g/L et l'acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à des pH allant de 1 à 5), afin de déterminer les conditions favorisant la corrosion de l'acier AISI 316L. Les résultats obtenus montrent que l'acier 316L a une bonne tenue à la corrosion généralisée et que la présence d'entailles augmente le risque de la corrosion par piqûres dans le milieu salin. Les données récoltées de l'étude expérimentale ont été exportées vers l'étude numérique, en utilisant le logiciel ANSYS FLUENT pour simuler le phénomène de corrosion pour estimer la vitesse de corrosion. Par la suite, une simulation de la fissuration de cette nuance à l'aide du logiciel ANSYS MECHANICAL a été faite pour étudier la propagation d'une fissure à partir d'une piqûre sous l'effet d'une contrainte mécanique statique. Où on a pu constater que les piqûres représentent des sites préférentiels pour l'amorçage des fissures.

**Mots clés :** AISI 316L, corrosion, piqûre, fissuration, simulation numérique.

# SOMMAIRE

*Liste des tableaux*

*Liste des figures*

*Liste des symboles*

***Introduction generale ..... 10***

***PARTIE.1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ..... 11***

**Chapitre.1 Généralités sur l'acier inoxydable austénitique 316L..... 13**

1.1 L'acier inoxydable austénitique 316L ..... 13

1.2 Applications de l'acier 316L ..... 14

1.3 Propriétés volumiques ..... 14

1.4 Propriétés de surface..... 15

1.4.1 Passivité ..... 15

1.4.2 La couche passive ..... 15

1.4.3 Biocompatibilité de l'acier inoxydable 316L..... 16

**Chapitre.2 Comportement électrochimique de l'acier316L ..... 19**

2.1 Comportement électrochimique simple ..... 19

2.1.1 Résistance à la corrosion de l'acier 316L..... 19

2.1.2 Mécanisme de résistance de l'acier 316L à la corrosion électrochimique ..... 20

2.1.3 Corrosion par piqûres des aciers 316L..... 21

2.1.4 Facteurs influençant la piqûration ..... 22

2.1.5 Mécanisme de la corrosion par piqûres..... 23

2.2 Comportement électrochimique mixte..... 24

2.2.1 Corrosion sous contrainte de l'acier 316L ..... 24

2.2.2 Mécanisme de la corrosion sous contrainte..... 25

2.3 Les types de fissure..... 26

2.4 Les dangers provoqués par la corrosion dans le corps humain ..... 26

***PARTIE. 2 EXPERIENCE ET RESULTATS ..... 28***

**Chapitre.3 Matériaux et méthodes ..... 30**

3.1 Caractérisation du matériau ..... 30

3.1.1 Caractérisation chimique :..... 30

3.1.2 Caractérisation microstructurale ..... 31

3.1.3 Taille des grains : ..... 32

3.2 Techniques expérimentales..... 32

3.2.1 Essai électrochimique ..... 32

3.2.2 Choix et mise au point des paramètres expérimentaux ..... 33

3.2.3 Préparation des échantillons..... 33

3.2.4 La nature des électrolytes..... 34

3.2.5 Observation microscopique..... 35

3.3 Exploitation des courbes de polarisation ..... 35

3.3.1 Extrapolation des droites de Tafel..... 35

3.3.2 Mesure de la résistance de polarisation..... 36

3.4 Méthode numérique ..... 37

3.4.1 Simulation numérique du phénomène de la corrosion électrochimique..... 37

3.4.1.1 Modèle mathématique ..... 38

3.4.1.2 Modèle numérique..... 38

3.4.2 Simulation numérique de la fissuration..... 40

3.4.2.1	Modèle mathématique .....	41
3.4.3	Modèle numérique de la propagation de fissure .....	41
<b>Chapitre.4</b>	<b>Présentation et analyse des résultats expérimentaux .....</b>	<b>46</b>
4.1	Effet de l'état de surface .....	46
4.1.1	Relation entre l'état de surface et les paramètres électrochimiques : .....	48
4.2	Effet de la nature du milieu : .....	49
4.2.1	Relation entre les données électrochimique et le milieu .....	52
4.3	Effet de l'acidité de l'acide sulfuriques .....	53
4.3.1	Relation entre le pH de l'acide sulfurique et les paramètres électrochimique.....	54
4.4	Observation des piqûres.....	55
4.5	Discussions et perspectives.....	59
4.5.1	Influence d'état de surface .....	59
4.5.2	Influence de la nature du milieu .....	59
4.5.3	Influence du pH d'acide sulfurique .....	60
4.6	Conclusion partielle .....	61
<b>Chapitre.5</b>	<b>Présentation et analyse des résultats de la simulation numérique.....</b>	<b>63</b>
5.1	La simulation numérique de la corrosion .....	63
5.1.1	Vitesse de corrosion .....	63
5.1.2	Discussion des résultats de la simulation de la corrosion.....	64
5.2	Simulation numérique de la fissuration .....	64
5.2.1	Présentation des résultats .....	64
5.2.2	La déformation totale : .....	65
5.2.3	Déformation élastique équivalente .....	66
5.2.4	Contrainte équivalente de Von mises .....	66
5.2.5	Facteur d'intensité de contrainte .....	67
5.2.6	Discussion et perspectives.....	68
5.3	Conclusion partielle .....	68
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>70</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>		<b>71</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Composition chimique typique de l'acier 316L .....	13
Tableau 1-2: Propriétés physiques de l'acier 316L.....	14
Tableau 1-3: Propriétés mécaniques de l'acier 316L.....	15
Tableau 3-1: Teneur en éléments d'alliage du 316L en pourcentage massique.....	31
Tableau 3-2: Taille des grains de l'acier 316L .....	32
Tableau 3-3 : Géométrie de l'éprouvette .....	39
Tableau 3-4 : Géométrie de l'éprouvette pour simulation de fissure.....	41
Tableau 3-5: Donnés de matériau pour la simulation.....	42
Tableau 3-6 : Maillage de l'éprouvette .....	43
Tableau 3-7 : Conditions aux limites .....	44
Tableau 4-1: Résultats des essais potentiostatiques de l'acier 316L.....	48
Tableau 4-2: Résultats des essais potentiostatiques de l'acier 316L.....	51
Tableau 4-3: Résultats des essais de polarisation potentiostatiques de l'acier 316L.....	54
Tableau 5-1: Résultats de la simulation.....	65

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Mécanisme de développement du film passif.....	16
Figure 2-1: Relation entre la résistance du film passif et les éléments d'alliage .....	19
Figure 2-2: Courbe de polarisation anodique de l'acier inoxydable.....	20
Figure 2-3: Corrosion par piqûres .....	22
Figure 2-4: Mécanisme de la corrosion par piqûre.....	23
Figure 2-5: Mécanismes proposés pour l'amorçage d'une piqûres .....	24
Figure 2-6: Réaction électrochimique au fond d'une fissure.....	25
Figure 2-7: Mécanisme de la corrosion sous contrainte.....	25
Figure 2-8 : Fissure intergranulaire .....	26
Figure 2-9 : Fissure transgranulaire.....	26
Figure 2-10 : Corrosion par piqûres d'une prothèse de hanche. ....	27
Figure 3-1: Dispositif expérimental utilisé pour les essais électrochimiques. ....	30
Figure 3-2: Microstructure de l'acier 316l prise au MEB.....	31
Figure 3-3: Image de la microstructure du 316L, prise au microscope optique.....	32
Figure 3-4: Schéma du dispositif pour le tracé d'une courbe $i = f(E)$ .....	33
Figure 3-5: L'échantillon (E0). ....	34
Figure 3-6: L'échantillon (E1). ....	34
Figure 3-7: L'échantillon (E2). ....	34
Figure 3-8: Droites de Tafel. ....	36
Figure 3-9: Détermination de la résistance à la polarisation. ....	37
<i>Figure 3-10 : Maillage de l'éprouvette .....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 3-11 : Système de coordonnées locale au front de fissure .....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3-12 : Élément tétraèdre.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3-13 : Résultat de maillage.....</i>	<i>44</i>
Figure 4-1: Superposition des courbes de polarisation potentiostatiques des échantillons d'aciers 316L polarisés dans la solution NaCl 0,9% .....	46
Figure 4-2: Superposition des courbes de polarisation potentiostatiques des échantillons d'aciers 316L polarisés dans la solution du glucose 0,83 g/L. ....	47
Figure 4-3: Superposition des courbes de polarisation des échantillons d'aciers 316L polarisés dans l'acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1 . ....	47
Figure 4-4: Densité de courant de corrosion de corrosion pour chaque milieu.....	49

Figure 4-5: Potentiel de corrosion dans chaque milieu. ....	49
Figure 4-6: Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon E0 d'acier 316L pour les trois milieux.....	50
Figure 4-7: Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon E1 d'acier 316L pour les trois milieux.....	50
Figure 4-8: Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon E2 d'acier 316L pour les trois milieux.....	51
Figure 4-9: Courant de corrosion en fonction du milieu .....	52
Figure 4-10: Potentiel de corrosion en fonction du milieu.....	53
Figure 4-11: Superposition des courbes de polarisation potentiostatiques l'échantillon 0 dans l'acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1, pH 2, pH 3, pH 4 et pH 5.....	53
Figure 4-12: Courant de corrosion en fonction de l'acidité du milieu sulfurique.....	54
Figure 4-13: Potentiel de corrosion en fonction de l'acidité du milieu sulfurique. ....	55
Figure 4-14: Micrographie de l'échantillon E0 après polarisation dans NaCl 0,9%. ....	55
Figure 4-15:Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans NaCl 0,9%. ....	56
Figure 4-16:Micrographie de l'échantillon E2 après polarisation dans NaCl 0,9%. ....	56
Figure 4-17: Micrographie de l'échantillon E0 après polarisation dans la solution glucose 0,83g/L. ....	56
Figure 4-18:Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans la solution glucose 0,83g/L. ....	57
Figure 4-19:Micrographie de l'échantillon E2 après polarisation dans la solution glucose 0,83g/L. ....	57
Figure 4-20:Micrographie de l'échantillon E0 après polarisation dans la solution d'acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1. ....	57
Figure 4-21:Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans la solution d'acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1. ....	58
Figure 4-22:Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans la solution d'acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1. ....	58
Figure 5-1 : Vitesse de corrosion obtenue par la simulation .....	63
Figure 5-2 : Déplacement total.....	65
Figure 5-3 : Déformation élastique équivalente de l'éprouvette. ....	66
Figure 5-4 : Distribution des contraintes de Von mises .....	67
Figure 5-5 : Distribution des contraintes de Von mises au fond de fissure.....	67
Figure 5-6 : Facteurs d'intensité de contrainte en fonction de la longueur de fissure.....	68

## LISTE DES SYMBOLES

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>NaCl</b>	Chlorure de sodium
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Acide sulfurique
<b>CSC</b>	Corrosion sous contrainte
<b>ECS</b>	Électrode au Calomel Saturée
<b>R<sub>p</sub></b>	Résistance à la polarisation
<b>β<sub>a</sub></b>	Pente de tafel anodique
<b>β<sub>c</sub></b>	Pente de tafel cathodique
<b>E<sub>corr</sub></b>	Potentiel de corrosion
<b>I<sub>corr</sub></b>	Courant de corrosion
<b>i<sub>corr</sub></b>	Densité de courant de corrosion
<b>v<sub>corr</sub></b>	Vitesse de corrosion
<b>η</b>	La surtension
<b>n</b>	Nombre de charge
<b>ρ</b>	La masse volumique
<b>F</b>	Constante de faraday
<b>MEB</b>	Microscope électronique à balayage
<b>K<sub>I</sub></b>	Facteur d'intensité de contrainte mode I
<b>K<sub>IC</sub></b>	Facteur d'intensité de contrainte critique
<b>M</b>	La masse molaire
<b>σ</b>	La contrainte
<b>ε</b>	La déformation
<b>SOLID187</b>	Type d'élément 3D contient 10noeuds pour chaque élément

# INTRODUCTION GENERALE

La progression et le développement des matériaux depuis le XXème siècle, a fortement contribué à la résolution des problèmes technologiques et industriels. Les aciers inoxydables figurent parmi les métaux qui sont actuellement utilisés tant dans les technologies de pointe que dans les industries agroalimentaires, automobiles, équipements maritimes, nucléaire chimiques, pharmaceutiques et aéronautique.

Parlant de l'une des nombreuses nuances d'aciers inoxydables, l'acier inoxydable austénitique AISI 316L combine des propriétés mécaniques spécifiques et une résistance à la corrosion générale lui offrant un avantage majeur pour être choisi par les concepteurs dans différents secteurs d'activité, notamment dans le secteur médical, où il est utilisé comme biomatériau dans les implants orthopédiques.

En effet, la plupart des implants métalliques prétendaient avoir une résistance élevée à la corrosion, afin de prolonger la durée de vie de l'implant dans le corps humain. Toutefois, la dégradation de ces implants devient plus préoccupante pour les chirurgiens au cours de ces dernières années. L'étude de la corrosion des biomatériaux est devenue cruciale pour surmonter l'inflammation et les réactions allergiques causées par les implants des biomatériaux sur le corps humain.

Notre travail s'inscrit dans cette problématique et vise à étudier l'effet électrochimique et mécanique de l'acier 316L, utilisé comme biomatériau métallique dans l'implantologie en Algérie.

L'un des enjeux des ingénieurs c'est de comprendre le comportement du matériau dans son milieu d'emploi et d'étudier les causes et les conditions conduisant à son inadaptation. Pour ce faire, nous avons adopté une approche qui englobe l'étude expérimentale et la modélisation numérique.

D'abord nous avons procédé à l'étude du comportement électrochimique de l'acier 316L, de surface altérée mécaniquement, en mettant en évidence l'effet du milieu (salin, glucosé et acide) par des essais de polarisation potentiodynamique en mode potentiostatique.

Par la suite, la simulation numérique sera réalisée pour étudier, en premier temps, le comportement électrochimique de l'acier 316L en utilisant le logiciel CFD ANSYS FLUENT puis la propagation d'une fissure causée par la piqûration à l'aide du logiciel ANSYS MECHANICAL. Lors de ces simulations, les paramètres expérimentaux ont été utilisés afin de créer un modèle numérique simulant la réalité.

Ce rapport est scindé en deux parties. La première partie, théorique, comprend une étude bibliographique portant sur les caractéristiques métallurgiques de l'acier inoxydable austénitique ainsi que les mécanismes de détérioration électrochimique simple et complexe.

Quant à la partie expérimentale, cette dernière décrit le matériau et les différentes méthodes expérimentales et numériques mises en œuvre. Les deux derniers chapitres de cette partie sont consacrés à la présentation des résultats obtenus à l'issue des essais expérimentaux et de la simulation. Ces résultats sont analysés et discutés tout en adoptant une approche matériau pour élucider les aspects électrochimique et mécanique.

## **PARTIE.1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

**CHAPITRE.1 :**

***Généralités sur l'acier inoxydable austénitique  
316L***

## **Chapitre.1 Généralités sur l'acier inoxydable austénitique 316L**

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques dont l'élément principal est le fer auxquels on a rajouté, avec des teneurs spécifiques, certains éléments afin de modifier et améliorer leurs propriétés. Selon les traitements métallurgiques qu'ils ont subis lors de l'élaboration de l'alliage et les teneurs des différents composants, où le chrome a un seuil minimal de 12%, les aciers inoxydables sont classés en quatre grandes familles, à savoir les aciers inoxydables ferritiques, les aciers inoxydables martensitiques, les aciers inoxydables austéno-ferritiques et les aciers inoxydables austénitiques objet de notre étude.

### **1.1 L'acier inoxydable austénitique 316L**

L'acier inoxydable austénitique est un alliage à base de fer composé majoritairement de chrome et de nickel. Ce dernier est un élément gammagène ( $\gamma$ -gène) indispensable pour stabiliser la structure austénitique de l'acier à température ambiante et améliorer ses propriétés mécaniques [1]. Quant au chrome qui est un élément alphasgène, il donne à l'acier son caractère résistant à la corrosion via la formation en surface d'une couche d'oxyde de chrome (majoritairement sous forme  $Cr_2O_3$ ).

L'acier 316L (« L » abréviation pour « Low Carbone ») fait partie de la famille des aciers inoxydables austénitiques et possède une teneur en carbone inférieure à 0,03% ce qui lui permet de réduire significativement la formation de carbures de chrome  $Cr_{23}C_6$  et d'éviter, ainsi, les phénomènes de déchromisations aux joints de grains. Ce qui lui offre une meilleure résistance à la corrosion intergranulaire [2].

De même, la présence du molybdène, même à des taux de 2%, a un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion de l'acier 316L dans des milieux acides [3].

Selon l'ASTM (American Society for Testing and Materials) la composition chimique de l'acier 316L est détaillée dans le tableau ci-après [4]:

*Tableau 1-1: Composition chimique typique de l'acier 316L*

<b>Eléments</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>	<b>C</b>	<b>P</b>	<b>N</b>
<b>%</b>	16-18	10-14	<2	2-3	<0,75	<0,03	<0,045	<0,10

En plus des éléments d'alliage supra-cités, d'autres éléments sont utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques et stabiliser la microstructure austénitique de l'acier 316L, tel que :

- **Le manganèse (Mn)** : pour une teneur massique inférieure à 7% renforçant ainsi leur résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides.
- **L'azote (N)** : élément gammagène aussi qui, en présence de faibles teneurs en carbone, augmente la limite d'élasticité sans diminuer la résistance à la corrosion intergranulaire.
- **Le silicium (Si)** : élément alphasgène qui diminue la résistance à la fissuration lors du soudage.

- **Le soufre (S)** : à des teneurs avoisinant 0,2%, améliore considérablement l'usinabilité au détriment de la résistance à la corrosion par piqûres [2] [3].

Ces éléments sont présents en petite quantité dans la composition de l'acier 316L, soit en tant qu'impuretés, soit ajoutés volontairement pour améliorer certaines propriétés ou compenser l'effet néfaste d'un autre élément.

## **1.2 Applications de l'acier 316L**

L'acier inoxydable austénitique de type 316L répond à deux critères importants, technique et économique, pour la sélection des matériaux à utiliser dans différents domaines.

En effet, en raison de sa résistance à la corrosion dans des environnements agressifs (haute température, milieux acides) et de son faible coût de production par rapport aux autres métaux, la nuance 316L est largement utilisée dans plusieurs secteurs d'activité tel que les industries pétrolières, chimiques, pharmaceutiques, nucléaires et médicales. Aussi, cette nuance est considérée parmi les matériaux d'implant les plus courants pour les applications orthopédiques.

## **1.3 Propriétés volumiques**

Grace à sa microstructure austénitique et ses éléments d'alliage, l'acier 316L est doté d'excellentes propriétés physique et mécanique lui permet de travailler dans des conditions sévères par rapport aux autres matériaux industriels à l'instar de l'acier 304 et d'être qualifié parmi les matériaux durables.

Les tableaux (1-2) et (1-3) résument les propriétés physique et mécanique de l'acier 316L

*Tableau 1-2: Propriétés physiques de l'acier 316L[4].*

<b>Propriétés</b>	<b>Valeurs</b>
Densité	8,027 g/cm <sup>3</sup>
Résistivité électrique	74μ.cm à 20°C
Conductibilité thermique	16,3 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Température de fusion	1371 – 1399 °C

La combinaison des caractéristiques mécaniques (résistance mécanique, ductilité et ténacité) du l'acier 316L qui couvrent une très grande plage de températures, allant des températures cryogéniques jusqu'à celles dépassant 1000 °C, et sa grande résistance à la corrosion, offre à cet alliage une durée de vie importante et par conséquent un gain économique à long terme.

Le tableau ci-dessous présente les propriétés mécaniques de cette nuance des aciers inoxydables austénitiques.

Tableau 1-3: Propriétés mécaniques de l'acier 316L[4].

Propriétés	Valeurs
Module de Young	190-200 GPa
Coefficient de Poisson	0,3
Limite élastique	217 MPa
Résistance à la traction	520-645 MPa
Allongement à la rupture	40 – 68%
Coefficient de dilatation thermique moyen de 20 à 1000 °C	$16,5 - 19,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Dureté	95 HRB ou 136 HV

## 1.4 Propriétés de surface

### 1.4.1 Passivité

La passivité est décrite comme l'état d'une surface métallique caractérisée par de faibles taux de corrosion dans une région potentielle significativement oxydante pour le métal, selon l'American Society for Testing and Materials (ASTM G 15-83).

Il existe un effet de seuil au-delà duquel un phénomène de passivité peut se manifester ; à titre d'exemple et contrairement aux aciers avec une teneur inférieure 12% en chrome, les aciers ayant une teneur supérieure à cette valeur exhibent ce caractère tel que l'acier 316L.

