

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Sciences des matériaux

Par : Brahim BELAHCENE

Sujet

Analyse et modélisation du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique.

Soutenue publiquement, le 10 / 12 / 2016, devant le Président jury composé de :

Mr GHERNAOUT Mohammed El Amine	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr BENMOUSSAT Abderrahim	Professeur	Centre univ.Tamanrasset	Directeur de thèse
Mr MANSRI Ali	Professeur	Université de Tlemcen	Co- Directeur de thèse
Mr KERBOUA Bachir	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mr BENDRAOUA Abdelaziz	Professeur	Université USTO – MB Oran	Examineur
Mr HADDOU Boumediene	Professeur	Université USTO – MB Oran	Examineur
Mr BOUSSAID Abdelhak	Professeur	Université de Tlemcen	Invité

Année Universitaire 2015 - 2016

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu pour son aide à l'aboutissement de ce travail pour tout ce qu'il a effectué dans ma vie et pour ce qu'il continue à faire.

Je remercie en premier lieu mon directeur de thèse, Mr BENMOUSSAT Abderrahim, professeur à l'Université de Tamanrasset, pour son aide et sa patience. Je suis également reconnaissant pour sa disponibilité même après sa mutation au CUTAM, centre universitaire de Tamanrasset, ses qualités pédagogiques et scientifiques. Je lui adresse toute ma gratitude.

J'exprime mes remerciements à Mr MANSRI Ali, professeur à Université UABB-Tlemcen, Co-encadreur, pour sa participation à l'élaboration de cette thèse ; Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude, pour la confiance qu'il m'a accordée en m'accueillant au sein de son laboratoire.

Je remercie Mr GHERNAOUT Mohammed El Amine, professeur à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'être le président de jury de ma thèse.

Je remercie vivement les membres du jury (Mr KERBOUA Bachir Professeur à l'université de Tlemcen, Mr BENDRAOUA Abdelaziz , professeur à l'université USTO Oran ,et Mr HADDOU Boumediene ,professeur à l'université USTO Oran) qui ont acceptés d'évaluer mon travail.

Je remercie Mr BOUSSAID Abdelhak, professeur à l'université de Tlemcen d'avoir accepté notre invitation.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma mère et mon père pour leur persévérance et aides ;
- Toute ma famille.

Résumé

Le développement de la technique d'assemblage de matériaux a été largement utilisé pour la conception de matériaux de haute résistance. La présente étude montre l'influence des paramètres et les performances d'assemblage par soudure de l'acier $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ sur les différentes zones de la structure telles que la zone fondue (FZ), la zone affectée thermiquement (ZAT), et le métal de base (BM). Les effets des charges thermiques, mécaniques et de la tension appliquée sur la variation de la contrainte, taux d'endommagement, et la sollicitation en milieu physicochimique sélectif sont étudiés. Une méthode exploratoire prédictive a été utilisée pour prévoir l'influence de proportions des éléments additifs du tableau périodique sur les propriétés des aciers.

L'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement par corrosion de l'acier HLE $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ ont été déterminés par un modèle axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par l'endommagement thermomécanique et les charges appliquées. L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été déterminés par microscopie électronique à balayage (MEB) et spectrométrie EDS.

L'influence de l'environnement et les paramètres physiques sur l'acier HLE $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ et son comportement d'endommagement en corrosion dans un milieu agressif à base NaCl a été étudié en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Les résultats montrent qu'il y a des variations du taux de corrosion par rapport au type de traitement thermique, fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement des échantillons. La résolution de l'équation de Nernst prouve que l'augmentation de la température a un effet direct sur le potentiel d'hydrogène de la solution, la densité de courant et la corrosion du métal. De plus, l'efficacité d'inhibition a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à

conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que l'acier $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ a une bonne efficacité.

Une méthode empirique tel que le model Norsok a été appliqué pour déterminer les paramètres sensibles les plus influencés sur la dégradation de matériaux dans un milieu riche en CO_2 . Par conséquent, le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité moyenne, la pression partielle de CO_2 , les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. En outre, l'application de scénarios nous a permis d'évaluer le risque de corrosion.

Mots clés : Acier HLE – corrosion – milieu sélectif – inhibiteur – soudure – modélisation

Abstract

The assembling technics by using resistance welding is the main element used extensively in industrial applications such as automotive industry, microchips systems, maintenance and reparation of metallic structures solicited by various environments. The development of assembling technics of materials has been widely used for designing high resistance material.

The aim of this study is to evaluate the thermomechanical behavior and damage rate of a HLE steel $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ assembled by Electric resistance welding. Different scenarios are applied in order to minimize damage zones affected by applied loads. The characterization of sample steel simulated at HAZ thermal condition is carried out using SEM- EDS. A two-dimensional asymmetric model is used in modeling. Moreover, samples were exposed to external loads. The maximum equivalent stress is obtained at 4312 C° with 3.7 % maximum strain. Thus, the displacement field vector indicates sense of stress diffusion from ZF to MB, and the damage zone area is highly affected by the variation of voltage.

The influence of environment and physical parameters on $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ HLE steel corrosion damage behaviour in NaCl solutions was studied using weight loss, pH evolution at 300k to 370k,

electro-exchanges, and passivity. Herein, the results show that the corrosion rate changes versus type of thermal treatment and cooling fluid, solution concentration, shape, size and cooling speed of the samples. The resolution of Nernst equation proves that the increase in temperature has a direct effect on hydrogen potential of the solution, current and corrosion potential of the metal. Moreover, the inhibition efficiency was determined by theoretical calculation using mechanical molecular and semi-empirical method. These results guided us to conclude that the inhibitor, which has low electronegativity than $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ Steel has good efficiency.

The Study of Corrosion Behavior of HLE steel solicited in (CO_2) % Selective Physicochemical medium is achieved by using empirical method to determine sensible parameters that have huge influence on materials' degradation. Therefore, the corrosion rate is estimated by application of a theoretical calculation based on physicochemical parameters, such as medium acidity, CO_2 partial pressure, thermodynamics parameters (P, T), and mechanical proprieties of studied materials. Moreover, scenarios application permitted us to assess corrosion risk.

Keywords: Steel HLE - corrosion - selective medium - inhibitor - welding – modeling

ملخص

تعتبر تقنيات التجميع باستخدام لحام المقاومة من العناصر الرئيسية المستخدمة على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية مثل صناعة السيارات، الصناعة البترولية وصيانة الهياكل المعدنية و البحرية ; وقد استخدمت على نطاق واسع في تطوير خصائص المواد لتصميم مواد ذات المقاومة العالية.

ان الهدف من هذه الدراسة هو تقييم سلوك والأضرار الميكانيكية الحرارية لمعدن الصلب $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ من فئة HLE. عدة سيناريوهات تم تطبيقها من أجل تقليل اضرار المناطق المتضررة من الجهود المطبقة. تم تشخيص عينة المعدن الصلب باستخدام مجهر فحص استقصائي (SEM)، مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) ومحاكاة عملية التلحيم بالمقاومة. النموذج المستخدم في النمذجة اكسي سمثري ثنائي الأبعاد. وعلاوة على ذلك، تعرضت عينات لجهود خارجية. تم الحصول على أقصى قدر من الضغط عند 4312 درجة مئوية مع قدر أقصى بقدر 3.7٪.

وهكذا، فإن شعاع مجال الإزاحة يشير إلى اتجاه نشر التوتر المنطقة المنصهرة (ZF) إلى المنطقة الطبيعية (MB) ; و منطقة المتضررة تتأثر بشدة من تغيرات الجهود. تمت دراسة تأثير البيئة والعوامل الفيزيوكيميائية على معدن الصلب $C_{0.12}\%Mn_{1.02}\%Si_{0.29}\%$ من فئة HLE، سلوك ضرر التآكل في محلول كلوريد الصوديوم باستخدام تغير الوزن، و الحموضة من K300 إلى k370، التبادلات الكهربائية.

فقد بينت النتائج أن معدل التغييرات للتآكل بدلالة نمط المعالجة الحرارية، سائل التبريد، تركيز المحلول، شكل، حجم وسرعة التبريد للعينات. حل المعادلة ناست (Nernst) يثبت أن الزيادة في درجات الحرارة لها تأثير مباشر على إمكانية هيدروجين للمحلول، شدة التيار وتآكل المعدن. وعلاوة على ذلك، تم تحديد فعالية التثبيط بالحساب النظري باستخدام الطريقة الميكانيك الجزيئية وشبه التجريبية. هذه النتائج أرشدتنا لاستنتاج أن المثبطات التي لديها السالبة الكهربائية منخفضة من المعدن الصلب $C_{0.12}\%Mn_{1.02}\%Si_{0.29}\%$ لديها كفاءة جيدة.

تحقق دراسة سلوك تآكل المعدن الصلب $C_{0.12}\%Mn_{1.02}\%Si_{0.29}\%$ من فئة HLE بوجود وسط فزيو كيميائي (CO_2) و باستخدام المنهج التجريبي لتحديد العوامل التي لها تأثير كبير على ضعف المواد، لذلك، تشير التقديرات إلى أن معدل التآكل بواسطة تطبيق الحساب النظري على أساس المعايير الفيزيائية، مثل حموضة الوسط، الضغط الجزئي (CO_2) ، العوامل الترموديناميكية (P، T)، و الخصائص الميكانيكية للمواد المدروسة. وعلاوة على ذلك، تطبيق سيناريوهات سمحت لنا بتقييم مخاطر التآكل.

كلمات المفتاحية: المعدن HLE - تآكل - وسط انتقائي - المانع - لحم - نمذجة

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Sommaire	VII
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII
Nomenclatures	XIV
Abréviations	XVII
Introduction Générale	XVIII

CHAPITRE I

Rappel Théorique et Synthèse Bibliographique

I.1. Introduction	2
I.2. Spécification des aciers HLE	3
I.3. Procédé d'assemblage	3
I.4. Modélisation numérique par les éléments finis	7
I.5. Modes d'endommagements dans les milieux sélectifs	9
I.6. Protection par inhibition	12
I.7. Mécanique moléculaire et semi empirique	13
I.8. Synthèse	15
I.9. Conclusion I	17

CHAPITRE II

Etude des propriétés et de l'effet des éléments d'alliage par application de la méthode Datamining

II.1. Introduction	19
II.2. Le Datamining	19
II.3. Analyse En Composantes Principales « ACP »	20
II.3.1 Formulation de l'Analyse en Composantes Principales	21
a. Matrice des données	21
b. Centrage et réduction des données	21

Sommaire

c. Distances entre objets	21
d. Inertie totale du nuage	22
II.3.2 Réalisation de l'analyse en composantes principales	22
a. Relations de transitions	22
b. Nuage des variables	23
II.4. Calcul d'une ACP avec MATLAB	23
II.5. Applications sur les propriétés des éléments d'alliages d'aciers	23
II.6. Préparation de la base de données	24
II.7. Exploitation de résultats	25
II.8. Interprétations de résultats	27
II.9. Conclusion II	29

CHAPITRE III

Analyse et modélisation du comportement thermomécanique et Evaluation du taux d'endommagement des aciers HLE $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$

III.1. Introduction	31
III.2. Modèle géométrique	32
III.3. Caractérisation microstructurale	33
III.4. Équations gouvernantes	34
III.5. Condition aux limites	35
III.6. Les procédures utilisées dans l'analyse par éléments finis	36
III.7. Validation du modèle	36
III.7.1 Validations de modèle électrothermique	36
III.8. Résultats et discussion	39
III.9. Conclusion III	54

CHAPITRE IV

Analyse et modélisation du comportement en corrosion des aciers $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ Sollicités dans un milieu sélectif physicochimique à base de NaCl.

IV.1. Introduction	56
IV.2. Matériels et méthodes	58

Sommaire	
IV.2.1Caractéristiques du matériau d'étude	58
IV.2.2 Conditions environnementales	58
IV.3. Résultats et discussions	59
a. Courbe de la polarisation	62
b. Estimation Théorique	66
IV.4. Conclusion IV	68
CHAPITRE V	
Étude du comportement en corrosion des aciers $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique à base $(CO_2)_\%$	
V.1. Introduction	71
V.2. Matériels et méthodes	72
V.3. Résultats et discussions	73
V.4. Conclusion V	77
CHAPITRE VI	
Interprétations des résultats	85
Conclusion Générale	88
Bibliographie	92
ANNEXE I	100
Résumé globale	
Bilan scientifique	
Publications	

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Assemblage par MIG, MAG

Figure I.2 : Assemblage par TIG

Figure I.3 : Arrangement des électrodes

Figure I.4 : Assemblage par résistance

Figure I.5 : Élément de contrôle de la solution numérique.

Figure I.6 : Corrosion humide dans un milieu aqueux

Figure I.7 : Corrosion sous l'effet sels minéraux (installation pétrolière)

Figure I.8 : Corrosion bactérienne sous l'effet sulfate (milieux aérobie)

Figure I.9 : Organigramme du calcul moléculaire

CHAPITRE II

Figure II. 1 Algorithme de base de la méthode ACP

Figure II.2 : Corrélation entre les nuances d'acier (loading plot)

Figure II.3 : Corrélation entre les éléments d'alliage (scores plot)

Figure II.4 : Corrélation entre les propriétés (scores plot)

CHAPITRE III

Figure III.1 : Modèle de la discrétisation asymétries

Figure III.2 : Assemblage et maillage structural

Figure III.3 : Composition chimique d'acier HLE

Figure III. 4 : Fractographies (MEB) pour acier HLE , a:20um, b:map 20um

Figure III. 5 : Organigramme de la modélisation assemblage électrothermomécanique

Figure III.6 : Distributions de la température en fonction du temps (Hou Zhigang et al)

Figure III.7 : Distributions de la température en fonction du temps (matche)

Figure III.8 : Distributions de la température en fonction du temps (Ranjbar Nodehet all)

Figure III.9 : Distributions de la température en fonction du temps (match)

Figure III.10: Visualisations graphiques de déplacement

Figure III.11 : Visualisation graphique pour la distribution température.

Figure III.12 : Visualisations graphiques de la distribution de la température (effet de joule)

Figure III.13 : Expansion de la plaque au plan X

Figure III.14 : Expansion d'assemblage au plan Y

Figure III.15 : Expansions d'assemblage au plan XY

Figure III.16 : Cartes d'expansion l'assemblage au plan XY

Figure III.17 : Variation de la déformation totale au long X

Figure III.18 : Visualisations graphiques de la distribution de la déformation totale au long X

Figure III.19 : Visualisations graphiques de la distribution de la déformation totale au long Y

Figure III.20 : Variation de la déformation totale au long Y

Figure III.21 : Visualisations graphiques de la distribution de la déformation totale au plan XY

Figure III.22 : Variation de la déformation totale dans le plan XY

Figure III.23 : Visualisations graphiques de la déformation principale (van mises)

Figure III.24 : Variation de la déformation principale (van mises)

Figure III.25 : Visualisations graphiques des potentiels électriques

Figure III.26 : Potentiels électriques

Figure III.27 : Visualisations graphiques de la variation des contraintes dans le plan X suivant le cordon d'assemblage

Figure III.28 : Visualisations graphiques de la variation des contraintes dans le plan Y suivant le cordon d'assemblage

Figure III.29 : Distributions des contraintes équivalentes, dans le plan XY suivant le cordon d'assemblage

Figure III.30 : Visualisations graphiques de la variation des contraintes dans le plan XY suivant le cordon d'assemblage

Figure III.31 : Variation des contraintes équivalentes suivant le cordon d'assemblage

Figure III.32 : Visualisations graphiques de la distribution des contraintes équivalentes suivant le cordon d'assemblage

Figure III.33 : Taux endommagement thermomécanique

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : (a) coupon d'acier, (b) échantillon après polissage, (c,d) segmentation, (e,f,g) choc thermique,(h) refroidissement par air ,(i) refroidissement par huile.

Figure IV.2 : Taux de corrosion du métal de base (mb) vs concentrations NaCl et surfaces d'échantillons

Figure IV.3:Taux de corrosion du métal affecté par la chaleur et refroidis par air (ZATsct) vs concentrations NaCl et surfaces d'échantillons

Figure IV.4 : Taux de corrosion du métal affecté par la chaleur et refroidis par multigrade d'huile (ZATH) vs concentrations NaCl et surfaces d'échantillons

Figure IV.5 : Taux de corrosion vs concentration NaCl

Figure IV.6:Densité de courant vs concentration NaCl

Figure IV.7:Effet de la température sur le potentiel de corrosion

Figure IV.8 : Effet e la température sur la densité de courant et le potentiel de corrosion (courbes de polarisation)

Figure IV.9 : Courbes de polarisation (tafel) pour 1 M NaCl à 300 k

Figure IV.10 : Taux de corrosion vs température

Figure IV.11 :Modes de configuration de C_7H_7N sur MB

Figure IV.12 : Distributions de la densité de charge

Figure IV.13 : Distributions du potentiel électrostatique (par méthode mm+)

Figure IV.14 : Dureté chimiques θ et douceur η

CHAPITRE V

Figure V.1 : Effet de la variation de pH pour faible concentration CO_2 % ($278k \leq t \leq 292k$).

Figure V.2 : Effet de la variation de pH pour faible concentration CO_2 % ($293 \leq t \leq 333k$).

Figure V.3 : Effet de la variation CO_2 % et la température (pH=6, $278k \leq t \leq 292k$).

Figure V.4 : Effet de la variation CO_2 % et la température (pH=6, $293k \leq t \leq 333k$).

Figure V.5 : Effet de la variation CO_2 % et la température (pH=5, $278k \leq t \leq 292k$).

Figure V.6 : Effet de la variation CO_2 % et la température (pH=5, $293 k \leq t \leq 373 k$).

Figure V.7 : Taux de corrosion vs température (milieu NaCl).

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Spécification technique des aciers API

Tableau I.1 : Facteurs de conversion entre taux de corrosion les plus utilisés.

Tableau II.1 : Base de données de propriétés d'aciers

Tableau III.1 : Condition aux limites

Tableau IV.1 : Estimation théorique de l'efficacité d'inhibiteurs des molécules

Nomenclatures

ACP : Analyse en Composante Principale

s : Coefficient de simple concordance

p_j : Pondération

I : Inertie totale du nuage

$d(i, i)^2$: Distances entre objets

$F_q(i)$: Relations de transitions

λ : Valeur propre

$\cos(j, j)$: Nuage des variables

R_e : Limite d'élasticité MPa

R_m : Limite de la plasticité MPa

ρ : La densité de la matière kg/m³

C : La capacité thermique spécifique Jkg⁻¹K⁻¹

t : Le temps s

k : La conductivité thermique W m⁻¹ K⁻¹

qv : Le taux de génération de chaleur interne.

q : Le flux de chaleur à travers la surface limite (J / s) / m²

n : La normale extérieure à la surface

C_e : La conductivité électrique (Ω.m)⁻¹

φ : Le potentiel électrique V

$[C^t]$: La matrice du chaleur thermique spécifique	
$[K^t]$: Matrice de la conductivité thermique	
$[K^v]$: Matrice du coefficient électrique	
$\{T\}$: Le vecteur de la température	
$\{V\}$: Le vecteur potentiel électrique	
$\{Q\}$: Le flux de chaleur vecteur	
$\{I\}$: Le vecteur courant	
σ_{equ}	: La contrainte équivalente	MPa
b	: La force appliquée sur le corps	N
r	: Le vecteur de coordonnées	
$\{\sigma\}$: Le vecteur de contrainte	
$[D]$: La matrice élasto-plastique	
$\{\varepsilon\}$: Le vecteur de la déformation	
$[De]$: Matrice d'élastique	
$\{\alpha\}$: Le coefficient de dilatation thermique	
U^{ijk}	: Déplacement	
Q	: Le flux de chaleur	J/s
I	: Courant électrique	A
V	: Voltage	V
Kt	: Température reliée avec constant	
$f(pH)$: Factor dépend par pH de solution	
f_{CO_2}	: Fugacité	

CO₂ : Dioxyde de carbone

S : Contraintes de cisaillement

MPa

H₂S : Sulfure d'hydrogène

Cl⁻ : Ion chlorure

CR : Corrosion rate

(mm/y)

Abréviations

ACP : Analyse en Composante Principale

MIG: Métal gaz inerte

MAG: Métal gaz active

TIG : Tungsten gaz inerte

ZAT: Zone affectée thermiquement

ZF: Zone de fusion (fondue ou noyau)

MB : Métal de base

HLE : Haute limite élasticité

EDS : Spectrométrie

FEM : Méthode des éléments finis

FZ : Zone fondue

Hp : Épaisseur de plaque (mm)

Wp , XG : Largeur de plaque (mm)

mpy : Milli-inch per year

P4VP : Poly(4-vinylpyridine)

Introduction générale

Le développement technologique de matériaux énergétiques tel que les structures métalliques, dans le transport et le stockage des fluides comme les hydrocarbures dans l'industrie pétrolière nécessite des études sur leur comportement physique et mécanique comme les pipelines lorsqu'ils sont sollicités en service par différents types de contraintes : mécaniques, corrosion, thermique... afin d'assurer leur bon fonctionnement et d'augmenter leur fiabilité.

Cette étude approfondit la réflexion engagée dans le cadre de cette thèse. Notre choix a été porté sur ce sujet car il s'agit d'un thème qui intéresse aujourd'hui des acteurs de la vie industrielle telle que l'industrie automobile, construction navale et industrie pétrolière. Les aciers utilisés dans ces secteurs nécessitent des études sur leurs comportements physique et mécanique comme les installations pétrolières lorsqu'ils sont sollicités en service par différents types de contraintes : mécaniques, corrosion, thermique... afin d'assurer leur bon fonctionnement et d'augmenter leur fiabilité.

Dans l'industrie pétrolière, l'acheminement du gaz naturel ou du pétrole brut entre les zones de production et les zones de consommation ou d'exportation nécessite la construction des lignes des pipelines qui répondent à des propriétés spécifiques telles que : une gamme de pression de service importante, une résistance à l'agressivité des milieux et des effluents qui peuvent contenir des éléments agressifs tels que le chlorure de sodium (NaCl) et le dioxyde de carbone (CO₂)Donc la mise en forme des pipelines a été basée sur l'amélioration des propriétés des aciers en jouant sur le pourcentages des éléments additifs, limite d'élasticité , l'épaisseur des tôles , diamètre des tubes qui nécessite un cout de mise en forme très élevés .

Introduction générale

Notre engagement est l'étude du comportement thermomécanique d'un acier standard faiblement allié d'une part et la faisabilité de l'amélioration de leur résistance à la corrosion dans des milieux physicochimiques sélectifs par estimation de l'efficacité d'inhibition de certaines molécules.

Les études sur le comportement en endommagement nécessitent le couplage entre les facteurs environnementaux et structurels à différentes échelles.

Des perspectives d'appliquer des matériaux plus tenaces à des contraintes variables est l'une des raisons qu'explique l'intérêt porté ces dernières années aux effets des différents paramètres physiques.

L'objectif ciblé dans cette étude est la mise en place d'une étude sur le comportement en endommagement des assemblages métalliques sous sollicitations de contraintes thermomécaniques et des facteurs environnementaux tels que : structurel, mécanique, thermique, chimique...

Dans une première étape, l'étude a porté sur les propriétés des nuances d'aciers et l'effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électrothermomécanique. Pour estimer le potentiel de prédiction de la classification des éléments additifs, on s'est intéressé à l'une des méthodes du Datamining, c'est la méthode d'Analyse en Composante Principale « ACP ».

Cette étape passe par la conception d'une base de donnée des propriétés d'aciers et la réduction de leur dimensions par calcul des valeurs propres et des vecteur propres réalisée à l'aide du code de calcul MATLAB , méthode du Datamining pour le but de connaître les corrélations entre les nuances d'aciers d'une part et leurs propriétés en

fonctions des éléments d'alliages d'autre part, cette première constatation a pour but d'enrichir l'aspect physique et métallurgique avant de choisir le matériau dans le test de simulation. L'étude exploratrice prédictive connue par la méthode datamining explique bien le comportement des aciers en fonction des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments alliages. Cette méthode nous a permis de déterminer les conditions de travail comme l'environnement thermique tel que le refroidissement pendant le processus de soudage, l'optimisation de l'épaisseur des tôles, les paramètres principaux qui assurent l'opération du soudage, qui sont attribués dans la simulation comme des conditions aux limites.

L'étude a porté ensuite sur l'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement à faible teneur en Carbone des aciers HLE.

Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par l'endommagement thermomécanique et des charges appliquées.

L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été effectués par microscopie électronique à balayage (MEB) et par spectrométrie EDS.

Le modèle utilisé dans la modélisation est asymétrique (symétrie dans la géométrie et dans les conditions aux limites). Les conditions aux limites sont exploitées à la base des résultats obtenus par l'effet des éléments d'addition.

Les équations gouvernantes dans l'assemblage par résistance ont été présentées.

Le modèle électro-thermomécanique utilisé dans la modélisation est asymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Les conditions aux limites sont exploitées à la base des résultats obtenus. L'objectif dans cette partie est l'évaluation

Introduction générale

du comportement thermomécanique et le taux endommagement de l'acier HLE $C_{0.12} \% Mn_{1.02} \% Si_{0.29} \%$. Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par l'endommagement thermomécanique et les charges appliquées.

Les échantillons ont été exposés à des charges externes. Ainsi, la distribution du champ de contraintes, déformation, température, champs électriques, sont présentées sous formes des graphes et de cartes. La distribution de ces paramètres sont visualisés sur la zone fondue ZF jusqu'au métal de base MB dans l'échantillon modélisées sous formes des plaques minces. La zone d'endommagement repérée est la plus affecté par la variation de la tension électrique appliqué au cours de la simulation d'assemblage par résistance.

La troisième partie de cette étude a porté sur l'étude de l'influence de l'environnement et les paramètres physiques sur l'acier HLE ($C_{0.12} \% Mn_{1.02} \% Si_{0.29} \%$) et son comportement en corrosion dans un milieu agressif à base de NaCl en s'approchant du contexte industriel dans l'industrie pétrolière. La méthode d'émersion (perte de poids), la résolution de l'équation Nernst et l'application des scénarios ont été appliqués pour dévoiler l'effet de l'évolution du potentiel de l'hydrogène, température, l'échange électronique.

L'efficacité inhibitrice a été déterminée par calcul théorique (méthode mécanique moléculaire et semi-empirique).

La quatrième partie de l'étude a porté sur l'application des méthodes empiriques tel que le model Norsok pour déterminer les paramètres sensibles à la dégradation des aciers. Le taux de corrosion est estimé par calcul théorique basé sur des paramètres

physico-chimiques, tel que l'acidité, la pression partielle de CO₂, les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Le risque de corrosion a été déduit de cette étude.

Dans ces dernières étapes, l'analyse et la modélisation du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités par des milieux sélectifs physicochimique NaCl et CO₂ ont été présentés.

L'étude a porté sur l'effet de l'environnement et les paramètres physiques sur l'acier HLE C_{0.12%} Mn_{1.02%} Si_{0.29%} et son comportement en endommagement en corrosion dans un milieu agressif à base NaCl a été étudiée en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Nous présenterons dans le premier chapitre une synthèse bibliographique sur le matériau d'étude (aciers HLE), le procédé d'assemblage thermomécanique, la modélisation numérique par les éléments finis, la protection par inhibition, la mécanique moléculaire et semi empirique et les modes d'endommagements dans les milieux sélectifs

Le second chapitre sera consacré à l'étude des propriétés des nuances d'aciers et l'effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électro thermomécanique par application de la méthode du Datamining, Analyse en Composante Principale « ACP ».

Dans le troisième chapitre, nous présenterons une étude numérique, les équations gouvernantes du comportement en endommagement électro-thermomécaniques et validation du modèle

Introduction générale

Le quatrième chapitre est une étude expérimentale portant sur le comportement en corrosion des aciers $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique (CO_2)% et à base de NaCl.

Le cinquième chapitre portera sur les résultats et leurs discussions et nous terminerons cette thèse par une conclusion et les perspectives.

CHAPITRE I

Rappel Théorique et Synthèse Bibliographique

I.1. Introduction

Le présent chapitre est une situation de notre recherche avec celle qui existe dans la littérature relevant, de la science et la physicochimie des matériaux. Plusieurs disciplines se sont intéressées à l'étude du comportement des matériaux à différentes limite d'élasticité, basant sur les propriétés de nuance d'acier à bas carbone, les techniques de caractérisation mécaniques et chimiques, les procédés d'assemblages par le couplage entre les forces physiques, mécaniques, thermiques, et chimiques sont des solutions nodales et des paramètres de caractérisation à investiguer.

La théorie et l'état d'art seront présentés dans ce travail. Les études, les démonstrations, ainsi que les critiques sont l'énergie dynamique de la recherche scientifique à différent domaines. On s'intéressera aux caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, pour assurer cette dynamisation.

L'effet des propriétés des éléments additifs ainsi que les paramètres utilisés dans les assemblages thermomécaniques y sont présentés avant de dévoiler les conditions aux limites applicables dans la simulation numérique.

Du point de vue performance, les caractéristiques de matériaux sont sensibles au type d'environnements chimiques. Le diagnostic de type d'endommagement par corrosion permet de choisir le type de protection. Des modèles en chimie théorique tel que la mécanique moléculaire et semi empirique y sont exploitées pour déterminer certaine efficacité d'inhibition des monomères et des polymères unitaires.