De plus, si la couche passive devait être détruite localement suite à un endommagement accidentel, elle possède la propriété de pouvoir se reconstituer dans un grand nombre de milieux, ce qui traduit la propriété d'autopassivation de l'alliage métallique dans ce milieu[5].

Cependant, la passivité n'est pas une propriété intrinsèque à un métal. L'oxydation favorise la passivation, mais les ions halogènes détruisent l'état passif.

### 1.4.2 La couche passive

Le film passif est fortement enrichie en chrome, il contient également du fer, des hydroxydes et de l'eau. Dans les aciers inoxydables en générale l'addition du chrome en quantité suffisante est nécessaire pour assurer leur passivité dans leur milieu d'emploi, les normes métallurgiques imposent une teneur en chrome supérieure à 12 %. Concernant les aciers inoxydables austénitiques, le chrome peut atteindre une teneur allant jusqu'à 18 %, ce qui favorise la passivation.

L'acier 316L possède en surface une couche passive très adhérente qui le protège de l'environnement extérieur. Elle est principalement formée d'un oxyde de chrome Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 1 à 10 nm d'épaisseur et de très faible perméabilité ionique[6][3].

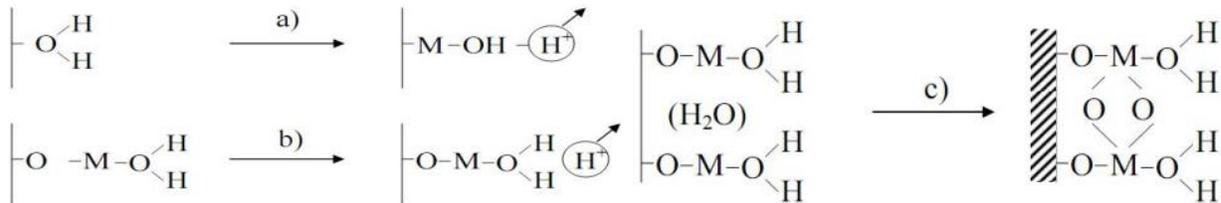
La résistance à la corrosion d'une couche passive peut très souvent s'améliorer avec le temps lorsque le métal est exposé à un environnement moins agressif[7].

Plusieurs modèles expliquent la formation de la couche passive et démontrent qu'elle est en fait un milieu dynamique, dont l'équilibre peut être rompu par la présence de contraintes chimiques, thermiques et mécaniques.

Le modèle dit "déprotonation de l'eau" semble être le plus probable parmi les modèles phénoménologiques établis pour expliquer la formation de la couche passive.

La force motrice assurant la croissance et la stabilité de la couche passive est due à l'existence d'une différence de potentiel entre le métal et l'environnement, provoquant ainsi l'apparition d'un champ électrique élevé à l'interface. La couche se développerait à partir d'un film initial de molécules d'eau et aurait un caractère amorphe plus ou moins marqué. Des cations provenant du substrat métallique diffuseraient à travers ce film sous l'influence de la différence de potentiel et ce, d'autant plus que leur affinité pour l'oxygène est importante. La neutralité électrique serait assurée par l'éjection de protons vers l'extérieur, permettant de passer d'une structure d'eau adsorbée vers celle d'un oxyde, avec tous les intermédiaires possibles, comme illustré dans la figure 1-1[8].

Les couches internes du film seraient présentes sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes métalliques et les couches externes sous forme d'une structure d'eau liée et/ou d'hydroxydes, conduisant ainsi à une structure d'oxyde hydraté peu organisé.



*Figure 1-1: Mécanisme de développement du film passif.*

### **1.4.3 Biocompatibilité de l'acier inoxydable 316L**

Un biomatériau est un matériau non vivant utilisé et conçu pour interagir avec des systèmes biologiques. Il peut être implanté dans le corps humain ou utilisé dans la construction d'appareils extracorporels.

Pour qu'un matériau soit considéré comme un biomatériau, il faut qu'il puisse répondre à un ensemble de critères d'appréciations concernant ses interactions avec l'environnement où il se trouve. Il doit répondre aux règles générales des biomatériaux [9] suivantes:

- Ne pas modifier l'environnement ;
- Ne pas être modifié par l'environnement ;

- Être chimiquement inerte ;
- Ne pas déclencher de réactions inflammatoires ;
- Ne pas être carcinogène ;
- Supporter les contraintes mécaniques ;
- Être d'une manipulation aisée, tant pour sa mise en œuvre que pour son application clinique.

Dans le domaine médical, l'acier 316L est utilisé comme matériau de restauration et de comblement osseux, implant articulaire (plaque, vis et clous d'ostéosynthèse) dans la réparation des fractures ainsi que prothèses d'articulation [10]. Son utilisation pour ce type d'application est spécifiée par les normes NF EN ISO 7153-1, 5832-1 et 5832-9.

**CHAPITRE.2 :**

***Comportement électrochimique de l'acier  
316L***

## Chapitre.2 Comportement électrochimique de l'acier316L

Dans ce deuxième chapitre nous aborderons les comportements électrochimiques simple et mixte relatifs à l'étude de l'interaction de l'acier 316L avec son environnement uniquement en premier lieu, puis en présence des contraintes mécaniques.

### 2.1 Comportement électrochimique simple

L'acier inoxydable 316L, à l'instar de la plupart des métaux passivables, est plutôt sensible aux phénomènes de corrosion localisée. Celle-ci est rendue possible par une rupture locale de l'intégrité de la couche passive sous l'effet corrosif de son milieu [7].

#### 2.1.1 Résistance à la corrosion de l'acier 316L

Les aciers inoxydables sont des matériaux utilisés dans de nombreux domaines industriels grâce à leur très grande résistance à la corrosion généralisée.

La résistance à la corrosion de l'acier 316L est due à la formation d'un film d'oxyde compact et ultrafin (1 à 10 nm), et la tenue à la corrosion de ce dernier dépend de la stabilité du film passif formé qui est en relation avec la composition du film, l'épaisseur et sa structure et le rôle des éléments d'alliages Cr, Ni, Mo[6].

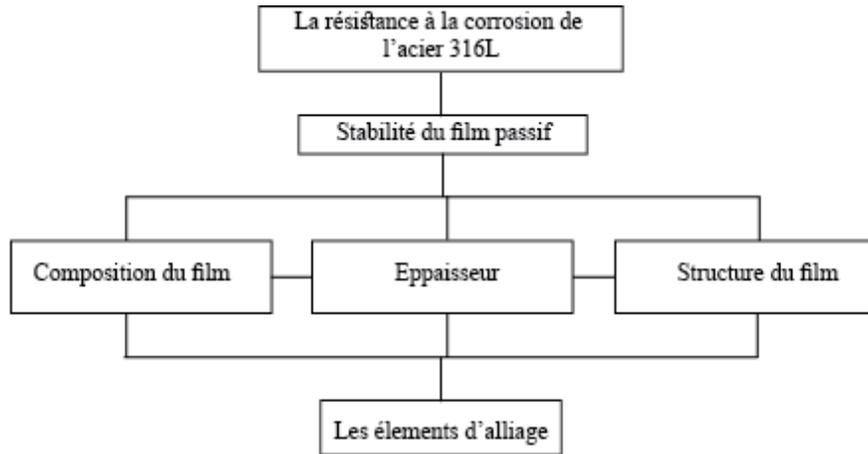


Figure 2-1: Relation entre la résistance du film passif et les éléments d'alliage

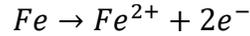
La composition chimique du film passif peut être caractériser par plusieurs techniques notamment la spectroscopie photoélectronique aux rayons X(XPS), IN-SITU[3], [11].

Sous la couche passive, la concentration en chrome dans cette région est supérieure à sa concentration en volume dans l'acier ; les atomes de chrome ont donc diffusé du volume vers la surface. En effet, leur oxyde est plus stable que celui du fer, avec une énergie libre de formation à d'hydroxydes/carbonates, se trouve une couche plus épaisse formée d'oxydes de chrome principalement, et moins de fer, qui constitue la partie principale de la couche température ambiante pour  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ [3], le molybdène ( $\text{Mo}^{6+}$ ) est présent souvent après une polarisation dans l'acide sulfurique pH1[11].

### 2.1.2 Mécanisme de résistance de l'acier 316L à la corrosion électrochimique

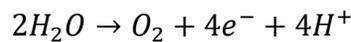
Dans la figure ci-dessous qui montre la courbe de polarisation anodique de l'acier 316L on peut distinguer les trois domaines suivants :

- 1) Domaine actif où le métal est sous l'effet d'une attaque chimique caractérisé par une réaction anodique :



- 2) Domaine passif dans lequel le film passif agit pour protéger la surface du métal contre la corrosion uniforme on remarque une diminution remarquable de l'intensité du courant jusqu'à un courant de passivation de grandeur ( $\mu A/cm^2$ ) le film passif est stable et l'échange de courant entre la surface du métal et le milieu est quasiment nul. Le courant reste constant dans l'intervalle de passivité jusqu'à une valeur de potentiel appeler potentiel de piqûration ou potentiel de transpassivation, d'où la rupture du film passif et on remarque une augmentation rapide et importante du courant.

- 3) Domaine de transpassivation qui est caractérisé par la réaction d'oxydation de l'eau comme suit :



Dans ce dernier domaine, l'apparition des paliers de « pseudopassivation » dans la courbe de polarisation avec un courant qui devient constant traduit la repassivité de l'acier 316L.[5]

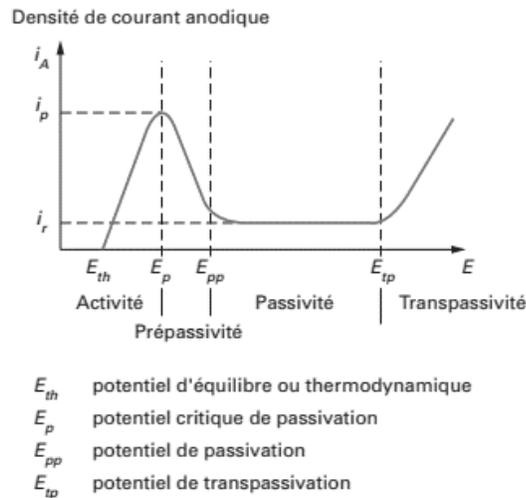


Figure 2-2: Courbe de polarisation anodique de l'acier inoxydable[12].

- 4) Rupture du film passif (dépassivation)

La rupture du film passif dans une situation d'attaque localisée est due aux facteurs liés à l'environnement ci-après :

- Les ions halogénures tel que les chlorures qui ont la capacité de pénétrer ou de diffuser dans le film passif et de provoquer une rupture locale ;

- Le pH de dépassivation ( $pH_d$ ), c'est la valeur de pH déterminée par l'expérimentation et pour laquelle le métal perd son pouvoir passivable, au-dessus de cette valeur le milieu est considéré quasi-neutre pour l'acier 316L ;
- Le pouvoir oxydant de la solution, la présence d'un agent oxydant tel que l'oxygène dans le milieu augmente le risque de la rupture de la couche passive ;
- La température est un paramètre opératoire qui permet d'augmenter le risque à la corrosion et l'anoblissement du métal ;
- Les contraintes mécaniques.

Les conséquences de la rupture du film passif conduisent à la corrosion localisée de l'acier 316L notamment la corrosion par piqûres et la corrosion sous contrainte qu'on va discuter en détail dans les paragraphes suivants.

### **2.1.3 Corrosion par piqûres des aciers 316L**

La corrosion par piqûres est une forme d'attaque localisée qui cible la surface du métal et provoque des trous de différentes morphologies.

Elle se manifeste par la présence de zones actives de surface réduite, là où le film passif est détruit ou disparu, entourées d'une zone passive beaucoup plus étendue et dont le film est intact. Dans ce cas l'acier 316L produit un « couple galvanique interne [13]».

Avec le développement de la corrosion, la région se creuse et devient partiellement occluse. La diffusion vers l'électrolyte s'en trouve ralentie, provoquant une accumulation locale de produits de corrosion, qui peut modifier suffisamment la chimie locale et l'agressivité du milieu pour rendre toute repassivation impossible.

La corrosion par piqûres est l'une des formes les plus destructrices et insidieuse cela provoque une défaillance d'équipement en raison de la perforation avec seulement un petit pourcentage de perte de poids du métal, souvent il est difficile de détecter les piqûres à cause de sa petite taille et parfois sont recouvertes de produit de corrosion.

Ce phénomène se produit principalement en milieux aqueux chlorurés neutres, contenant de l'oxygène qui est un agent oxydant, suite à des interactions entre la surface du métal et les espèces du milieu. La concentration ascendante des ions  $Cl^-$  dans la piqûre résulte de leur migration sous l'action d'un flux de transport afin de maintenir la neutralité électrique[13], [14].

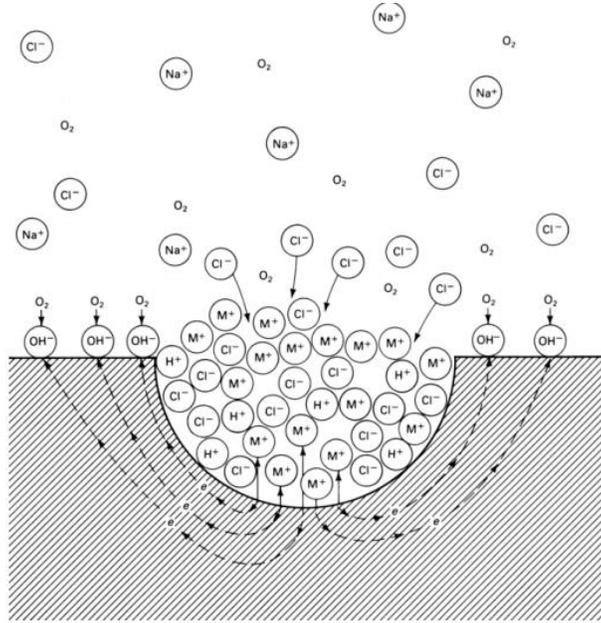


Figure 2-3: Corrosion par piqûres[15]

#### 2.1.4 Facteurs influençant la piqûration

Le potentiel critique de piqûres est un paramètre cinétique et thermodynamique difficile à caractériser. Sa valeur dépend du mécanisme d'initiation de piqûre, de la cinétique de croissance et de la repassivation de la piqûre. De plus, la mesure du potentiel de piqûres des alliages industriels est parfois difficile, nécessitant une analyse statistique pour calculer la probabilité de piqûres pour un potentiel particulier. Malgré ces limitations, le potentiel de piqûres est une mesure utile pour déterminer la sensibilité d'un métal ou d'un alliage à la corrosion par piqûres. Le potentiel de piqûres du système d'environnement métallique est déterminé par les facteurs suivants [7], [13]:

- La composition chimique du métal ;
- L'état de surface et la présence des inclusions ;
- La composition chimique de l'électrolyte et la concentration des ions agressives comme le  $\text{Cl}^-$  ;
- La température ;
- Potentiel de corrosion (type et concentration des oxydants, la réaction cathodique).

En augmentant la concentration du chlorure, la température, le potentiel de corrosion et en diminuant le pH, le risque de la corrosion par piqûres devient plus important.

### 2.1.5 Mécanisme de la corrosion par piqûres

La piqûration du l'acier 316L passe par les trois étapes suivantes[7] :

1. **L'amorçage** : ou la nucléation de la piqûre correspond à la rupture de la couche passive ;
2. **Croissance métastable** : dans cette étape la corrosion est significative, le métal est capable de se repassiver tant que la piqûre n'atteint pas un état critique ;
3. **Stabilisation des piqûres** : c'est l'étape irréversible ou la piqûre atteint un stade critique de développement.

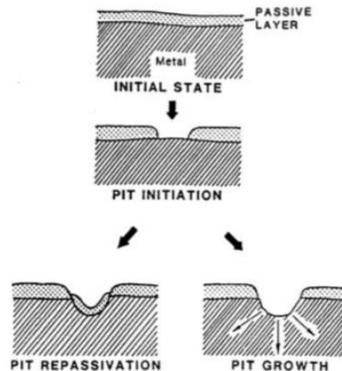


Figure 2-4: Mécanisme de la corrosion par piqûre.

Concernant la première étape relative à l'amorçage, trois mécanismes ont été proposés pour expliquer ce phénomène de nucléation d'une piqûre[7], [16].

- **Le mécanisme de rupture** : correspond à la fissuration du film protecteur ce qui expose le métal local aux ions agressifs. Cette rupture est due à plusieurs facteurs à savoir : la tension interfaciale du film, les forces d'électrostriction nées et de l'intense champ électrique régnant dans le film ;
- **Le mécanisme de pénétration** : la pénétration se manifeste par l'incorporation des ions agressifs tel que les chlorures dans le film passif puis transportés vers l'interface ;
- **Le mécanisme d'adsorption** : les chlorures adsorbés à l'interface de la couche passive accélèrent la dissolution des cations contenus dans le film passif, provoquant d'une manière locale son amincissement et sa disparition.

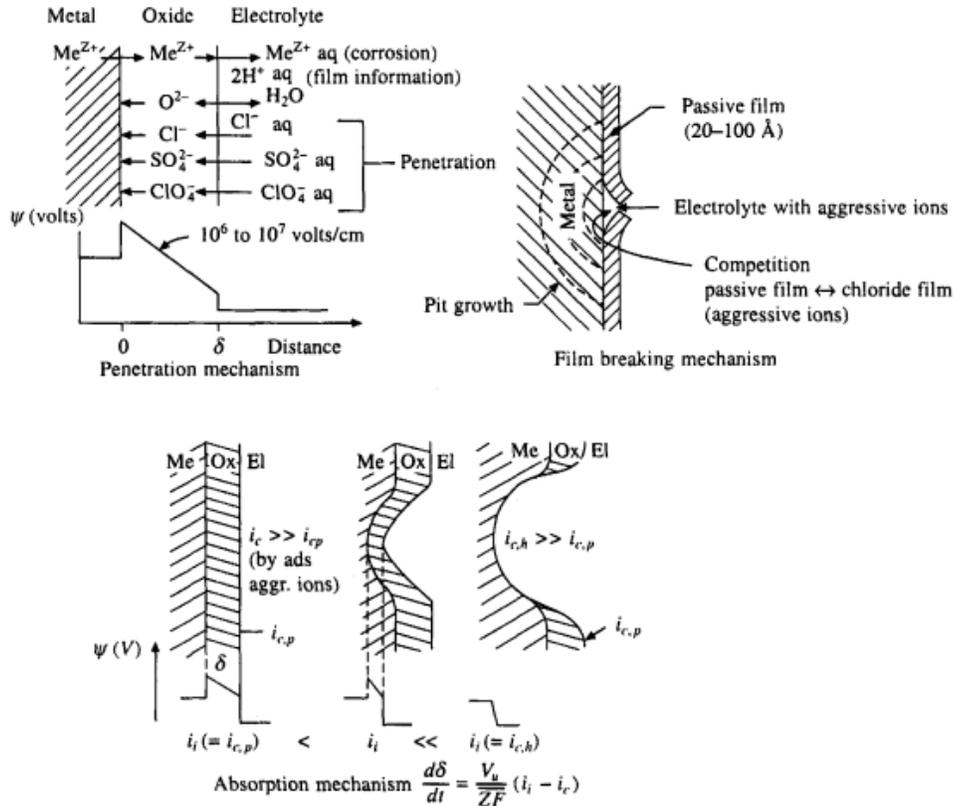


Figure 2-5: Mécanismes proposés pour l'amorçage d'une piqûres[16]

## 2.2 Comportement électrochimique mixte

Etant donné que l'acier 316L est utilisé dans des milieux souvent corrosifs où dans il subit également des contraintes mécaniques, cycliques ou statiques, l'étude des effets chimiques et mécaniques conjugués s'avère nécessaire pour comprendre l'influence de ces facteurs sur la tenue de l'acier 316L à la corrosion.

### 2.2.1 Corrosion sous contrainte de l'acier 316L

La corrosion sous contrainte est une synergie entre l'effet de l'attaque chimique et l'effet des contraintes mécaniques constantes. Ce risque de corrosion est dû à un phénomène appelé « fissuration induite par l'environnement » ou en anglais « Environment Induced Crack (EIC)»[17], où les métaux se fissurent ou se rompent à des niveaux de contrainte nettement inférieurs à leur résistance ultime à la traction, voire à leur limite élastique.

La corrosion sous contrainte est donc liée à l'existence même de la passivité. La fissuration peut se produire à partir de microdéfauts de la couche passive lorsqu'elle est soumise à une contrainte de traction. Ce phénomène est très majoritairement observé avec les aciers inoxydables austénitiques.[5]

La particularité de la fissuration induite sous l'effet de la corrosion est qu'elle est fragile même pour les matériaux pour lesquels la rupture est ductile comme le cas de l'acier 316L, objet de notre étude[7].

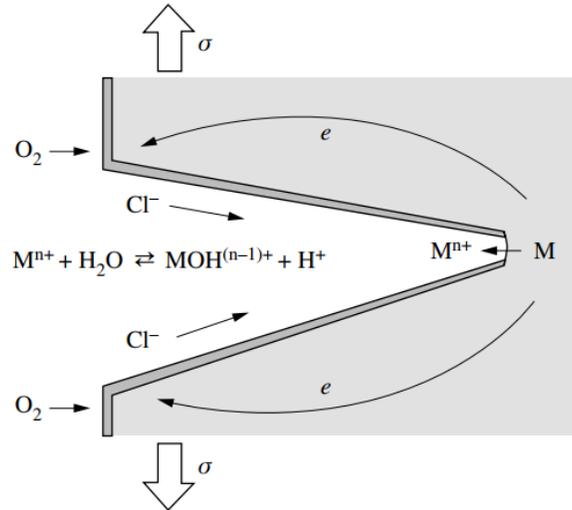


Figure 2-6: Réaction électrochimique au fond d'une fissure.

### 2.2.2 Mécanisme de la corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte est scindée en deux étapes :

- 1) L'amorçage : cette étape est due à plusieurs facteurs citant :
  - La piqûration ;
  - L'accumulation de l'hydrogène dans le métal ;
  - La rupture mécanique du film passif ;
  - Défauts de structures comme les inclusions.
- 2) La propagation des fissures (intergranulaire ou transgranulaire) : la fissure se propage en raison de la perte de matière causée par la dissolution anodique locale au fond de la fissure.

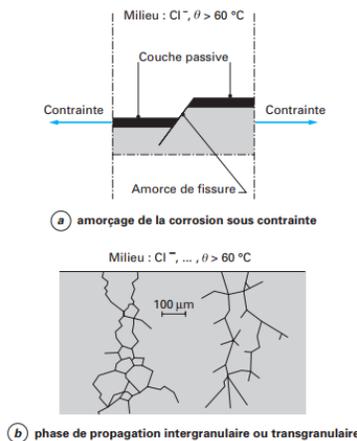


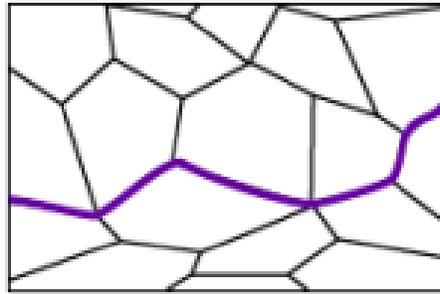
Figure 2-7: Mécanisme de la corrosion sous contrainte[5]

Il est difficile d'atténuer les conditions environnementales qui conduisent à la CSC. Le niveau de chlorures requis pour produire une corrosion sous tension est très faible. Les contraintes mécaniques comme la contrainte de traction en est un paramètre qui pourrait être contrôlé.

Cependant, les contraintes résiduelles associées à la fabrication, au soudage ou aux cycles thermiques, ainsi que les contraintes de conception, sont souvent responsables du CSC, et même les traitements thermiques de réduction des contraintes ne le sont pas capables d'éliminer complètement ces contraintes résiduelles[16].

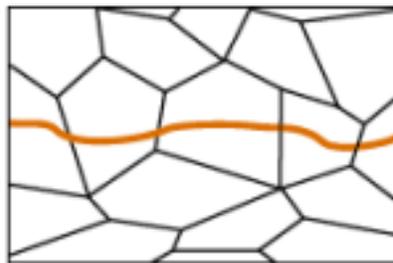
### **2.3 Les types de fissure**

Les fissures peuvent se propager de deux façons, la première c'est la propagation intergranulaire, c'est-à-dire à travers les joints de grains.



*Figure 2-8 : Fissure intergranulaire*

La deuxième c'est la propagation transgranulaire à travers les grains.



*Figure 2-9 : Fissure transgranulaire.*

### **2.4 Les dangers provoqués par la corrosion dans le corps humain**

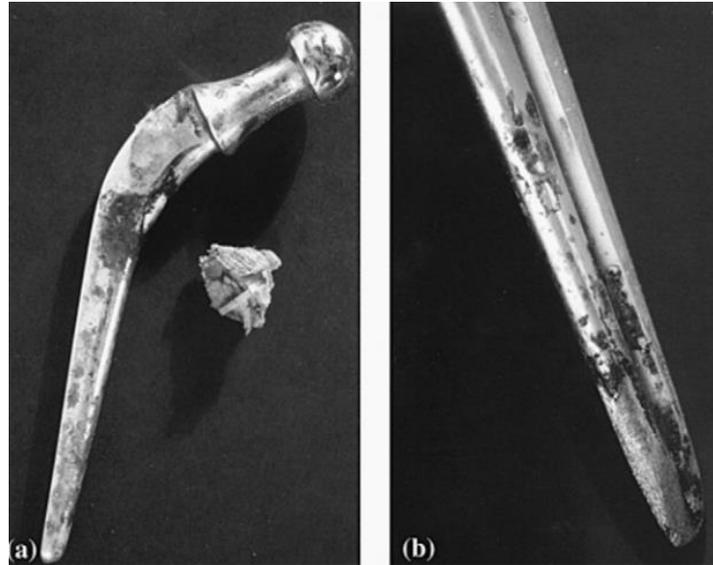
Comme l'acier 316L est un biomatériau pour les implants, tel que les prothèses des hanches, il est nécessaire de voir l'effet de la corrosion de ce dernier sur le corps humain.

Les implants corrodés dans le corps humain causent des dommages excessifs et des ions métalliques toxiques tels que Fe, Cr et Ni libérés dans les fluides corporels. Les ions métalliques libérés de l'implant ont été reconnus comme la principale raison de l'échec clinique et des réactions allergiques. Les concentrations élevées de métaux, par exemple, le Cr, Ni, Co, Ti et V dans le sang des patients portant l'implant causant des problèmes de santé importants[18].

Au départ, ces oligo-éléments majeurs dans l'implant métallique ne seraient pas nocifs par les ions libérés. Cependant, lorsque les implants commencent à se corroder, les oligo-éléments (Fe, Cr, Ni) se diffuseraient agressivement dans le corps. La libération excessive de ces ions métalliques nocifs pourrait avoir des effets néfastes sur le corps humain.

À titre d'exemple, un taux plus élevé de Fe dans le sang entraîne des effets critiques, à savoir l'insuffisance hépatique, la lésion organique à long terme voire même la mort.

De même, une concentration plus élevée de Cr (III) dans les cellules entraîne une hémolyse qui pourrait endommager l'ADN, les reins, le foie et les cellules sanguines [19].



*Figure 2-10 : Corrosion par piqûres d'une prothèse de hanche[19].*

## **PARTIE. 2 EXPERIENCE ET RESULTATS**

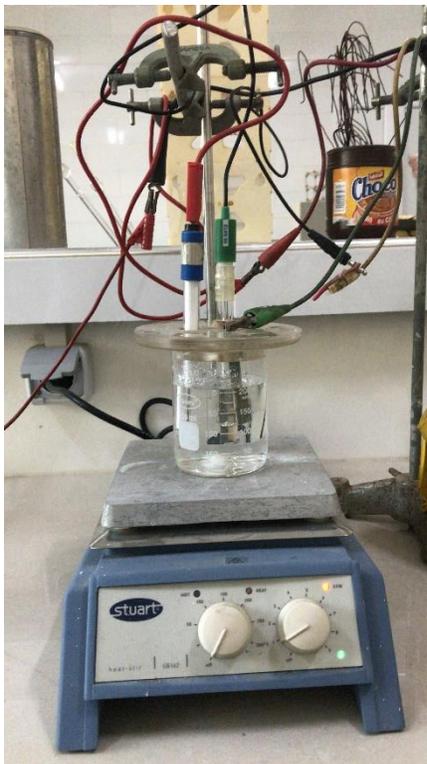
***CHAPITRE.3 :***

***Matériaux et Méthodes***

## Chapitre.3 Matériaux et méthodes

Les différents aspects expérimentaux et numériques relatifs à l'étude du comportement électrochimique de l'acier 316L sont exposés dans cette partie. Plusieurs techniques et moyens ont été utilisés afin de bien appréhender à la fois la tenue à la corrosion et la propagation d'une fissure sous l'effet chimique et mécanique pour cette nuance.

Dans un premier temps, des essais électrochimiques ont été réalisés au niveau du Laboratoire de Sciences et Génie des Matériaux (LSGM) de L'École Nationale Polytechnique.



*Figure 3-1: Dispositif expérimental utilisé pour les essais électrochimiques.*

Par la suite, des simulations numériques ont été exécutées pour simuler la corrosion aqueuse et la propagation d'une fissure sous une contrainte statique en utilisant le logiciel ANSYS et une station de travail puissante du même laboratoire.

### 3.1 Caractérisation du matériau

Pour mener cette étude nous avons utilisé un alliage d'acier inoxydable austénitique considéré comme un biomatériau métallique utilisé en implantologie, dénommé AISI 316L suivant la norme américaine et Z3 CND 17-12-02 selon la norme AFNOR. Cet alliage est disponible sous forme de tôle de 1mm d'épaisseur.

#### 3.1.1 Caractérisation chimique :

La composition chimique l'acier 316L, déterminée à l'ESTA (École Supérieure des Techniciens en Aviation) de Dar El Beida (Alger), est détaillée dans le tableau 3.1 [20].

Tableau 3-1: Teneur en éléments d'alliage du 316L en pourcentage massique

Eléments	C	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Cu	Co	Pb
%	<0,038	64,46	17,556	11,889	2,482	0,486	1,490	0,240	0,148	0,0025
Eléments	W	Ti	P	V	Nb	As	S	Sn	Al	
%	0,052	0,0028	0,043	0,041	0,011	0,011	0,017	0,009	0,008	

### 3.1.2 Caractérisation microstructurale

La microstructure de l'acier illustrée dans la figure 3-2 a été observée au microscope électronique à balayage (MEB) en électrons rétrodiffusés, au Laboratoire d'Etude de Texture et Applications aux Matériaux (LETAM – Metz, France). [20]

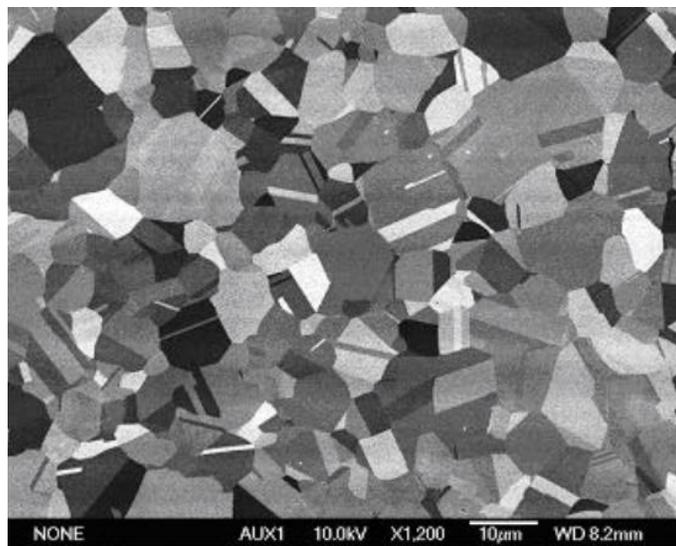


Figure 3-2: Microstructure de l'acier 316l prise au MEB.

Pour la figure 3-2, cette dernière montre la microstructure de l'acier inoxydable 316L obtenue par un microscope optique équipé d'une caméra et relié à un système informatique pour l'acquisition des photographies. [20].

Les joints de grains austénitiques prennent une nuance de gris plus foncée à cause d'une probable présence d'inclusions. De nombreux agglomérés de précipités sombres sont répartis sur l'étendue de la surface de la photographie de cette figure dont certains sont repérés par des flèches ; ils correspondent à des inclusions d'oxydes ou de sulfures résultant d'une éventuelle précipitation lors de l'élaboration du matériau[21].

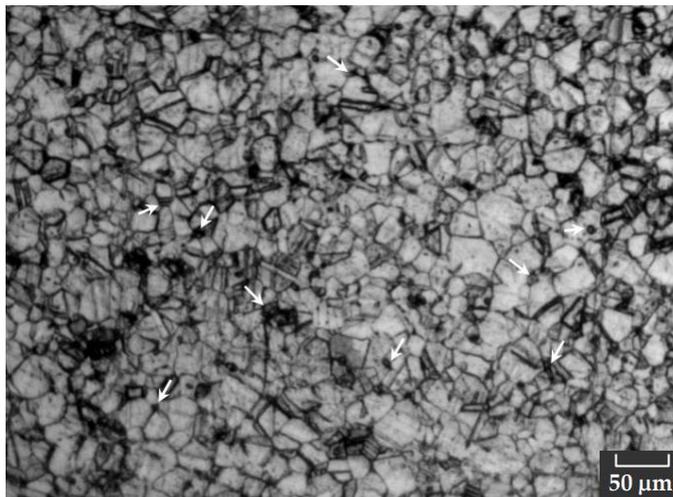


Figure 3-3: Image de la microstructure du 316L, prise au microscope optique

### 3.1.3 Taille des grains :

La détermination des tailles des grains de l'acier 316l a été faite par deux méthodes manuelle et numérique (logiciel Aphélon). Le tableau suivant montre les résultats obtenus [21]:

Tableau 3-2: Taille des grains de l'acier 316L

Matériau	Taille de grain méthode manuelle	Taille de grain méthode numérique
316L	13 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

## 3.2 Techniques expérimentales

La corrosion qui se déroule en phase aqueuse est un mécanisme électrochimique. Par conséquent, plusieurs techniques électrochimiques ont été développées. Les principaux avantages desdites techniques comprennent la sensibilité aux faibles taux de corrosion et la courte durée expérimentale.

Au cours des expériences électrochimiques, les échantillons ont été polarisés pour accélérer le processus de la corrosion. Les essais ont été effectués en quelques minutes ou heures. Les analyses électrochimiques sont utilisées aussi bien en laboratoire que sur le terrain[22].

### 3.2.1 Essai électrochimique

Le dispositif à trois électrodes (figure 16) employé dans notre étude utilise un potentiostat EGG Princeton 362 qui permet le balayage et l'amplification de la tension depuis la zone de comportement cathodique jusqu'à la zone de comportement anodique de l'acier 316L dans l'intervalle [-500 mV/ECS ; 900 mV/ECS] (jusqu'à 1500 mV/ECS dans l'acide sulfurique) afin d'avoir une polarisation globale du domaine cathodique jusqu'à la fin de transpassivation.

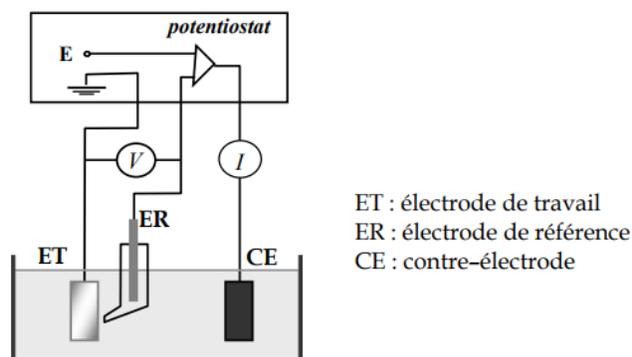


Figure 3-4: Schéma du dispositif pour le tracé d'une courbe  $i = f(E)$   
en mode potentiostatique.[17]

Le montage de la cellule électrochimique utilisé dans notre étude est illustré dans la figure IV. 6. L'électrode de référence est l'électrode au calomel saturée (ECS) « HANNA Instruments HI 5412 », utilisée à cause de son emploi simple au laboratoire. Cette électrode correspond au système  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Cl}^-$  ; son potentiel dépend de la température et vaut  $+245\text{mV}/\text{ENH}$  à  $25^\circ\text{C}$ .

Un agitateur chauffant Stuart SB162 permet de maintenir le milieu agité (150 tours par minute) l'essai dure environs 2 heures. La contre-électrode en platine Pt sert à mesurer le courant parcouru par l'électrode polarisée.

Les essais électrochimiques sont réalisés dans trois milieux de nature différente, à savoir une solution de chlorure de sodium  $\text{NaCl}$  0,9% de pH neutre, une solution du glucose avec une teneur de 0,83g/L et une solution d'acide sulfurique de pH 1, les essais sont appliquées respectivement à neuf électrodes de trois types E0, E1 et E2 (E0 une surface plane, E1 avec une empreinte au niveau de la surface, E2 deux empreintes au niveau de la surface) dans ces différentes solutions, lesquelles sont aérées et agitées.

D'autres essais de polarisation ont été réalisés par la suite sur l'échantillon E0, dans les mêmes conditions, en utilisant des solutions d'acide sulfurique de pH varie de 2 à 5 et ce, afin d'avoir une meilleure compréhension de l'effet de l'acidité de l'acide sulfurique sur le comportement électrochimique de l'acier 316L.

### 3.2.2 Choix et mise au point des paramètres expérimentaux

Notre étude du comportement électrochimique de l'acier 316L consiste à polariser neuf électrodes divisées en trois types d'échantillons dans trois milieux différents pour investiguer l'effet des paramètres tel que l'état de surface, la nature du milieu et l'effet du pH sur la tenue à la corrosion de ces échantillons.

### 3.2.3 Préparation des échantillons

Nous avons préparé trois échantillons de l'acier 316L de 75 mm de longueur, 10 mm de largeur et 1 mm d'épaisseur. Le découpage des échantillons a été fait au département mécanique de L'ENP à l'aide d'une machine guillotine. Les trois états de surface sont mentionnés ci-dessous :

- L'échantillon référence E0 de surface plane ;
- L'échantillon E1 avec une indentation par une machine de duromètre équipé d'un pénétrateur brinell ;
- L'échantillon E2 avec deux indentations par la même machine.

Les figures ci-dessous montrent les trois types des échantillons utilisés dans notre étude :



Figure 3-5: L'échantillon (E0).

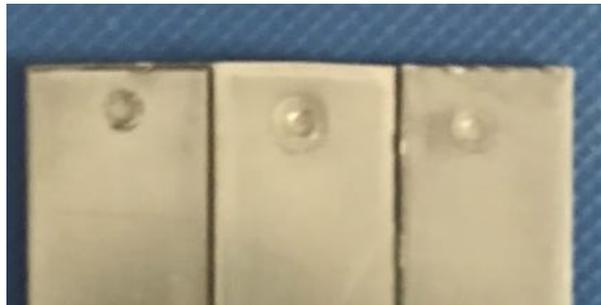


Figure 3-6: L'échantillon E1.



Figure 3-7: L'échantillon E2.

### 3.2.4 La nature des électrolytes

Vu que l'acier 316L est un biomatériau utilisé comme implant dans le corps humain, trois électrolytes ont été préparés au niveau du laboratoire LSGM de l'Ecole Nationale Polytechnique avec des dosages de NaCl, du glucose et d'acide sulfurique similaires à ceux des fluides corporels.

Les trois électrolytes préparés sont les suivants :

- Solution de NaCl 0,9% : similaire au liquide physiologique de volume de 200ml pour assurer l'immersion de la surface de l'électrode, aérée et sous agitation, Sa préparation

est faite par peser de 1,8g de NaCl solide dans le but d'obtenir une solution de 0,9% de NaCl un pH neutre ;

- Solution du glucose 0,83g/l de volume 200 mL : similaire à la concentration du glucose normal dans le corps humain. Sa préparation est faite par peser de 1,7g de D-Glucose solide ;
- Solution d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : Cinq solutions de pH allant de 1 jusqu'à cinq ont été préparées par prélèvement d'un volume de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98% pureté), pour obtenir une solution d'acide sulfurique de concentration 0,05 M (pH 1) et puis par dilution on obtient solutions moins acide.

### 3.2.5 Observation microscopique

Après chaque essaie de polarisation nous avons pris des images de la surface corrodée à l'aide du microscope OPTIKA aux grossissements 50, 100, 150 et 500 du laboratoire LSGM.

## 3.3 Exploitation des courbes de polarisation

Après l'établissement de la courbe E-log(|i|) nous avons déterminé les paramètres électrochimiques (le potentiel de corrosion, le courant de corrosion, la résistance à la polarisation et le potentiel de transpassivation) permettant d'étudier le comportement de l'acier 316L dans les différents milieux.