I.2. Spécification des aciers HLE

La rentabilité des projets industriels exige une estimation des coûts avant la prise de n'importe quelle décision. Il y a presque une trentaine d'années où les aciers à Haute limite d'Élasticité sont apparus dans le marché mondial surtout dans les domaines pétroliers, maritimes, et automobiles.... Des spécifications sont variées suivant le besoin du marché et la limite économique, le (Tableau I.1) montre quelques spécifications mécaniques des aciers de grades API[1].

Tableau I.1 : Spécification technique des aciers API

Grade	Limite d'élasticité (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (%)
API-X65	448	530	24
API-X70	483	566	23
API-X80	551	620	22
API-X100	690	770	25

I.3. Procédé d'assemblage

La technologie d'assemblage ou de réparation des pièces métalliques par différentes méthodes telle que : métal gaz inerte (MIG), métal gaz actif (MAG), tungstène gaz inerte(TIG)et par résistance où les résultats de soudage sont différents particulièrement dans les zones fondues (ZF). Les zones affectées thermiquement (ZAT) dépendent de plusieurs paramètres : la méthode de soudage, l'absence des impuretés, le nombre de cycle appliqué, le temps de soudage et le processus de refroidissement. Ces procédés consistent à assembler des pièces métalliques à l'aide d'un apport de chaleur qui se fait

par apport de métal (soudage par cordon fondu) ou sans apport de métal comme le soudage par résistance. Ce qui confère à l'assemblage soudé une continuité métallique.

Le soudage par résistance est un processus gouverné par la loi de Fick, dans lequel les surfaces métalliques en contact sont jointes par la chaleur obtenue à partir de la résistance au passage du courant électrique. La chaleur produite dans le substrat est modélisée par la résistance au passage du courant ou bien le voltage appliqué à l'origine de l'énergie thermique produite par l'agitation électronique au sien du matériau. Des études paramétriques sur le processus de soudage par résistance peuvent être effectuées par des modèles axisymétriques[2].

On articulerait sans incertitude beaucoup moins des assemblages, s'il n'y avait pas influence sur l'état standard des métaux. Certaines machines à base de métal et gaz inerte actif permettent d'assembler des métaux en plus de l'acier à l'aide de l'isolation de gaz (gaz argon /CO₂) figures (I.1 , I.2).

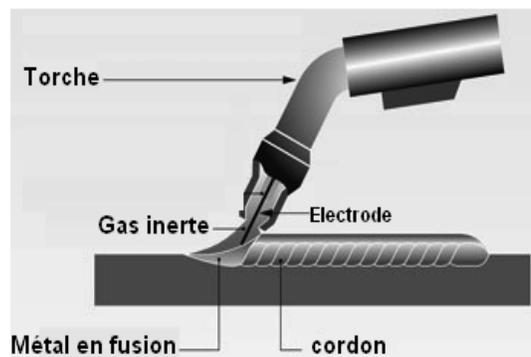


Figure I.1 Assemblage par soudage MIG, MAG¹.

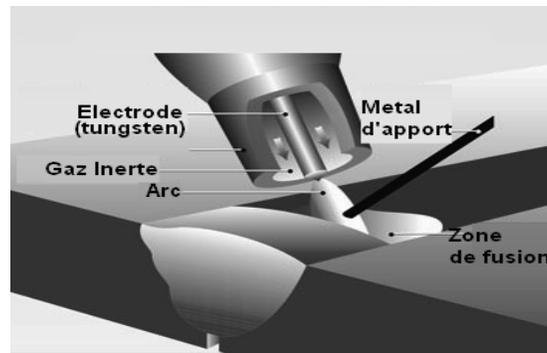


Figure I.2 Assemblage par TIG¹.

- **L'assemblage automatique**

Il permet d'assurer l'adhésion entre deux pièces métalliques à l'aide d'un apport de chaleur créée par le cordon fondu. Ce procédé d'assemblage garantit une continuité métallique de la pièce.

Les techniques de couplage par voie de soudage ont évolués dans les domaines technologiques :

- industrialisation de principes physiques : électrons, laser et ultra-sons ;
- découvertes involontaires : le soudage par explosion et par diffusion ;
- introduction croissante de la micro-électronique dans les équipements de soudage et le développement de la robotisation, d'où une amélioration de la qualité et de la productivité.

- **L'assemblage longitudinal**

Ce procédé utilise le procédé Gas-Metal Arc Welding (GMAW). Il convient à l'assemblage des aciers microalliés. (Figure I.3).

¹ : <http://www.outiland.fr/le-poste-a-souder-a-l-arc-mma-mag-mig-tig.html>

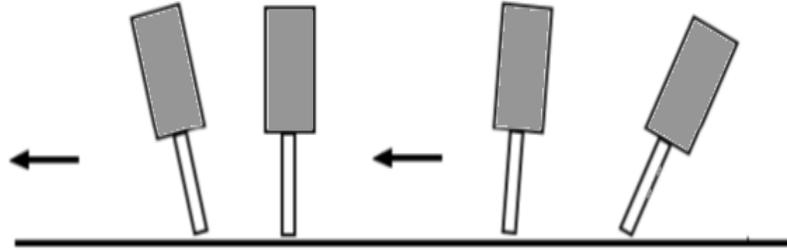


Figure I.3 Arrangement des électrodes [3].

- **L'assemblage par résistance**

Ce processus est gouverné par la loi de Fick; dans lequel les surfaces métalliques en contact sont jointes par la chaleur obtenue à partir de la résistance au passage du courant électrique (Figure I.4). Ce procédé a été inventé en 1877 par le professeur Elihu Thomson. La chaleur produite dans le substrat est modélisée par la résistance à le courant ou bien le volage appliqué, qui est à l'origine de l'énergie thermique produite par l'agitation électroniques au sien des matériaux.

L'évaluation de l'endommagement passe par la phase linéaire jusqu'à la phase non linéaire .

Le processus utilise deux forme d'électrodes à base d'alliage de cuivre, le courant provoqué pince les feuilles ensembles simultanément, l'énergie livrée est de l'ordre de millisecondes [4].

La distribution d'énergie thermique lors du soudage pourrait être considérablement modifiée par le mouvement rapide du métal fondu [5].

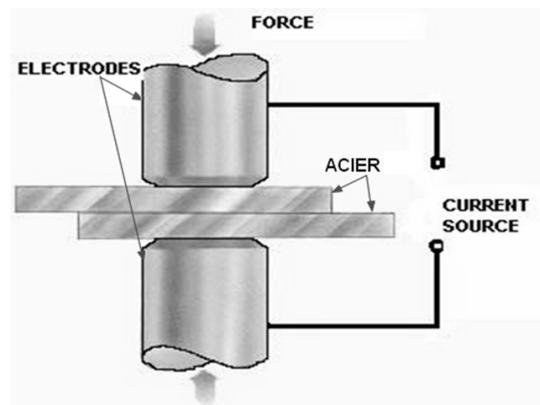


Figure I. 4 Assemblage par Résistance².

I.4. Modélisation numérique par les éléments finis

Un système physique peut être modélisé par des équations différentielles à un ordre dépendant de son degré de liberté et de ses dimensions. L'une des méthodes numériques de résolution est la méthode des éléments finis. Elle permet de rapprocher les équations différentielles gouvernantes, ce que l'on appelle la forme forte vers la forme faible avant d'atteindre des solutions physiques. La structure est discrétisée en éléments de forme géométrique choisis dont les nœuds sont les points d'assemblage d'autres éléments voisins.

Les contraintes appliquées directement sur ces nœuds qui conduisent à des solutions dans les éléments de maillage. La finesse du maillage raffine les solutions.

La méthode des éléments finis comporte deux formulations l'une est basée sur la méthode variationnelle directe comme celle de Rayleigh-Ritz et l'autre sur la méthode des résidus massiques comme celle de Galerkin. Les conditions de stationnarité conduisent à la dérivée des équations fondamentales de la méthode variationnelle pour

²: http://www.robot-welding.com/spot_welding.htm

les problèmes à des valeurs limites. Elle a un avantage de soustraction de dérivés fonctionnelles [15]. Cette méthode utilise des éléments de maillages à différentes formes linéaire, triangulaire, quadratique pour présenter les variables à rechercher. La solution numérique est transformée à une variable physique. L'équation différentielle présentée par la forme forte est transformée à la forme faible après une certaine approximation faite par des dérivés partiels.

La solution finale parfois ne match pas la solution mesuré vue au résidu ou reste de dérivé. Le résidu est contracté quand en multipliant par des fonctions de pondérations.

La discrétisation doit être assurée aux conditions suivantes :

- existence de solutions,
- unicité de la solution,
- stabilité,
- convergence,
- Estimation de la variation d'erreur de la solution discrète.

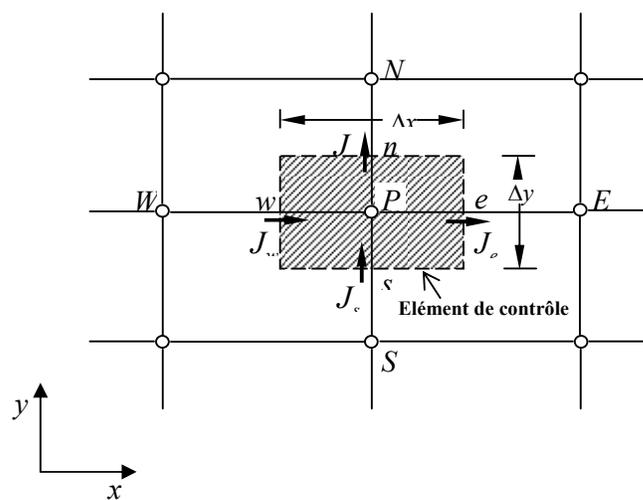


Figure I. 5 Élément de contrôle de la solution numérique.

Les équations d'un problème physique peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial(xij)} (\mathbf{F}) = \frac{\partial}{\partial(xij)} \left(\frac{\partial(F)}{\partial(xij)} \right) + \mathbf{S}\varphi \quad (\text{I. 3})$$

Considérons l'élément de contrôle sur la figure (I.5).

L'intégration de l'équation (I. 3) sur l'élément de contrôle de la figure (I. 9) donne :

$$J_e - J_w + J_n - J_s = \int_V \mathbf{S}\varphi dV \quad (\text{I. 4})$$

où les variables J_e , J_w , J_n et J_s sont les éléments de contrôle de la solution intégrée sur les faces en trois direction e, w, n. La forme faible est décrite sous forme matricielle par :

$$\{\mathbf{F}\} = [\mathbf{K}] \cdot \{\delta\} \quad (\text{I. 5})$$

où :

$\{\delta\}$ = vecteur des déplacements ;

$[\mathbf{K}]$ = matrice de rigidité (constant) ;

$\{\mathbf{F}\}$ = matrice des forces nodales (vecteur des chargements).

I.5. Modes d'endommagements dans les milieux sélectifs

L'interaction du métal avec son environnement peut être influencée par ses caractéristiques[6]. Ce phénomène est divisé en groupes suivant :

- ✓ Les milieux humides (Figure I. 6) ;
- ✓ Les milieux secs (gaz sec à haute température) ;
- ✓ Les autres fluides comme les sels agressifs (Figure I.7) ;
- ✓ Les milieux bactériens (Figure I.8).

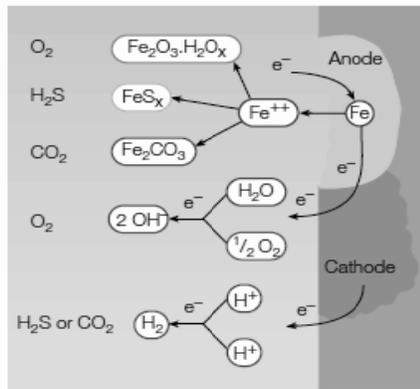


Figure I. 6 Corrosion humide dans un milieu aqueux



Figure I.7 Corrosion sous l'effet sels minéraux (installation pétrolière).

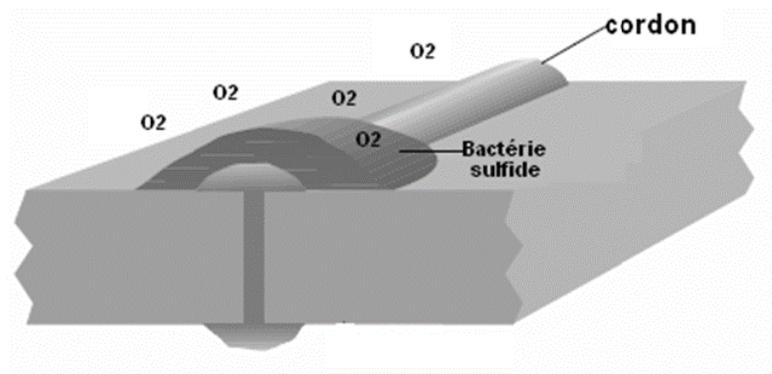


Figure I.8 Corrosion bactérienne sous l'effet du sulfate (milieux aérobie).

Il existe trois méthodes de mesure du taux de corrosion :

- a. Réduction d'épaisseur de métal par unité du temps ;
- b. Perte de masse par unité de surface et de temps ;
- c. Variation de la densité de courant.

La relation entre la réduction de l'épaisseur et l'unité de temps d_s/dt est déterminée par la loi de Faraday, équations (I. 6).

$$\frac{ds}{dt} = \frac{i_{corr} M}{zF\rho} \frac{cm}{s} \quad (I. 6)$$

Ou :

i_{corr} (A/cm²) = courant de corrosion ;

z = nombre des électrons dans l'équation anodique réaction ;

M = masse molaire de métal (g/mol) ;

F = constant de Faraday = 96, 485 coulombs/mole électrons ;

ρ = le densité du métal (g/cm³).

Le tableau I.2 : Facteurs de conversion entre taux de corrosion les plus utilisés. [6]

Réaction	Densité de courant corrosion $\mu A/cm^2$	Perte de masse par unité de surface et du temps mdd	Taux de dégradation moyen par unité de temps	
			mm/ans	mpy*
$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$	1	2. 51	$1. 16 \times 10^{-2}$	0. 46
$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	1	2. 84	$1. 17 \times 10^{-2}$	0. 46
$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	1	2. 93	$1. 5 \times 10^{-2}$	0. 59
$Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$	1	2. 63	$1. 08 \times 10^{-2}$	0. 43
$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$	1	0. 81	$1. 09 \times 10^{-2}$	0. 43
$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$	1	1. 09	$2. 2 \times 10^{-2}$	0. 89

1 mA cm⁻² = 11.6 mm y⁻¹ = 456 mpy = 249 g m⁻² day⁻¹
mpy = milli-inch per year

I.6. Protection par inhibition

Le retardement ou bien la protection contre le phénomène de dégradation du matériau par corrosion peut être achevé par l'application des inhibiteurs [6]. D'une façon globale, un inhibiteur peut modifier l'accélération de corrosion d'un métal. Il doit avoir une stabilité chimique, et thermique. On distingue trois types d'inhibiteurs, selon leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles :

- ✓ Les inhibiteurs anodiques ;
- ✓ Les inhibiteurs cathodiques ;
- ✓ Les inhibiteurs mixtes qui diminuent la vitesse des deux réactions partielles, anodiques et cathodiques

- **Les inhibiteurs anodiques**

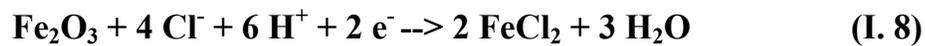
Ce type d'inhibiteurs forment des couches oxydes sur la surface du métal, ce qui provoque un décalage au potentiel de corrosion standard, corrosion standard du métal. Ce décalage mettra une zone de passivation protectrice contre le milieu agressif. Le Chrome, le molybdène, les nitrates, le tungstène sont des exemples d'inhibiteurs anodiques.

La dissolution de fer en présence de chlorure est présentée dans l'équation suivante :



- **Les inhibiteurs cathodiques**

Ce type est basé sur la précipitation en surface cathodique. La vitesse de réaction peut être réduite par l'utilisation des poisons cathodiques. Par contre, ils peuvent augmenter le risque à la fragilisation par Hydrogène pendant le chargement cathodique. Les équations (I. 7, I. 8, I. 9, I. 10) montrent le processus cathodique :



- **Inhibiteurs Mixte**

Ces inhibiteurs réduisent les réactions cathodiques et anodiques. Ils sont typiquement sous forme de films qui permette de précipiter ou de bloquer les molécules agressives au niveau de la surface du métal.

- **Inhibiteurs de corrosion volatile**

Ils sont nommés aussi des inhibiteurs à phases (VPI) vapeur ou Inhibiteur de corrosion volatile (VCI), où les particules sont transportées dans un environnement limité.

I.7. Mécanique moléculaire et semi empirique

La mécanique moléculaire [7] convient à l'utilisation de la mécanique newtonienne pour modéliser des systèmes moléculaires. Les atomes peuvent être traités comme des sphères dures non-élastiques où ils peuvent interagir selon le potentiel de Lennard-Jones. Elle admet non uniquement de montrer les propriétés chimiques mais aussi de modéliser les structures géométriques des molécules et calcul théoriques des propriétés

physicochimiques. La méthode semi empirique est basée sur les formulations de Hartee Fock.

Par approximation énergétiques, elle permet d'obtenir des paramètres physicochimiques basées sur des données empiriques des structures moléculaires. Cette méthode a un cout de calcul plus optimisé et rapide par rapport au calcul quantique basé sur (ab initio, DFT. .) qui demande des stations de calcul puissants recommandées pour les molécules plus complexes. C'est une méthode empirique quand on n'aura pas d'inclusion explicitement deux paires électrons pour Hamiltonnin.

Pour les systèmes à liaison π , c'est la méthode Hückel proposé par Erich Hückel [8, 9, 10]. Roald Hoffmann a proposé la méthode de Hückel élargi pour modéliser tous système d'électrons de valence [11]. Elle a une large application dans la description des molécules dans la chimie organique. Par contre, elle a été appliquée dans la modélisation des solides [12], nanostructure [13] avec des paramètres différents.

La méthode est basée sur les fonctions [14] :

Construire des molécules à partir d'atomes et les transformer en trois dimensions (3D).

- Construction de structures à partir d'éléments standards
- Utilisation de molécules à partir d'autres sources
- Réarrangeant des molécules (rotation et translation, flexion...)
- Mise en place de calculs en mécanique moléculaire et méthodes semi-empiriques
- Calculs de l'analyse des conformations pour les méthodes initio SCF semi-empiriques
- Représentation graphique des résultats de calculs chimiques.

Le calcul peut se faire suivant l'organigramme suivant (Figure I. 9) :

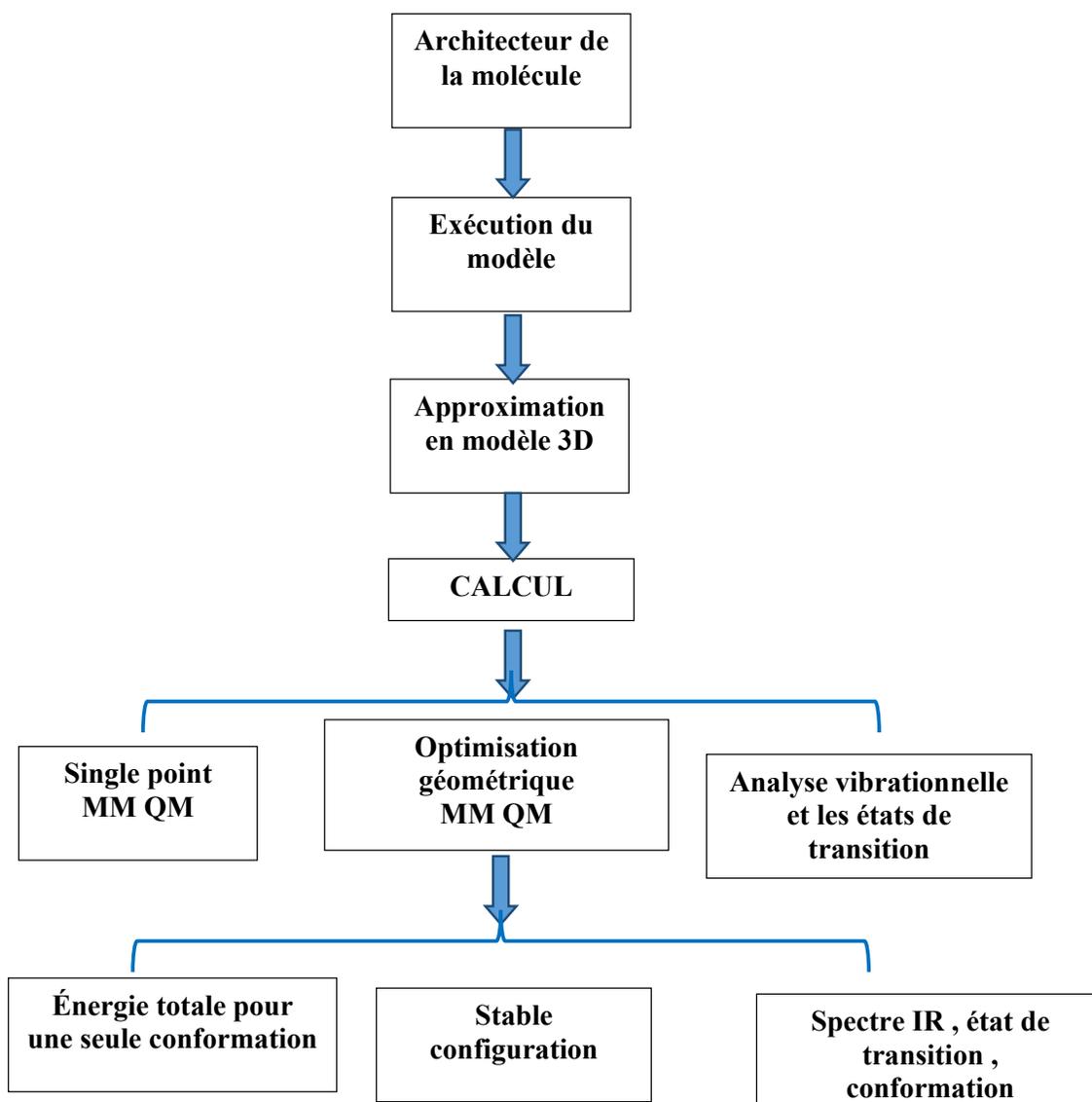


Figure I. 9 Organigramme du calcul moléculaire [13].

I.8. Synthèse bibliographique

Le développement des techniques d'assemblage des matériaux a été largement appliqué dans la fabrication des structures à haute limite d'élasticité pour le but de réduire les zones endommagées, ainsi que l'augmentation des résistances aux variations d'environnements thermiques chimiques, et mécaniques.

L'assemblage des métaux par résistance est largement utilisé dans des applications industrielles comme l'industrie automobile, les systèmes à base des plaques minces, maintenance et la réparation des structures métalliques.

Le comportement des assemblages des structures métalliques peut être gouverné par des conditions et des paramètres du processus de soudage. Le soudage par résistance est un processus gouverné par la loi de Fick où les surfaces métalliques sont assemblées par l'énergie de la chaleur. La résistance à la conduction électrique pendant le soudage par point de deux plaques minces a été reporté par les auteurs [16].

L'évaluation des aciers dans le contexte comportement a été amplement reporté et révisé par beaucoup des chercheurs en sciences des matériaux. Dans ce sens, l'identification des caractéristiques mécaniques non linéaire peut être achevé par test de la tension uniaxiale en fonction de la température dans le cas des aciers 304 L [17].

La résistance au soudage par résistance a un effet sur la microstructure et la transformation métallurgique, cette influence est discernable au niveau des zones affectées thermiquement (ZAT) pour les aciers ferritiques de type AISI 430 [18], les atomes comme Mo participe dans les propriétés, la microstructure et la mécanique pour les aciers à haute résistance [19].

La distribution de la chaleur pendant le soudage par résistance est modifiée par le mouvement de la zone fondue [20] ainsi les grands mouvements (par fusion) des zones fondus ont un effet sur les propriétés des assemblage métalliques [21].

Le système de refroidissement pendant le processus d'assemblage est nécessaire, l'écoulement d'eau a un effet sur le champ de la température et la distribution de

contraintes pendant l'opération d'assemblage comme le cas X70 [2] . Le degré de la déformation a une relation avec la résistance à la déformation pour l'acier X80[22].

Le couplage entre les propriétés mécaniques et thermiques au cours de l'opération d'assemblages est modélisé par FEM [23]. Les contraintes résiduelle augmentent pendant le soudage par point [24]. Les transitions thermiques peuvent affecter les électrodes du processus du soudage par point [25].

Pendant l'application de soudage par point la formation de la zone fondue augmente [21]. La corrélation entre microstructure et les propriétés mécaniques pour ferrite aciculaire (FA) sous contrôle du procès thermomécanique a été étudiée [26].

I.9. Conclusion I

À travers cette étude bibliographique, nous avons présentés les propriétés et les spécifications des aciers à bas carbone, ainsi la technique de retardement ou bien la protection contre le phénomène de dégradation du matériau par corrosion.

Nous présenterons dans le chapitre II le comportement des aciers en fonctions des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments d'alliages, cette première étude sera entamée par une modélisation par la méthode datamining compilé sur le code du calcul MATLAB.

CHAPITRE II

**Etude des propriétés et de l'effet des éléments d'alliage
par application de la méthode Datamining**

II.1. Introduction

La proportion des éléments additifs appartenant au tableau périodique influent sur les propriétés des aciers. Suivant leur proportion, ces éléments octroient à l'acier des propriétés spécifiques déterminées. En existence de plusieurs éléments, l'effet peut être amplifié. On trouvera ci-après une description prédictive des principales influences sur l'acier.

L'analyse des données est une étape importante pour comprendre l'effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électrothermomécanique avant de déterminer les paramètres influents sur le comportement des nuances d'aciers et de dévoiler les conditions aux limites qui seront appliquées dans la simulation numérique.

La présente méthode consiste à regrouper les objets d'un ensemble de données en classes homogènes [27,28]. Pour estimer le potentiel de prédiction de la classification des éléments additifs, des aciers et leurs propriétés on s'intéresse à l'une des méthodes du Datamining, c'est la méthode d'Analyse en Composante Principale « ACP ».

II.2. Le datamining

Le datamining est apparu dans les années 90, pour extraire des nouvelles connaissances à partir des bases de données. Le datamining extrait à partir d'une vaste base de données, des conclusions nouvelles quant aux données entrées [33,34,35]

Il existe de nombreux logiciels de datamining tels que Statistica, XLSTAT, SPSS, Clémentine, SAS ou Oracle... Tous ont la méthodologie en commun : il faut trouver un domaine, construire une base (data warehouse), définir des questions ouvertes et le problème général. Une fois ces étapes accomplis, en rentrant (input) dans le logiciel les requêtes de la base, il en sortira, les réponses aux questions posées (après une brève analyse des résultats - output). Dans notre étude, nous avons programmé la méthode de

classification ACP par le langage Matlab Figure II. 1 (Algorithme de base de la méthode ACP).

II.3. Analyse en composantes principales « ACP »

L'Analyse en Composante Principale (ACP) est l'une des méthodes d'analyses descriptives multivariées.

Le but de cette analyse est de résumer le maximum d'informations possibles en perdant le moins possible pour :

- Faciliter l'interprétation d'un grand nombre de données initiales ;
- Donner plus de sens aux données réduites ;

La méthode ACP permet donc de réduire des tableaux de grandes tailles en un petit nombre de variables tout en conservant un maximum d'informations. Les variables de départ sont dites 'métriques'. De nombreuses méthodes sont recommandées dans la littérature pour réduire la taille de dimension de la grande base de données [29].

Le nombre de données recueillies pour d'écrire un phénomène peut être trop important pour permettre un traitement direct de toute l'information disponible. L'objectif d'Algorithme de l'ACP est d'extraire $q < p$ "facteurs" (qui sont des combinaisons linéaires des p variables) contenant tout ou une grande partie de l'information contenue dans les p variables de départ.

La méthode ACP permet de réduire la dimension de la matrice des données, en retenant le plus possible les variations présentes dans le jeu des données de départ. Cette réduction ne sera possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation entre elles non nuls. Ces variables initiales sont transformées en de nouvelles variables, appelées composantes principales. Elles sont obtenues par combinaisons linéaires des précédentes et sont ordonnées et non corrélées entre elles. L'analyse en composantes principales cherche à identifier les vecteurs propres orthonormaux et leurs valeurs propres correspondantes de la matrice de dispersion des variables originelles. Les vecteurs propres

orthonormaux sont utilisés pour construire les composantes principales et les valeurs propres sont les variances des composantes principales correspondantes [30].

II.3.1 Formulation de l'analyse en composantes principales [35]

a. Matrice des données

La matrice suivante représente la forme générale d'une classe (cluster) des données.

$$\begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & x_{ij} & \vdots \\ x_{m1} & x_{ij} & x_{mp} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 1})$$

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_i & \bar{x}_p \\ s_1 & s_i & s_p \end{pmatrix}$$

m objets (ou individus), p descripteurs (ou variables)

s Coefficient de simple concordance (Sokal et Michener, 1958), $s(i, i) = \frac{x_{ij} + x_{ij}}{n}$

b. Centrage et réduction des données

Pour centrée les données d'une matrice on utilise la formule suivante :

$$X_{jj} = \frac{(x_{jj} - \bar{x}_i)}{s_i} \quad (\text{II. 2})$$

c. Distances entre objets

L'écart ou la distance entre les individus ou les objets est donnée par l'expression suivante

$$d(i, i)^2 = \sum_{j=1}^p p_j (x_{ij} - x_{ij})^2 \quad (\text{II. 3})$$

ou p_j est une pondération qui est en général égale à 1.

d. Inertie totale I du nuage

On note I le moment d'inertie du nuage des individus

$$I = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \right)^2 = p \quad (\text{II. 4})$$

Ce moment d'inertie totale est intéressant car c'est une mesure de la dispersion du nuage des individus par rapport à son origine. Si ce moment d'inertie est grand, cela signifie que le nuage est très dispersé, tandis que s'il est petit, alors cela signifie que le nuage est très concentré sur son centre de gravité.

II.3.2 Réalisation de l'analyse en composantes principales

Le but est de trouver des axes orthogonaux (indépendants) qui ont la propriété d'extraire le maximum de la variance projetée (ou inertie projetée) des individus ou objets.

- calcul de la matrice des données centrées-réduites ;
- calcul de la matrice des corrélations variables/variables ;
- calcul de la matrice des vecteurs propres et du vecteur des valeurs propres ;

$$\begin{pmatrix} X_{11} & \cdot & X_{1m} \\ \cdot & X_{ij} & \cdot \\ X_{nm} & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \rho_{11} & \cdot & \rho_{1m} \\ \cdot & \rho_{ij} & \cdot \\ \rho_{n1} & \cdot & \rho_{nm} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} U_{11} & \cdot & U_{1m} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{n1} & \cdot & U_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \lambda_m \end{pmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Avec $q \leq p$

a. Relations de transitions

$$F_q(i) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_q}} \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \right) G_q(j) \quad (\text{II. 6})$$

ou F est la projection de l'individu i sur l'axe factoriel q , G sont les projections des p variables sur q , et λ est la valeur propre associée à la composante q .

$$\mathbf{G}_q(\mathbf{j}) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_q}} \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \right) \mathbf{F}_q(\mathbf{i}) \quad (\text{II. 7})$$

b. Nuage des variables

On peut alors définir l'angle $(\widehat{j, j})$ entre deux vecteurs par son cosinus :

$$\cos(\mathbf{j}, \mathbf{j}) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \right) \left(\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \right) = \mathbf{cor}(\mathbf{j}, \mathbf{j}) \quad (\text{II. 8})$$

II.4. Calcul d'une ACP avec MATLAB [40]

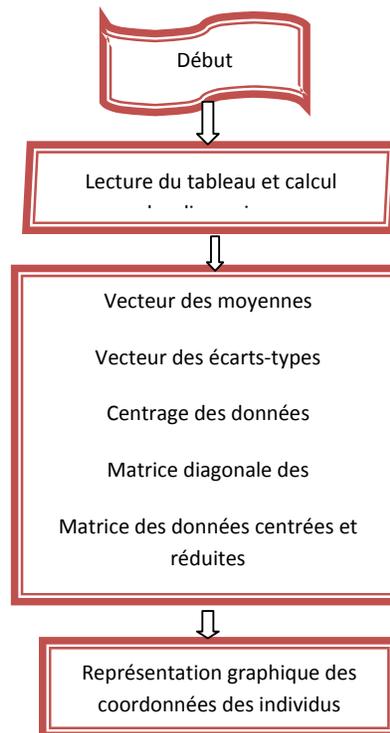


Figure II. 1 Algorithme de base de la méthode ACP.

II.5. Applications sur les propriétés des éléments d'alliages d'aciers

Dans cette partie nous allons présenter les résultats graphiques des corrélations entre les individus, obtenues à partir des calculs numériques sous Matlab. La première étape consiste à déterminer la signification physique des axes de projection (PC1, PC2). La seconde étape consiste en l'interprétation des corrélations entre les éléments, qui peut être déduite deux

diagrammes : loadings, ou diagramme des variables, et scores, ou diagramme des propriétés.

II.6. Préparation de la base de données

Nous avons collecté dans notre base de données les concentrations des éléments additives, propriétés mécaniques pour différentes nuances d'aciers API 5LX. Le tableau 1 donne les valeurs que nous avons utilisées et qui sont issue de la référence [36-39].

Tableau II. 1 : Base de données de propriétés d'aciers

Aciers	Rm [MPa]	A [%]	Re [MPa]	Re/Rm	V(volt)	e(mm)	T _{rc}
X52_A	545	0,34	393	0,72	0.88	0.5	21.5
X52_B	515	0,34	390	0,76	0.15	0.75	21
X60	770	0,34	593	0,77	0.14	1.5	18
X65	758	0,34	600	0,79	1.14	0.5	20
X70	758	0,34	621	0,81	1.44	0.75	20.5
X80	827	0,337	690	0,83	1.14	0.5	18
X100	770	0,337	393	0,89	1.16	0.75	21

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Cu%
0,16	1,22	0,22	0,007	0,009	0,12	0,08	0,12
0,16	1,17	0,23	0,007	0,007	0,28	0,12	0,19
0,21	1,52	0,19	0,012	0,003	0,16	0,15	0,15
0,22	1,45	0,45	0,025	0,015	0,3	0,3	0,25
0,22	1,65	0,45	0,025	0,015	0,3	0,3	0,25
0,076	1,84	0,35	0,015	0,003	0	0	0,22
0,06	1,9	0,25	0,011	0	0	0	0

Mo%	V%	Al%	Ti%	Nb%	N%
0,01	0,06	0,019	0,01	0,05	0,012
0,06	0,01	0,04	0,01	0,01	0,012
0,16	0,05	0,022	0,01	0,03	0,012
0,1	0,05	0,015	0,05	0	0,012
0,1	0,05	0,015	0,05	0	0,012
0,00001	0,01	0	0,05	0	0,12

II.7. Exploitation de résultats

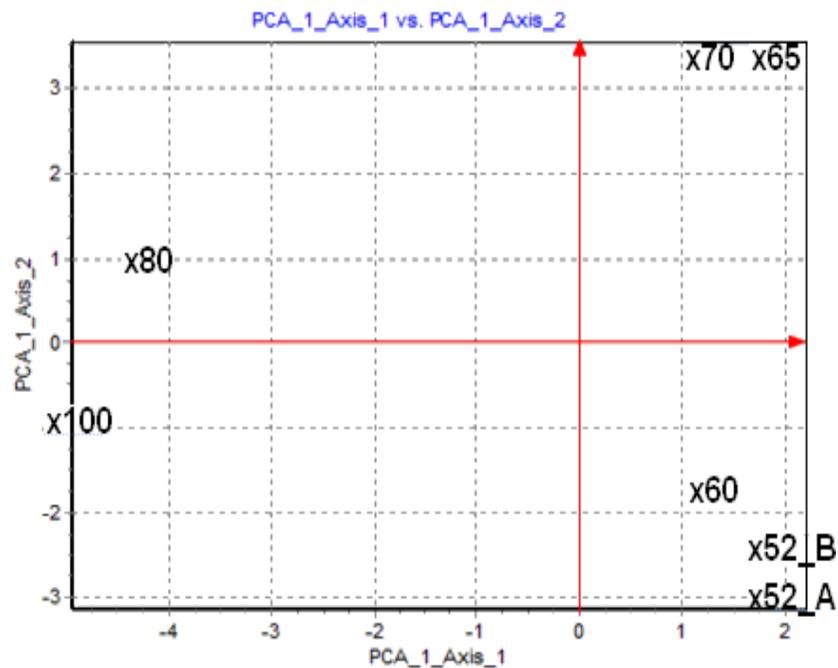


Figure II. 2 corrélation entre les nuances d'acier (Loading plot).

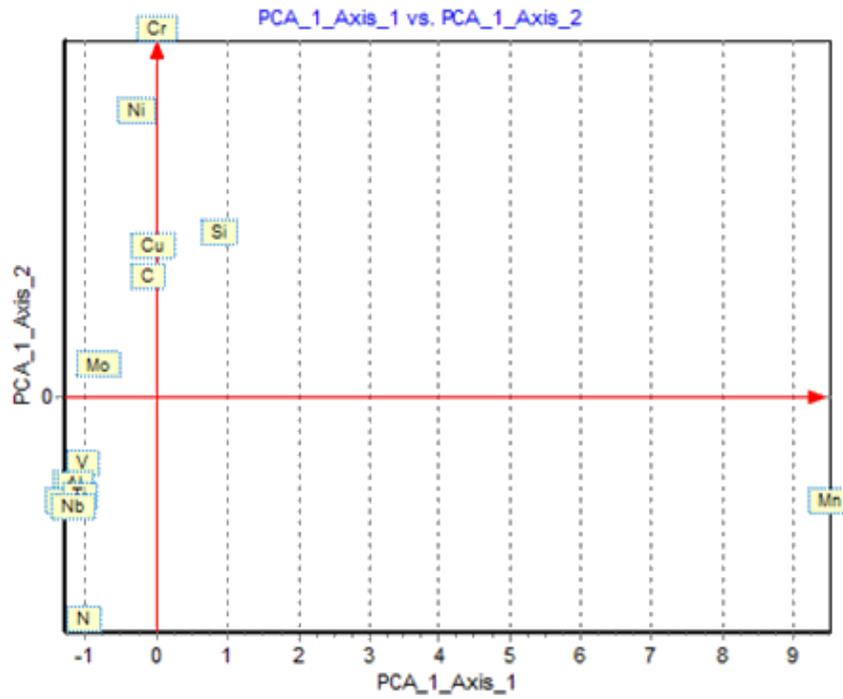


Figure II. 3 corrélations entre les éléments d'alliage (Scores plot).

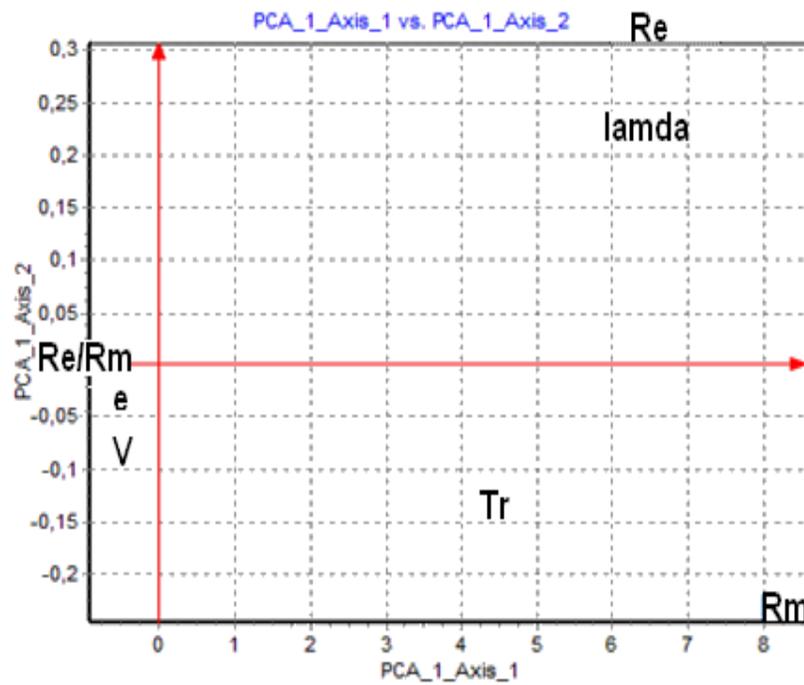


Figure II. 4 corrélations entre les propriétés (Scores plot).

II.8. Interprétations de résultats

Les figures (II. 2- II. 4) présentent le diagramme des variables et des propriétés et (Loading plot , scores plots). Ils permettent de déceler les corrélations entre les propriétés mécaniques et les compositions chimiques des nuances d'aciers étudiés.

Nous pouvons remarquer un certain nombre de corrélations et d'anti corrélations. Certaines de ces corrélations sont triviales et assez simples à expliquer. D'autres sont le reflet de principes et relations physiques intrinsèques.

Nous pouvons voir que le rapport entre limite d'élasticité et la plasticité est reparti uniquement suivant l'axe pc1 alors les deux grandeurs R_e et R_m sont répartis du côté droit qui sont symétriques par rapport à PC1, ce qui explique qu'il a une anti-corrélation entre les deux phases, ce dernier nous a permis de déterminer le taux endommagement dans les matériaux. Le voltage appliqué et l'épaisseur des tôles ont un effet sur le comportement en endommagement des matériaux car auto l'épaisseur augmente avec variation de force de voltages (cycles) la zone fondue ou bien le noyau qui sera développé entre les deux tôles agrandira (la croissance) ce phénomène physique est due à l'effet de joule.

La conductivité est corrélée avec la limite d'élasticité puisqu'un matériau plus conducteur conduit plus vite la chaleur ce qui diminue le temps nécessaire pour la formations des zones endommagées.

La température de refroidissement des anodes assure la bonne opération des anodes puisque ses derniers sont à base de cuivre ; donc un refroidissement est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement à l'instant d'opération d'assemblage.

L'effet des éléments additifs sur l'état d'endommagement des différents types de nuances a été reporté dans [41] :

Cr : Augmente la trempabilité (agit sur les points de transformation de l'acier et ralentit la vitesse de transformation de l'austénite au cours du refroidissement).

Ni : Augmente la stabilité de l'austénite et ralentit sa transformation pendant le refroidissement, donc augmente la Trempabilité tout en baissant la température. Il augmente la ductilité, surtout aux très basses températures.

Si : il est utilisé comme désoxydant : Augmente la dureté, la résistance à la traction et à la corrosion. Diminue la ductilité, la malléabilité, la soudabilité.

Mn : Intervient comme désoxydant. Il augmente la trempabilité,

Mo : Améliore la fraction volumique en bainite.

N : Abaisse le point de transformation. Il diminue la ductilité et la ténacité.

Ti, Nb et Al : Bloquent les joints de grains austénitiques, et inhibent leur croissance, ce qui a des conséquences bénéfiques sur les propriétés mécaniques des structures obtenues ; même additives Ti, Nb Sont employés pour leur grande affinité avec le carbone, surtout lorsqu'il s'agit de fixer cet élément sous une forme stable. Ce sont aussi de bons désoxydants. On fait précipiter les nitrures de titane et de niobium au cours de traitements thermiques ou thermomécaniques pour réaliser un durcissement par précipitation [41].

Donc on revient à la Figure II. 2, le nuage de points nous a permis de classer les différents types d'aciers en trois classes suivants leurs caractéristiques mécaniques et compositions chimique, on remarque aussi que l'acier X52A, X52B, X60 sont corrélées entres eux. Ils sont caractérisés par une phase de plasticité grande par contre X65, X70 sont corrélés entres

eux aussi mais ils ont caractérisé par une plage d'élasticité importante ; pour X100, X80 ils sont rapprochés vers l'indice de caractérisation du taux d'endommagement ce qui montre que les deux nuances à haute limite d'élasticité qui engendrent une phase d'élasticité grande par rapport à la plasticité dans les matériaux eux même.

Cette classification nous a permis aussi de discerner un champ optique sur la compréhension des corrélations entre les différents types de nuances ce qui facilite leurs exploitations dans les domaines industriels.

II.9. Conclusion II

Nous avons présenté dans la première partie la technique utilisée pour étudier l'effet et la corrélation entre les éléments d'alliages sur les propriétés des aciers. On a montré que la méthode ACP permet de trouver un axe u , issu d'une combinaison linéaire des X_n tel que la variance du nuage autour de cet axe soit maximale. Les nouvelles variables, appelées composantes principales (PC), sont non corrélées, et sont ordonnées par fraction de l'information totale que chacune contient.

Nous avons présenté dans la deuxième partie l'effet des éléments additives sur les propriétés des aciers API5LX, les corrélations entre les différents types de nuances ainsi que l'environnement thermique c.à.d. le refroidissement lors du processus d'assemblage, l'optimisation d'épaisseur des tôles, la conductivité thermique, la force de compression qui sont des paramètres principaux pour assurer l'opération du soudage, qui sont introduits dans notre simulation comme des conditions limites.

CHAPITRE III

**Analyse et modélisation du comportement
thermomécanique et évaluation du taux
d'endommagement des aciers HLE C_{0.12%} Mn_{1.02%} Si_{0.29%}**

III.1. Introduction

Les surfaces métalliques dans l'assemblage par résistance électrique sont jointes par énergie thermique et la loi de Fick gouverne ce processus. Cet assemblage a un effet sur la microstructure et les transformations des phases qui se produisent dans chaque zone affectée thermiquement (ZAT).

Le présent chapitre montre l'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement de l'acier HLE C_{0.12%} Mn_{1.02%} Si_{0.29%}. Différents scénarios ont été appliqués afin de minimiser les zones affectées par endommagement thermomécanique et les charges appliquées. L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été effectués par microscopie électronique à balayage (MEB) et spectrométrie EDS.

Le modèle utilisé dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites exploités par la méthode datamining présentée dans le chapitre précédent). Les échantillons ont été exposés à des charges externes.

La contrainte maximale équivalente est obtenue à 4312°C avec 3,7% de déformation maximale. Ainsi, la distribution du champ de contraintes, déformation, température, champs électriques sont présentés sous formes de graphes et de cartes. La distribution de ces paramètres estimés a ont été visualisés de la zone fondue ZF jusqu'au métal de base MB dans l'échantillon modélisés sous formes de plaques minces.

Les zones endommagées les plus affectées sont obtenues par la variation de la tension électrique appliquée au cours de l'assemblage par résistance.

L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été obtenus par microscopie électronique à balayage (MEB) et par spectrométrie EDS.

III.2. Modèle géométrique

Le modèle géométrique de l'assemblage considéré dans cette étude est illustré par les figures (III.1, III.2) en considérant deux plaques rectangulaires en acier avec les dimensions suivantes : hauteur $\frac{H_p}{2}=0,75$ mm, largeur $W_p=16$ mm.

Les plaques ont été chargées à l'aide de deux électrodes en cuivre qui ont le même rayon de contact : 3mm .Les deux électrodes sont refroidies par l'eau comme montré sur la figure III. 2. Les deux plaques minces sont soumises à une charge de traction uniaxiale en amplitude σ . Tous ces paramètres sont implantés comme conditions aux limites. Pour des raisons de symétrie dans les conditions aux limites et de la géométrie, seulement un quart de la structure a été considéré. Le maillage a été raffiné à la proximité de la zone de contact ; La figure III.1 montre le maillage global et le raffinement du maillage dans le cordon de soudure.

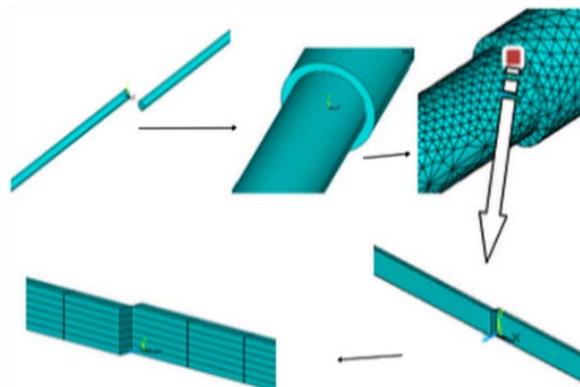


Figure III. 1 Modèle de la discrétisation axisymétriques

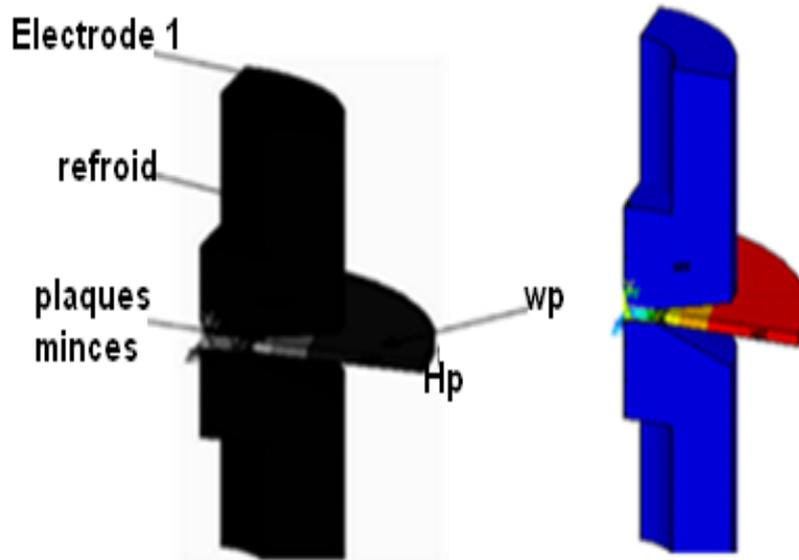


Figure III. 2 Assemblage et maillage structural.

III.3. Caractérisation microstructurale [42]

La composition chimique de l'acier d'étude a été effectuée en utilisant l'analyse dispersive électronique à balayage(EDS) ; établi à partir de l'histogramme de la figure III. 3. L'analyse microstructurale de l'acier d'étude a été effectuée par microscope électronique à balayage (MEB) figure III. 4 (a, b).

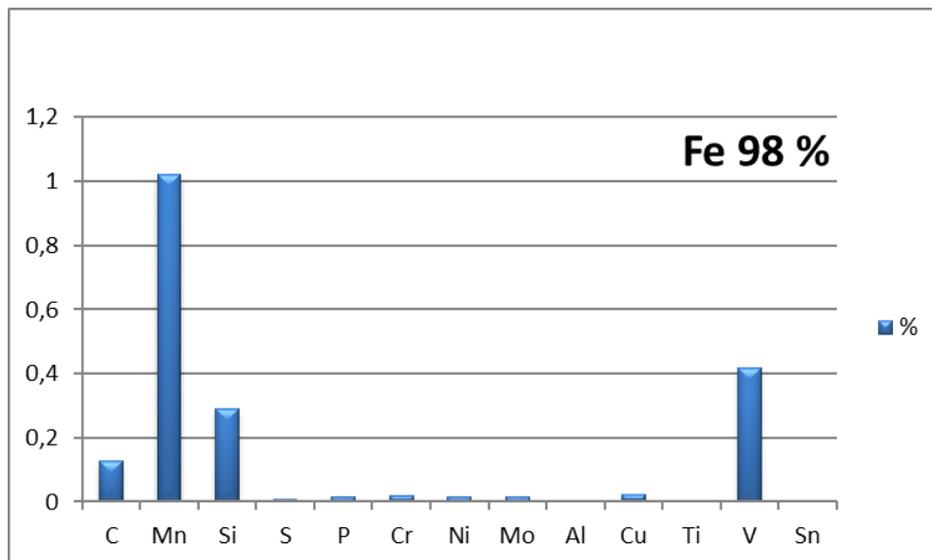


Figure III. 3 Composition chimique d'acier HLE.

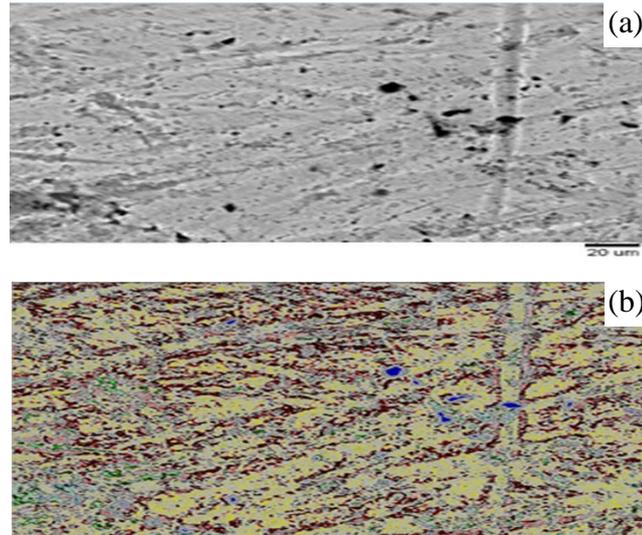


Figure III. 4 Fractographies (MEB) pour acier HLE, a: 20um, b: map 20um.

III.4. Equations gouvernantes

Le processus de soudage par résistance est simulé comme un modèle axisymétrique et modélisé par les équations gouvernantes de l'analyse thermique transitoire.

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{III. 1})$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\mathbf{C}_e \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\mathbf{C}_e}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{C}_e \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{III. 2})$$

Le problème thermoélectrique est résolu par équation matricielle

$$[\mathbf{C}^t]\{\dot{\mathbf{T}}\} + ([\mathbf{K}^t]\{\mathbf{T}\} + [\mathbf{K}^v]\{\mathbf{V}\}) = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{Q}\} \\ \{\mathbf{I}\} \end{Bmatrix} \quad (\text{III. 3})$$

Pour l'analyse structurale, l'équation d'équilibre pour une contrainte est donnée par la relation :

$$\nabla \sigma(\mathbf{r}, t) + \mathbf{b}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (\text{III. 4})$$

Équation Constructive du matériau basée sur la théorie thermo-elastique-plastique est donnée par :

$$d\{\sigma\} = [D]d\{\varepsilon\} + [D^e] \left(\{\alpha\} + \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} \right) dT \quad (\text{III. 5})$$

III.5. Conditions aux limites

Le modèle géométrique d'assemblage par résistance électrique est représenté dans les figures (III. 1; III.2); il possède un axe de symétrie.

Tableau III. 1: Les conditions aux limites

Limites	Mécanique	Thermique	Électrique
Eau de refroidissement		18°-25°C	
axe symétrie	U = 0	Adiabatique	I=0
Electrode 1	0.3 - 0.35 KN	18°-25°C	V (1.5-2.5)
Electrode 2	U =0	18°-25°C	V=0

Cette étude a été réalisée afin de déterminer l'évolution de certaines propriétés et le taux d'endommagement d'acier d'assemblage des couches minces. Les facteurs principaux d'opérations d'assemblage électrothermomécanique. L'assemblage des plaques minces est basé sur les paramètres suivants :

- ✓ Le refroidissement des électrodes
- ✓ Le temps d'assemblage
- ✓ L'intensité du courant
- ✓ L'effort sur les électrodes
- ✓ Déplacement des electrodes

III.6. Les procédures utilisées dans l'analyse par éléments finis

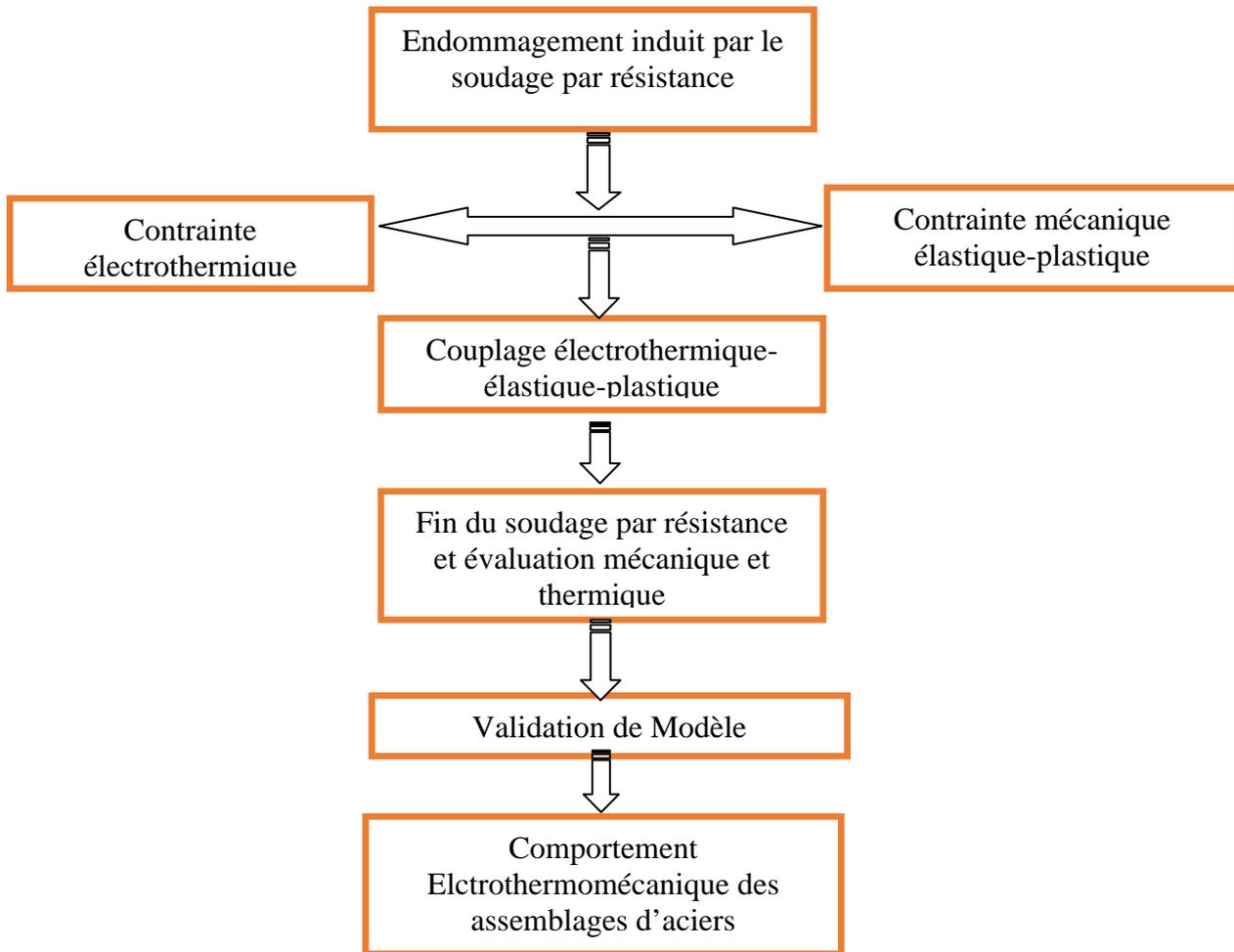


Figure III. 5 Organigramme de la modélisation assemblage électrothermomécanique.