### 3.3.1 Extrapolation des droites de Tafel

Tafel a découvert qu'une relation linéaire entre E et log I existe si une électrode est polarisée à des potentiels suffisamment grands, les deux dans les directions anodique et cathodique. Les régions dans lesquelles de telles relations existent sont connues sous le nom de régions de Tafel. Mathématiquement, cette relation est donnée comme Équation :

$$I = I_{corr} \left[ \exp\left(\frac{2,3(E-E_{corr})}{\beta_a}\right) - \exp\left(-\frac{2,3(E-E_{corr})}{\beta_c}\right) \right] \quad (3.1)$$

Où  $I$  est le courant,  $I_{corr}$  est le courant au potentiel de corrosion  $E_{corr}$ ,  $E$  est le potentiel appliqué,  $\beta_a$  et  $\beta_c$  sont les constantes de Tafel qui sont les pentes anodiques et cathodiques des tracés E-log(I) dans les régions de Tafel. Les métaux corrosifs qui présentent un comportement de Tafel lorsqu'ils sont polarisés présenteront un tracé similaire à celui illustré à la Fig. La différence entre  $E$  et  $E_{corr}$  est appelée surtension  $\eta$ . [22]

Région cathodique :

$$\eta_c = a - \beta_c \log(|i|) \quad (3.2)$$

Région anodique :

$$\eta_a = a + \beta_a \log(|i|) \quad (3.3)$$

On peut calculer les droites de Tafel expérimentalement comme le montre la figure 3-8. Le tracé des droites de Tafel nous permet de déterminer  $I_{corr}$ , qui est le point d'intersection des deux droites de Tafel avec  $E_{corr}$ , donc la vitesse de corrosion de l'équation suivante :

$$v_{corr}(mm/an) = \frac{i_{corr} \times t \times M}{\rho \times n \times F} \quad (3.4)$$

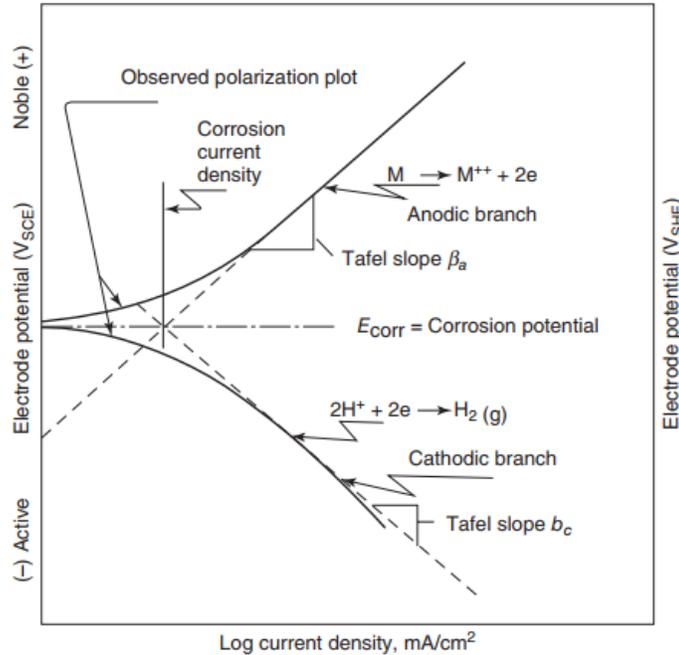


Figure 3-8: Droites de Tafel.[22]

### 3.3.2 Mesure de la résistance de polarisation

Stern et Geary ont trouvé que la pente du courant-potentiel autour du potentiel de corrosion est essentiellement linéaire ; la pente dont on parle de résistance de polarisation ( $R_p$ ).  $R_p$  est défini mathématiquement comme Équation :

$$R_p = \left( \frac{dE}{dI} \right)_{I=0} \quad (3.5)$$

En insérant la valeur obtenue graphiquement de  $R_p$  dans l'équation suivante on obtient la valeur de  $I_{corr}$  :

$$i_{corr} = \frac{1}{2,3 \cdot R_p} \left( \frac{|\beta_a| \beta_c}{|\beta_a| + \beta_c} \right) \quad (3.6)$$

Parce que seul un très petit potentiel de perturbation (moins de  $\pm 30$  mV, typiquement  $\pm 10$  mV) est appliqué, cette technique n'interfère pas avec la corrosion réactions. Un tracé de résistance de polarisation typique est présenté à la Fig. 3.5.3 De la pente,  $R_p$  (en ohms.cm<sup>2</sup> si la densité de courant est tracée ou en ohms si le courant est tracé) est calculé.

Il convient de noter que la courbe  $i-E$  autour du potentiel de corrosion peut ne pas être linéaire. De plus, la courbe dans les régions anodiques et cathodiques peut ou peut pas être symétrique.

La courbe  $i$ - $E$  symétrique n'est obtenue que lorsque les deux  $\beta_a$  et  $\beta_c$  sont égaux. Les valeurs  $\beta_a$  et  $\beta_c$  nécessaires pour calculer le courant de corrosion pourraient être déterminée par la méthode d'extrapolation de Tafel.[22]

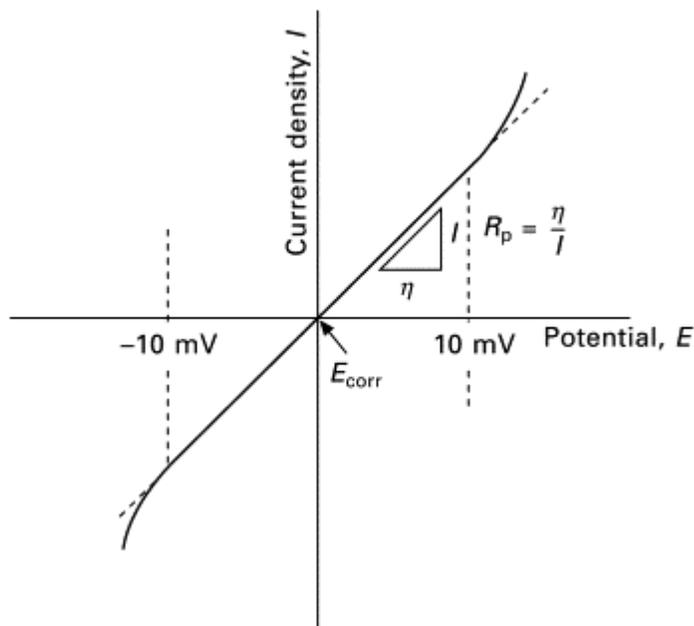


Figure 3-9: Détermination de la résistance à la polarisation.

### 3.4 Méthode numérique

Pour appréhender le comportement électrochimique simple et mixte de l'acier 316L, les travaux expérimentaux effectués au laboratoire ont été suivis par des simulations numériques réalisées pour simuler la corrosion électrochimique et la propagation de la fissure dans ce matériau.

Ces simulations s'appuient sur l'utilisation des méthodes de calcul numérique à l'instar de la Méthode des Eléments Finis (MEF) et la Méthode des Volumes Finis (MVF) pour modéliser des processus et résoudre des problèmes physiques et chimiques.

L'intérêt principal de la simulation réside dans l'obtention d'une description détaillée en trois dimensions de phénomènes physiques à étudier sans recourir à l'expérimentation, ce qui permet un gain considérable en termes de temps, de coût et de quantité d'informations.

Durant notre étude, les deux outils de simulation ANSYS MECHANICAL et ANSYS FLUENT ont été choisis pour simuler respectivement la propagation de la fissure et la corrosion électrochimique.

#### 3.4.1 Simulation numérique du phénomène de la corrosion électrochimique

La simulation numérique du phénomène de corrosion électrochimique a connu une progression au cours des années où plusieurs modèles ont été développés pour comprendre et prédire ce phénomène.

Notre étude numérique a été réalisée en utilisant un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) pour prédire la vitesse de corrosion.

À l'aide du logiciel ANSYS FLUENT V19.2, on n'a pas un modèle spécifique dédiée à la corrosion, mais on peut utiliser la réaction de la surface et créer des éléments et des réactions chimiques qui peuvent servir à simuler le mécanisme de corrosion.

### 3.4.1.1 Modèle mathématique

La modélisation du phénomène de corrosion électrochimique consiste à modéliser les réactions électrochimiques qui se passe au niveau de l'interface métal électrolyte.

La réaction électrochimique générale :

$$\sum_{i=1}^N v_i' M_i^{z_i} \leftrightarrow \sum_{i=1}^N v_i'' M_i^{z_i} + \left( \sum_{i=1}^N (v_i'' - v_i') z_i \right) e^- \quad (3.7)$$

$v_i'$  et  $v_i''$  sont le coefficient stœchiométriques respectifs des espèces  $i$  en réactif et en produit.

$M_i^{z_i}$  Représente l'espèce chimique (liquide ou solide).

$z_i$  est le nombre de charge de l'élément  $i$ .

Le mécanisme de base de la corrosion suit le principe de la batterie, il est donc nécessaire de modéliser les réactions électrochimiques qui se produisent.

Dans ANSYS FLUENT l'équation de transfert de charge pour une réaction électrochimique à l'interface faradique est déterminée par l'équation de Butler-Volmer, alternativement en utilisant les pentes de Tafel résultant des essais de polarisation[23].

$$i_{corr} = i_0 \prod_j^n \left( \frac{Y_j}{Y_j^0} \right)^{Y_j} \left[ \exp \left( \frac{2,3}{\beta_a} \eta \right) - \exp \left( -\frac{2,3}{\beta_c} \eta \right) \right] \quad (3.8)$$

Tel que :

$i_{corr}$ : La densité de courant de corrosion

$i_0$  : la densité de courant d'échange

$N$  : le nombre des éléments chimique

$Y_j$  : la fraction massique de l'espèce chimique  $j$

$Y_j^0$  : la fraction massique initiale de l'espèce chimique  $j$

$\beta$  : les pentes de Tafel cathodiques et anodiques

$\eta$  : la surtension

### 3.4.1.2 Modèle numérique

#### 1) La géométrie

Le tableau suivant résume les dimensions de l'éprouvette utilisée dans la simulation

Tableau 3-3 : Géométrie de l'éprouvette

La géométrie	Dimensions (mm)			Etat de surface	Indentation
L'éprouvette	L=75	l=10	E=1	Indenté	0,1 mm

## 2) Maillage

La figure suivante montre le maillage associé à la pièce qui est de type CFD.

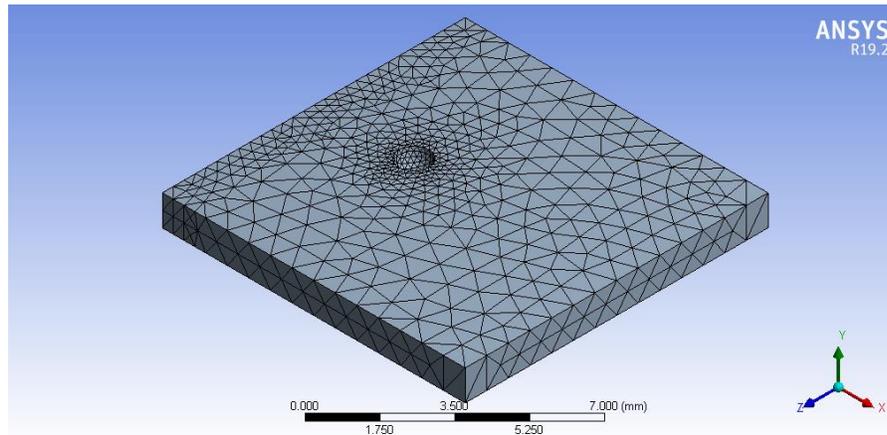


Figure 3-10 : Maillage de l'éprouvette

Comme il est montré dans la figure le maillage n'est uniforme sur toute la géométrie on voit bien que le nombre des éléments est important dans la zone indentée, par rapport aux autres endroits.

## 3) Création du modèle de corrosion électrochimique

Pour la création du modèle de la corrosion électrochimique dans ANSYS FLUENT, les actions de configuration suivantes ont été effectuées[24] :

- La sélection du modèle « species transport » ;
- L'activation des deux types de réaction : volumétrique et électrochimique ;
- L'activation de « Species migration » dans la section « Options ».

En activant la réaction électrochimique le solveur potentiel électrique s'active automatiquement.

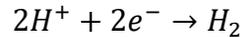
## 4) Sélection du matériau

Notre éprouvette est de l'acier 316L qui est un alliage ferreux on a représenté cet alliage par le Fer. Afin que le fer Fe puisse être utilisé dans le modèle de simulation, ils doivent être définis comme étant un fluide même pour son ion  $Fe^{2+}$ . Pour ce faire, le nombre de charge, défini par défaut égale à 0, de chaque élément est modifié dans la base de données d'ANSYS FLUENT.

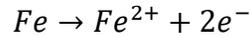
## 5) Etablissement des réactions et des mécanismes

Dans cette étape, on ajoute les éléments (Fe, Cr, Ni) participant à la réaction électrochimique à la liste des espèces solides et on spécifie le nombre des réactions et le nom de chaque réaction avec son identifiant. Par la suite, on introduit les réactions suivantes :

a) La réaction cathodique :



b) La réaction anodique :



Chaque réaction est associée avec les paramètres de Tafel, densité de courant d'échange et le potentiel d'équilibre obtenus de l'expérience ainsi que les fractions massiques initiales.

S'agissant du processus de corrosion nous avons deux mécanismes : Mécanisme cathodique et anodique. La réaction cathodique est associée au mécanisme cathodique et les trois réactions anodiques sont associées avec le mécanisme anodique.

Les propriétés du mélange à spécifier dans cette étape sont :

- La densité ;
- Le coefficient de diffusivité ;
- La conductivité électrique de l'électrolyte.

L'utilité de la simulation c'est que nous avons la capacité pour contrôler les paramètres de corrosion.

#### **6) Etablissement des conditions aux limites**

Comme tout modèle numérique il est nécessaire d'établir les conditions aux limites, dans notre cas ces conditions, liées à l'interface métal électrolyte, ont été associées au mécanisme approprié.

#### **7) Exécution des calculs**

L'exécution des calculs nous permet d'avoir les paramètres suivant :

- Le potentiel électrique ;
- La conductivité électronique ;
- La densité de courant faradique ;
- La vitesse de corrosion ;
- Le potentiel dans la surface d'électrode ;
- La densité de courant.

### **3.4.2 Simulation numérique de la fissuration**

Depuis son introduction au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle par les ingénieurs pour résoudre des problèmes mécaniques, la méthode des éléments finis est devenue l'outil de base pour la résolution des problèmes physiques. Tel que l'étude du comportement mécanique des matériaux.

La méthode consiste à discrétiser le matériau en éléments, ce qu'on appelle le maillage. Puis transformer l'équation gouvernante en système d'équations algébrique pour chaque élément, en

rassemblant ces systèmes on obtient le système global dont la solution est celle approchée au problème étudié.

Dans cette partie, nous avons utilisé ANSYS MECHANICAL APDL V 19.2 doté du système d'analyse des structures statiques basé sur la méthode des éléments finis.[25]

### 3.4.2.1 Modèle mathématique

La détermination de facteur d'intensité de contrainte par La méthode intégrale [25][26] :

$$I_0 = - \frac{\int_V q_{i,j} [\sigma_{kl} \varepsilon_{kl}^{aux} \delta_{ij} - \sigma_{kj}^{aux} u_{k,j} - \sigma_{kj} u_{k,j}^{aux}] dV}{\int_S \delta q_n} \quad (3.9)$$

Tel que :

$q_{i,j}$  : vecteur de fissure

$\sigma, \varepsilon, u$ : la contrainte, la déformation, le déplacement respectivement

$\sigma_{k j}^{aux}, \varepsilon_{kl}^{aux}, u_{k,j}^{aux}$  : la contrainte, la déformation, le déplacement respectivement dans le champ auxiliaire.

L'intégrale d'interaction est associée avec les facteurs d'intensité de contrainte par la formule suivante :

$$I = \frac{2}{E^*} [K_1 K_1^{aux} + K_2 K_2^{aux}] + \frac{1}{\mu} K_3 K_3^{aux} \quad (3.10)$$

Tel que :

$K$  : les modes de rupture

$E^*=E$  pour la contrainte plane ;  $E^*= E/(1-\nu)$  pour la déformation plane.

$E$  : module de Young

$\nu$  : coefficient de poisson

$\mu$  : module de cisaillement

Dans le cas du mode I de rupture la formule devient

$$I = \frac{2}{E^*} [K_1 K_1^{aux}] \quad (3.11)$$

### 3.4.3 Modèle numérique de la propagation de fissure

#### 1) Description de la géométrie

Le tableau suivant résume les paramètres géométriques de la pièce étudié :

Tableau 3-4 : Géométrie de l'éprouvette pour simulation de fissure.

La géométrie	Dimensions (mm)			Type d'entaille	Profondeur
L'éprouvette	L=75	l=10	E=1	V	0,15 mm

La conception de l'éprouvette entaillée a été faite à l'aide du logiciel « SOLIDWORKS », puis exportée vers ANSYS MECHANICAL sous l'extension SLDPRT.

## 2) Propriétés du matériau

Les propriétés de l'Acier austénitique inoxydable 316L, ont été importées de la base de données (GRANTA Materials Data for Simulation), développée par ANSYS pour aider les ingénieurs dans la sélection et l'étude des matériaux. Cette base de données contient plus de 26000 matériaux, plus de 20 propriétés du matériau et 11 classes différentes des matériaux. Les propriétés mécaniques de l'acier 316L utilisé comme des paramètres d'entrés sont portées dans le tableau suivant :

Tableau 3-5: Donnés de matériau pour la simulation

Propriétés	Valeurs
Module de Young (GPa)	190-200
Coefficient de poisson	0,3
Limite élastique (MPa)	217
Résistance à la traction (MPa)	520-645
Allongement à la rupture	40 – 68%
Facteur d'intensité de contrainte critique (MPa.m <sup>0.5</sup> )	112 [27]

Pour la propagation d'une fissure SMART en mode statique, il est nécessaire d'introduire le facteur d'intensité de contrainte critique  $K_{Ic}$ .

## 3) Système de coordonnées

Afin d'assurer la précision du calcul des facteurs d'intensité de contrainte et la direction de la propagation de la fissure, il est important de mettre un système de coordonnées locale au niveau du front de fissure.

La figure ci-dessous montre le système de coordonnées au fond de fissure.

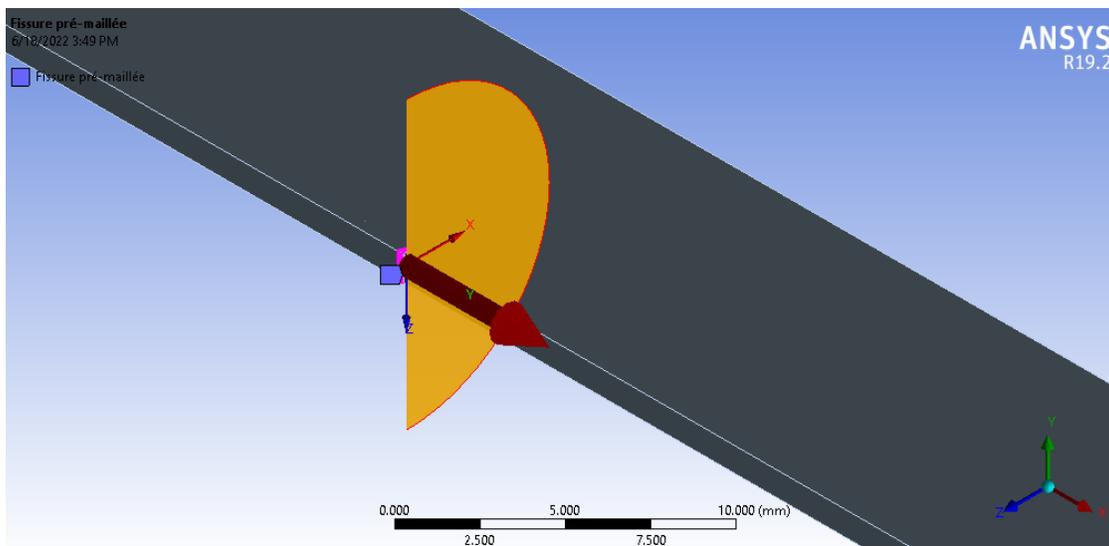


Figure 3-11 : Système de coordonnées locale au front de fissure

**L'axe X** : est associé au sens de propagation ;

**L'axe Y** : est perpendiculaire au front de fissure et dans le même sens de la force et le déplacement ;

**L'axe Z** : est tangentielle au front de la fissure.

#### 4) Le Maillage

La géométrie de l'éprouvette est subdivisée en élément finis, et pour cela on utilise un maillage le maillage solide (SOLID187) comme le modèle est tridimensionnelle.

Le type de maillage est tétraèdre « SOLID187 » pour les modèles tridimensionnelle est montré dans la figure suivante [28]:

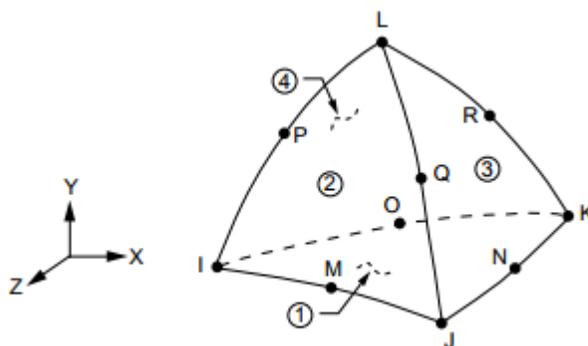


Figure 3-12 : Élément tétraèdre

Le tableau suivant résume les statistiques de maillage :

Tableau 3-6 : Maillage de l'éprouvette

Type de maillage	Maillage volumique
La physique	Mécanique
Élément	SOLID187
Taille d'éléments maximum	3,7 mm
Nombre total de nœuds	12476
Nombre total d'éléments	8070

Le modèle de fissure choisi pour étudier la propagation de fissure est le modèle dit SMART (Separating, Morphing, Adaptive and Remeshing Technology). Introduit par ANSYS, l'utilité de ce modèle dans l'analyse réside dans l'adaptation automatique du maillage après les changements de géométrie causés par la propagation de fissure dans chaque étape de la solution. Cette mise à jour se fait autour de la région du fond d'entaille uniquement ce qui résulte en une meilleure efficacité dans la résolution du problème de propagation de fissure.

Après la définition des surfaces de la fissure (la face supérieure, inférieure et le front) nous avons généré le maillage en tenant en compte la géométrie de la fissure.

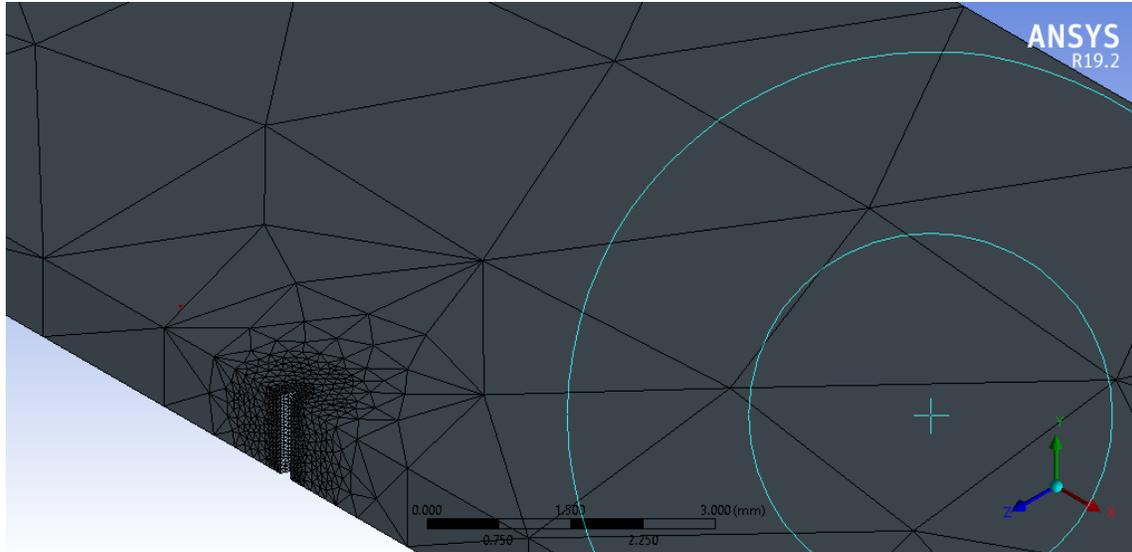


Figure 3-13 : Résultat de maillage

On peut remarquer que la densité des éléments est importante dans la zone entaillée et le maillage est uniforme sur le reste de l'éprouvette.

#### 5) Les conditions aux limites

Dans cette étape nous avons introduit les conditions aux limites notamment la force le déplacement, la température et la fixation :

Tableau 3-7 : Conditions aux limites

Paramètres	Valeurs
Température	37° C
La force appliquée	5 KN (sous forme d'une rampe)
Le support fixe	Oui

La force appliqué est sous la forme d'une rampe elle augmente en fonction du temps linéament, c'est parmi les exigences du modèle SMART

**CHAPITRE.4 :**

***Présentation et analyse des résultats  
expérimentaux***

## Chapitre.4 Présentation et analyse des résultats expérimentaux

Afin de mieux exploiter les données électrochimiques, il est indispensable de passer aux tracés de courbes  $\log(|i|)$ -E. Les figures suivantes illustrent les courbes de polarisation en mode potentiostatique mesurées lors des neufs (09) essais effectués sur trois échantillons dans des solutions de nature différentes : la solution de NaCl 0,9%, la solution du glucose 0,83g/l et la solution d'acide sulfurique à pH égale à 1.

Les effets de l'état de surface, de la nature du milieu et de l'acidité de l'acide sulfurique sur le comportement électrochimique de l'acier 316L seront discutés dans ce chapitre.

### 4.1 Effet de l'état de surface

#### 1) Milieu salin NaCl 0,9%:

La figure ci-dessous montre la superposition des courbes de polarisation globale  $\log(|i|)$ -E des échantillons E0, E1 et E2 immergés dans la solution de NaCl 0,9%

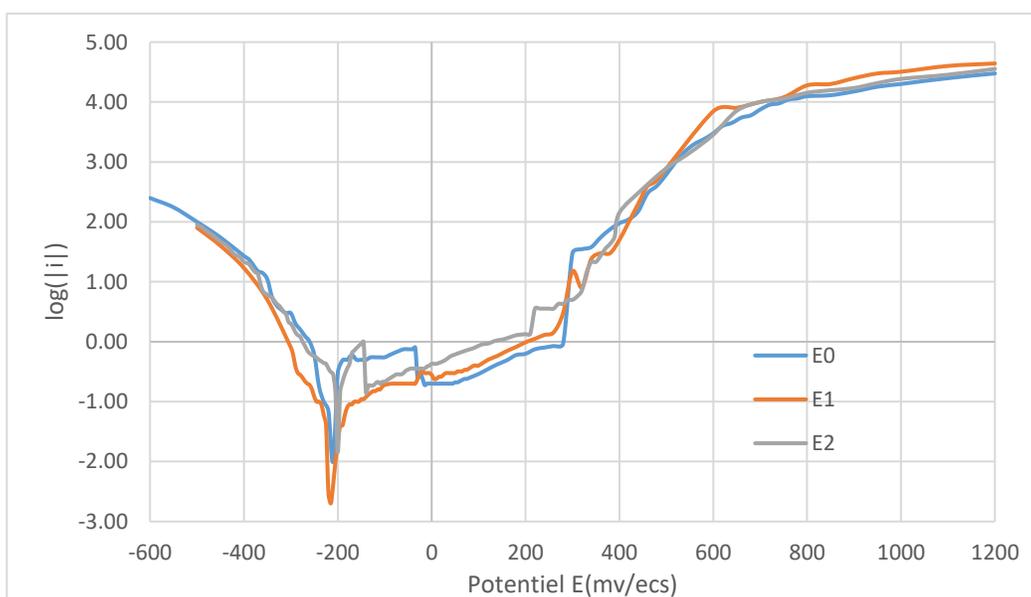


Figure 4-1: Superposition des courbes de polarisation potentiostatiques des échantillons d'aciers 316L polarisés dans la solution NaCl 0,9%

#### 2) Milieu sucré glucose 0,83 g/L :

Dans la figure ci-dessous les courbes de polarisation globale  $\log(|i|)$ -E des échantillons E0, E1 et E2 ont été superposées afin de comparer le comportement de ces échantillons dans la solution du glucose 0,83g/L .

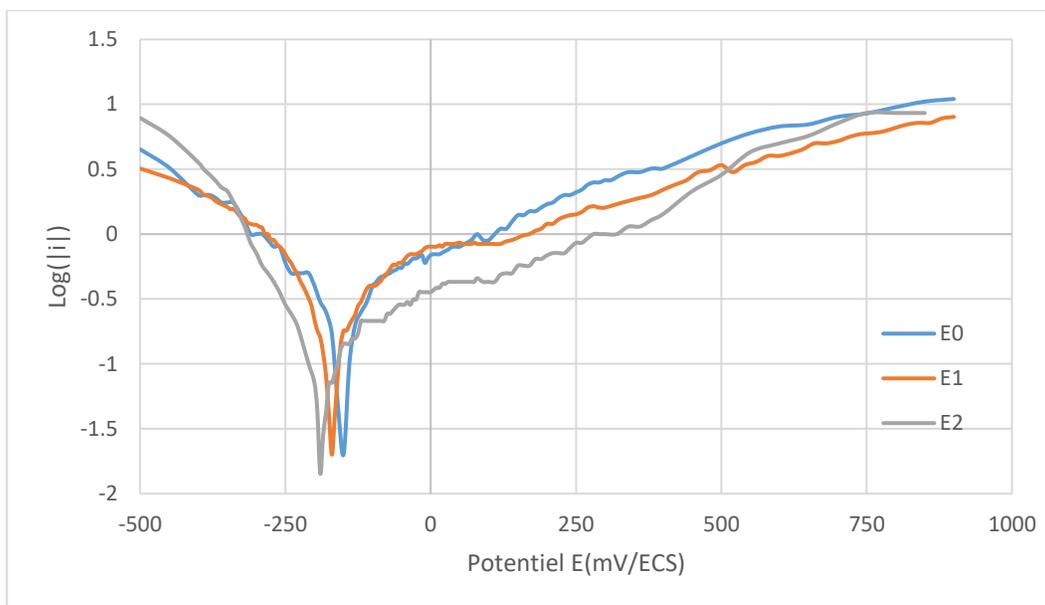


Figure 4-2: Superposition des courbes de polarisation potentiostatiques des échantillons d'aciers 316L polarisés dans la solution du glucose 0,83 g/L.

### 3) Milieu d'acide sulfurique pH1 :

La figure ci-dessous montre la superposition des courbes de polarisation globale  $\log(|i|)$ -E des échantillon E0, E1 et E2 immergés dans la solution d'acide sulfurique pH1.

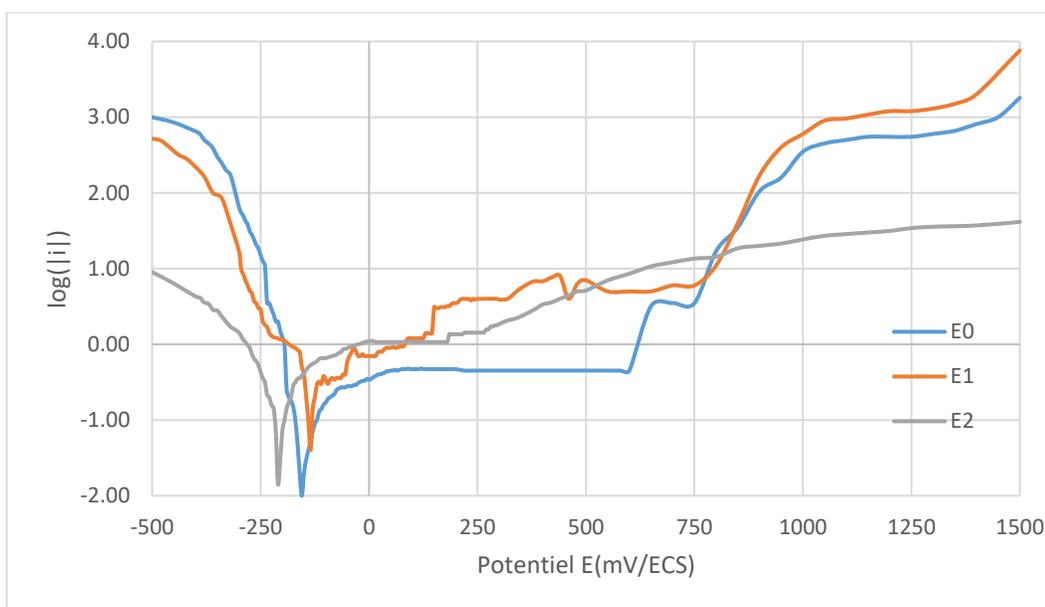


Figure 4-3: Superposition des courbes de polarisation des échantillons d'aciers 316L polarisés dans l'acide  $H_2SO_4$  pH 1 .

En utilisant la méthode d'extrapolation des droites de Tafel et la résistance de polarisation nous avons déterminé, pour chaque milieu, le courant de corrosion, le potentiel de corrosion et la vitesse de corrosion en (mm/an) de chaque échantillon. Les paramètres électrochimiques tirés des courbes de polarisation sont portés dans le tableau suivant :

Tableau 4-1: Résultats des essais potentiostatiques de l'acier 316L.

Milieu	Echantillon	$E_{corr}$ (mV/ECS)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$b_c$ (mV/déc)	$b_a$ (mV/déc)	$V_{corr}$ (mm/an) $\times 10^{-3}$	$R_p$ ( $\text{Ohm.cm}^2$ ) $\times 10^3$	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$V_{corr}$ (mm/an) $\times 10^{-3}$
NaCl 0,9%	E0	-210	0,31	-97,9	322,2	3,52	96,15	0,34	3,88
	E1	-220	0,38	-114	155	4,32	85	0,34	3,82
	E2	-200	0,44	-121,15	149,59	5	87,71	0,23	2,65
glucose 0,83g/L	E0	-150	0,04	-57,5	33,21	0,45	180	0,05	0,57
	E1	-170	0,063	-46,9	45,81	0,72	168	0,06	0,68
	E2	-185	0,063	-103	68	0,72	333	0,07	0,61
H2SO4 pH 1	E0	-220	0,11	-50,72	207,14	1,25	222,2	0,08	0,9
	E1	-135	0,22	-80,45	110,22	2,5	63	0,32	3,6
	E2	-210	0,32	-138,98	345	3,64	166,66	0,41	2,94

Des chiffres du tableau ci-dessus on note que les vitesses de corrosion calculées dans les régions cathodiques et anodique avant la passivation sont relativement faibles (inférieurs à  $10\mu\text{m}/\text{an}$ ), donc une très faible perte de matière. Ces résultats confirment la grande résistance de l'acier 316L à l'attaque chimique généralisée. Ces vitesses sont corrélées avec les données de corrosion extraites de la littérature et des bases de données de corrosion [29][30].

D'après les courbes de polarisation obtenues nous avons pu suivre le comportement électrochimique de l'acier 316L et de voir l'effet des déformations plastiques localisées sur sa tenue à la corrosion en différents milieux.

Les courbes sont similaires, globalement nous n'avons pas constaté un changement du comportement électrochimique de l'acier 316L. Le comportement cathodique n'est pas affecté par l'écrouissage local. Cependant l'effet de l'état de surface apparaisse dans le domaine anodique où nous avons une augmentation du courant pour les échantillons E1 et E2 par rapport à l'échantillon E0.

Aussi, on remarque un élargissement du domaine anodique et une augmentation du courant de passivation des échantillons E1 et E2 par rapport à E0, ce qui explique la lenteur de la transition passive active des échantillons E1 et E2 par rapport à E0.

L'étendue du film passif se restreint sous l'influence des défauts mécaniques initiés au niveau de la surface des échantillons E1 et E2, d'où l'acier 316L atteint le potentiel de piqûration à des valeurs relativement faibles par rapport à l'échantillon référence E0.

#### 4.1.1 Relation entre l'état de surface et les paramètres électrochimiques :

Densité de Courant de corrosion en fonction de l'état de surface :

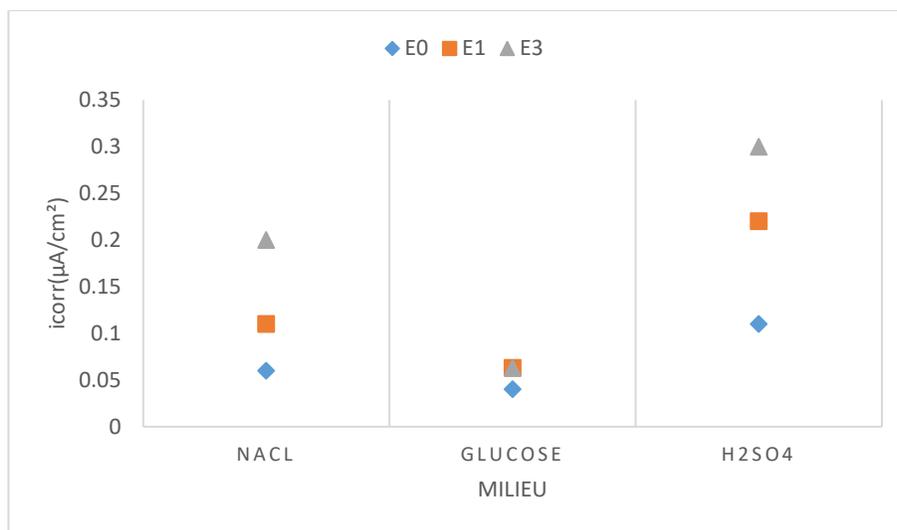


Figure 4-4: Densité de courant de corrosion de corrosion pour chaque milieu.

D'après les résultats portés dans la figure ci-dessus on constate que, contrairement à l'échantillon E0, les échantillons E1 et E2 ont enregistré une augmentation de la densité du courant de corrosion dans le milieu salin et acide en fonction de nombres des empreintes.

#### Potentiel de corrosion en fonction de l'état de surface

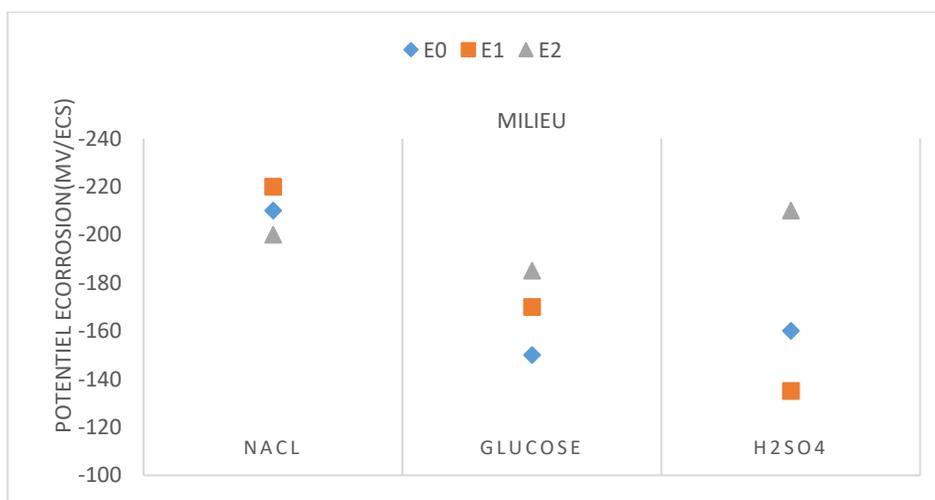


Figure 4-5: Potentiel de corrosion dans chaque milieu.

De la figure IV-5, on constate que les trois échantillons ont des valeurs du potentiel de corrosion proches notamment dans les milieux salin et glucosé, néanmoins, l'échantillon E2 a enregistré dans le milieu acide une grande valeur par rapport à celles des deux autres échantillons.

#### 4.2 Effet de la nature du milieu :

Comme le milieu est un facteur majeur dans le comportement électrochimique, dans cette partie nous allons étudier le comportement électrochimique de l'acier 316L dans trois milieux de différentes natures.

### 1) L'échantillon 0 sans empreinte :

Dans la figure ci-dessous les courbes de polarisation globale  $\log(|i|)$ -E de l'échantillon E0 ont été superposées afin de comparer le comportement de cet échantillon dans les trois électrolytes.