III.7. Validation du modèle

III.7.1 Validations du Modèle électrothermique

La validation du présent modèle est assurée par l'application des conditions aux limites sur un modèle axisymétrique, pour un type d'acier faiblement allié (Hou Zhigang et al) [43].

Les résultats montrent un bon déroulement du modèle électrothermique figures (III. 6, III. 7, III. 8, III. 9). On remarque qu'une température maximale dans l'intervalle du temps 0.2s et 0.3 s, explique le développement du noyau ou bien de la zone fondue.

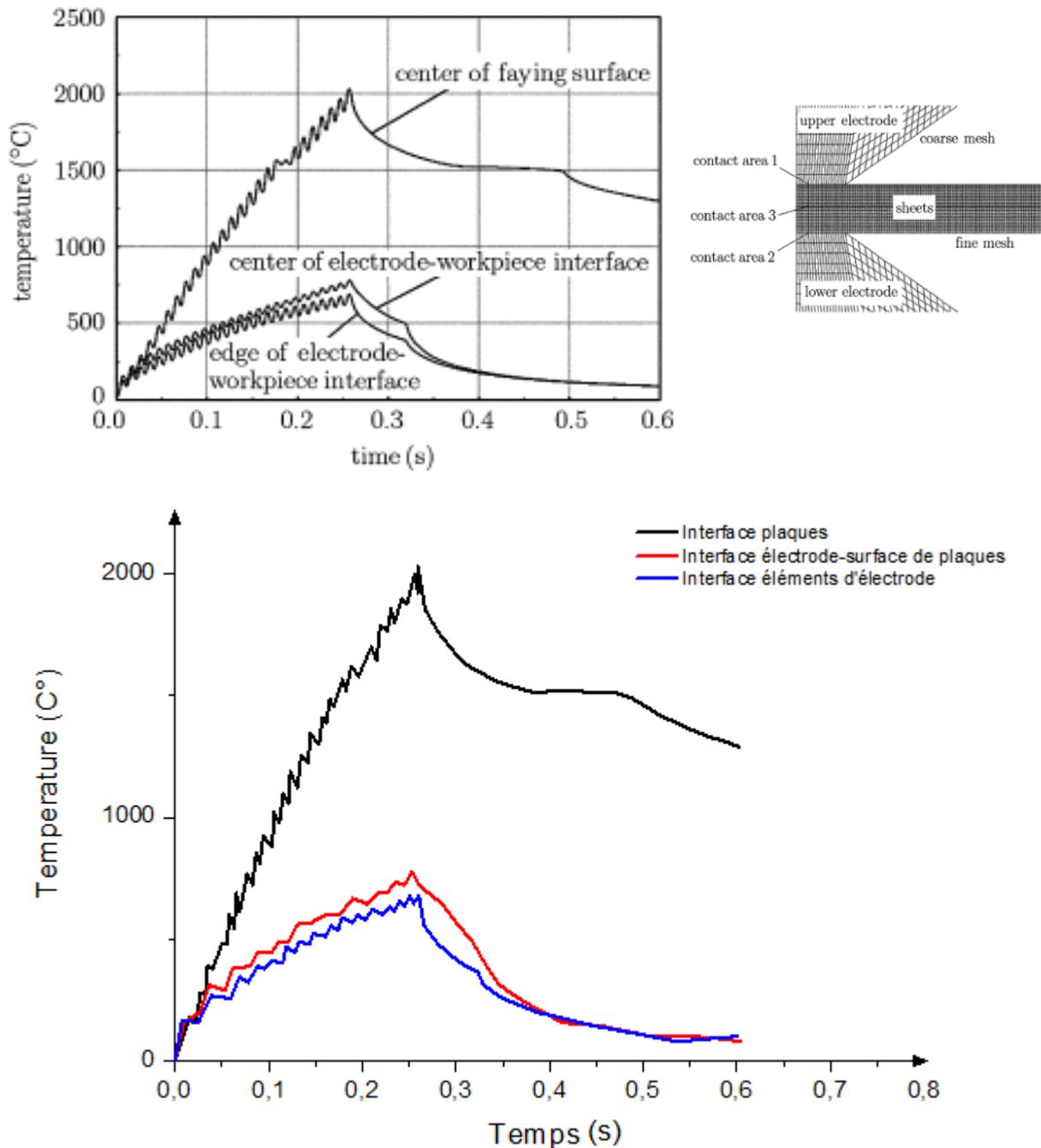


Figure III. 6 Distributions de la température en fonction du temps (Hou Zhigang et al) [43].

```
1 POST26  
TEMP_2  
TEMP_3  
TEMP_4  
TEMP_5
```

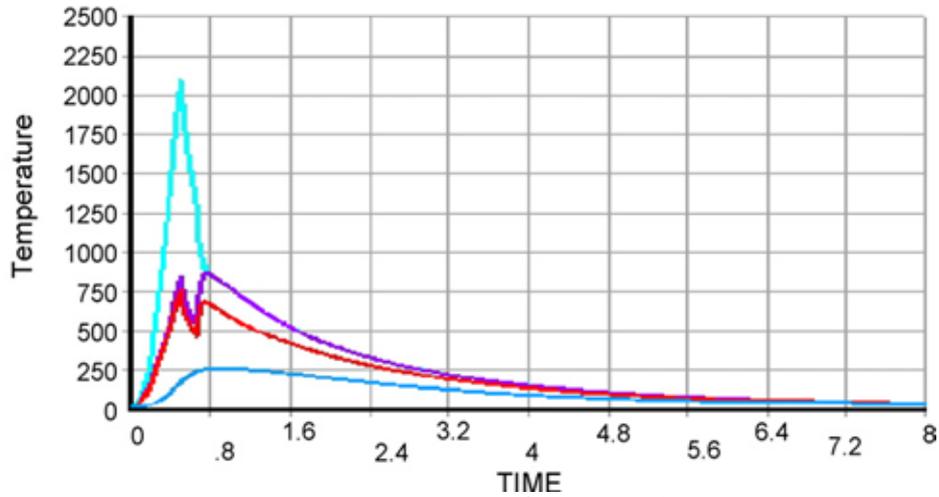


Figure III. 7 Distributions de la température en fonction du temps.

Des résultats similaires pour un autre acier faiblement allié ont été établis par Ranjbar Nodeh et al[44] nous a permis de valider notre modèle électrothermique. On remarque un maximum de température à l'instant $t = 0.5$ s.

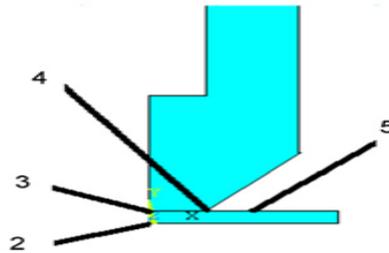


Figure III. 8 Distributions de la température (C°) en fonction du temps (s) (RanjbarNodeh et all) [46].

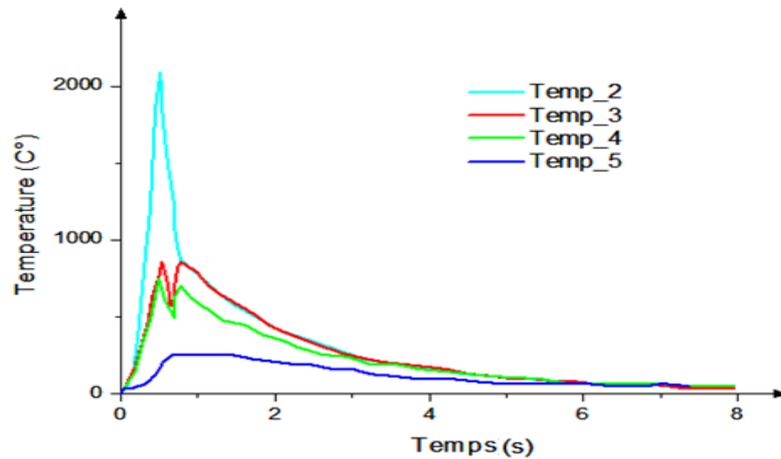


Figure III. 9 Distributions de la température (C°) en fonction du temps (match).

Cette validation nous permet d'initier le processus d'assemblage par des forces électrothermomécaniques afin de quantifier le comportement macroscopique du matériau étudié. Les résultats attendus nous ont permis de caractériser et de localiser les zones affectées thermiquement avant d'étudier leur comportement en différent milieu sélectif que nous allons présenter dans le chapitre suivant IV.

III.8. Résultats et discussion

Le couplage entre les deux forces tel est appliqué par des forces mécaniques et thermiques générés par l'effet joule quand l'énergie électrique passe à travers les deux électrodes à base de cuivre.

La Figure III. 10 est un prototype d'un processus simulé d'un assemblage par résistance. Le vecteur de déplacement explique bien le sens de la distribution des forces appliqués provoqués des déplacements. Le déplacement est grand à l'extrémité des plaques 0.072mm.

Par contre, il est petit au zones fondue, et de l'ordre 0.008 mm

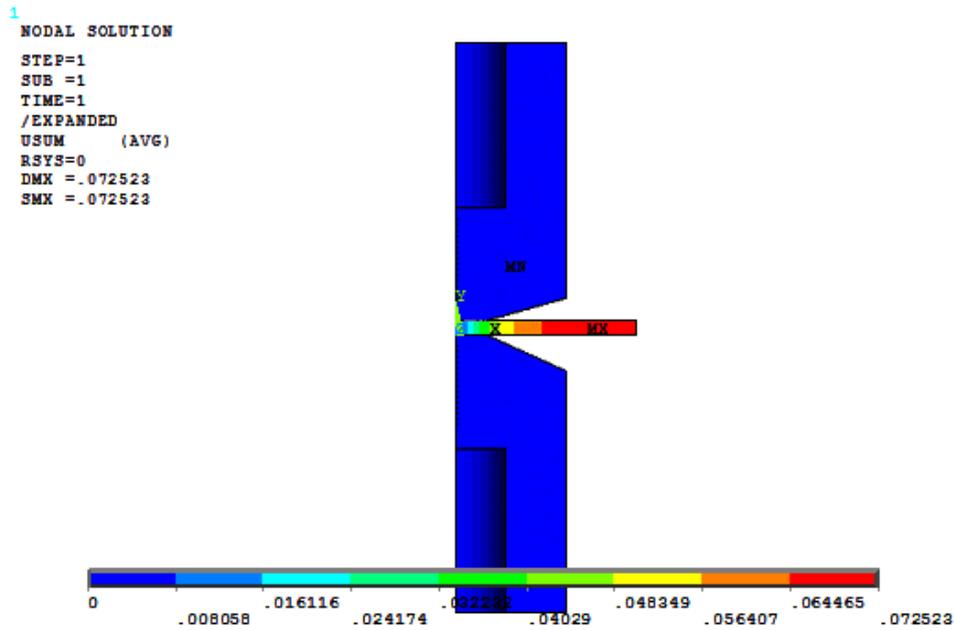


Figure III. 10 Visualisations graphiques de déplacement.

Les solutions sont obtenues numériquement après la convergence des erreurs avec des résidus suffisamment petits. Une autre condition physique est exploitée pour assurer cette convergence, c'est celle de la température de fusion du matériau étudié. Quand la température à la zone du contact est supérieure à la température de la fusion du matériau, les deux plaques jointent entre eux après solidification atomique et cristallographique.

Comme il est présenté dans les deux figures (III. 11, III. 12) la température dépasse la valeur de la fusion $T_{\max}=4312,157\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\min}=18^{\circ}\text{C}$. La diffusion de la chaleur commence à partir la zone fondue jusqu'à l'extrémité du métal de base. Cette évolution est gouvernée par un gradient thermique exponentiel comme il est montré par la figure III. 11. Le type de refroidissement influe sur la vitesse d'assemblage de deux plaques. D'une autre façon, la structure dissipe un flux thermique pendant relaxation vers l'équilibre.

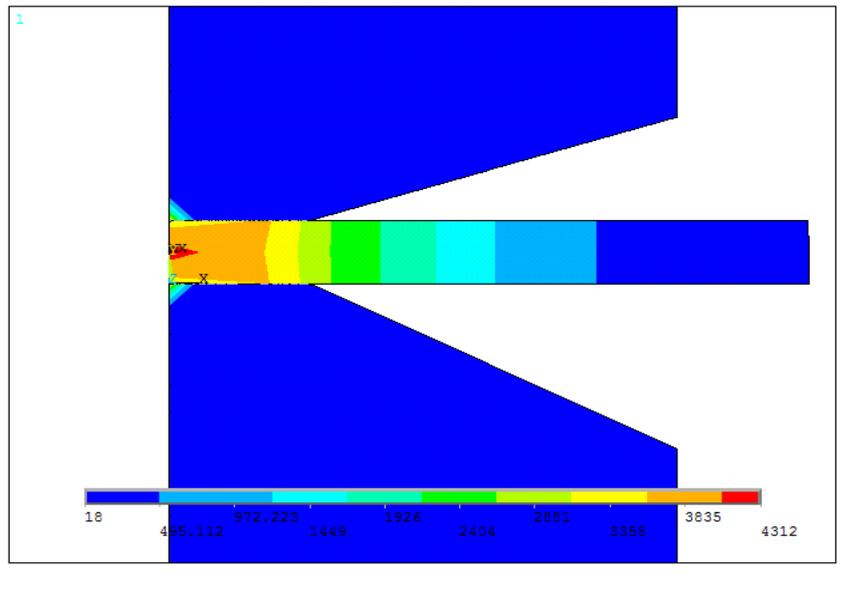


Figure III. 11 Visualisation graphique de la distribution de la température.

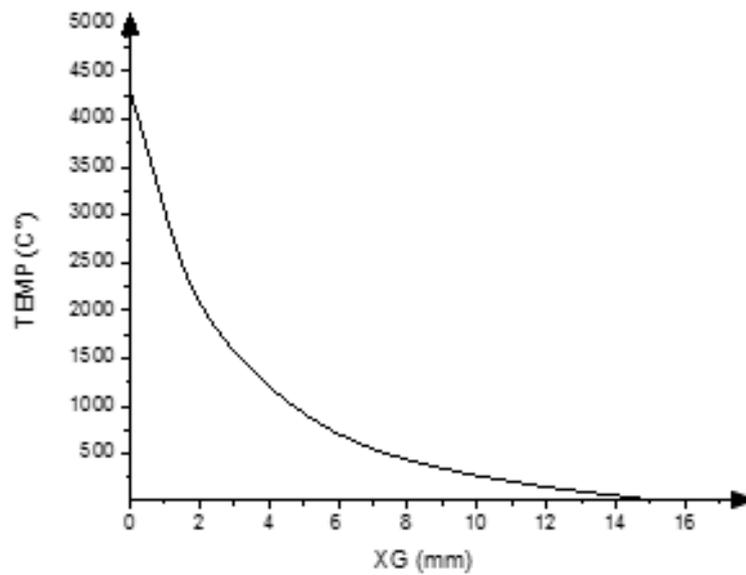


Figure III. 12 Visualisations graphiques de la distribution de la température (effet de joule).

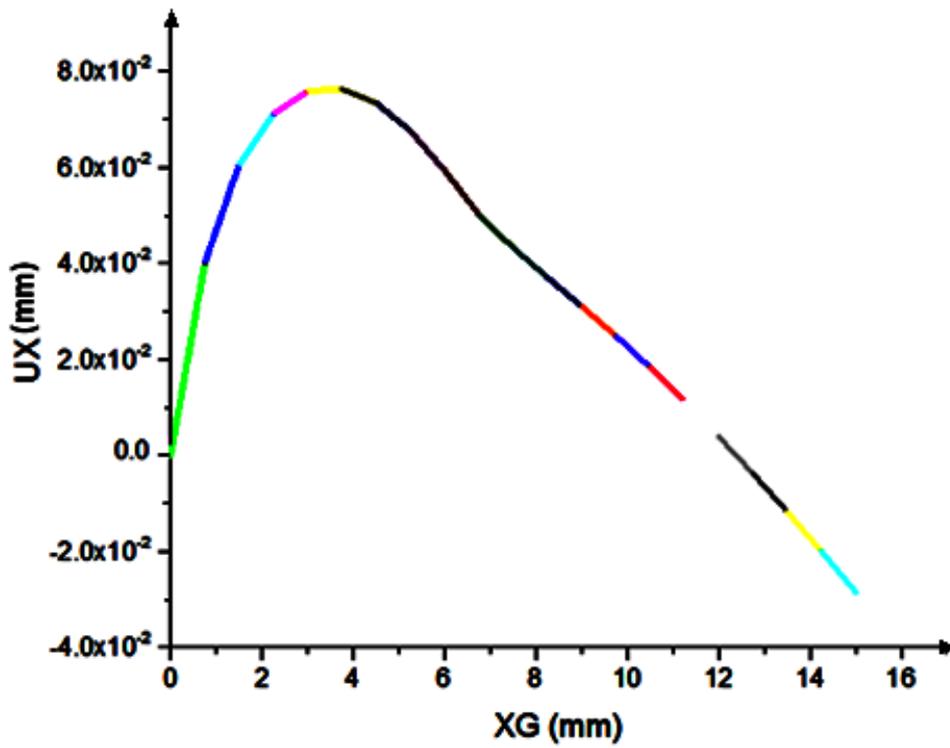


Figure III. 13 Expansion d'assemblage au long X.

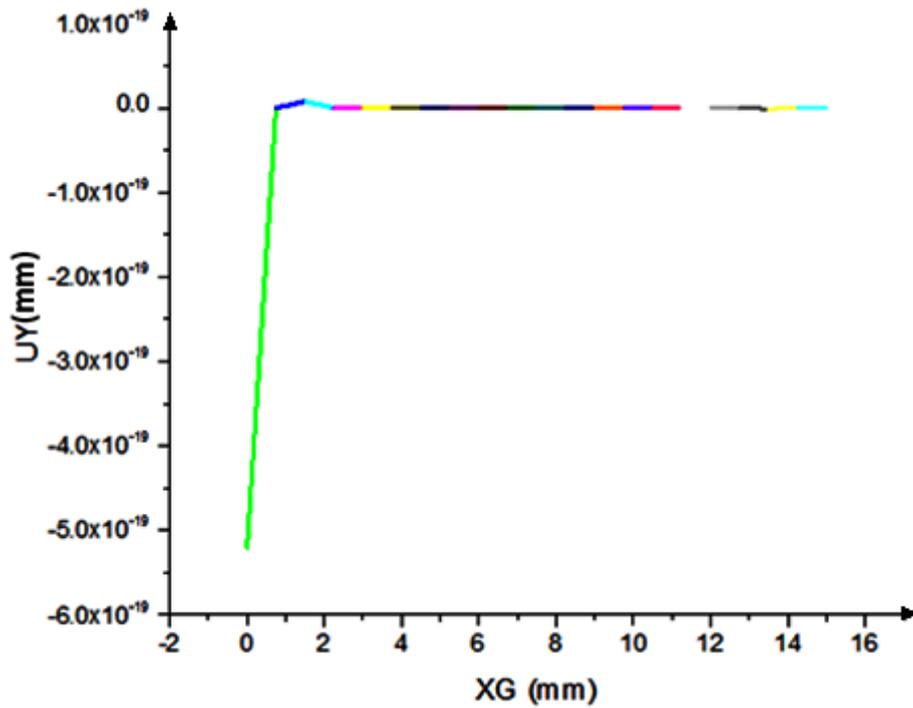


Figure III. 14 Expansion d'assemblage au long Y.

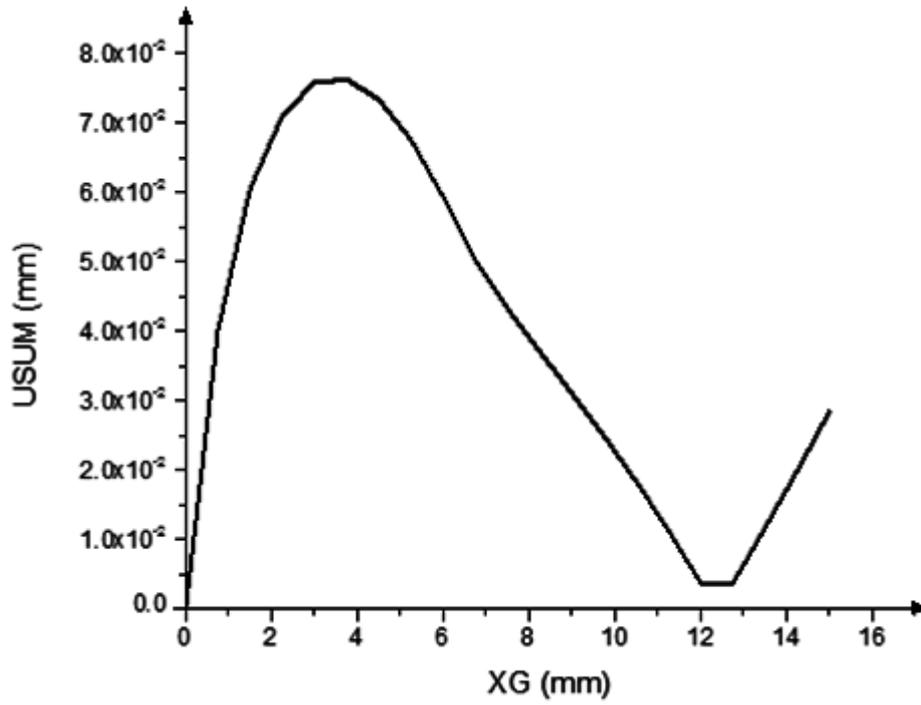


Figure III. 15 Expansions d'assemblage au plan XY.

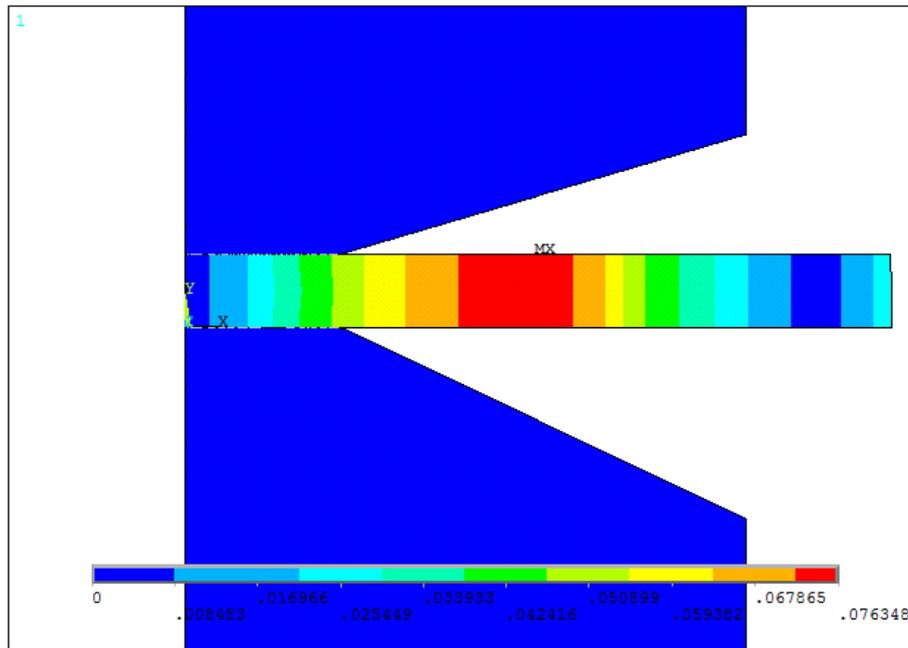


Figure III. 16 Cartes d'expansion l'assemblage au plan XY.

Les déplacements dans le plan XY atteint 0.0725 mm. Le glissement dans le plan XY est important à cause de la force réactive provoquée pendant l'écrasement de l'extrémité de deux plaques. La dilatation dans le sens positive du cordon d'assemblage provoque une forte compression sur son extrémité. Par conséquence, une réponse extensive des deux plaques produit un déplacement dans le sens contraire du champ de contrainte principale. À l'échelle microscopique, ce chevauchement provoque un clivage inter granulaire qui est due à l'endommagement du matériau.

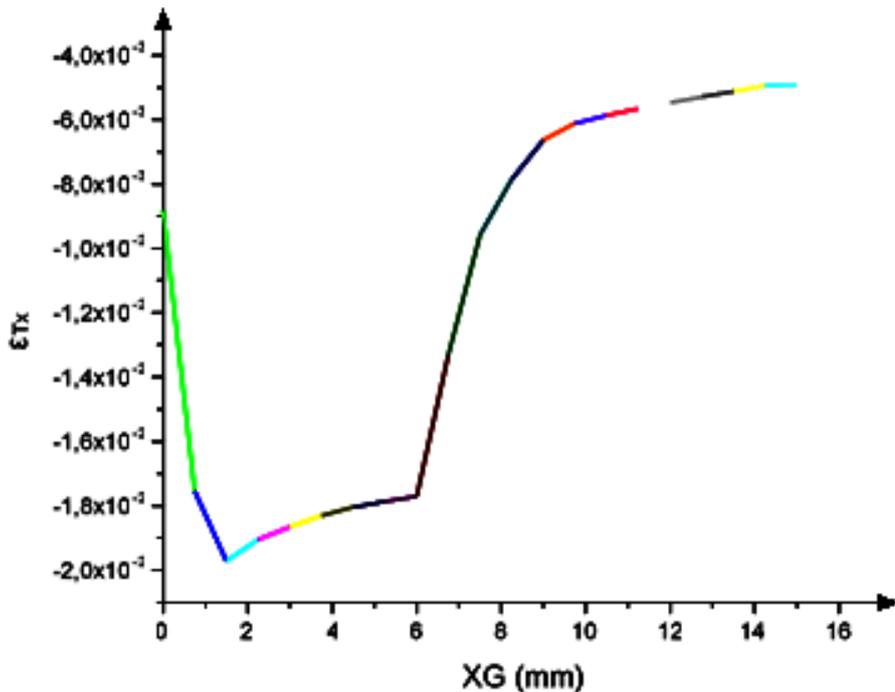


Figure III. 17Variation de la déformation totale au long X.

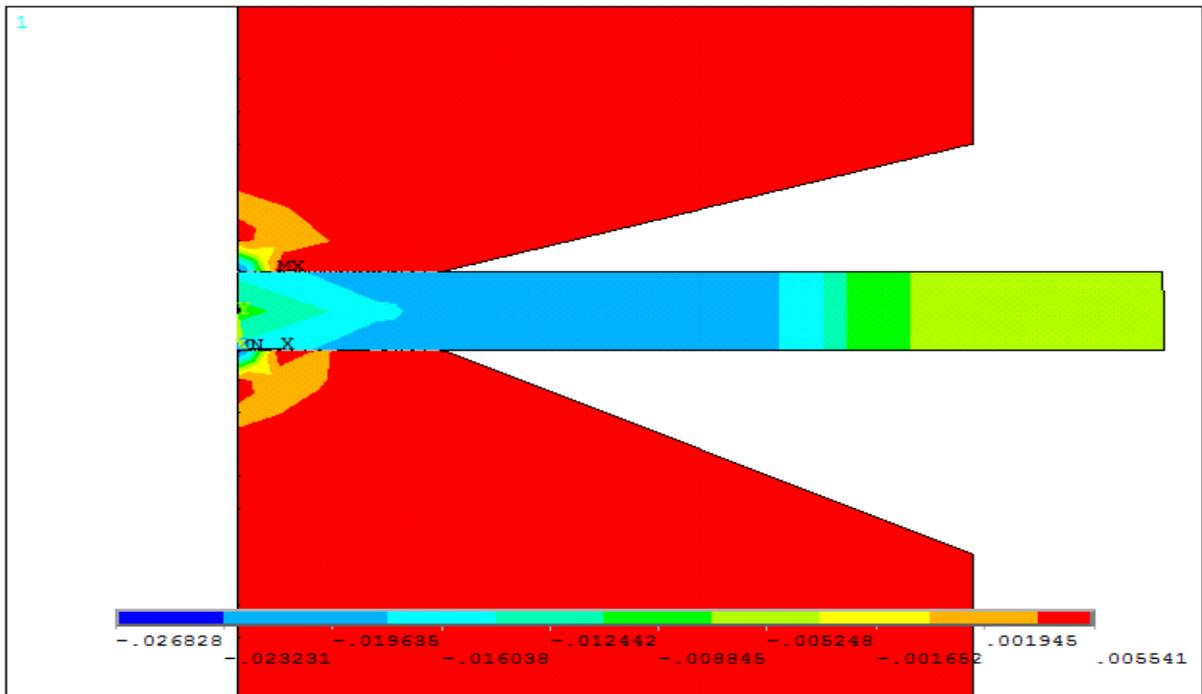


Figure III. 18 Visualisations graphiques de la distribution de la déformation totale au long X.