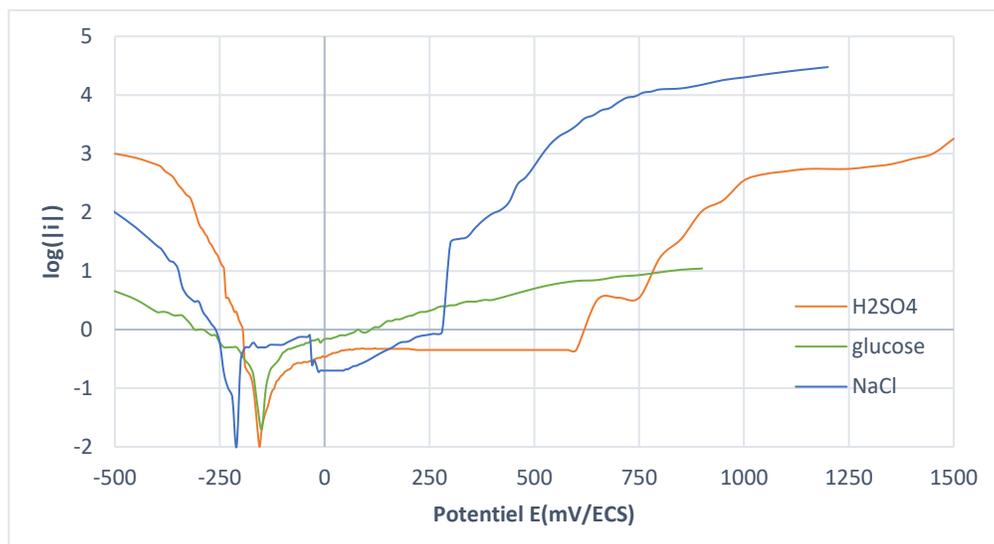


Figure 4-6: Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon E0 d'acier 316L pour les trois milieux

### L'échantillon E1 une seule empreinte :

Dans la figure ci-dessous les courbes de polarisation globale  $\log(|i|)$ -E de l'échantillon E1 ont été superposées afin de comparer le comportement de cet échantillon dans les trois électrolytes

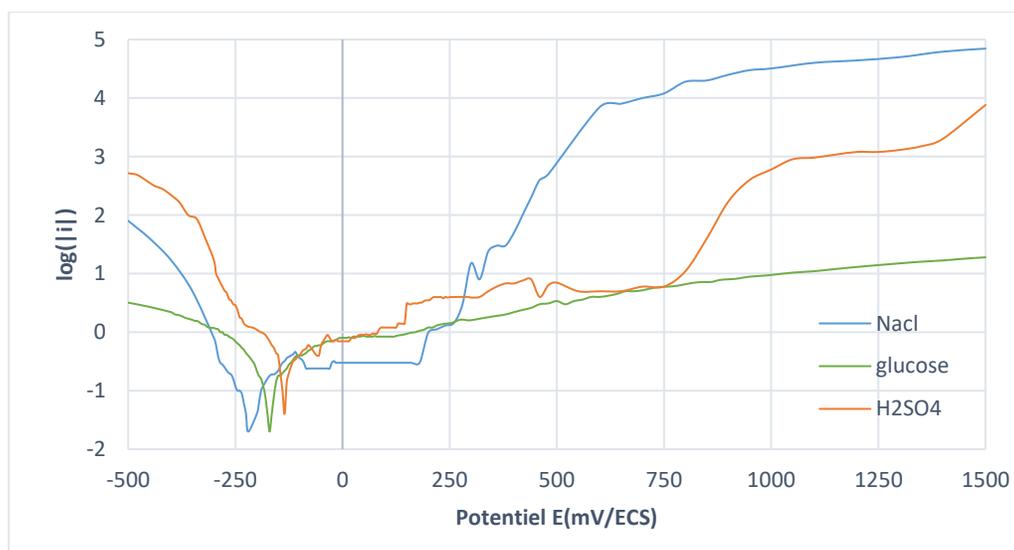


Figure 4-7: Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon E1 d'acier 316L pour les trois milieux

### L'échantillon 2 à deux empreintes :

Dans la figure ci-dessous les courbes de polarisation globale  $\log(|i|)$ -E de l'échantillon E2 ont été superposées afin de comparer le comportement de cet échantillon dans les trois électrolytes.

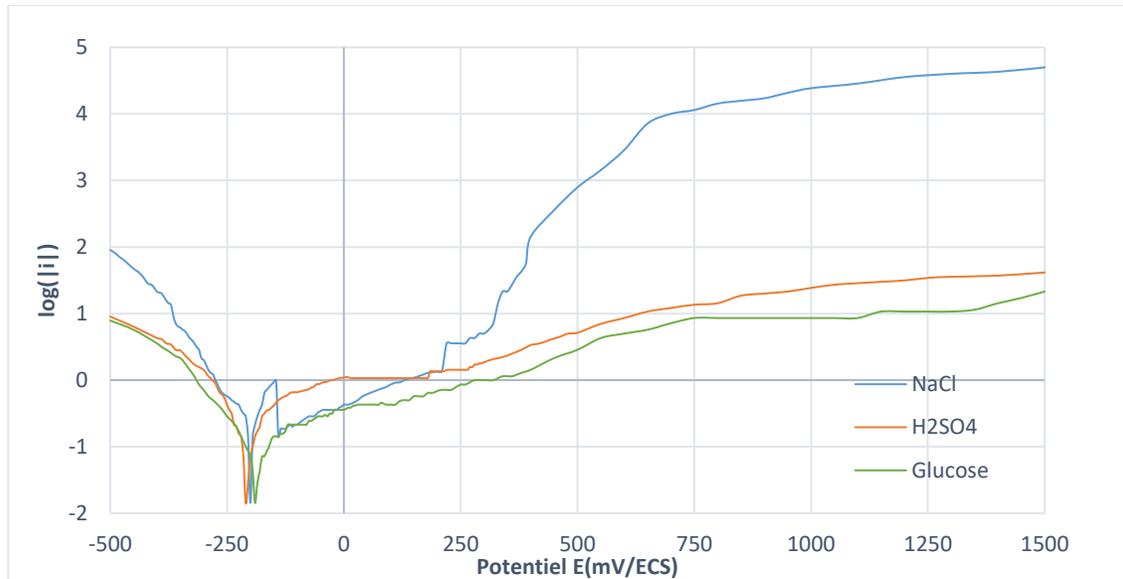


Figure 4-8: Superposition des courbes de polarisation de l'échantillon E2 d'acier 316L pour les trois milieux

Tableau 4-2: Résultats des essais potentiostatiques de l'acier 316L.

Echantillon	Milieu	$E_{corr}$ (mV/ECS)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	bc (mV/déc)	ba (mV/déc)	$V_{corr}$ (mm/an) $\times 10^{-3}$	Rp ( $\text{Ohm}\cdot\text{cm}^2$ ) $\times 10^3$	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$V_{corr}$ (mm/an) $\times 10^{-3}$
Echantillon 0	NaCl 0,9%	-210	0,31	-97,9	322,2	3,52	96,15	0,34	3,88
	glucose 0,83g/L	-150	0,04	-57,5	33,21	0,45	180	0,05	0,57
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1	-220	0,11	-50,72	207,14	1,25	222,2	0,08	0,9
Echantillon 1	NaCl 0,9%	-220	0,38	-114	155	4,32	85	0,34	3,82
	Glucose 0,83 g/L	-170	0,063	-46,9	45,81	0,72	168	0,06	0,68
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1	-135	0,22	-80,45	110,22	2,5	63	0,32	3,6
Echantillon 2	Nacl 0.9%	-200	0,44	-121,15	149,59	5	87,71	0,23	2,65
	Glucose 0.83 g/L	-185	0,063	-103	68	0,72	333	0,07	0,61
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH 1	-210	0,32	-138,98	345	3,64	166,66	0,41	2,94

Afin de pouvoir comparer le comportement de l'acier 316L dans les milieux retenus nous avons superposé les courbes de polarisation globale. D'après les figures ci-dessus on constate que le comportement diffère d'un milieu à un autre.

Il apparaît que l'acier 316L est plus susceptible à la corrosion localisée dans le milieu salin et le milieu acide par contre le milieu du glucose n'a pas provoqué la corrosion de l'acier 316L où les valeurs de la densité du courant faibles. De même, le domaine anodique est court par rapport aux milieux, dont le passage actif passif se fait à des faibles valeurs de potentiel. On remarque une augmentation brutale du courant dès la fin de passivation cette augmentation est due à l'effet des ions  $Cl^-$ , l'acier 316L n'a pas pu se repassiver dans ce milieu, et il atteint le potentiel de piqûration à des faibles valeurs par rapport à l'acide sulfurique.

Les courbes de polarisation des trois échantillons de l'acier 316L dans l'acide sulfurique présentent un palier de passivation remarquable. Aussi l'apparition des paliers de pseudo-passivation dans le domaine de transpassivation ce qui signifie la capacité de l'acier 316L à se repassiver dans l'acide sulfurique à pH égale à 1.

L'acier 316L a un comportement particulier dans l'acide sulfurique. Les résultats obtenus de la polarisation montrent que l'acier 316L a une grande résistance à la corrosion dans l'acide sulfurique à pH1.

#### 4.2.1 Relation entre les données électrochimique et le milieu

Les résultats des essais de polarisation potentiodynamique sont schématisés dans les graphes ci-après.

##### 1) Courant de corrosion en fonction de la nature du milieu

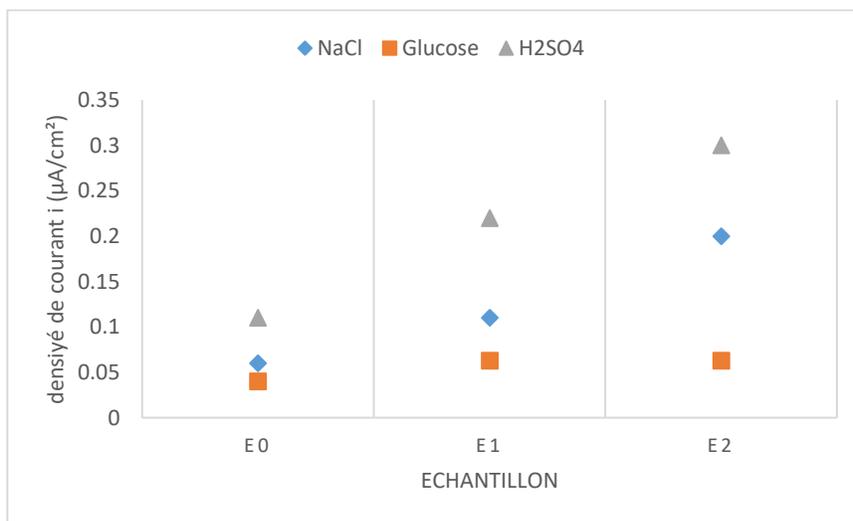


Figure 4-9: Courant de corrosion en fonction du milieu

Les densités de courant de corrosion dans les trois milieux ont des valeurs dans l'intervalle ( $0.04 \mu A/cm^2$  à  $0.3 \mu A/cm^2$ ). La valeur la plus importante est obtenue pour la solution NaCl 0,9% avec une valeur proche pour l'acide sulfurique pH 1, quant à la valeur la plus faible, elle est obtenue dans la solution glucose 0,83g/l, ce qui signifie que l'acier 316L a résisté à corrosion uniforme.

## 2) Potentiel de corrosion en fonction de la nature du milieu

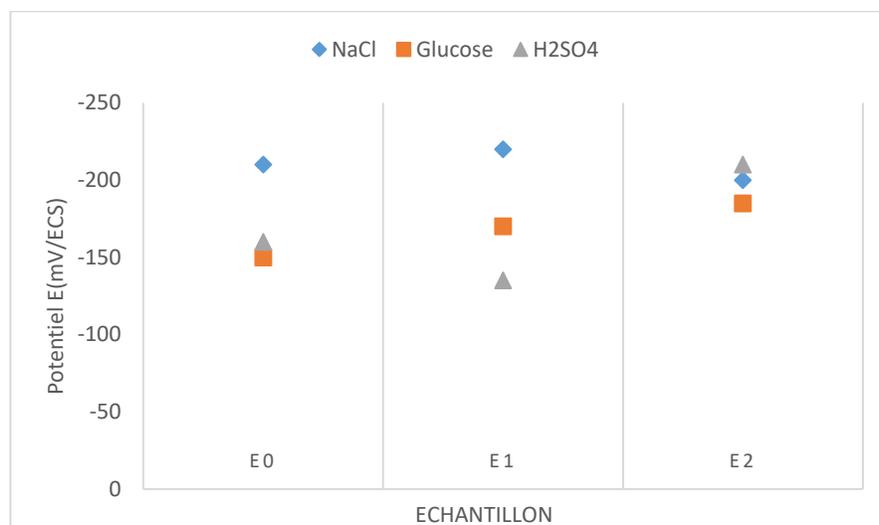


Figure 4-10: Potentiel de corrosion en fonction du milieu

Les valeurs de potentiel de corrosion mesurées sont plus faibles dans la solution NaCl 0,9% que dans les solutions de l'acide sulfurique et du glucose. Le comportement de l'acier 316L est plus anodique dans le milieu salin.

### 4.3 Effet de l'acidité de l'acide sulfuriques

Superposition des courbes de polarisation globale de l'échantillon E0 dans l'acide sulfurique pour des valeurs de pH allant de 1 jusqu'à 5 :

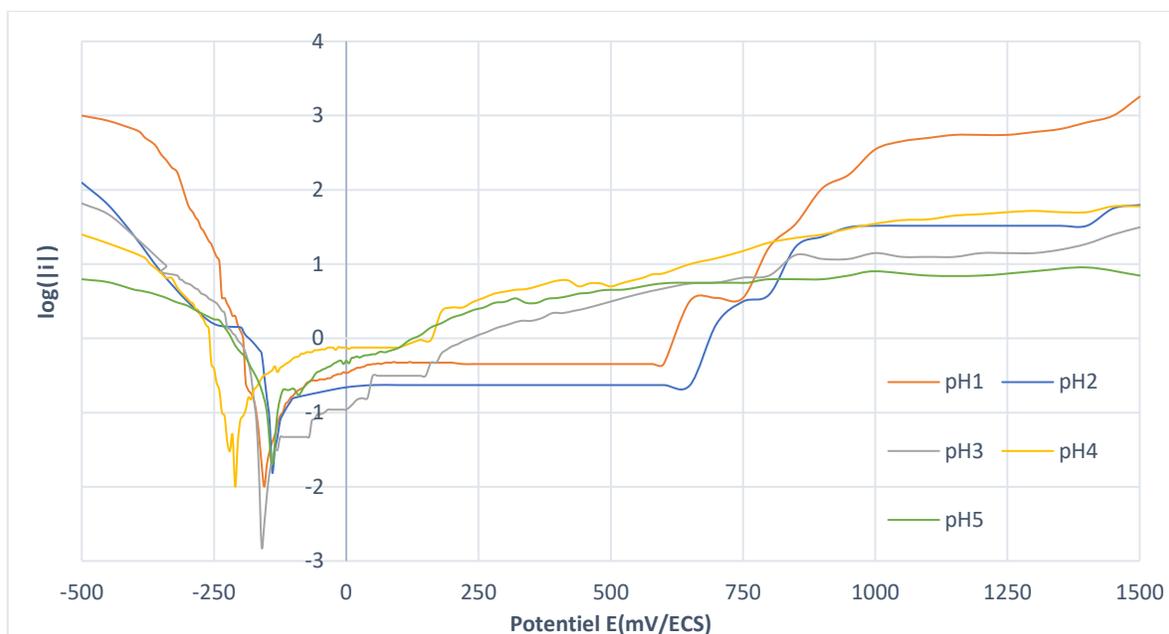


Figure 4-11: Superposition des courbes de polarisation potentiostatiques l'échantillon 0 dans l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 1, pH 2, pH 3, pH 4 et pH 5

En utilisant la méthode d'extrapolation des droites de Tafel et la résistance de polarisation nous avons déterminé, pour chaque milieu, le courant de corrosion, le potentiel de corrosion et la

vitesse de corrosion en (mm/an) de chaque échantillon. Les paramètres électrochimiques tirés des courbes de polarisation sont portés dans le tableau suivant :

Tableau 4-3: Résultats des essais de polarisation potentiostatiques de l'acier 316L.

	$E_{corr}$ (mV/ECS)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	bc	ba	$V_{corr}$ (mm/an)	$R_p$	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$V_{corr}$ (mm/an)
<b>pH1</b>	-155	0,11	-50,72	207,14	1,25	222	0,13	1,49
<b>pH2</b>	-140	0,09	-11,08	68,9	1,02	60,6	0,07	0,78
<b>pH3</b>	-145	0,06	-48,3	300	0,68	220	0,08	0,93
<b>pH4</b>	-210	0,09	-53,14	97,2	1,02	200	0,07	0,85

Les essais de polarisation potentiodynamique en mode potentiostatique effectués pour investiguer l'effet du pH de l'acide sulfurique sur le comportement électrochimique de l'acier 316L montrent que l'intensité du courant dans le domaine cathodique diminue en augmentant le pH.

Lorsque en diminuant la concentration de l'acide, dans le domaine anodique on remarque que le comportement se diffère mais le passage du domaine actif au domaine passif est en relation le ph du milieu, en augmentant la concentration l'intensité de courant devient plus importante et le domaine anodique devient plus large sauf dans le cas de pH 4 qui présente une exception par rapport aux autres. D'après les courbes il est difficile de caractériser le potentiel de transpassivation de l'acier 316L à cause de l'apparition de plusieurs paliers de pseudopassivation, Même à des valeurs de pH égale à 1.

### 4.3.1 Relation entre le pH de l'acide sulfurique et les paramètres électrochimique

#### 1) Courant de corrosion en fonction du pH :

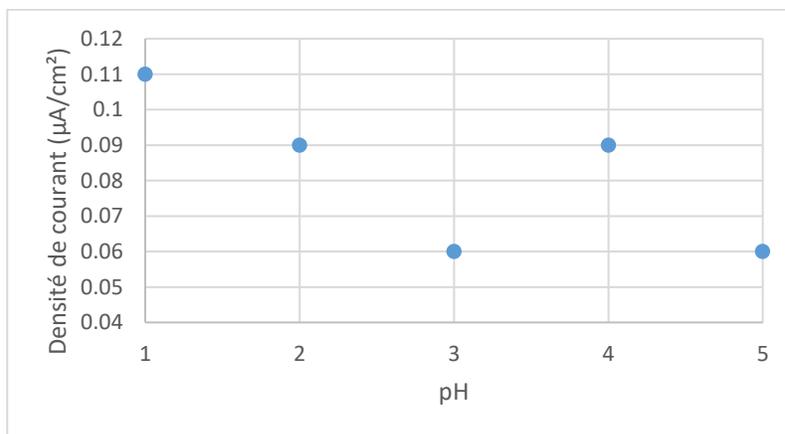


Figure 4-12: Courant de corrosion en fonction de l'acidité du milieu sulfurique.

Globalement les courants de corrosion sont faibles, on a des valeurs varie entre  $0,06\mu\text{A}/\text{cm}^2$  et  $0,11\mu\text{A}/\text{cm}^2$  c'est-à-dire que la vitesse de corrosion est faible, donc l'acier 316l a résisté la corrosion généralisé dans l'acide sulfurique. Les valeurs de l'intensité du courant de corrosion diminuent en augmentant le pH de l'acide sulfurique.

## 2) Potentiel de corrosion en fonction du pH :

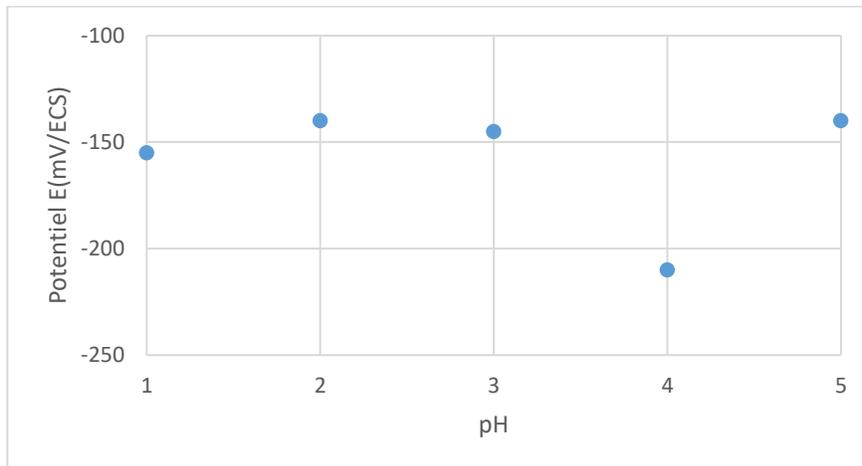


Figure 4-13: Potentiel de corrosion en fonction de l'acidité du milieu sulfurique.

On remarque que les valeurs de potentiel de corrosion sont proche en fonction de l'acidité du pH, La variation du potentiel de corrosion est légèrement faible on a des valeurs dans l'intervalle de  $[-140 ; -155\text{ mV/ECS}]$ , on a constaté que la valeur du potentiel de corrosion est égale à  $-210\text{ mV/ECS}$  pour l'acide sulfurique pH 4. Ce qui signifie l'anoblissement de l'acier 316L dans cette condition.

## 4.4 Observation des piqûres

Le figures (4-15, 23) montre l'observation micrographique des échantillons après les essais de polarisation

### 1) Les échantillons polarisés dans la solution NaCl 0,9% :



Figure 4-14: Micrographie de l'échantillon E0 après polarisation dans NaCl 0,9%.

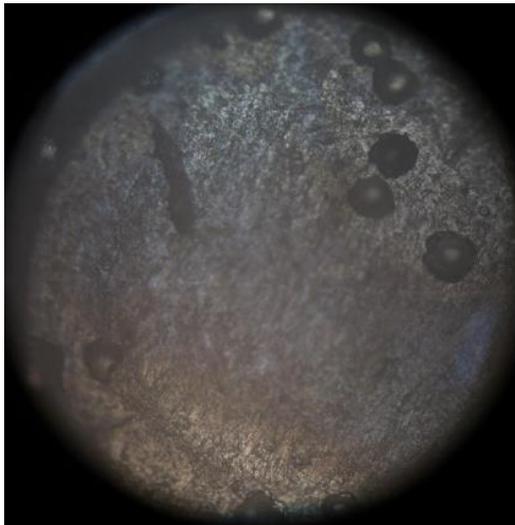


Figure 4-15: Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans NaCl 0,9%.

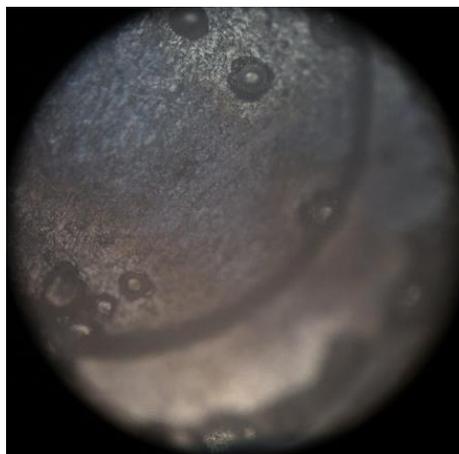


Figure 4-16: Micrographie de l'échantillon E2 après polarisation dans NaCl 0,9%.

**2) Les échantillons polarisés dans la solution du glucose 0,83g/L :**

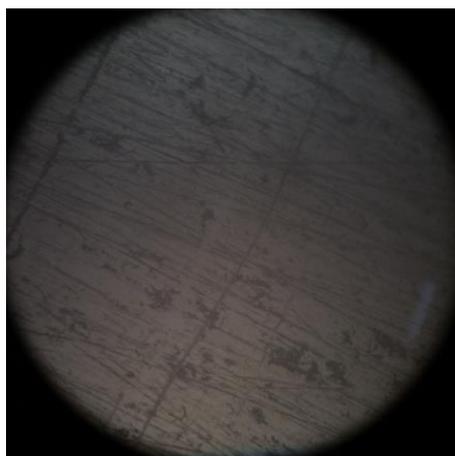


Figure 4-17: Micrographie de l'échantillon E0 après polarisation dans la solution glucose 0,83g/L.

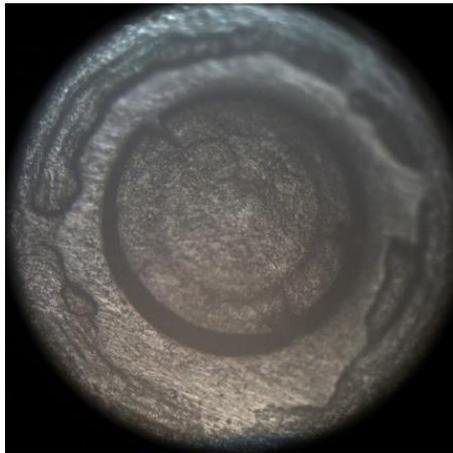


Figure 4-18: Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans la solution glucose 0,83g/L.



Figure 4-19: Micrographie de l'échantillon E2 après polarisation dans la solution glucose 0,83g/L.

**3) Les échantillons polarisés dans la solution d'acide sulfurique pH1 :**

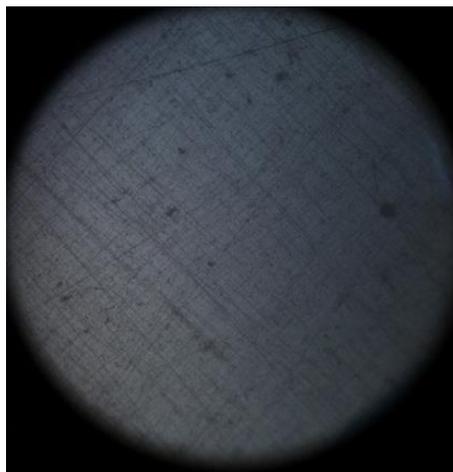
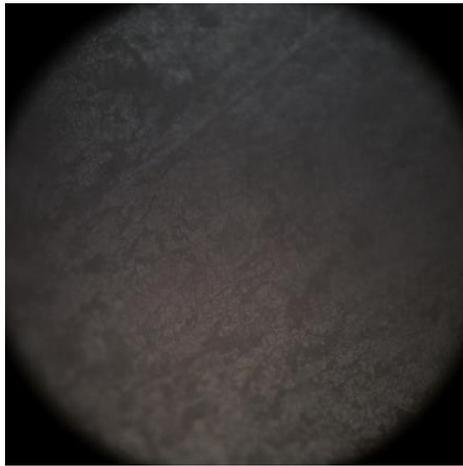


Figure 4-20: Micrographie de l'échantillon E0 après polarisation dans la solution d'acide  $H_2SO_4$  pH 1.



*Figure 4-21:Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans la solution d'acide H2SO4 pH 1.*



*Figure 4-22:Micrographie de l'échantillon E1 après polarisation dans la solution d'acide H2SO4 pH 1.*

Les images microscopiques sont prises après la polarisation des échantillons donc elles concernent la fin de transpassivation.

On constate que l'acier 316L a subi une attaque localisée, cette attaque est caractérisée par l'apparition des cavités et des trous donc il s'agit de la corrosion par piqûre. Dans la solution de NaCl 0,9 % le risque de ce type de corrosion est important dû aux ions de chlorure. Les piqûres des échantillons polarisés dans la solution NaCl 0,9 % sont grossières.

Les micrographies des échantillons polarisés dans l'acide sulfurique pH 1, confirme la résistance à la corrosion de l'acier 316L, elles traduisent l'apparition des paliers de pseudopassivation dans les courbes de polarisation.

Pour les micrographies des échantillons indentés, on a remarqué que les piqûres ne sont pas distribuées uniquement dans la zone indentée.

## 4.5 Discussions et perspectives

Cette étude tente de valoriser l'influence de certains paramètres notamment, l'état de surface des échantillons, où l'on a considéré que la surface a été altérée mécaniquement, la nature du milieu et le pH de l'acide sulfurique. La discussion des résultats sur la tenue à la corrosion de l'acier AISI 316L. sera subdivisée en trois volets afin de mieux englober toutes les données, métallurgiques et électrochimiques ainsi que leurs éventuelles interrelations :

- Influence de l'état de surface ;
- Influence du milieu ;
- Influence du pH de l'acide sulfurique.

### 4.5.1 Influence d'état de surface

La présente étude a pour but de comprendre l'interaction entre le comportement en corrosion après une déformation, en induisant un défaut mécanique au niveau de la surface d'échantillon d'acier 316L, la déformation locale de l'acier 316L est en relation avec la réactivité de la surface du métal et la stabilisation de la couche passive formée par l'acier inoxydable austénitique lors du processus de la corrosion, d'après [31] [31] la déformation plastique agit sur la distribution et la densité de dislocations. Les résultats obtenus n'évoquent pas un changement remarquable du comportement des échantillons indentés par rapport à l'échantillon référence (E0). Donc l'échantillon reste résistif à la corrosion généralisée. [33] montre qu'après, l'application d'une contrainte de traction plastique sur les échantillons, le taux des dommages provient de la corrosion est important par rapport aux échantillons non déformés.

Les micrographies des échantillons E1 et E2 polarisés dans la solution NaCl 0,9 % montrent l'apparition des piqûres stables au niveau de la zone indentée, cette destruction de la couche se situe préférentiellement sur des défauts de structure (fissures ou dislocations) [1] [6]. Ce qui prouve que la corrosion peut déclencher dans des sites spécifiques comme le cas des surfaces indentées.

L'étude par simulation nous permet de mieux comprendre l'effet de l'indentation ou l'altération mécanique plus précisément sur le comportement électrochimique de l'acier 316L, nous pouvons tirer des données importantes comme la distribution du potentiel, le courant et la concentration des ions de chlorures.

### 4.5.2 Influence de la nature du milieu

L'étude électrochimique des trois (3) échantillons dans 3 milieux de nature différente (salin, sucré et acide), révèle que l'acier 316L a subi une corrosion par piqûres dans le milieu salin, ce risque de corrosion est dû aux ions de chlorure qui ont une influence majeure sur le comportement en corrosion de l'acier 316L même à un pH neutre et une concentration de  $160 \text{ mmol.L}^{-1}$  donc le milieu est considéré comme un milieu doux. À cause de sa nature agressive et son coefficient de diffusion dans le film passif, les chlorures accélèrent la dissolution active de l'alliage, le caractère spécifique des ions chlorures réside surtout en leur capacité à provoquer une destruction locale de la couche passive.

L'attaque par les ions chlorures est probablement le mode dominant de corrosion des dispositifs orthodontiques. Ces ions seraient capables d'attaquer la couche d'oxyde protectrice de l'acier 316L. Ce qui explique que l'effet de la nature du milieu sur le comportement électrochimique de l'acier se réside à la capacité de déstabiliser et détruire le film passif et de rendre la repassivation impossible.

Dans le milieu d'acide sulfurique à pH 1 et température ambiante, l'acier 316L n'était pas dans des conditions qui favorisent sa corrosion les vitesses obtenues de la corrosion sont relativement faible, il atteint son potentiel de piqûration a des valeurs élevées par rapport aux valeurs obtenues dans le milieu chloruré, ainsi que l'apparition des paliers de pseudopassivation dans le domaine de transpassivation. Les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  ne sont pas assez agressifs en comparaison avec les ions de chlorures  $\text{Cl}^-$ .

La solution de glucose n'a aucun effet sur la tenue à la corrosion électrochimique de l'acier 316L. Les conditions des milieux ne sont pas corrosives pour ce matériau, on peut considérer que l'électrode est en interaction avec l'eau distillée. C'est dû à la neutralité de milieu et l'absence des ions agressifs. Une étude faite par [34] sur l'effet de D-glucose sur le comportement électrochimique de l'acier 316L dans une la salive artificielle, les résultats montrent que la résistance a augmenté en présence du glucose.

### **4.5.3 Influence du pH d'acide sulfurique**

La résistance à la corrosion de l'acier 316L dans l'acide sulfurique est due à la nature de l'acide sulfurique et les éléments d'addition de l'acier, cependant l'apparition d'un palier de passivation remarquable à un courant de passivation très faible prouve la stabilité du film passif. L'acier 316l contient le molybdène avec une teneur de 2,48 % lui permet de résister dans les milieux acides.

D'après [5], pour des concentrations de 0 % à 30 % d'acide sulfurique, les aciers austénitiques peuvent être utilisées à condition la solution est suffisamment aérée et à température limitée. La nuance X5CrNiMo 17-12-2 dans une solution de 25 % d'acide  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à température 50 ° C. ses performances sont encore suffisantes à la même température dans une solution à seulement 5 % d'acide sulfurique si elle est aérée en permanence. Dans notre travail nous avons investiguer le comportement de 316L dans une solution jusqu'à 2 % d'acide sulfurique aérée et agitée à température ambiante, les résultats montrent que ces conditions ne favorisent pas la corrosion de l'acier 316 L.

L'ASM [29] explique que cette résistance est due principalement aux éléments d'addition de l'acier 316l et sa nature actif-passif.

Durant cette étude on a pu déterminer une valeur pour laquelle l'acier 316L perd sa passivité en polarisant l'échantillon dans les solutions d'acide sulfurique de différents pH. L'acier 316L peut perdre son pouvoir passivable à une valeur de pH égale à 2 dans l'acide sulfurique, au-dessus de ces valeurs le milieu est considéré comme neutre pour l'acier 316 L.

## **4.6 Conclusion partielle**

Le comportement électrochimique de l'acier 316L de point de vue matériau dépend de la stabilité de son film passif son interaction avec le milieu, ce qu'on a pu voir dans les différents milieux.

L'acier 316L montre une excellente tenue à la corrosion dans le glucose même aux présences des défauts dans la surface aussi son comportement dans l'acide sulfurique est particulier on a une perte de matière relativement importante par rapport aux autres milieux, mais le film passif a agi contre l'attaque pour protéger la surface du métal et en présence des défauts mécaniques au niveau de la surface on a remarqué la diminution de palier de passivation, dans le milieu NaCl 0,9 % on a des piqûres grossières ce qui confirme le rôle déterminant du chlorure dans la destruction du film passif.

En termes de perte de matière le glucose est le moins agressives (0.45-0.71  $\mu\text{m}/\text{an}$ ) qui quasiment nul puis le l'acide  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 – 3,64  $\mu\text{m}/\text{an}$ ) et le NaCl 0,9 % (3-5  $\mu\text{m}/\text{an}$ ). Le milieu glucosé ne favorise pas la corrosion de l'acier 316L.

Le comportement électrochimique ne dépend pas individuellement d'un paramètre, c'est-à-dire si la surface est altérée mécaniquement ça ne veut dire pas que l'acier perd sa résistance à la corrosion dans le milieu glucosé par exemple, on trouve que l'effet est synergique entre les paramètres étudiés.

Les données extrapolées sont le pont vers la simulation numérique du phénomène de corrosion et l'étude du comportement mécanique de l'acier AISI 316L par l'outil numérique. En utilisant les paramètres de Tafel, le potentiel d'équilibre et la densité de courant d'échange, nous pouvons réaliser un modèle numérique.

**CHAPITRE.5 :**

***Présentation et analyse des résultats de la  
simulation numérique***

## Chapitre.5 Présentation et analyse des résultats de la simulation numérique

Ce dernier chapitre est dédié à la présentation, l'analyse et discussion des résultats obtenus par la simulation numérique et en continuité des travaux expérimentaux faits au laboratoire.

### 5.1 La simulation numérique de la corrosion

L'étude de la corrosion par simulation numérique nous permet d'extraire d'autres données telles que la distribution du potentiel et la vitesse de corrosion dans la surface de l'électrode la distribution des éléments chimiques sur la surface.

Notre matériau est un alliage ferreux, on a pris le fer comme élément qui représente ce métal pour simplifier les calculs et la modélisation du processus de corrosion.

En basant sur les résultats des essais de polarisation potentiostatique et la géométrie de l'éprouvette, on a construit un modèle qui permet d'étudier le phénomène de la corrosion électrochimique par la voie numérique.

#### 5.1.1 Vitesse de corrosion

La vitesse de corrosion calculée par le logiciel ANSYS FLUENT est illustrée sur la figure ci-dessous :

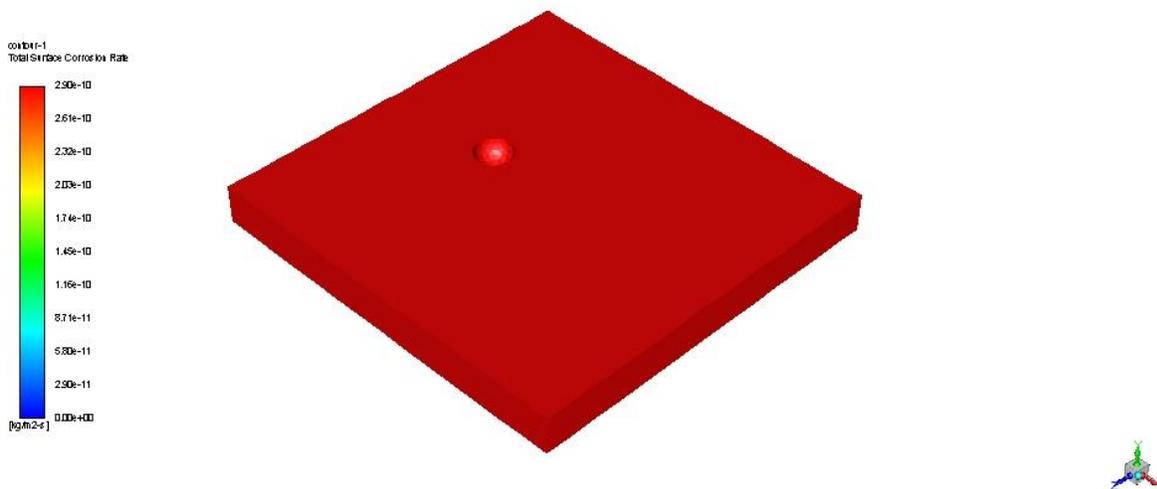


Figure 5-1 : Vitesse de corrosion obtenue par la simulation

On constate que la vitesse de corrosion est uniforme sur toute la surface de l'électrode, sa valeur est égale à  $10 \mu\text{m}/\text{an}$  proches de la valeur obtenue par l'expérimentation et confirme la résistance à la corrosion généralisée.

### **5.1.2 Discussion des résultats de la simulation de la corrosion**

Pour aller plus loin dans notre étude électrochimique, nous avons utilisé l'approche numérique parce qu'elle permet d'acquérir plusieurs paramètres qu'on ne peut pas avoir avec l'expérimentation.

Dans cette étude, nous avons pu créer une liaison entre l'expérimentation et la simulation numérique, à partir des paramètres obtenus par la polarisation électrochimique et la géométrie de l'échantillon. L'objectif étant donné de comparer avec le résultat expérimental, de voir l'effet de l'état de surface sur la corrosion électrochimique et de voir la manière de dégradation de la surface.

Cette étude est une initiation au développement des modèles de corrosion pas seulement la corrosion généralisée, mais aussi la corrosion localisée, la propagation de piqûre ainsi que la corrosion galvanique. L'importance de cet outil revient essentiellement à l'extraction des différentes données et la possibilité de varier les paramètres d'environnement.

Les essais de simulation montrent que la vitesse peut atteindre une valeur de 100  $\mu\text{m}/\text{an}$  voir même plus et ça dû à l'établissement de conditions des limites et la densité du courant d'échange, dans notre étude nous avons pu contrôler plusieurs paramètres tel que les réactions, le choix des éléments chimique qui participent au processus.

Il apparait que le logiciel ANSYS FLUENT ne traite pas ce phénomène par une approche matériau où il prend en considération des paramètres comme les propriétés de surface de l'acier 316L, car il est dédié principalement au fluide. Le choix a été fait à la base pour enchaîner avec le logiciel ANSYS MECHANICAL, mais cette approche reste utile, car elle aide à prédire et estimer la corrosion.

## **5.2 Simulation numérique de la fissuration**

Notre objectif dans cette phase c'est d'étudier l'amorçage d'une fissure au niveau de l'acier 316L à partir d'une piqûre de taille 200  $\mu\text{m}$  avec une profondeur de 150  $\mu\text{m}$  (dans une éprouvette de 75 mm de longueur, 10 mm de largeur et 1 mm d'épaisseur) sous l'effet d'une force de traction , en suivant la transition piqûre fissure et la direction de la propagation de cette fissure sous l'effet mécanique.

Pour que la simulation de ce phénomène être proche de la réalité, on a supposé que l'acier 316L est attaqué chimiquement et que cette attaque résulte une piqûre au niveau du matériau ainsi une légère diminution des propriétés mécanique, les résultats de la simulation obtenue sont présentés ci-après.

### **5.2.1 Présentation des résultats**

Avant d'entamer la simulation de la propagation d'une fissure, nous avons vérifié si la présence d'un défaut géométrique à savoir une piqure au niveau de l'éprouvette peut influencer sur la distribution de la contrainte de Von mises.

Nous avons étudié la propagation de fissure et sa direction à partir du facteur d'intensité de contrainte (FIC), de cette simulation On a pu extraire les données suivantes :

- La déformation totale ;
- La déformation élastique équivalente ;
- Contrainte équivalente de Von mises ;
- Le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$ .

Le tableau suivant résume les résultats obtenus de la simulation par ANSYS MECHANICAL :

Tableau 5-1: Résultats de la simulation.

Résultats	Minimum	Maximum
Déplacement totale(mm)	0	0,24
Déformation élastique %	0,0002	3,9
Contrainte équivalente (MPa)	0,37	5328,3
$K_I$ (MPa.mm <sup>0,5</sup> )	1957,9	1981

Ces résultats concernent la fin de la simulation, c'est-à-dire au point de la dernière force appliqué qui égale à 5 KN après l'amorçage de fissure. On remarque aussi que le  $K_I$  calculé par l'outil de simulation est supérieur au facteur critique d'intensité de contrainte, donc la fissure propage. La valeur maximale est obtenue au front de la fissure lors de la propagation.

La direction de propagation est dans le sens de l'axe X (du système de coordonnées locale) introduit pour simuler la propagation de la fissure.