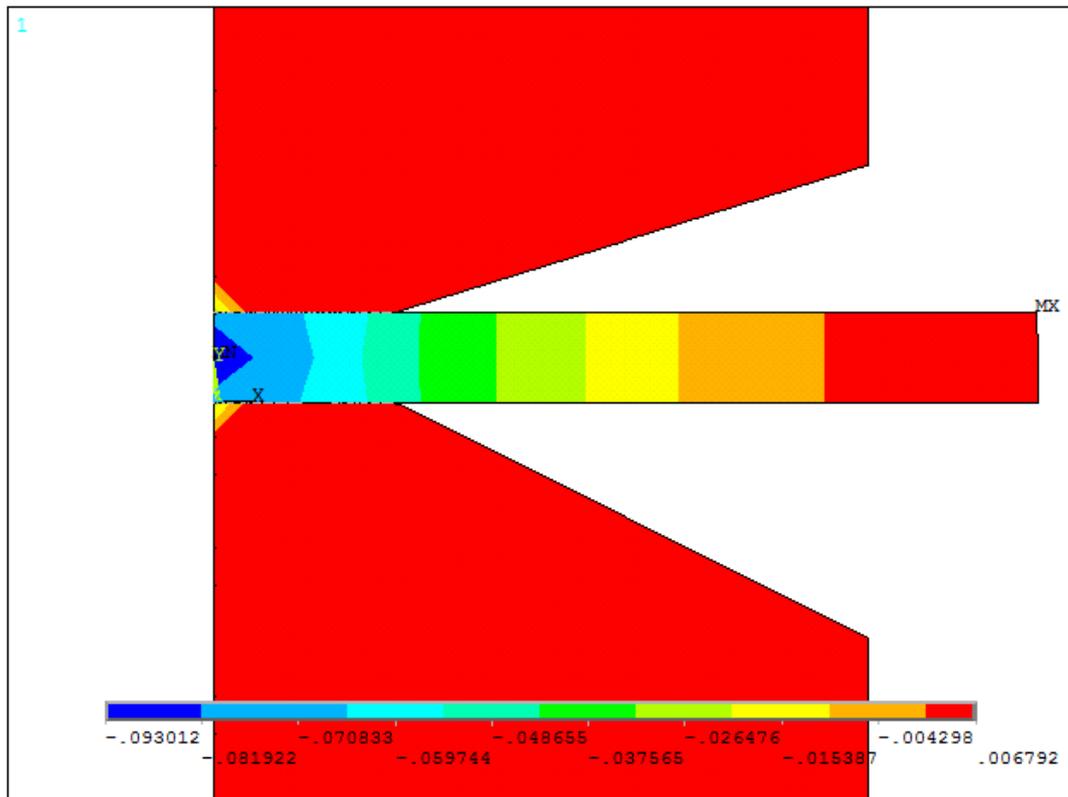


Figure III. 19 Visualisations graphiques de la distribution de la déformation totale au long Y.

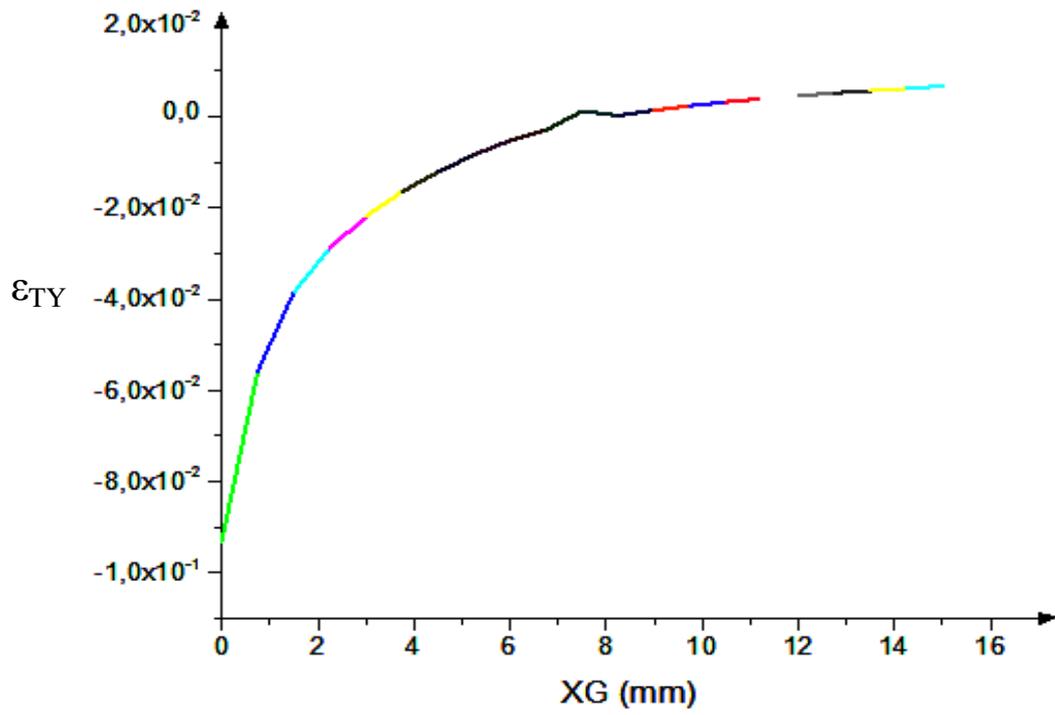


Figure III. 20 Variation de la déformation totale au long Y.

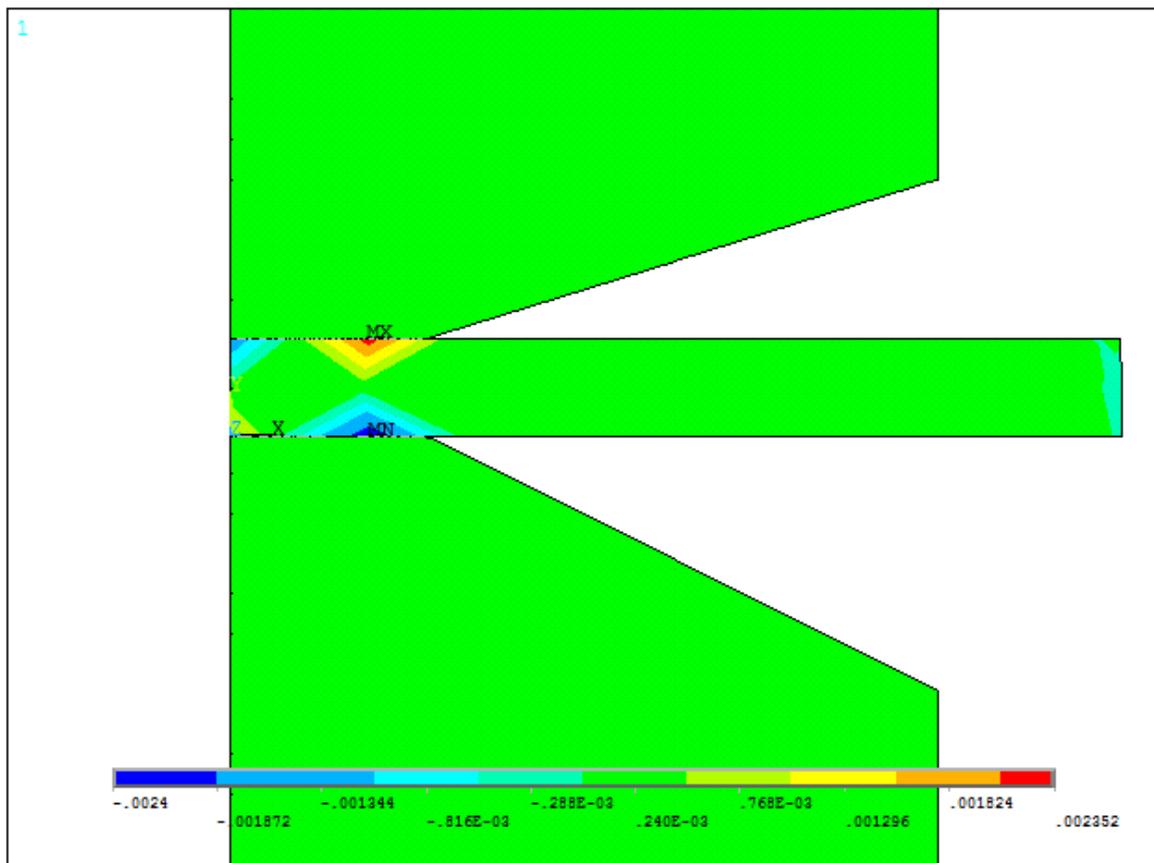


Figure III. 21 Visualisations graphiques de la distribution de la déformation totale au plan XY.

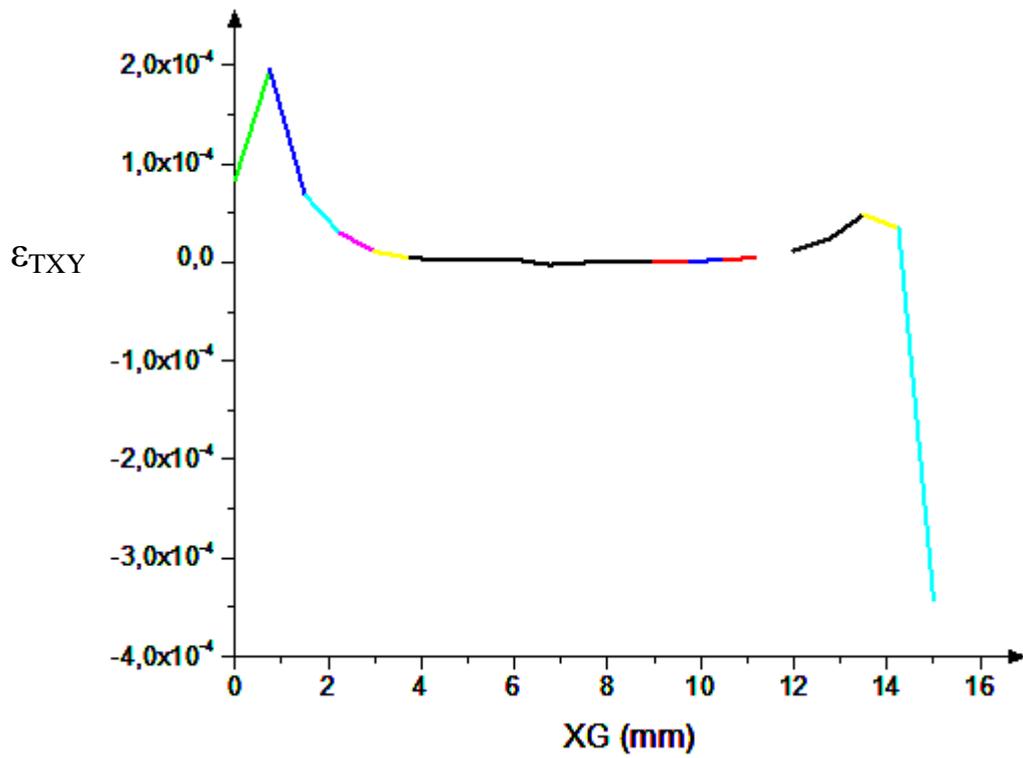


Figure III. 22 Variation de la déformation totale dans le plan XY.

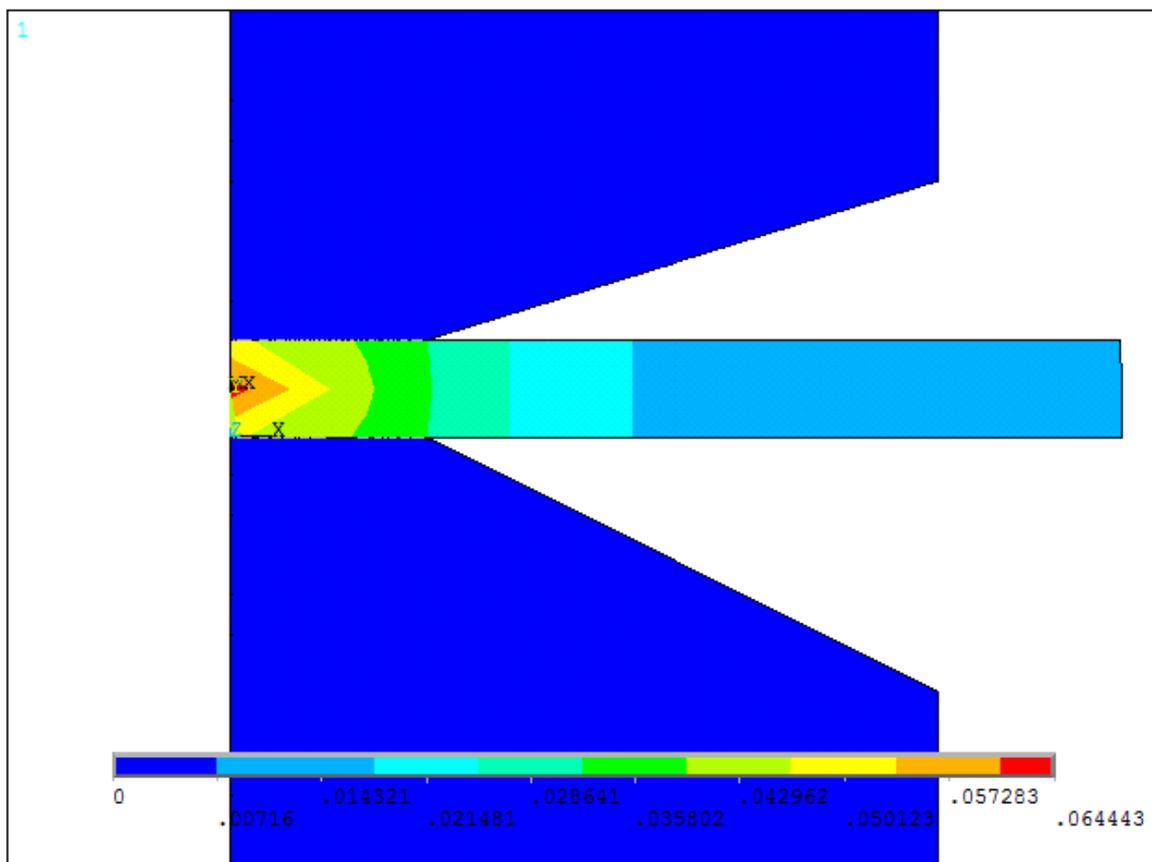


Figure III. 23 Visualisations graphiques de la déformation principale .

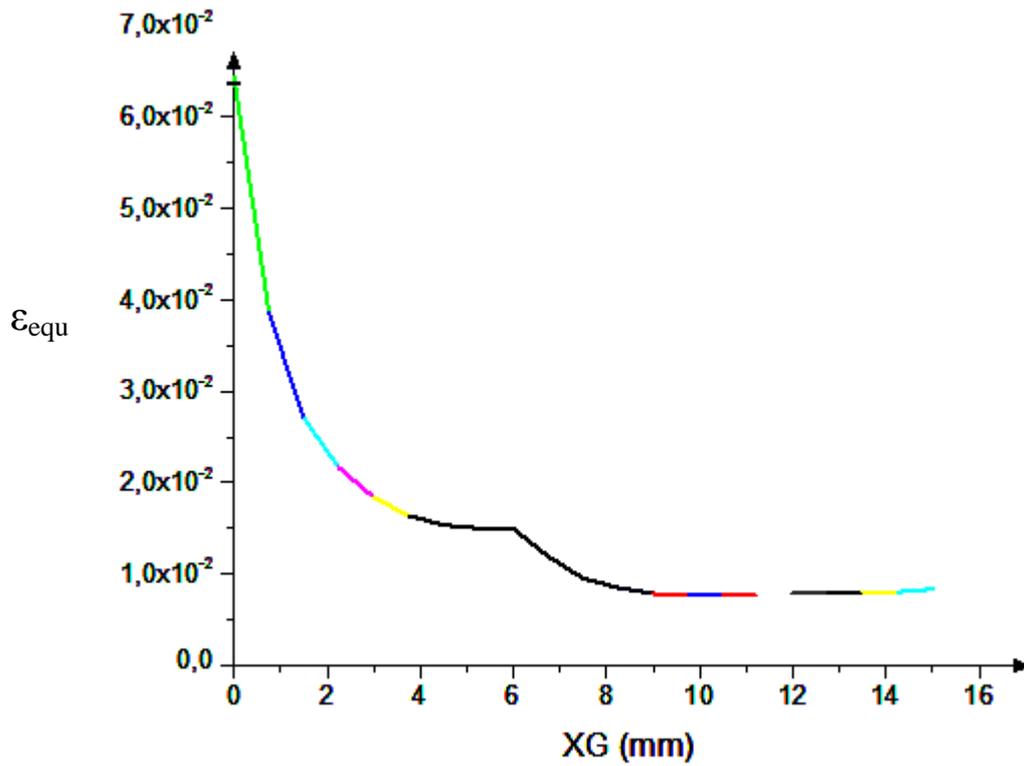


Figure III. 24 Variation de la déformation principale.

Le déplacement dans le sens horizontal X, vertical Y et dans le plan XY figures (III. 13- III. 16) provoque une déformation quantifiable figures (III. 17 - III. 24) suivant le type de contrainte induit pendant la dilation thermique des deux plaques. On trouve dans que la déformation principale est de l'ordre 0.064.

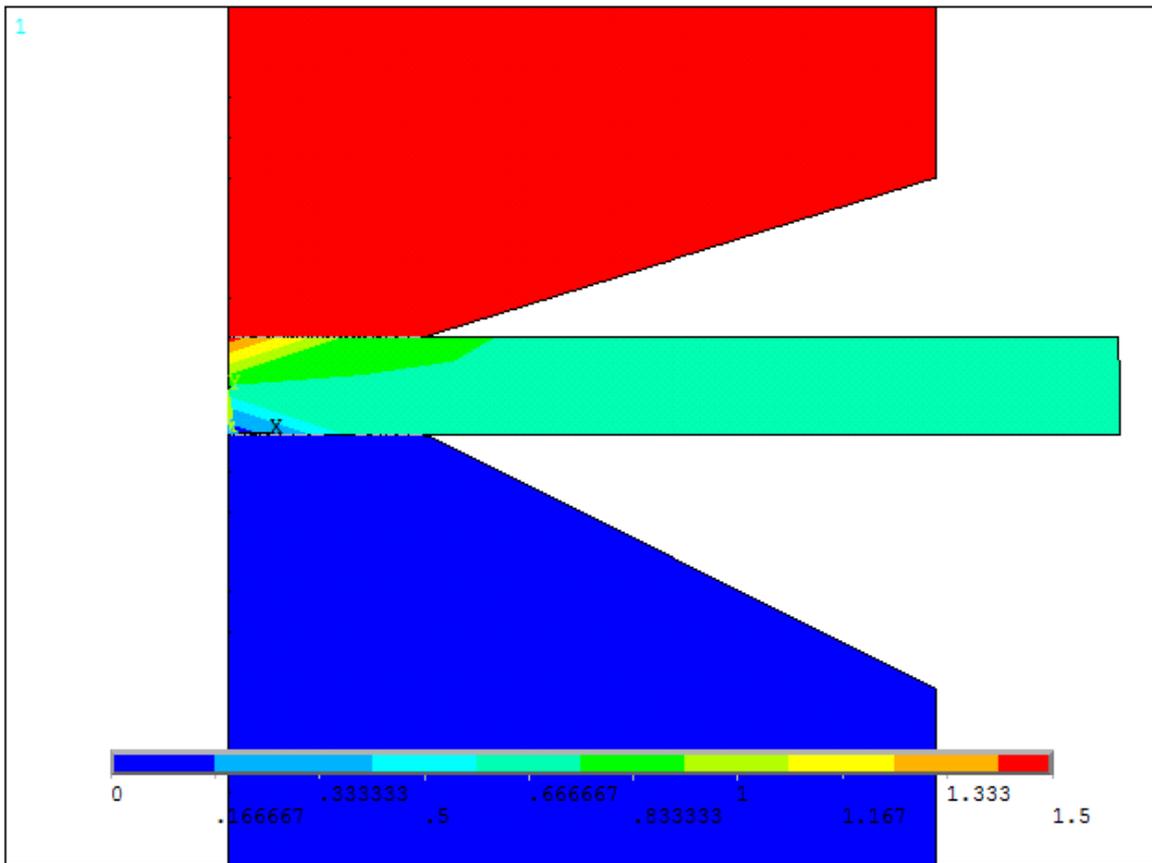


Figure III. 25 Visualisations graphiques des potentiels électriques.

Le potentiel électrique est le travail effectué par les deux électrodes en cuivre sur les deux plaques minces. Il indique aussi le sens de déplacement des électrons figure III. 25, ce déplacement dépend de la conductivité électrique du type de métal et les conditions de refroidissements appliqués.

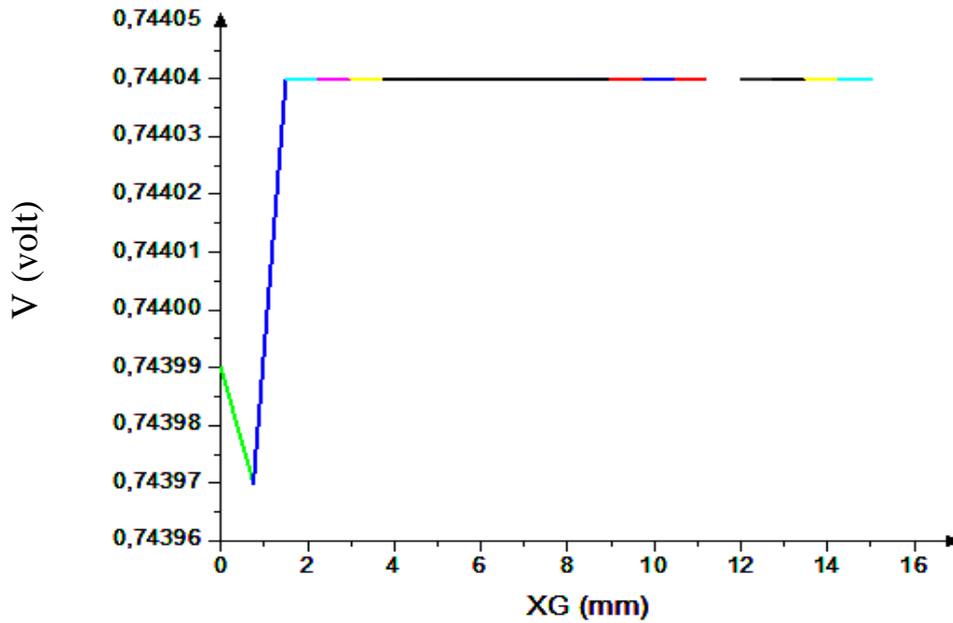


Figure III. 26 Potentiels électriques.

La figure III. 26 montre un gradient du potentiel électrique de la zone fondu jusqu' a la zone affectée thermiquement. Par contre, le potentiel électrique tend vers un plateau stable d'une valeur 0.744 V (métal de base). Cette stabilisation est justifiée par l'application des bonnes conditions aux limites (Tableau III. 1).

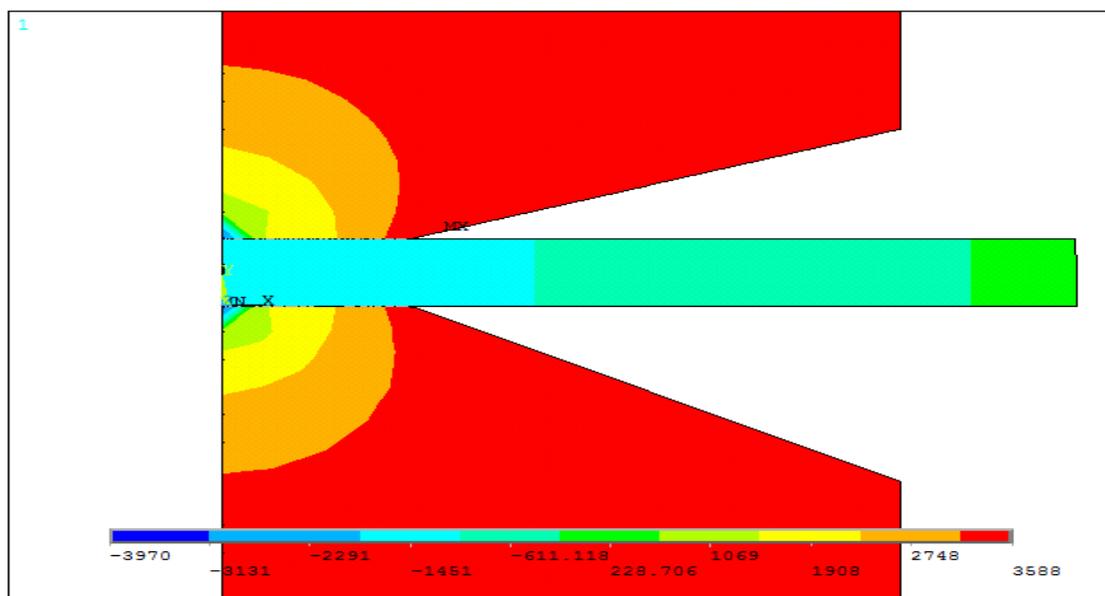


Figure III. 27 Visualisations graphiques de la variation des contraintes dans le plan X suivant le cordon d'assemblage.

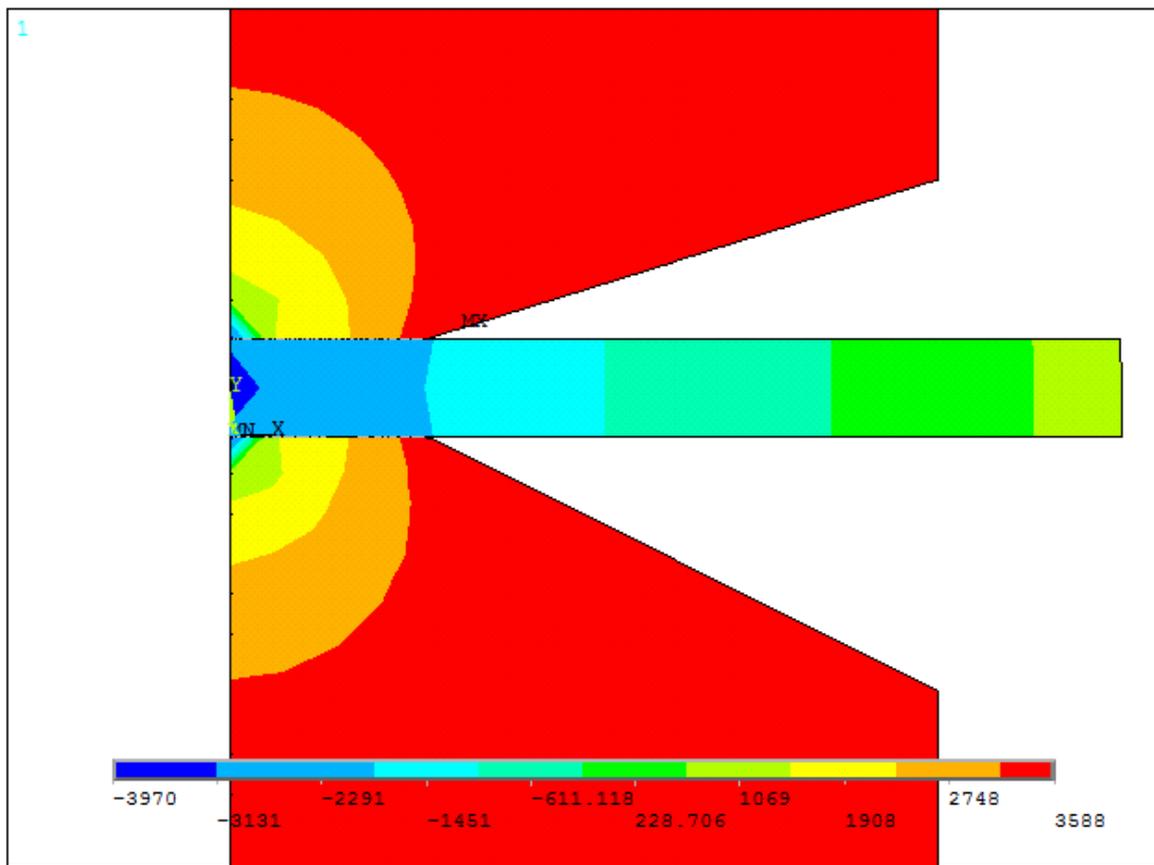


Figure III. 28 Visualisations graphiques de la variation des contraintes dans le plan Y suivant le cordon d'assemblage.

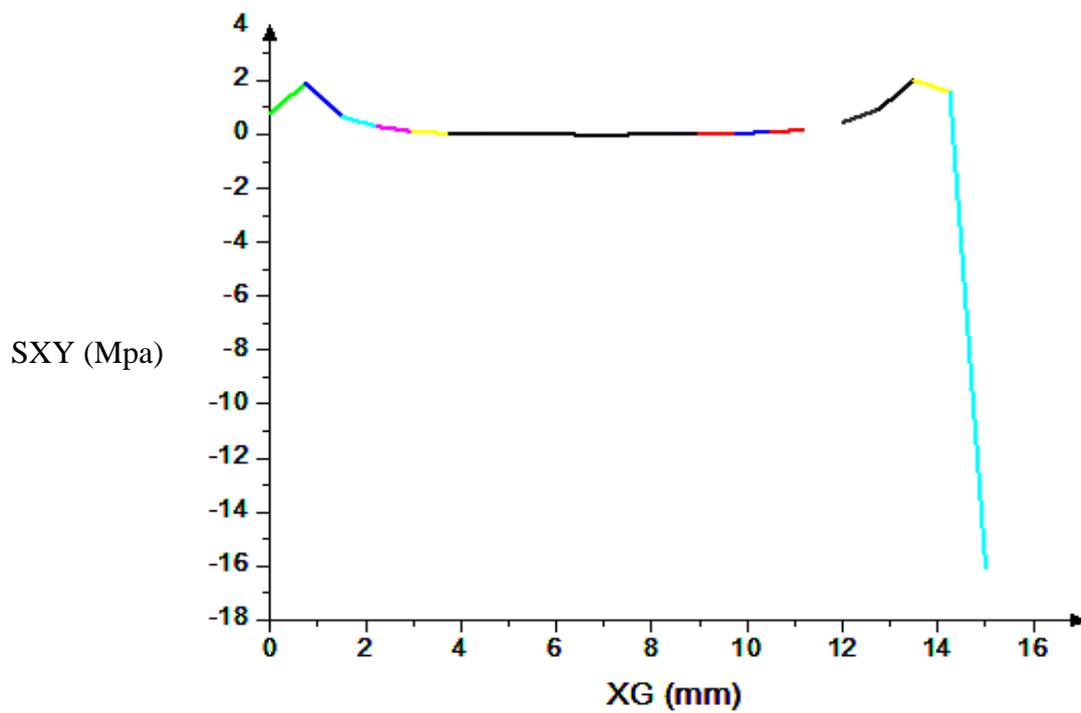


Figure III. 29 Distributions des contraintes équivalentes, dans le plan XY suivant le cordon d'assemblage.