### 5.2.2 La déformation totale :

Elle s'agit de calculer le déplacement des nœuds lors de la traction cette option a pour but de voir la déformation suivant les axes (X, Y, Z) dans notre cas la déformation est suivant l'axe Y, la figure suivante montre le déplacement pour un vecteur de déplacement dans le même sens du vecteur force et le déplacement :

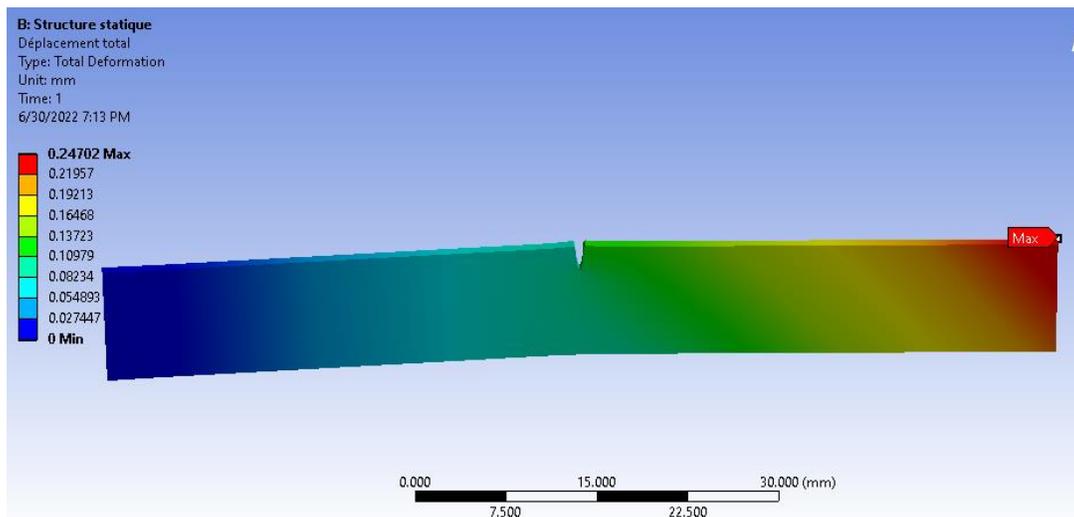


Figure 5-2 : Déplacement total

D'après Le résultat de la déformation avec le déplacement, on constate que la déformation est maximale dans l'endroit où la force est appliqué, en augmentant la force on a remarqué que la déformation prend des valeurs importantes au niveau de la fissure.

### 5.2.3 Déformation élastique équivalente

Lors de la traction, on a pu déterminer la déformation élastique équivalente de l'éprouvette pour chaque nœud, les figures ci-dessous montrent la distribution de la déformation élastique sur la géométrie.

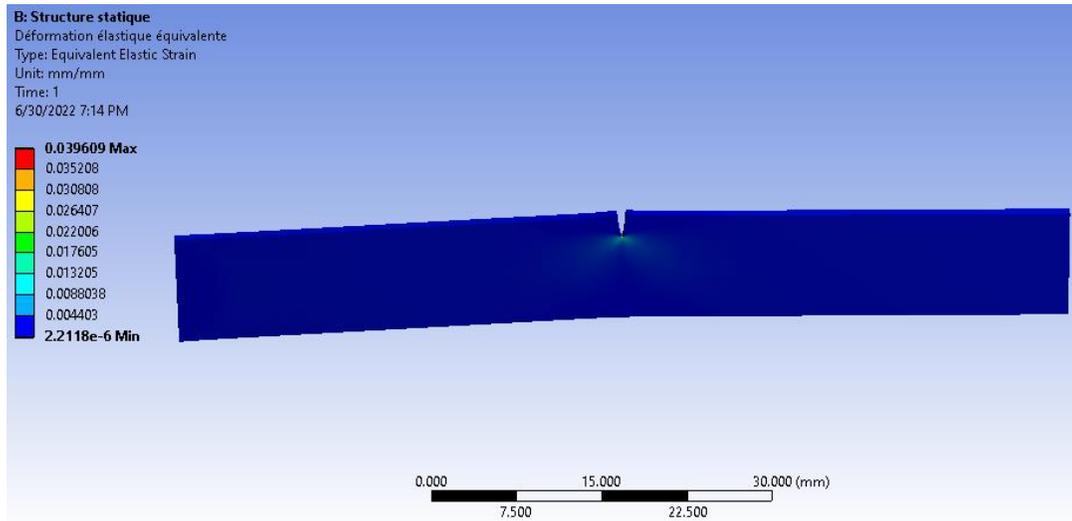


Figure 5-3 : Déformation élastique équivalente de l'éprouvette.

Les résultats montrent que la déformation se distribue au niveau de la fissure, et la valeur maximale est au niveau du front de fissure et elle augmente avec la propagation.

### 5.2.4 Contrainte équivalente de Von mises

Il s'agit de calculer la contrainte de Von mises et de voir leur répartition sur le volume de l'éprouvette en fonction du temps de traction. La valeur moyenne de la contrainte de Von mises calculé par le logiciel est égale à 446,6 MPa.

#### La distribution des contraintes

Les figures suivantes montrent la répartition des contraintes équivalentes (Von mises) sur le volume de l'éprouvette

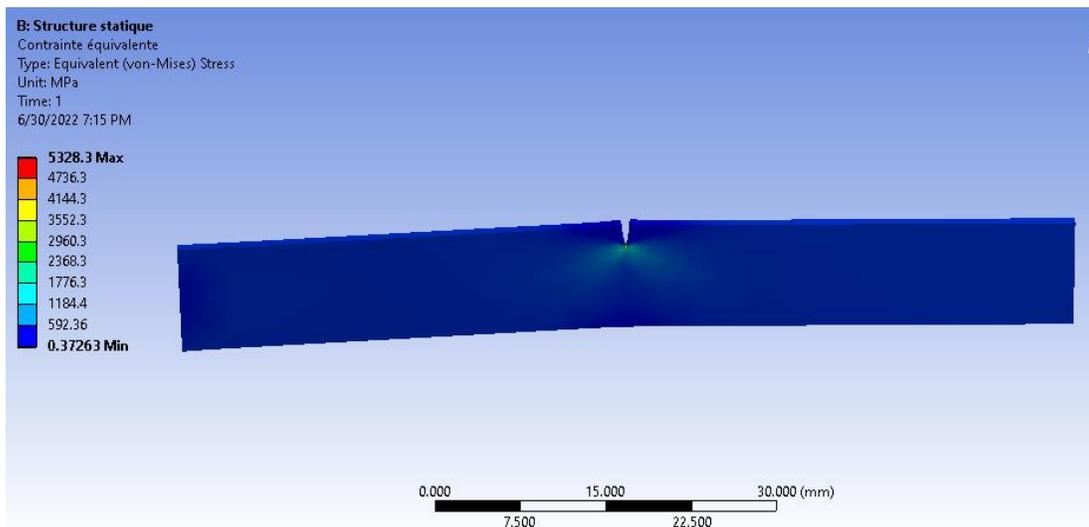


Figure 5-4 : Distribution des contraintes de Von mises

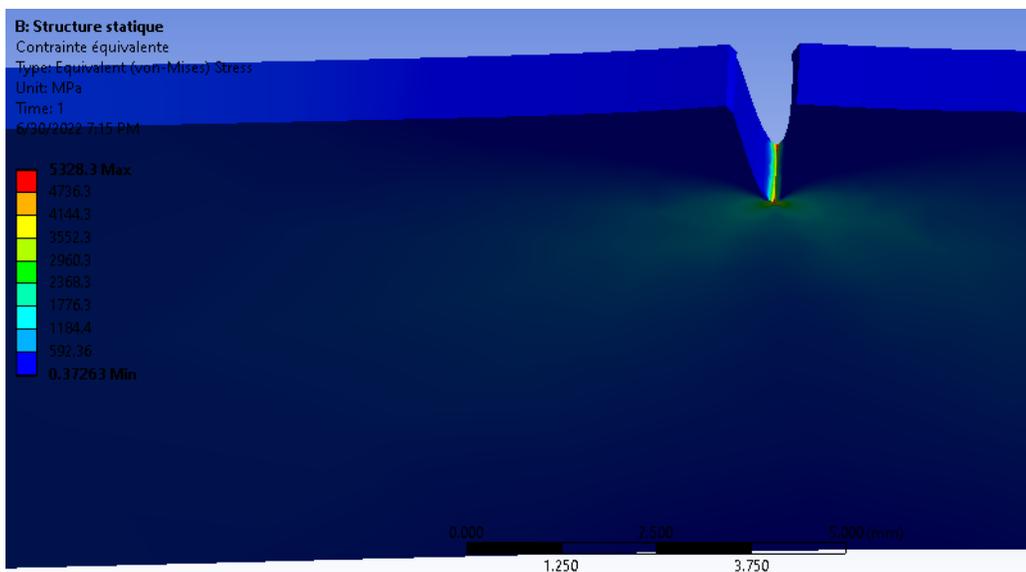


Figure 5-5 : Distribution des contraintes de Von mises au fond de fissure

Comme dans le cas de la déformation, les contraintes sont réparties autour de la fissure et la valeur maximale est située au front de fissure. On constate une augmentation de l'intensité des contraintes en fonction de la longueur de fissure.

### 5.2.5 Facteur d'intensité de contrainte

La figure suivante illustre le facteur d'intensité de contrainte calculée lors de la simulation pour six contours en fonction de la longueur de fissure

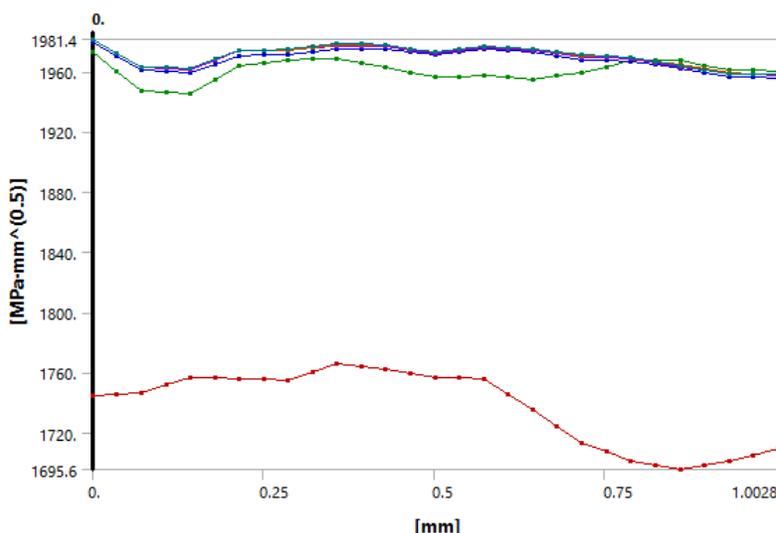


Figure 5-6 : Facteurs d'intensité de contrainte en fonction de la longueur de fissure

On a six courbes, ces courbes représentent les contours de fissure demandés par le paramètre des fissures pré maillé sur ANSYS MECHANICAL. Elles sont utilisées pour vérifier la convergence des valeurs de K (facteur d'intensité de contrainte). La première courbe est du contour le plus proche du front de fissure ; les autres courbes présentent les contours cohérents avec la croissance de longueur de fissure. On constate que les courbes convergent rapidement ce qui implique que le maillage est adéquat.

### 5.2.6 Discussion et perspectives

Dans notre étude, nous avons suivi la transition piqûre-fissure et la propagation de la fissure sous l'effet d'une mécanique de traction, en introduisant la taille de piqûre est obtenue à l'aide des résultats expérimentaux à la géométrie de l'éprouvette, nous avons constaté que la piqûre peut être un site de nucléation de fissure, d'après la littérature, le risque de la fissuration est important dans l'environnement corrosif et ça peut engendrer la rupture fragile même pour les matériaux ductiles, à titre d'exemple, l'acier 316L. La limitation de cette étude réside à l'absence de l'effet chimique qui joue un rôle déterminant à la propagation de la fissure à partir d'une piqûre.

Les résultats obtenus restent à confirmer par l'expérience pour que le modèle développé soit validé.

### 5.3 Conclusion partielle

Notre étude numérique est partagée sur deux volets, la simulation numérique de la corrosion et la simulation numérique de la propagation de fissure.

Les résultats de la simulation de corrosion sont assez proches des résultats obtenus par l'expérience, concernant la simulation mécanique, on a pu voir l'effet de la corrosion localisée sur le comportement mécanique de l'acier 316L d'où la transition piqûre fissure au niveau de ce dernier malgré ses propriétés mécaniques. Les résultats obtenus de la propagation de fissure restent à confirmer par l'expérimentation pour confirmer ces résultats. Le modèle de corrosion

peut être développé pour qu'il soit assez proche de la réalité ou d'utiliser des simulateurs dédiés principalement à l'étude de corrosion.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre étude, effectuée sur l'acier inoxydable austénitique 316L, a porté en premier lieu sur la caractérisation de son comportement électrochimique en fonction de son état de surface, de la nature du milieu (salin, glucosé ainsi que le pH de l'acide sulfurique). Cette étude expérimentale a montré la bonne tenue à la corrosion généralisée de l'acier 316L, mais ce dernier était susceptible à la corrosion par piqure dans le milieu salin et que ce risque de corrosion augmente en présence des défauts mécaniques présents sur sa surface.

En second lieu, et en s'appuyant sur les résultats de la partie expérimentale, la simulation avec ANSYS FLUENT du comportement électrochimique a été réalisée en utilisant les paramètres favorisant la corrosion de l'acier 316L tel que la géométrie et le milieu. Ainsi à partir des paramètres de Tafel et de potentiel d'équilibre nous avons estimé la vitesse de corrosion et trouvé qu'elle est du même ordre de grandeur que celle calculée lors de partie expérimentale.

L'étude s'est ensuite focalisée sur la simulation du comportement mécanique avec ANSYS MECHANICAL pour suivre la propagation d'une fissure sous l'effet d'une contrainte mécanique de traction. La modélisation numérique de la transition piqure-fissure a été faite sur un échantillon de l'acier 316L qui a subi une corrosion par piqure dans la solution de NaCl 0,9 %.

En concevant une géométrie approximative aux dimensions de la piqure, l'exécution de cette simulation a révélé que la direction de la propagation de la fissure est perpendiculaire à la contrainte mécanique appliquée sur l'éprouvette et que la piqure est un site d'amorçage de la fissure.

Bien que dans la réalité les implants soient exposés dans la réalité à des contraintes à la fois chimiques et mécaniques notre simulation de la propagation de fissure s'est, toutefois, limitée uniquement à l'effet mécanique sans intégrer l'effet chimique, et ce, car le logiciel ANSYS MECHANICAL ne prend pas en charge l'effet chimique du milieu.

En guise de perspective, les résultats obtenus peuvent être améliorés par l'intégration de l'effet chimique de la même façon que l'effet thermique dans la simulation du comportement mécanique, ce qui permettrait d'avoir des résultats plus proches à la réalité et d'envisager d'autres études plus avancées concernant le comportement de l'acier 316L par exemple la corrosion par fatigue et la fragilisation par l'hydrogène.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. B. P. Lacombe, B. Baroux, *Les aciers inoxydables*, Eds Les Ul. France, 1990.
- [2] P. Cunat, “Aciers inoxydables: Critères de choix et structure,” *Tech. l’Ingenieur*, vol. 33, p. 18, 2000, [Online]. Available: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=16028346>
- [3] C. O. A. Olsson and D. Landolt, “Passive films on stainless steels - Chemistry, structure and growth,” *Electrochim. Acta*, vol. 48, no. 9 SPEC., pp. 1093–1104, 2003, doi: 10.1016/S0013-4686(02)00841-1.
- [4] H. M. Cobb, *Steel Products Manual: Stainless Steels*. 1999.
- [5] J.-P. Cunat, “Aciers inoxydables, Propriétés. Résistance à la corrosion,” *Tech. l’Ingénieur, Trait. matériaux métalliques*, p. 31, 2008.
- [6] J. H. Qiu, “Passivity and its breakdown on stainless steels and alloys,” *Surf. Interface Anal.*, vol. 33, no. 10–11, pp. 830–833, 2002, doi: 10.1002/sia.1460.
- [7] B. Baroux, *La corrosion des métaux - Passivité et corrosion localisée: Passivité et corrosion localisée (Technique et ingénierie)*. DUNOD, 2014.
- [8] M. Haïdopoulos, S. Turgeon, C. Sarra-Bournet, G. Laroche, D. Mantovani, “Development of an optimized electrochemical process for subsequent coating of 316 stainless steel for stent applications,” *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 17, no. 7, pp. 647–657, 2006, doi: 10.1007/s10856-006-9228-4.
- [9] H. Chaouki, A. Chtaini, and A. El Bouadili, “Resistance a La Corrosion Des Alliages Utilises Comme Implants En Milieu Biologique,” *Sci. Study Res.*, vol. 6, no. January 2005, pp. 35–42, 2014.
- [10] M. Niinomi, *Metals for biomedical devices*, 2nd ed. woodhead Publishing, 2019.
- [11] Z. Wang, E. Paschalidou, A. Seyeux, S. Zanna, V. Maurice, and P. Marcus, “Mechanisms of Cr and Mo Enrichments in the Passive Oxide Film on 316L Austenitic Stainless,” vol. 6, no. September, pp. 1–12, 2019, doi: 10.3389/fmats.2019.00232.
- [12] J. Crolet, G. Béranger, “Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages,” *Les Tech. l’ingénieur*, M, pp. 1–21, 1998, [Online]. Available: [http://sora.zxq.net/doc/ensam/3/s2/Corrosion et rupture Mat/Cours/Corrosion en milieu aqueux des metaux et alliages\\_Doctrichnesd\\_ingénieur\\_.pdf](http://sora.zxq.net/doc/ensam/3/s2/Corrosion%20et%20rupture%20Mat/Cours/Corrosion%20en%20milieu%20aqueux%20des%20metaux%20et%20alliages_Doctrichnesd_ingénieur_.pdf)
- [13] C. Q. Jessen, *Stainless steel and corrosion*. 2011.
- [14] F. Mars G, *Corrosion Engineering (McGraw-Hill, 1987).pdf*, 3rd ed. 1987.
- [15] S. D. Cramer and B. S. Covino, *ASM Handbook, Volume 13B, Corrosion: Materials*, vol. 13. 2005.
- [16] H. S. Khatak and B. Raj, *Corrosion of Austenitic Stainless Steels*. 2002. doi: 10.1533/9780857094018.
- [17] D. Landolt, *Corrosion and surface chemistry of metals*. 2007. doi: 10.5860/choice.45-0897.
- [18] H. Matusiewicz, “Potential release of in vivo trace metals from metallic medical implants in the human body: From ions to nanoparticles - A systematic analytical review,” *Acta Biomaterialia*, vol. 10, no. 6. Acta Materialia Inc., pp. 2379–2403, 2014. doi: 10.1016/j.actbio.2014.02.027.

- [19] R. I. M. Asri *et al.*, “Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 77. Elsevier B.V., pp. 1261–1274, 2017. doi: 10.1016/j.msec.2017.04.102.
- [20] L. Rouibah, “Etude électrochimique et morphologique de la piqûration de l’acier inoxydable austénitique 316L,” Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [21] H. Hachemi, “Etude de l’influence du milieu sur le comportement électrochimique de l’acier inoxydable AISI 316L,” Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
- [22] S. Papavinasam, “Electrochemical polarization techniques for corrosion monitoring,” *Tech. Corros. Monit.*, no. C, pp. 49–85, 2008, doi: 10.1533/9781845694050.1.49.
- [23] “ANSYS Fluent Theory Guide,” no. August, 2018.
- [24] A. D. Canonsburg, “ANSYS Fluent User ’ s Guide,” no. August, 2018.
- [25] I. ANSYS, “Fracture Analysis Guide,” ANSYS, *Inc.*, no. January, 2022.
- [26] “Theory Reference,” no. August, 2018.
- [27] T. Materials and I. Company, “Materials Selection and Design,” *Mater. Sel. Des.*, 2018, doi: 10.31399/asm.hb.v20.9781627081948.
- [28] A. D. Canonsburg, “Element Reference,” no. August, 2018.
- [29] B. D. Craig, D. S. Anderson, A. S. M. International, *Handbook of Corrosion Data*. ASM International, 1994. [Online]. Available: <https://books.google.dz/books?id=KXwgAZJBWb0C>
- [30] H. Satoh, T. Nakayama, *Nonferrous materials*, vol. 53, no. 4. 2004. doi: 10.3323/jcorr1991.53.178.
- [31] D. Large, R. Sabot, X. Feaugas, “Influence of stress-strain field on the dissolution process of polycrystalline nickel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution: An original in situ method,” *Electrochim. Acta*, vol. 52, no. 27 SPEC. ISS., pp. 7746–7753, 2007, doi: 10.1016/j.electacta.2006.12.064.
- [32] X. Feaugas, *al.*, “Influence d’un état mécanique sur la réactivité de surface en milieux aqueux des métaux c.f.c.,” *PlastOx 2007 - Mec. Mec. des Interact. Plast. - Environ.*, vol. 2007, pp. 221–236, 2009, doi: 10.1051/ptox/2009016.
- [33] S. Munir, W. R. Walsh, “The Quantification of Corrosion Damage for Pre-stressed Conditions: A Model Using Stainless Steel,” *J. Bio- Tribo-Corrosion*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1007/s40735-016-0033-4.
- [34] R. Saranya, S. Rajendran, “Influence of d-glucose on corrosion resistance of SS316 in presence of artificial saliva,” *Rasayan J. Chem.*, vol. 11, no. 1, pp. 103–110, 2018, doi: 10.7324/RJC.2018.1111747.