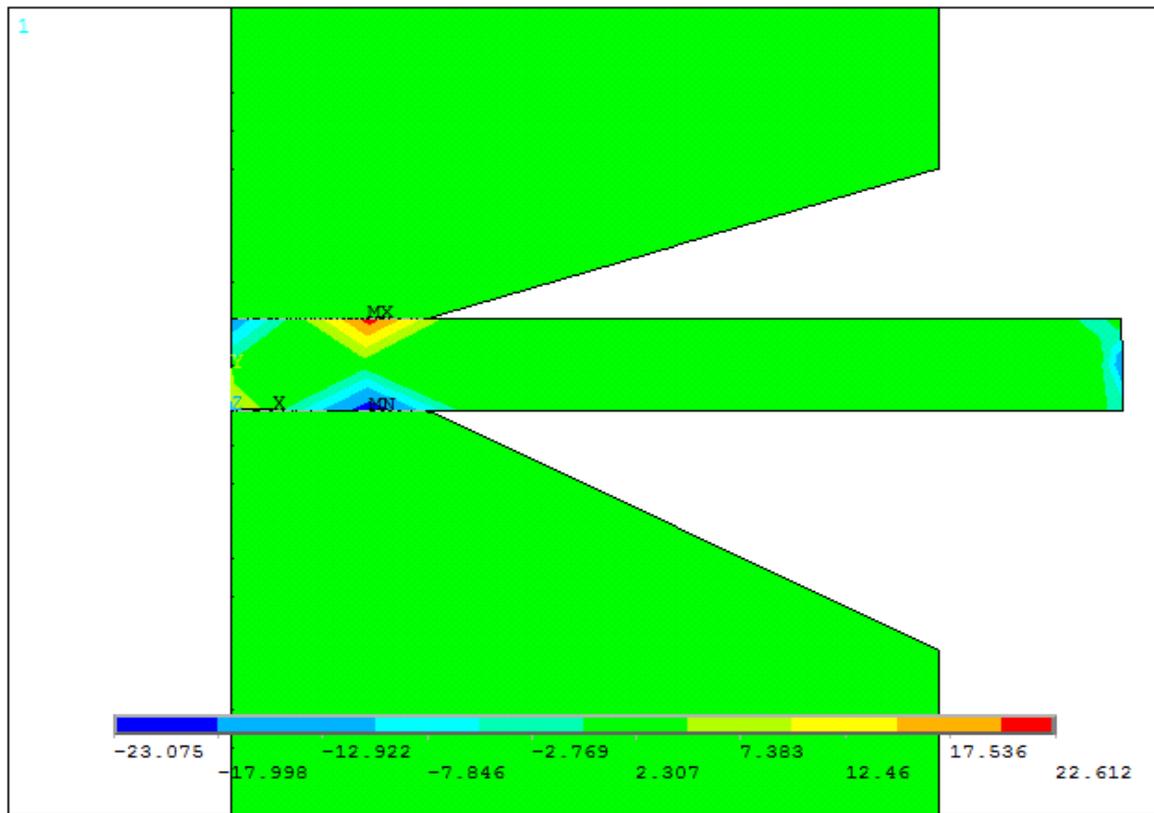


Figure III. 30 Visualisations graphiques de la variation des contraintes dans le plan XY suivant le cordon d'assemblage.

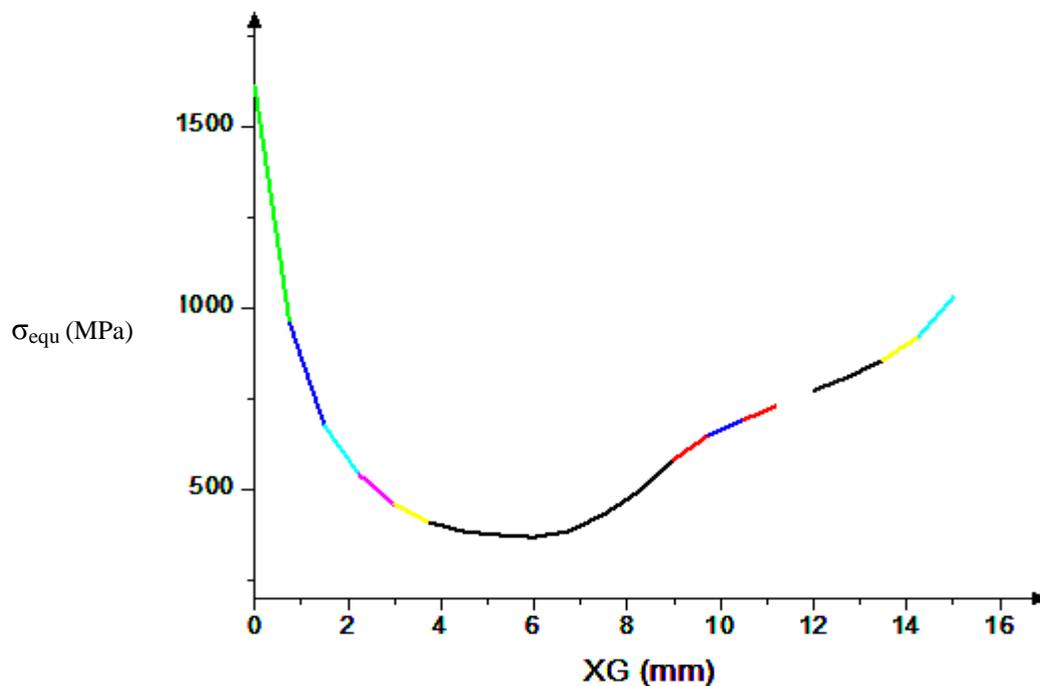


Figure III. 31 Variation des contraintes équivalentes suivant le cordon d'assemblage.

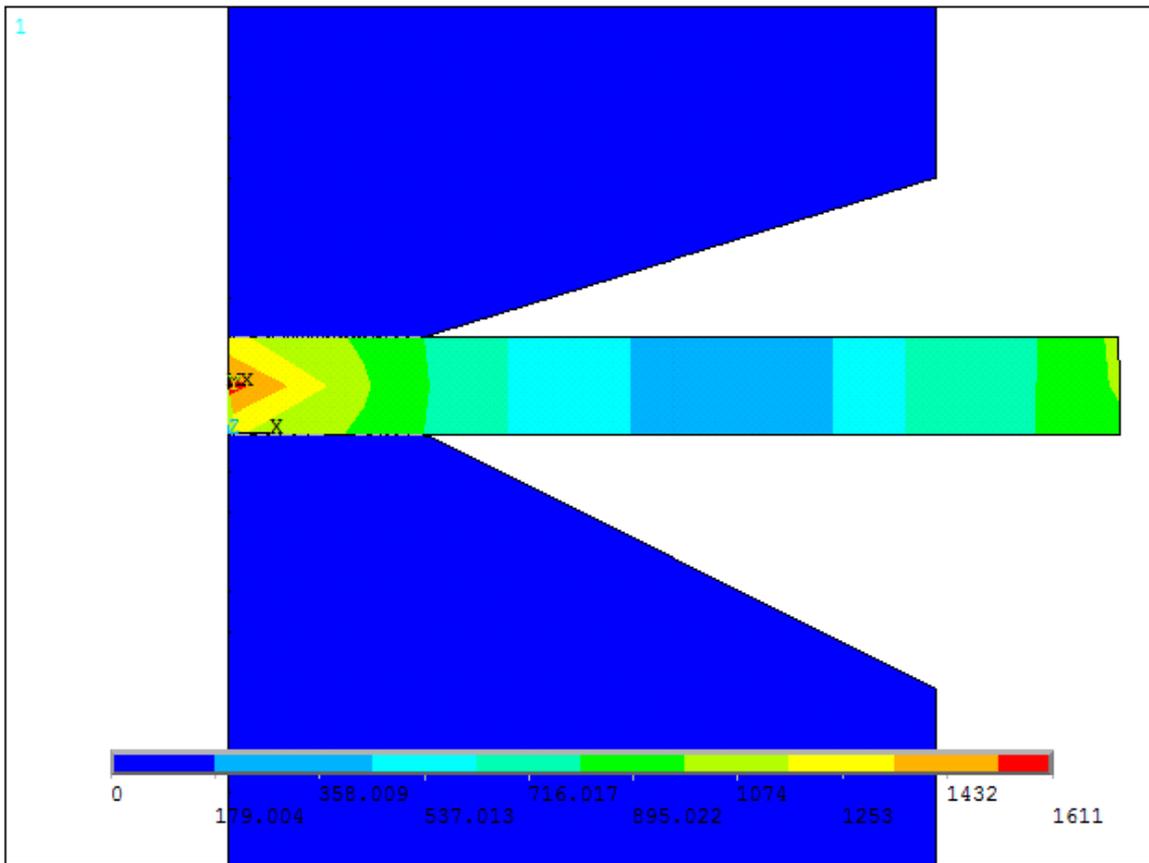


Figure III. 32 Visualisations graphiques de la distribution des contraintes équivalentes suivant le cordon d'assemblage.

Les figures (III. 29- III. 32) montrent que la distribution de contrainte dans la direction, dans laquelle, on peut voir que la contrainte de compression dans la zone d'assemblage est très importante et la contrainte maximale est d'environ 1,61 équivalent 10^{+03} MPa ; cela est dû à la génération de la contrainte thermique interne et résiduelle.

Il est justifié par la non-uniformité des propriétés thermiques de matériaux. En appliquant la charge thermomécanique, le vecteur de la sommation augmente de façon significative due au déplacement des contraintes sur toute la zone de contact. Il devient plus important à cause des plusieurs phénomènes physiques intrinsèque comme : transfert de masse, changement de phase interne, et glissement des joints de grains.

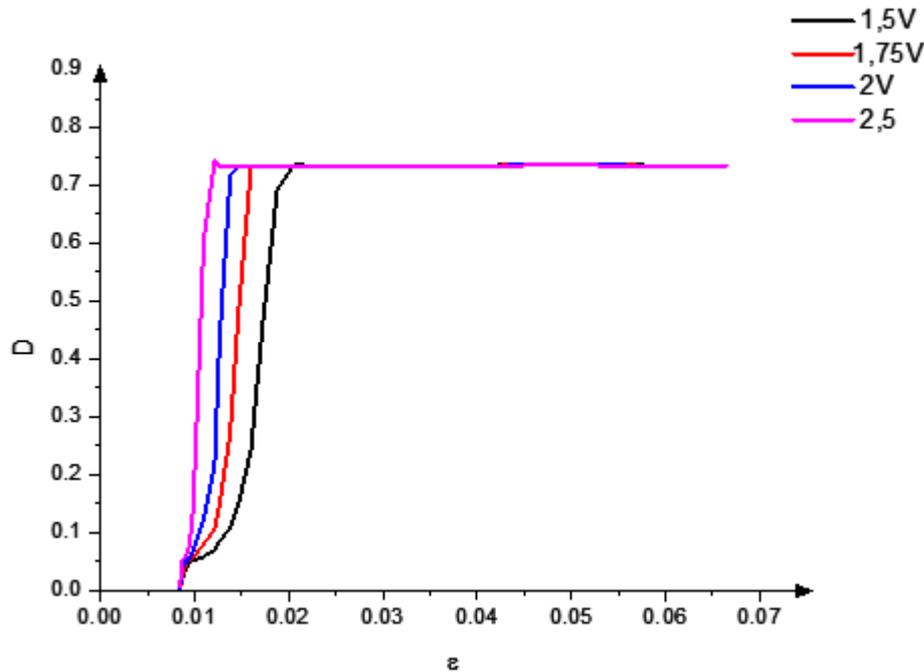


Figure III. 33 Taux endommagement thermomécanique.

La Figure III. 33 montre que le taux D augmente approximativement et linéairement à la zone des contraintes. En particulier, il a une valeur très importante à la zone de fusion ZF avec un progrès de tension.

III.9. Conclusion III

Dans cette étude, une théorie efficace avec un modèle axisymétrique en deux dimensions a été utilisée pour analyser l'effet des paramètres de résistance d'assemblage électrique sur le comportement thermomécanique et le taux d'endommagements d'acier HLE. Il a été démontré l'existence des endommagements en trois différentes zones FZ, HAZ, BM, qui peuvent influencer sur la capacité de résistance des matériaux à la variation des contraintes internes. La zone d'endommagement est la zone fortement affectée par la variation de la tension appliquée, car la déformation thermique et la concentration de contrainte sont plus accentuées lorsque la charge électromécanique appliquée augmente.

Nous présenterons dans le chapitre suivant une analyse et une modélisation du comportement en corrosion des aciers C_{0.12%}Mn_{1.02%}Si_{0.29%} sollicités dans un milieu sélectif physicochimique à base de NaCl

CHAPITRE IV

**Analyse et modélisation du comportement en corrosion
des aciers $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ Sollicités dans un milieu
sélectif physicochimique à base de NaCl**

IV.1. Introduction

Les surfaces métalliques dans l'assemblage par résistance électrique sont jointes par énergie thermique et la loi de Fick gouverne ce processus. L'étude de l'interaction entre le métal et le liquide est l'une des méthodes de prévention pour trouver des solutions fiables aux phénomènes de dégradation sous l'effet de l'agressivité du milieu. Plusieurs équipements dans l'industrie pétrolière ont été réalisés en utilisant les aciers HLE (haute limite d'élasticité) comme les installations pétrolières et gazières, les tubes de production, les pipelines de transport et les tubes de refroidissement, et les réservoirs de stockage. Plusieurs travaux ont été développés dans ce domaine.

La protection de l'acier API 5LX60 en sol simulé à base de NS_4 par l'utilisation des ions polyphosphates comme inhibiteur de corrosion a été développée par les auteurs [45].

Les molécules de sulfures peuvent diminuer le taux de corrosion dans l'environnement riche en CO_2 des échantillons d'acier API 5L X52 [46].

Le poly (4-vinylpyridine) réduit le taux de corrosion de l'acier en présence de H_2SO_4 [47].

La réduction de la densité de courant cathodique et l'augmentation de la résistance de polarisation du fer en présence d'acide sulfurique peut être réalisée par poly (4-vinylpyridine poly-3-oxyde d'éthylène) [48]. De nouveaux procédés ont été développés pour la modélisation chimique tel que le modèle de corrélation établie sur le potentiel d'oxydation électrochimique de plusieurs anions [49]. La stabilité de l'inhibition sur la ferrite dans l'acide sulfurique peut être obtenue par effet du poly (4-vinylpyridine) quaternisé greffé en bromodécane[50]. Par conséquent, le radical de cette dernière a été appliqué comme inhibiteur afin de protéger le métal pur comme le fer, le cuivre et le zinc

[51-52]. Les normes des bandes d'essais et les expressions de la corrosion ont été rapportés dans [53-54-55-56] .L'inhibition de la corrosion de l'acier doux dans HCl en utilisant P4VP est due à des phénomènes de chimisorption [57] .D'autre part, l'application de la méthode de protection exige à identifier et à étudier le comportement des matériaux sous divers sollicitations par contraintes chimiques, mécaniques, contrainte thermique avant l'utilisation d'inhibiteurs de l'interface (phase vapeur, phase liquide (anodique, adsorption cathodique et mixte).

Nous présenterons dans cette partie une évaluation expérimentale du taux de corrosion de l'acier C_{0.12%}Mn_{1.02%} Si_{0.29%} sous choc thermique dans la zone affectée thermiquement (ZAT) lors de l'assemblage des plaques d'aciers en présence du milieu physico-chimique à base de NaCl. L'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur l'acier HLE C_{0.12%} Mn_{1.02%} Si_{0.29%} et son comportement en endommagement par corrosion a été étudiée en utilisant la perte de poids (weight loss) après attaque chimique pendant 720 heures réparties en 10 étapes avec une évolution du pH de 300k à 370k et l'échange électronique.

L'estimation de l'efficacité du polymère a été déterminée par calcul physique en utilisant deux méthodes : méthode mécanique moléculaire et la méthode semi-empirique.

IV.2. Matériels et méthodes

IV.2.1 Caractérisation du matériau d'étude

La composition chimique de l'acier a été effectuée par analyse spectrométrique établi à partir de l'histogramme de la figure III. 3.

Les microstructures ont été réalisées en utilisant la microscopie électronique à balayage (MEB) figure III. 4 (a, b).

IV.2.2 Conditions environnementales

Dix-huit échantillons d'acier avec des géométries et des poids différents ont été utilisés dans cette étude ; le premier groupe est considéré comme référence sans choc thermique et nommé métal de base (BM)). Néanmoins, les deux groupes restant des échantillons ont été affectés par la chaleur et refroidi par l'air et par l'huile multigrade respectivement. La caractéristique de l'huile a été étudié dans notre laboratoire (LAEPO-TLEMCEN) avant d'établir le choc thermique sur les échantillons [58].Le milieu sélectif a été préparé avec différentes concentrations 0,1 M à 0,8 M de NaCl. Le taux de corrosion est déterminé par la méthode de perte de poids (weight loss).

Les échantillons ont été préparés avant analyse : traitement de surface à l'acétone, et à l'eau bi-distillée et séchées avant chaque mesure. Les procédures de préparation des échantillons, le polissage, la segmentation, le choc thermique et les fluides de refroidissement sont présentés dans la figure IV. 1.

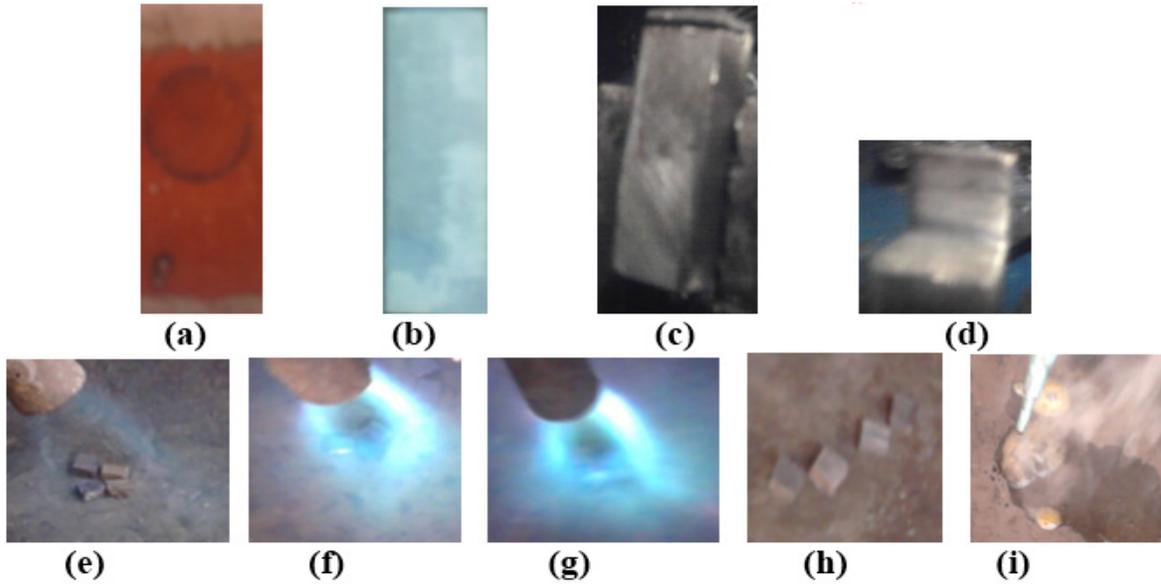


Figure IV. 1 (a) Coupon d’acier ,(b) échantillon après polissage,(c,d) segmentation, (e,f,g) choc thermique,(h) refroidissement par air,(i) refroidissement par l’huile.

IV.3. Résultats et discussions

L'effet de l'agressivité et l'état de corrosion du matériau d'étude avec différentes concentrations de NaCl, ont été montrés par la méthode de perte de poids figures (IV. 2 – IV. 6).

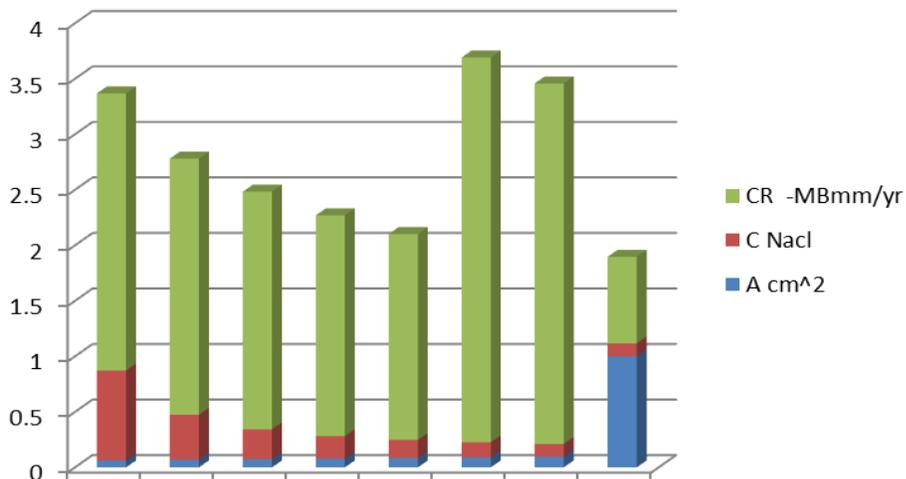


Figure IV. 2 Taux de corrosion du métal de base (MB) en fonction des concentrations de NaCl et les surfaces d'échantillon.

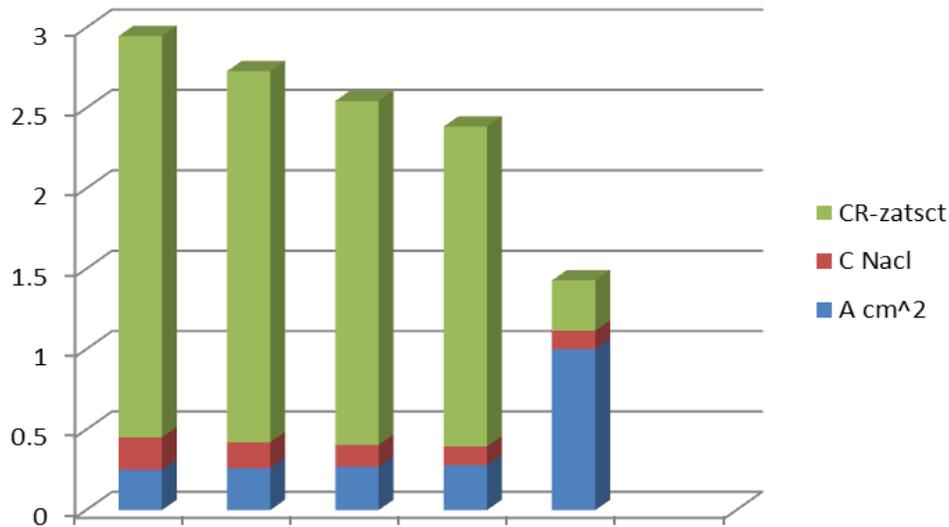


Figure IV. 3 Taux de corrosion du métal affecté par la chaleur et refroidi par Air (ZATsct) en fonction des concentrations de NaCl et surfaces d'échantillon.

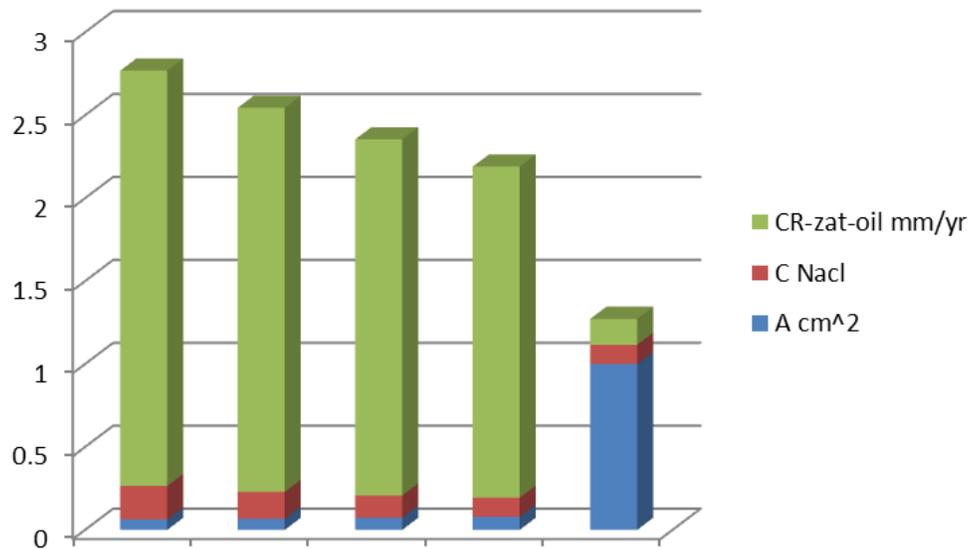


Figure IV. 4 Taux de corrosion du métal affecté par la chaleur et refroidi par huile multigrade (ZATH) en fonction des concentrations de NaCl et les surfaces d'échantillons.

Les figures (IV. 2, IV. 3, IV. 4) montrent que le corrosion d'acier C_{0.12%}Mn_{1.02%} Si_{0.29%} augmente avec accroissement des concentrations de l'halite. L'augmentation de la taille et la variation de la forme géométrique ont un effet direct sur le taux de corrosion. Cela peut être expliqué par le contact entre le plan atomique de métal et l'halite (NaCl)

Le taux de corrosion a des valeurs importantes pour le premier groupe d'échantillons (MB), il atteint 0,376% pour 0,135 M de NaCl. Le groupe affecté par la chaleur et refroidis par air (ZAT) a des valeurs de vitesse de corrosion plus faibles que le métal de base, le taux de corrosion se développe jusqu'à 0,214% pour 0,135 M de NaCl .Ceci est justifiée par les phénomènes de refroidissement mis en place par l'air et la recristallisation du métal sous condition standard. Le taux de corrosion des d'échantillons (ZATH) est inférieur au métal de base par contre il est supérieur pour les échantillons refroidis par air. Cette variation est justifiée par dépôt des atomes de carbone sur une surface métallique pendant le traitement thermique. On remarque une non linéarité du taux de corrosion en fonction la zone d'échantillonnage, la concentration, le choc thermique et le type de fluides de refroidissement.

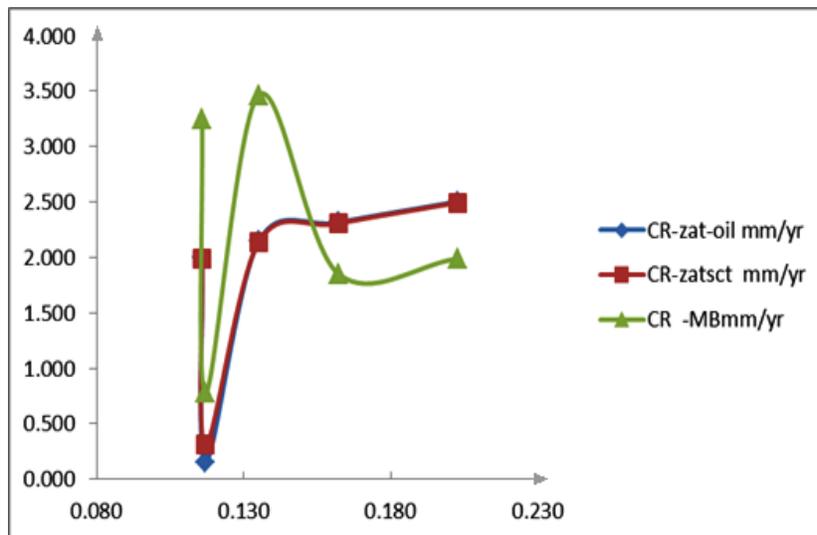


Figure IV. 5 Taux de Corrosion en fonction de la concentration de NaCl (mg/ml).

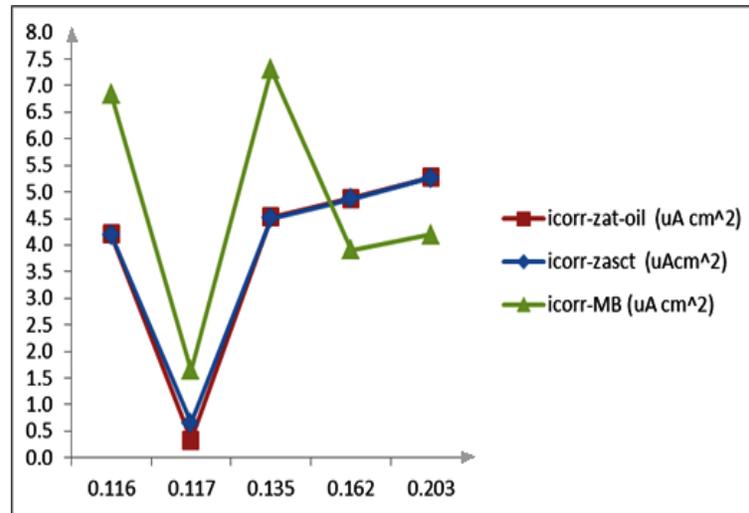


Figure IV. 6 Densité de courant en fonction de la concentration NaCl (mg/ml).

a. Courbe de polarisation

Pour obtenir la courbe de polarisation, nous avons résolu l'équation de Nernst (l'équilibre du potentiel ionique) équation (IV. 2). Suivant, les résultats d'analyse de spectrométrie obtenus, les atomes de Fe sont très dominant, ils représentent 98% et qui font l'une des conditions initiales pour résoudre l'équation. D'après la figure IV. 7 et IV. 8 les pentes cathodiques et anodiques changent apparemment avec l'augmentation de la température et la variation de l'acidité du milieu pH; il est clairement indiqué par l'existence de phénomènes de réaction proton à décharge cathodique, le déplacement maximum en valeur de E_{corr} et I_{corr} sont respectivement $-0,45 \text{ V}$, $0,002 \text{ mA cm}^{-2}$ à 370K vers la zone cathodique. Ainsi, le taux de corrosion augmente quand la densité de courant du matériau étudié augmente en milieu agressif simulé par la variation du potentiel de l'hydrogène et du nombre de transfert de charge.

L'augmentation de la température a un impact direct sur le potentiel de l'hydrogène comme le montre la figure IV. 7, qui, en conséquence, due à l'augmentation de l'acidité du milieu et de la densité de courant.



$$E = E^0 + \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \frac{a_{\text{ox}}^x}{a_{\text{red}}^y} \quad (\text{IV. 2})$$

Où,

- R : Constante des gaz parfaits, égale à $8,3144621 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- T : Température absolue en kelvin
- a : Activité chimique de l'oxydant et du réducteur
- F : Constante de Faraday, égale à $96\,485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1} = 1 \text{ F}$
- n : Nombre d'électrons transférés dans la demi-réaction
- [ox] : Activité chimique de l'oxydant
- [red] : Activité chimique du réducteur

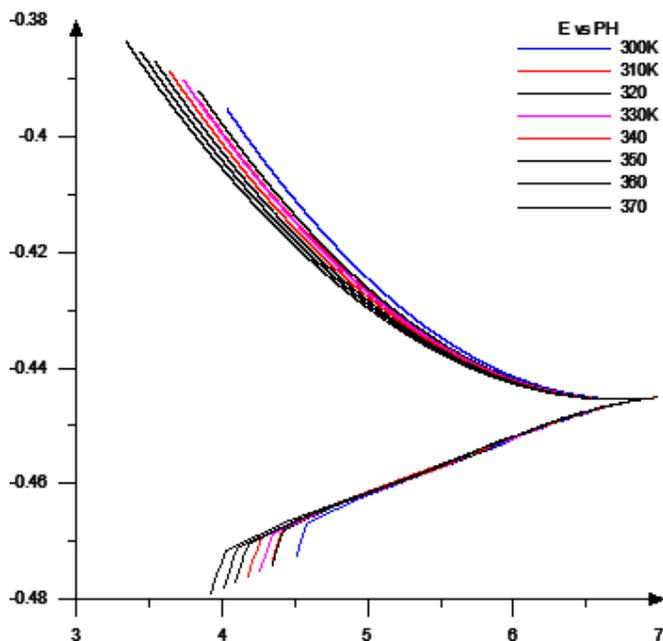


Figure IV. 7 Effet de la température sur le potentiel de corrosion (V) et potentiel de l'hydrogène.

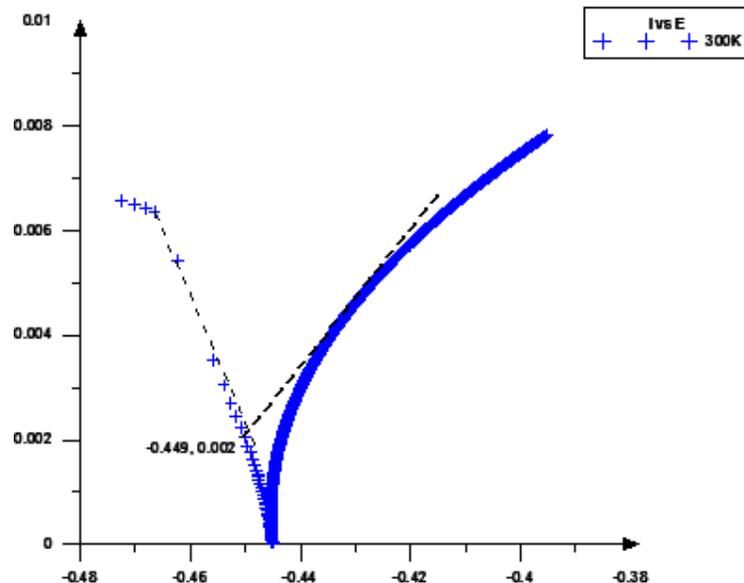


Figure IV. 8 Effet de la température sur le potentiel de corrosion (V) et la densité de courant (mA cm^{-2}) (Courbe de polarisation).

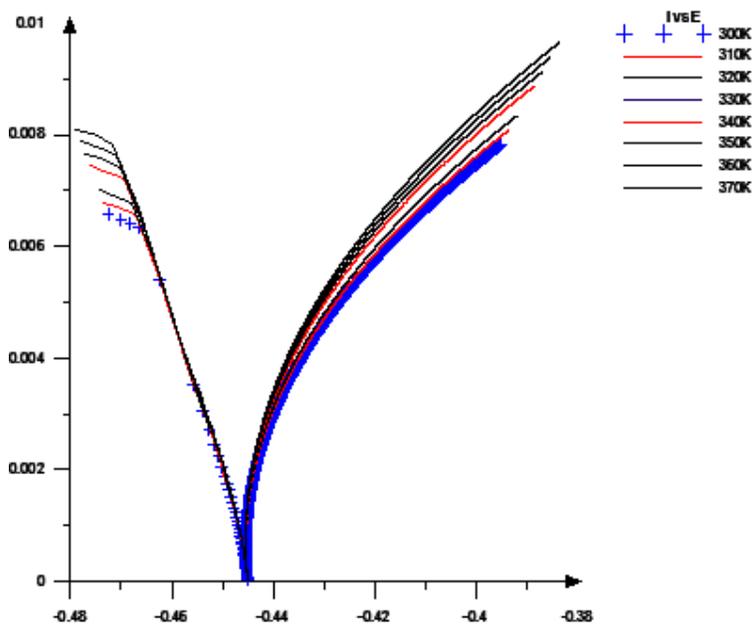


Figure IV. 9 Courbe de polarisation Tafel (densité de courant(mA cm^{-2}) en fonction du potentiel de corrosion (V)) pour 1M NaCl à 300 k.

Les figures IV. 7 et IV. 9 montrent l'effet de l'agitation thermique en augmentant la température de coupure pour la polarisation de NaCl 1 M. Le potentiel de corrosion du matériau étudié est d'environ $-0,449 \text{ V}$ à $2 * 10^{-3} (\text{mA cm}^{-2})$ figure IV. 9.

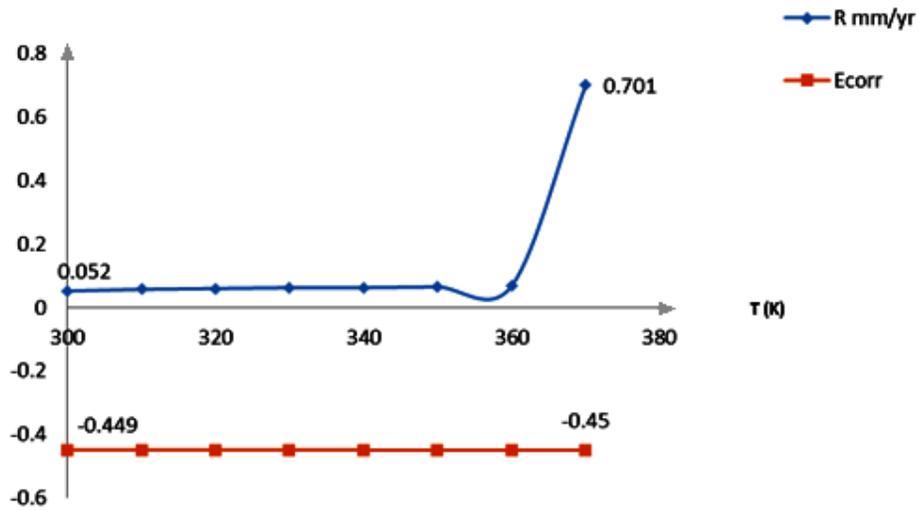


Figure IV. 10 Taux de corrosion en fonction de la température.

L'évaluation du taux de dégradation est importante dans le domaine de l'ingénierie technique. La figure IV. 10 montre le taux de corrosion (CR). Il augmente rapidement avec l'augmentation de la température du milieu jusqu'à atteindre 0,701 mm / an à 370K.

Une relation entre le taux de corrosion et la température a été déterminée par régression. L'équation déterminée est de l'ordre de cinq avec une certitude de 99,55%. Elle est faible seulement dans la gamme des températures suivantes [300k, 370k] à concentration standard

$$CR = 10^{-8} * T^5 - 2 * 10^{-5} * T^4 + 0.0152 * T^3 - 5.0071 * T^2 + 821.29 * T - 53829 + \varphi ; R^2 = 99.5\%$$

Cette équation a une application importante dans la prédiction de la vitesse de corrosion de ce type de métal quand les variables sont en fonction de la température et de la concentration du milieu sélectif. L'équation proposée peut être programmée en utilisant le langage d'assemblage pour l'application de la mesure de taux corrosion.

Le tableau IV.1 montre les résultats obtenus à partir de la méthode moléculaire et semi-empirique mécanique utilisées pour déterminer certaines propriétés du monomère et du

polymère, les molécules qui ont une faible électronégativité que le métal de base peuvent protéger le matériau de la corrosion.

b. Estimation théorique

Les calculs de chimie quantique ont été effectués pour montrer l'effet d'inhibition pour certains polymères. En plus, l'optimisation de la structure géométrique a été établie à l'aide de champ de force mécanique moléculaire, et l'option MM + basée sur des interactions électrostatiques est utilisée pour trouver les coordonnées d'une structure moléculaire avec l'énergie potentielle minimale figures (11, 13). La charge atomique Mulliken est utilisée pour indiquer la réactivité chimique figure IV. 12.

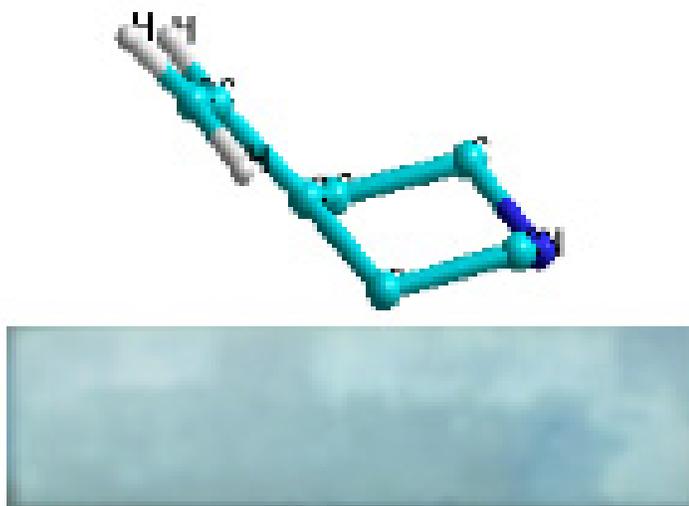


Figure IV. 11 C7H7N pattern sur MB.

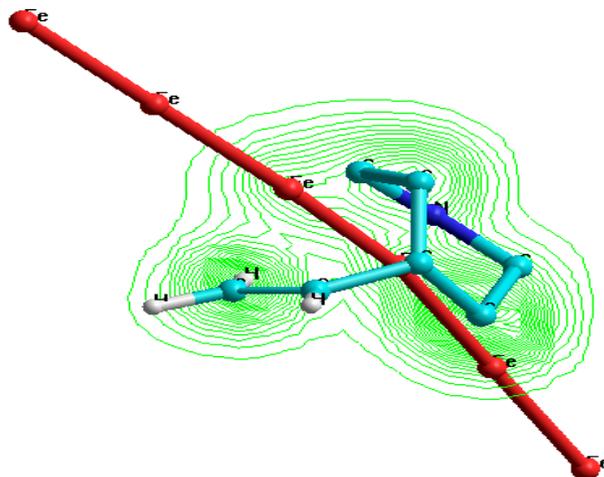


Figure IV. 12 Distribution de la densité de Charge .

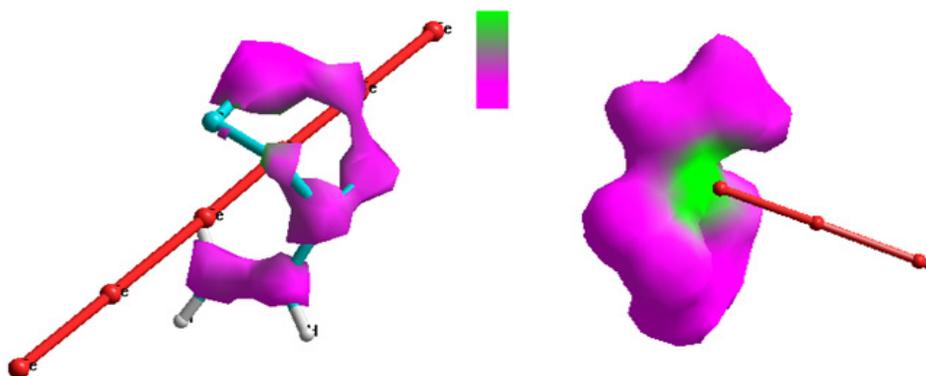


Figure IV. 13 Distribution potentiel Électrostatique (méthode MM+).

Les valeurs de softness η and hardness θ figure IV. 14 ont été estimées en utilisant la relation entre le potentiel d'ionisation I et l'affinité A obtenu à partir du calcul théorique. Ces quantités sont liées à l'énergie d' EHOMO orbitale la plus élevée occupée et l'énergie d'ELUMO orbitale inférieure occupée.

$$A = -ELUMO \quad (1)$$

$$I = -EHOMO \quad (2)$$

$$\eta = (I-A)/2 \quad (3)$$

$$\theta = 1/\eta \quad (4)$$

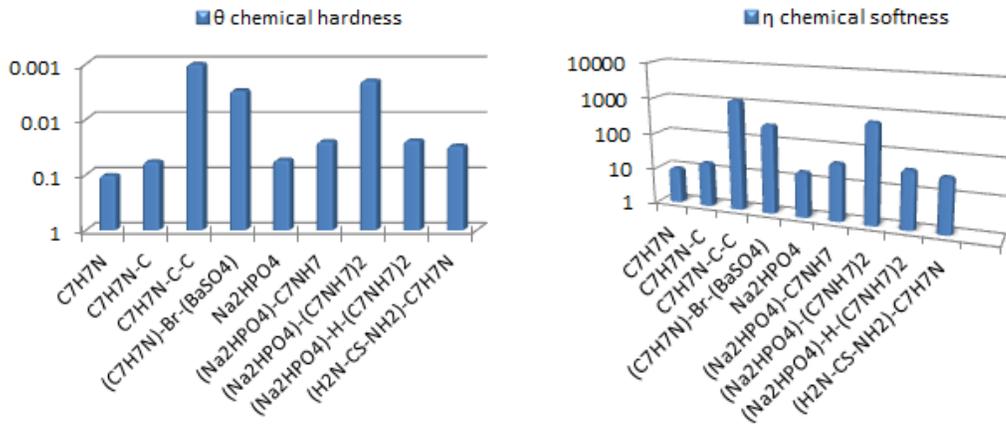


Figure IV. 14 Douceur (η) et dureté (θ) .

Tableau IV.1: Estimation Théorétique d'efficacité d'inhibiteur

Molécule	Efficacité d'inhibiteur %
C ₇ H ₇ N	6.781
C ₇ H ₇ N-C	8.489
C ₇ H ₇ N-C-C	6.540
(C ₇ H ₇ N)-Br-(BaSO ₄)	3.203
Na ₂ HPO ₄	18.767
(Na ₂ HPO ₄)-C ₇ NH ₇	2.616
(Na ₂ HPO ₄)-(C ₇ NH ₇) ₂	3.470
(Na ₂ HPO ₄)-H-(C ₇ NH ₇) ₂	8.089
(H ₂ N-CS-NH ₂)-C ₇ H ₇ N	7.635

IV.4. Conclusions IV

- Le choc thermique et la nature du fluide de refroidissement influent sur le comportement à la corrosion d'acier C_{0.12%} Mn_{1.02%} Si_{0.29%} en milieu physicochimique sélectif comme NaCl.
- Le taux de corrosion a une relation avec la forme, la taille des échantillons ainsi la concentration du milieu agressif.
- La densité de courant et l'acidité du milieu augmentent avec la variation de la température celle-ci a un impact direct sur le comportement à la corrosion du métal.

- Les molécules ayant une faible électronégativité que le métal de base peuvent le protéger contre les milieux agressifs.
- Le polymère $(C_7H_7N)_n$ a une bonne zone de couverture sur le métal de base ceci est montré par la distribution de la densité de charge et le potentiel électrostatique.

CHAPITRE V

**Étude sur comportement en corrosion des aciers
C_{0.12%}Mn_{1.02%}Si_{0.29%} HLE sollicités dans un milieu
sélectif physicochimique à base (CO₂) %**

V.1. Introduction

Dans l'industrie pétrolière, les réservoirs conventionnels et non conventionnels doivent être contrôlés afin de diminuer l'effet de composants dangereux sur les installations de pétrole et de gaz, les complétions, des tubes de production, pipeline de transport, et les réservoirs de stockage.

Les méthodes empiriques telles que le modèle NORSOK seront appliquées pour déterminer les paramètres sensibles les plus influençables sur la dégradation des matériaux. Par conséquent, le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tel que l'acidité moyenne, la pression partielle de CO₂, les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. En outre, l'application de scénarios nous a permis d'évaluer le risque de corrosion.

La présence de composants dangereux tels que (CO₂, H₂S, Cl ...) dans les gisements de pétrole et de gaz et dans les condensats peuvent donner des situations indésirables telles que la détérioration des propriétés des matériaux par phénomène de dégradation. Les entrées d'eau et la variation du niveau de plan d'eau affectent directement l'énergie de drainage de gaz et de pétrole. En outre, les percées d'eau affectent également les potentiels des puits.

L'interaction entre CO₂ et l'eau donnent des ions carbonates (FeCO₃), qui est un paramètre appréciable pour contrôler le phénomène de corrosion dans les installations de réseau collectées et des processus. L'étude de l'interaction entre les métaux et les fluides est l'une des méthodes préventives pour trouver des solutions fiables contre le

phénomène de dégradation en présence d'un milieu agressif [42]. Plusieurs équipements dans l'industrie pétrolière sont essentiellement réalisés en aciers HLE [42]. Ainsi, la protection des structures d'aciers tels que la nuance API 5LX60 en milieu NS₄ de sol simulé a été montré par l'utilisation des ions poly-phosphates comme inhibiteurs de corrosion [45]. Les molécules de sulfures peuvent diminuer le taux de corrosion des échantillons d'acier API 5L X52 dans un environnement de CO₂ [59].

V.2. Matériels et méthodes

L'application de la méthode empirique basée sur le modèle de NORSOK [60,61] sur les matériaux peut nous donner un moyen de générer des scénarios et pour déterminer la sensibilité pour chaque paramètre physique et chimique qui affecte le taux de corrosion.

$$R \text{ (mm/y)} = \alpha * \left(\frac{\varepsilon}{c}\right) (a1 + a2 * \text{Log} (10^{P(a3 - a4/(273.15 * T))}) * P_{CO_2}) \quad (\text{V.1})$$

Équation (1) va être simplifier dans l'intervalle de température 278 K-293K ,

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha = 0.62 & \text{si } 293 \leq T \\ \alpha = 0.36 & \text{si } T = 288K \\ \alpha = f(\text{pH}) * Kt * (10^{P(0.0031 - 1.4/(273.15 + K))} * P_{CO_2}) & \text{si } T = 278K \end{array} \right.$$

ε : contrainte de déformation ;

Kt : constant dépend par température ;

T : température K ;

α : constant dépends pH, fugacité ,température ;

$a1, a2, a3, a4, c$: constants ;

$f(\text{pH})$: facteur dépends par pH de solution ;

f_{CO_2} : fugacité ;

P_{CO_2} : pression partielle de CO₂.

V.3. Résultats et discussions

L'effet du milieu agressif sur la vitesse de corrosion avec différents scénarios sont présentés en figures (V.1 -V.6).

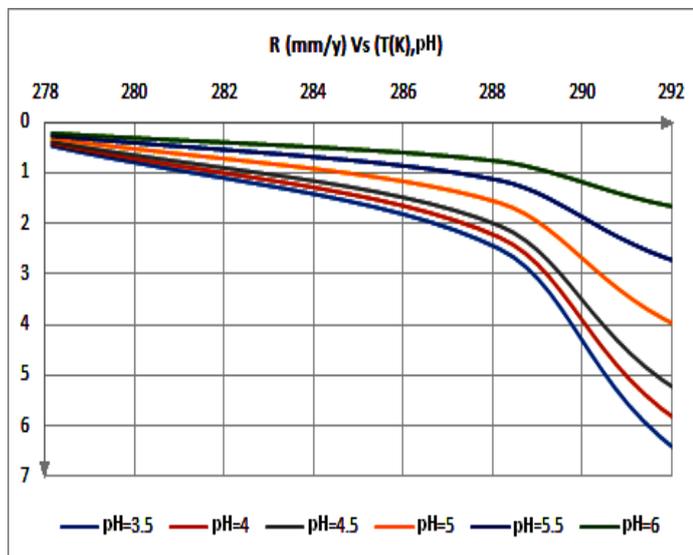


Figure V.1 Effet de la variation de pH pour faible concentration CO₂% (278k ≤ T ≤ 292k).

Les figures V.1 et V.2 décrivent la variation de potentiel d'hydrogène de milieu standard (pH =6) (pH=3,5) à faible valeur de CO₂%. Chaque valeur de la vitesse de corrosion est couplée par deux paramètres variables (de température et de pH).

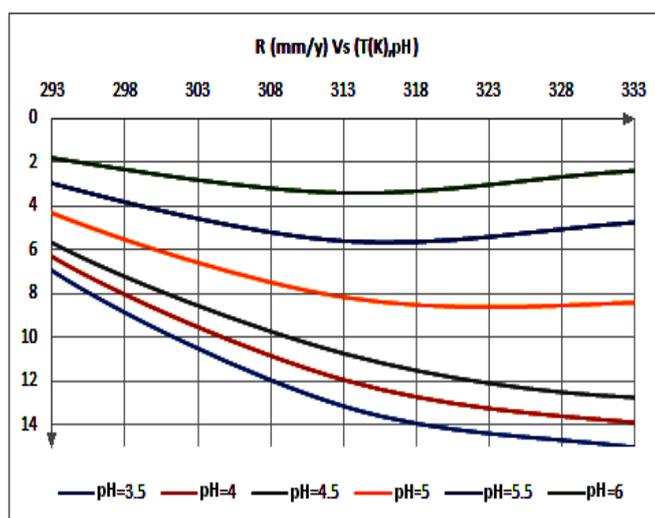


Figure V.2 Effet de la variation de pH pour faible concentration CO₂% (293 ≤ T ≤ 333k) .

La dérivation du comportement à la corrosion dans cet état commence à partir de 293 K comme il est montré sur la figure V.2. Ce phénomène est expliqué par la dégradation du métal par les composants agressifs, ils sont régis par une réaction complète qui peut être anodique, cathodique ou mixte. La loi générale, qui peut modéliser la perte de poids de la matrice métallique, sont les lois de diffusion de Fick et les lois de la cinétique chimique.

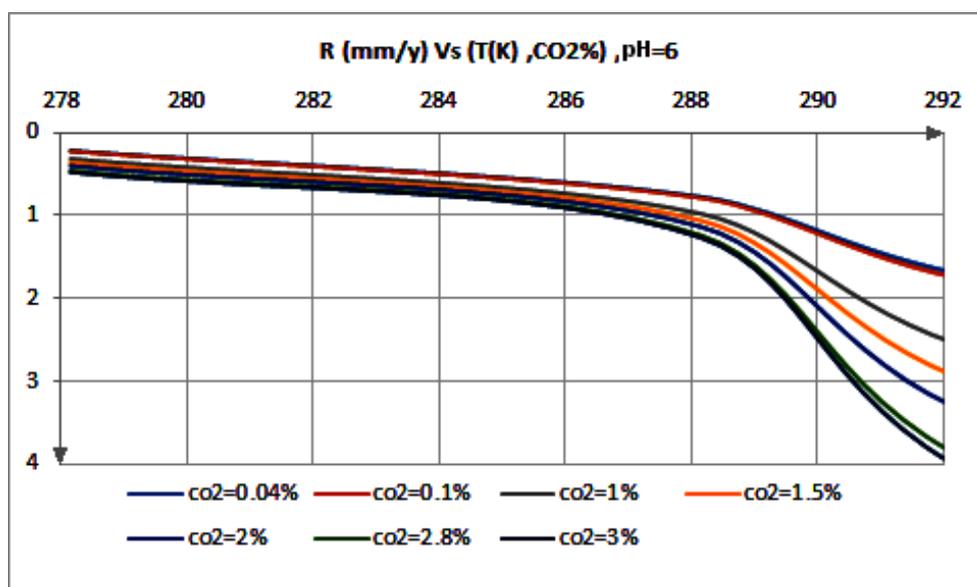


Figure V.3 Effet de la variation CO₂ % et la température (pH=6, 278k≤T≤292k).

Les figures V.4, V.5, V.6 et V.7 présentent les vitesses de corrosion avec une variation de la température et la proportion de CO₂. Ce phénomène est régi par des réactions chimiques tel que la dissolution du Fer par l'évolution de l'équation d'hydrogène (2).

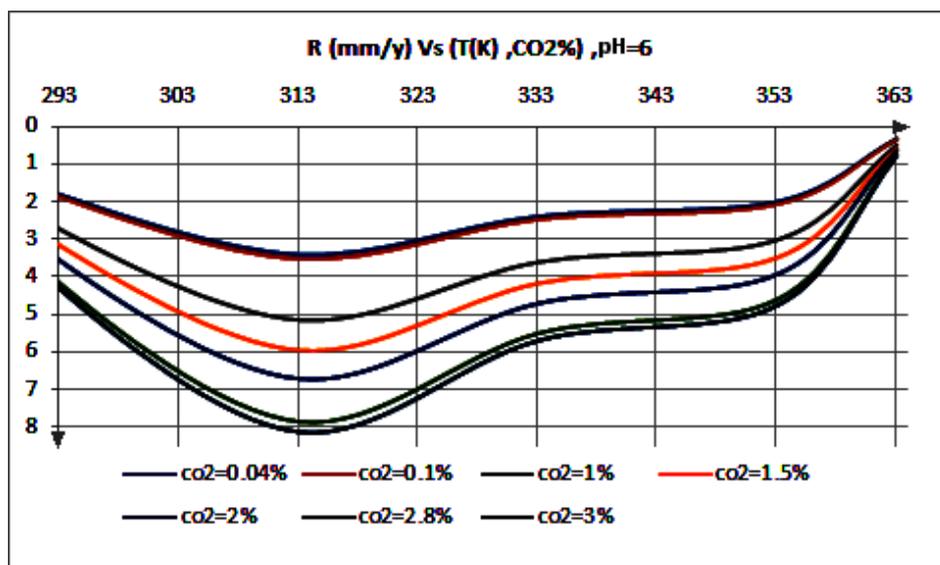


Figure V.4 Effet de la variation CO₂ % et la température (pH=6 ,293k≤T≤333k).

A la concentration normale du potentiel d'hydrogène, le comportement à la corrosion de l'acier change lorsque la température et la densité des composants indésirables augmentent.

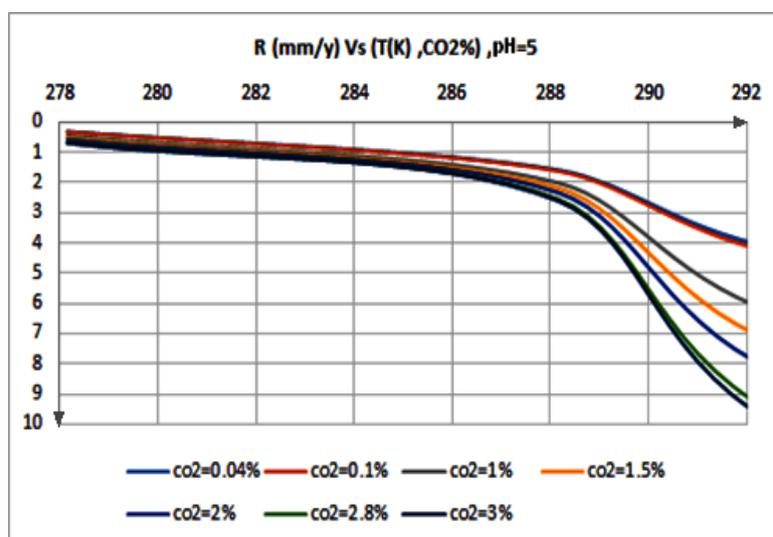


Figure V.5 Effet de la variation CO₂ % et la température (pH=5 ,278k≤T≤292k).

Par conséquent, les diminutions des taux de corrosion sont dues à l'augmentation du potentiel d'hydrogène. Puis, la variation de température contribue directement à l'épuisement de l'acier.

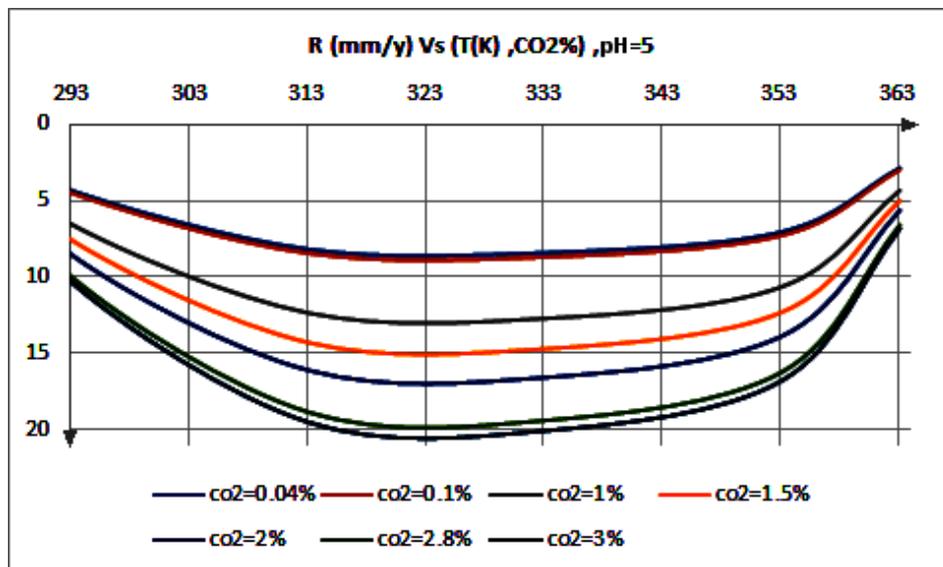


Figure V.6 Effet de la variation CO₂ % et la température (pH=5 , 293 k ≤ T ≤ 373 k)

Cette électro réduction de CO₂ et son interaction avec les éléments d'alliages de l'acier est très importante et peuvent se produire dans la canalisation de gaz.

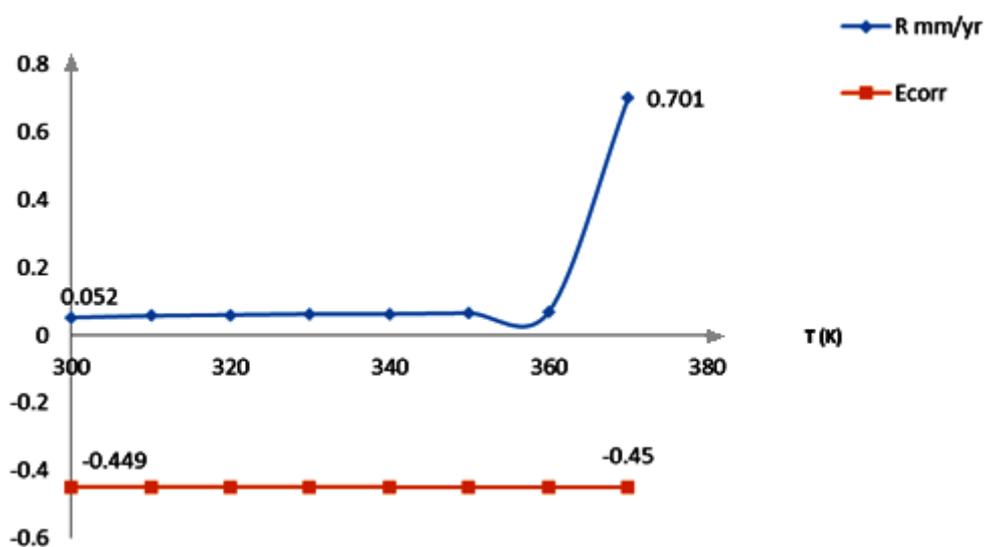


Figure V.7 Taux de Corrosion en fonction température (milieu NaCl) [42]

FigureV.7 montre l'influence du milieu agressif à base de NaCl. Toutefois, les éléments agressifs de CO₂ ont un effet important sur la résistance à la corrosion de l'acier par rapport à son comportement en milieu NaCl [42], puisque l'interaction des impuretés présentes dans la composition de gaz ont une influence sur la corrosion des aciers à faible carbone [62].

V.4. Conclusions V [63-64]

La concentration de CO₂ augmente due à la fugacité de la pression totale et la température du fluide.

- L'acidité augmente la variation du potentiel d'hydrogène, ce qui a un rapport direct avec la nature de l'eau de saumure et la concentration de CO₂.
- L'augmentation du potentiel d'hydrogène à même concentration de CO₂ affecte la vitesse de corrosion.
- L'augmentation de la concentration de CO₂ pour le même potentiel d'hydrogène affecte également la résistance à la corrosion de l'acier.
- L'augmentation de la concentration de CO₂ avec différents potentiel d'hydrogène affecte fortement la résistance à la corrosion de l'acier.
- La température a une influence sur la stabilisation de l'interaction du phénomène de corrosion

Il est recommandé, dans l'industrie du gaz et du pétrole, de contrôler la variation ou les entrées de gaz carbonique et les éléments et les composants dangereux périodiquement en appliquant les techniques d'échantillonnage ou de mesure directe de la pression partielle dans la canalisation. La sélection de l'acier dans l'industrie du gaz est une

solution préventive contre les produits agressifs. La résistance à la corrosion de l'acier peut être réalisée par des éléments de transition qui ont une grande affinité avec le Fer.

CHAPITRE VI

Interprétations des Résultats

La présente étude montre l'influence des paramètres et les performances d'assemblage par soudure des aciers $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ sur les différentes zones de la structure telles que la zone fondue (FZ), la zone affectée thermiquement (ZAT), et le métal de base (BM). Les effets des charges thermiques, mécaniques et de la tension appliquée sur la variation de la contrainte, taux d'endommagement, et la sollicitation en milieu physicochimique sélectif sont étudiés. Une méthode exploratoire prédictive a été utilisée pour prévoir l'influence de proportions des éléments additifs du tableau périodique sur les propriétés des aciers.

L'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement par corrosion de l'acier HLE $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ ont été déterminés par un modèle axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par l'endommagement thermomécanique et les charges appliquées. L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été déterminés par microscope électronique à balayage (MEB) et spectrométrie EDS.

L'influence de l'environnement et les paramètres physiques sur l'acier HLE

$C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ et son comportement d'endommagement en corrosion dans un milieu agressif à base NaCl a été étudié en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Les résultats montrent qu'il y a des variations du taux de corrosion par rapport au type de traitement thermique, fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement des échantillons. La résolution de

l'équation de Nernst prouve que l'augmentation de la température a un effet direct sur le potentiel d'hydrogène de la solution, la densité de courant et la corrosion du métal. De plus, l'efficacité d'inhibition a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que l'acier $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ a une bonne efficacité.

Une méthode empirique tel que le model Norsok a été appliqué pour déterminer les paramètres sensibles les plus influencés sur la dégradation de matériaux dans un milieu riche en CO_2 . Par conséquent, le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité moyenne, la pression partielle de CO_2 , les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. En outre, l'application de scénarios nous a permis d'évaluer le risque de corrosion.

L'objectif ciblé dans cette étude a porté sur la mise en place d'une étude sur le comportement en endommagement des assemblages métalliques sous sollicitations de contraintes thermomécaniques et des facteurs environnementaux tels que : structurel, mécanique, thermique, chimique...

Nous présenterons dans le premier chapitre une synthèse bibliographique sur le matériau d'étude (aciers HLE), le procédé d'assemblage thermomécanique, la modélisation numérique par les éléments finis, la protection par inhibition, la mécanique moléculaire et semi empirique et les modes d'endommagements dans les milieux sélectifs

Dans le chapitre II, l'étude a porté sur les propriétés des nuances d'aciers et l'effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électrothermomécanique. Pour estimer le potentiel de prédiction de la classification des éléments additifs, on s'est intéressé à l'une des méthodes du Datamining, c'est la méthode d'Analyse en Composante Principale « ACP ».

Cette étape passe par la conception d'une base de donnée des propriétés d'aciers et la réduction de leur dimensions par calcul des valeurs propres et des vecteur propres réalisée à l'aide du code de calcul MATLAB , méthode du Datamining pour le but de connaître les corrélations entre les nuances d'aciers d'une part et leurs propriétés en fonctions des élément d'alliages d'autre part , cette première constatation a pour but d'enrichir l'aspect physique et métallurgique avant de choisir le matériaux dans le test du simulation. L'étude exploratrice prédictive connue par la méthode datamining explique bien le comportement des aciers en fonctions des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments alliages. Cette méthode nous a permis de déterminer les conditions de travail comme l'environnement thermique tel que le refroidissement pendant le processus de soudage, l'optimisation de l'épaisseur des tôles, les paramètres principaux qui assurent l'opération du soudage, qui sont attribués dans la simulation comme des conditions aux limites.

Le chapitre III a porté ensuite sur l'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement à faible teneur en Carbone des aciers HLE. Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par endommagement thermomécanique et des charges appliquées. L'état de surface et la composition

chimique des matériaux étudiés ont été effectués par microscopie électrique à balayage (MEB) et par spectrométrie EDS. Le modèle utilisé dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et dans les conditions aux limites). Les conditions aux limites sont exploitées à la base des résultats obtenus par l'effet des éléments d'addition.

Les équations gouvernantes dans l'assemblage par résistance ont été présentées. Le modèle électro-thermomécanique utilisé dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Les conditions aux limites sont exploitées à la base des résultats obtenus. L'objectif dans cette partie est l'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement de l'acier HLE

$C_{0.12} \% Mn_{1.02} \% Si_{0.29} \%$. Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par endommagement thermomécanique et des charges appliquées.

L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été effectués par microscopie électrique à balayage (MEB) et par spectrométrie EDS.

Les échantillons ont été exposés à des charges externes. La contrainte maximale équivalente est déterminée à 4312 ° C avec 3,7% de déformation maximale. Ainsi, la distribution du champ de contraintes, déformation, température, champs électriques, sont présentées sous formes des graphes et de cartes. La distribution de ces paramètres sont visualisés sur la zone fondue ZF jusqu'au métal de base MB dans l'échantillon modélisées sous formes des plaques minces. La zone d'endommagement repérée est la plus affecté par la variation de la tension électrique appliqué au cours de la simulation d'assemblage par résistance.

Le chapitre IV de cette étude a porté sur l'étude de l'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur l'acier HLE $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ et son comportement en corrosion dans un milieu agressive à base de NaCl en s'approchant du contexte industriel dans l'industrie pétrolière. La méthode d'émersion (perte de poids), la résolution de l'équation Nernst et l'application des scénarios pour dévoiler l'effet de l'évolution du pH, température, l'échange électronique ont été appliqués.

L'efficacité inhibitrice a été déterminée par calcul théorique (méthode mécanique moléculaire et semi-empirique).

La chapitre V a portée sur l'application des méthodes empiriques telles que le model NORSOK pour déterminer les paramètres sensibles à la dégradation des aciers. Le taux de corrosion est estimé par calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité, la pression partielle de CO_2 , les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Le risque de corrosion a été déduit de cette étude.

Les chapitres IV et V montrent l'analyse et la modélisation du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités par des milieux sélectifs physicochimique NaCl et CO_2 ont été présentés.

L'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur acier HLE

$C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ et son comportement en endommagement en corrosion dans un milieu agressif à base NaCl a été étudiée en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Interprétations des Résultats

L'étude exploratrice prédictive par la méthode datamining connue par la méthode datamining explique bien le comportement des aciers en fonctions des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments alliages. Cette méthode nous a permis de déterminer les conditions de travail comme l'environnement thermique tel que le refroidissement pendant le processus de soudage, l'optimisation de l'épaisseur des tôles, les paramètres principaux qui assurent l'opération du soudage, qui sont attribués dans la simulation comme des conditions aux limites.

Dans l'analyse et la modélisation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement de l'acier HLE $C_{0.12\%}$ $Mn_{1.02\%}$ $Si_{0.29\%}$ le modèle appliqué dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites) à deux dimensions pour analyser l'effet des paramètres de résistance d'assemblage électrique sur le comportement thermomécanique et le taux d'endommagement des aciers HLE. Il a été montré qu'il existe des endommagements en trois zones la zone fondue ZF, Zone affectée thermiquement ZAT et le métal de base MB, qui peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des matériaux et aux variations des contraintes internes. La zone d'endommagement est fortement affectée par la variation de la tension appliquée, car la déformation thermique et la concentration de contraintes sont plus accentuées lorsque la charge électromécanique appliquée augmente. Dans cette étude, le métal d'assemblage est affecté par la variation de dommages dans les différentes zones.

L'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur l'acier HLE

$C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ et son comportement en endommagement par corrosion dans un milieu agressif à base de NaCl a été étudiée par la méthode de perte de poids. Les résultats montrent que le taux de corrosion varie en fonction de plusieurs paramètres : type de traitement thermique, le fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement lors du processus d'assemblage par soudure. L'efficacité inhibitrice a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que

$C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ acier a une bonne efficacité.

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Le taux de corrosion a une relation avec la forme, la taille des échantillons et la concentration du milieu agressif.
- La densité de courant et l'acidité du milieu par augmentation de la température a un impact direct sur le comportement à la corrosion de métal.
- Les molécules ayant une faible électronégativité que le métal de base peuvent le protéger contre les milieux agressifs.
- Le polymère (C_7H_7N) n a une bonne zone de couverture sur le métal de base montré par la distribution de la densité de charge et le potentiel électrostatique.

L'étude du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique à base de CO_2 a été faite par l'application du modèle empirique NORSOK. Le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul

théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité, la pression partielle de CO_2 , les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Cette application nous a permis d'évaluer le risque de corrosion et de conclure que :

- L'augmentation de la concentration CO_2 accroît la fugacité (pression partial).
- L'augmentation de l'acidité du milieu a un rapport direct avec la nature de l'eau de saumure et de la concentration en CO_2 .
- L'augmentation du potentiel de l'hydrogène à une concentration de CO_2 donnée affecte la vitesse de corrosion.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 à un potentiel de l'hydrogène donné affecte également la résistance à la corrosion de l'acier.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 avec le potentiel d'hydrogène affecte fortement la résistance à la corrosion de l'acier.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce manuscrit a porté sur la mise en place d'une étude sur le comportement de l'acier à haute limite d'élasticité ayant subi des contraintes externes électro-thermomécaniques et sollicités dans un milieu sélectif physicochimique à base de NaCl et CO₂. Une recherche bibliographique a été établie afin de tracer les chemins de l'étude et d'apprécier sa faisabilité au regard de nos objectifs : évaluation de l'endommagement thermomécanique et physicochimique du matériau affecté par les contraintes d'assemblage par résistance.

Dans l'étude bibliographique, nous avons présentés les propriétés de nuance d'acier à base de carbone, les techniques de caractérisation mécaniques et chimiques, les procédés d'assemblages par le couplage entre les forces physiques, mécaniques, thermiques, et chimiques. Du point de vue performance, les caractéristiques de matériaux sont sensibles au type d'environnements chimiques, ce qui provoque différents modes d'endommagement. Le diagnostic de type d'endommagement permet de choisir le type de protection. Des modèles en chimie théorique tel que la mécanique moléculaire et semi empirique ont été exploitées pour déterminer l'efficacité d'inhibition des monomères et polymères unitaires.

L'étude exploratoire prédictive connue par la méthode datamining explique bien le comportement des aciers en fonctions des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments alliages. Cette méthode nous a permis de déterminer les conditions de travail comme l'environnement thermique comme le refroidissement du processus de soudage, l'optimisation d'épaisseur des tôles, les paramètres principaux qui assurent

l'opération du soudage, qui ont été introduits dans la simulation comme des conditions aux limites.

Le modèle bidimensionnel axisymétrique du processus de soudage par résistance, nous a permis de réaliser une microstructure sur un plan de la topologie. Ainsi, elle permet de définir les changements de propriétés au voisinage de la zone affectée thermiquement.

Les résultats obtenus montrent que le comportement macroscopique des plaques d'aciers étudiés a une corrélation directe avec les contraintes provoquées pendant l'opération du soudage par résistance.

Le comportement en endommagement thermomécanique des plaques, a été présenté par une visualisation graphique et par image, qui comportent (le déplacement, la distribution des contraintes, déformation, la température, taux endommagement.).

Le choc thermique et la nature du fluide de refroidissement influe sur le comportement à la corrosion d'acier $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ en milieu physicochimique sélectif à base de NaCl.

- Le taux de corrosion a une relation avec la forme, la taille des échantillons et la concentration de milieu agressif.
- La densité de courant et de l'acidité du milieu par augmentation de la variation de la température a un impact direct sur le comportement du métal à la corrosion.
- Les molécules d'inhibiteurs ont une faible électronégativité que le métal de base ils peuvent par conséquent le protéger contre les milieux agressifs.
- Le polymère $(C_7H_7N)_n$ a une bonne zone de couverture sur le métal de base montré par la distribution de densité de charge et de potentiel électrostatique.

Conclusion Générale

- L'augmentation de la concentration en CO_2 accroît la fugacité de la pression totale.
- L'augmentation de l'acidité de milieux a un rapport direct avec la nature de l'eau de saumure et de la concentration de CO_2 .
- L'augmentation du potentiel de l'hydrogène à une concentration de CO_2 donnée affecte la vitesse de corrosion.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 à un potentiel de l'hydrogène donné affecte également la résistance à la corrosion de l'acier.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 avec le potentiel d'hydrogène affecte fortement la résistance à la corrosion de l'acier.

Bibliographies

- [1] T.Luu , "Déchirure ductile des aciers à haute résistance pour gazoducs (X100)" , Thèse de l'Ecole des Mines de Paris pour l'obtention du grade de docteur en Sciences des Métiers de l'Ingénieur, 24 novembre 2006.
- [2] L.Chaowen , and al , " Three-dimensional finite element analysis of temperature and stress distributions for in-service welding process " , Materials and Design 52, 2013.
- [3] N.U. Ahmed, B.L. Jarvis, "Thermal Cycles in Multiple Electrode Submerged Arc Welding", Welding Research SUPPLEMENT, 15-23, 1996
- [4] http://www.robot-welding.com/Welding_parameters.htm.
- [5] Y.Bing Li, Z.Qin Lin, S. Jack Hu, G.Long Chen, " Numerical analysis of magnetic fluid dynamics behaviors during resistance spot welding", J. Appl. Phys. , 2007, 101 (5), 053506.
- [6] E.Bardal, "Corrosion and protection",engineering materials and processes", ISBN 1852337583, 1993.
- [7] P.Atkins, R.Friedman, "Molecular Quantum Mechanics", Oxford, New York, 1997.
- [8] A.Streitwieser, "Molecular Orbital Theory for Organic Chemists", Wiley, New York, (1961).
- [9] C.A.Coulson, B.O.Leary , R.B.Mallion , "Huckel Theory for Organic Chemists", Academic Pr; 1st US - 1st Printing edition (November 1978) , ISBN-10: 0121932508
- [10] K.Gavroglou, A.Simões,"Neither Physics Nor Chemistry: A History of Quantum Chemistry", MIT Press, -351 pages, 2012.

- [11] R. Hoffmann, "An Extended Hückel Theory. I. Hydrocarbons", *Journal of Chemical Physics*, 39, 1397, (1963)
- [12] M.A.Abdulsattar, K.H.AlBayati, "Corrections and parameterization of semiempirical large unit cell method for covalent semiconductors", *Phys. Rev. B* 75, 245201 (2007).
- [13] "HyperChem Manual", HC50-00-02-00, October 1996.
- [14] G. THEWLIS, "Weldability of X100 line pipe", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 5, No. 6, pp. 365-377, 2000.
- [15] J.E. Flaherty, "Finite Element Analysis", Department of Mathematical Sciences, Spring 2000.
- [16] Y. J. Cho, H. S. Cho, "A study on the electric conductance of resistance spot welds -the contact conductance between two thin plates", *Mechanics Research Communications* Volume 12, Issue 6, 1985.
- [17] K. Jeong-Hyeon, "Numerical model to predict deformation of corrugated austenitic stainless steel sheet under cryogenic temperatures for design of liquefied natural gas insulation system." *Materials and Design* 57. 2014.
- [18] M. Alizadeh-Sh, and al, "Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties", *Materials and Design* 56, 2014.
- [19] X.W.Chen, and al, "Effects of Mo, Cr and Nb on microstructure and mechanical properties of heat affected zone for Nb-bearing X80 pipeline steels." *Materials and Design*, 2014.
- [20] K.S.Yeung, P. H.Thornton, "Transient thermal analysis of spot welding electrodes.", *Supplement To The Welding Journal*, January 1999.

- [21] C.I.Tsai, O.Jammal, "Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth "International Congress and Exposition, Detroit, Mich, Feb. 1990.
- [22] H. Zhang, "Failure analysis of dissimilar thickness resistance spot welded joints in dualphase steels during tensile shear test. "Materials and Design 55, 2014.
- [23] S.Ji-quan, "Research on mathematical model of thermal deformation resistance of X80 pipeline steel. " Materials and Design 32, 2011.
- [24] R. Nodeh, S. Serajzadeh, A. H. Kokabi, "Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification. "journal of materials processing technology, 2008.
- [25] K. S. Yeung and p. H. Thornton, "Transient thermal analysis of spot welding electrodes. " , Supplement To The Welding Journal, January 1999.
- [26] W.Wang, and al,"Relation among rolling parameters, microstructures and mechanicalproperties in an acicular ferrite pipeline steel", Materials and Design 30 (2009) 3436–3443.
- [27] H. Hotelling, "Analysis of a complex of statistical variables into principal components", Journal of E.P, vol.24 , pp.417- 441 , 1933.
- [28] L.Ferre,"Selection of components in principal component analysis: A comparaisn of methods", computational Statistics and Data Analysis , pp.669-682, 1995 .
- [29] K.Minami, H.Nakajima, and al,"Realtme discrimination of ventricular tachyarrhythmia with fourier-transform neural network", IEEE Trans. Biomed.Eng., vol. 46, no 2 , 1999.
- [30] I.T.Jolliffe, "Principal component analysis", Springer-Verlag, New York, 1986.
- [31] P.Besse, L.Ferre, "Sur l'usage de la validation croisée en analyse en composantes

- principales”, Revue de Statistique Appliquée, XLI (1), pp. 71-76, 1993.
- [32] P.Adriaans , D.Zantinge, ” Data Mining Addison Wesley”, 1996.
- [33] J.M.Franco, “Le Data Warehouse “. EDS-InstitutPrometheus , yrolles, 1997.
- [34] J.Han , M.Kamber,”Data Mining: Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann, 2000.
- [35] Rapport, ” Statistiques et Probabilités”, Tome 2, A.I.D.E.P, Dunod.
- [36] L.rytirova, ”etude de la degradation par l'hydrogene des aciers microallies et duplex. Influence de la microstructure”, vsb – technical university ostrava (cz) ecole centrale paris (fr);2006.
- [37] N.Hagiwara, T.Masuda ,” Efects of prestrain on fracture toughness and fatigue-crack growth of line pipe steels”. Journal of pressure vessel, technology, 123-355, 2001.
- [38] I.Moro, “fragilisation par l'hydrogene gazeux d'un acier ferrito-perlitique de grade API X80 ”, doctorat de l’université de toulouse, 13 novembre 2009.
- [39] T.Trungluu,“dechirure ductile des aciers a haute resistancepour gazoducs (x100) ”, ed n° 432 , sciences des metiers de l’ingénieur, doctorat de l’ecole des mines de paris, le 24 novembre , 2006.
- [40] B.Belahcene , H.I.Faroaun, “ datamining de la classification périodique des éléments ”, Colloque National sur les Techniques de Modélisation et de Simulation en Science des Matériaux à l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbès- Algérie 23- 24/11/2009.
- [41] A.S.Bilat,” Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade : caractérisation et modélisation ”, Thèse, Paris, 2007.

- [42] B.Belahcene , A.Benmoussat, A.Mansri, M.Z.Doghmane ,”Analyze and modeling of damage behavior of a $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ HLE Steel Solicited in Selected Physicochemical medium” , J. Mater. Environ. Sci. 6 (6) 1765-1770 , ISSN : 2028-2508, 2015.
- [43] H.Zhigang , L.W.yuanxun, C.C.chunzh, “A multi-coupled finite element analysis of resistance spot welding process”, Acta Mechanica Solida Sinica, Vol. 19, No. 1, March 2006.
- [44] R.Nodeh, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, “Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification”, journal of materials processing technology 205 , 60–69, 2008.
- [45] A.Benmoussat, M. Traisnel, “Corrosion Study of API 5L X60 Gas Pipelines Steels in NS(4) Simulated Soil, Corrosion of pipelines transporting hydrocarbons”, Biskra, Algérie, Avril 2010.
- [46] M.C.Fatah, “Effects of sulphide ion on corrosion behaviour of X52 steel in simulated solution containing metabolic products species: A study pertaining to microbiologically influenced corrosion (MIC) “, corrosion Engineering Science and Technology 48(3):211-220 , May 2013 .
- [47] L. Larabi, Y.Harek, ” Effect of Iodide Ions on Corrosion Inhibition of Mild Steel in 0.5 M H₂SO₄ by Poly(4-Vinylpyridine”, Portugaliae Electro chimica Acta 22(3):227-247 , January 2004 .

- [48] Y.Abed, Z.Arrar, B.Hammouti, A.Aouniti, S.Kertit, A.Mansri, " An electrochemical study of the action of a poly(vinylpyridine) derivative as inhibitor for corrosion of iron in 1M H₂SO₄ ", J. Chim. Phys. 96 1347-1355, 1999.
- [49] R .Hagiwara, Y. Ito, " Room temperature ionic liquids of alkyimidazolium cations and fluoroanions " , Journal of Fluorine Chemistry , Volume 105, Issue 2, , Pages 221–227, September 2000.
- [50] A. Chetouani, K. Medjahed, S.S. Al-Deyab, B. Hammouti, , I. Warad, A. Mansri, A. Aouniti, " Inhibition of Corrosion of Pure Iron by Quaternized Poly(4-Vinylpyridine)-Graft-Bromodecane in Sulphuric Acid" , Int. J. Electrochem. Sci., 7 6025 – 6043, 2012.
- [51] S.Kertit, F.Chaouket, A.Srhiri, M.Keddou, "Corrosion inhibition of amorphous FeBSiC alloy in 1 m HCl by 3-amino-1, 2, 4-triazole " , J Appl Electrochem (1994) 24: 1139. doi:10.1007/BF00241312.
- [52] A. T.Skotheim, M. Dekker, "Handbook of Conducting Polymers", (1986).
- [53] I.Matsushima , "Uhlig's Corrosion Handbook", R.W. Revie , John Wiley.Sons. Inc, p.515, 2000.
- [54] I.Matsushima,"corrosion and protection", the Society of Materials Science. Japan. Vol.19 , 1980.
- [55] H. Bhandari, V. Choudhary, S.K. Dhawan, "Influence of self-doped poly(aniline-co-4-amino-3-hydroxy-naphthalene-1- sulfonic acid) on corrosion inhibition behaviour of iron in acidic medium", Synth. Met. 161 (2011) 753–762.

- [56] V.S.Sastri, E.Ghali, M.Elboujdaini, “Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions ”, John Wiley. Sons Ltd, 7 NOV 2012, DOI: 10.1002/9780470024546.ch6.
- [57] L.Larabi, Y.Harek, M. Traisnel, A Mansri., “Synergistic Influence of Poly(4-Vinylpyridine) and Potassium Iodide on Inhibition of Corrosion of Mild Steel in 1M HCl “, journal of Applied Electrochemistry, Volume 34, Issue 8, pp 833–839, August 2004.
- [58] B.Belahcene, A .Mansri, A .Benmoussat, “Investigation on the Rheological Behavior of Multigrade Oil under the Effect of Organic and Inorganic Impurities “, engineering, Technology & Applied Science Research , ETASR. 4 N° 6 711-713, 2014.
- [59] M.C. Fatah, M.C. Ismail, and B. Ari-Wahjoedi, “Electrochemical Behavior of X52 Steel in a CO₂ Environment in the Presence of Acetate and Sulfide”, J. Mater. Eng. Perform, 22, p 236–244, 2013.
- [60] “CO₂ Corrosion Rate Calculation Model” , NorsokStandar N° M-506.
- [61] S.Olsen,”CO₂ corrosion prediction by use of Norsok M-506 model-guideline and limitation Corrosion”, Houston, TX: NACE, 623, 2003.
- [62] P. Wattanaphana, T. Sema, R. Idem, Z. Lianga, and P.Tontiwachwuthikul, “Effects of flue gas composition on carbon steel (1020) corrosion in MEA-based CO₂ capture process” International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 19, pp. 340–349, 2013.
- [63] B.Belahcene, A.Benmoussat , AMansri , M.Z.Doghmane, A.Bacetti , K.Sadek , ”Study on Corrosion Behavior of HLE steel solicited in (CO₂)% Selective

Physicochemical medium”, J. Mater. Environ. Sci. 7 (8) 2965-2970, ISSN : 2028-2508, 2016.

[64] B.Belahcene, M.Z Doghmane, K.sadek, ”investigation on corrosion behavior of steel HLE under the Effect of Hazardous component(CO_2)%” , Fifteenth international conference “New Trends on Fatigue and Fracture – fracture and environment, NT2F15”, National polytechnic School of Oran, from 20-23 October 2015.

ANNEXE I

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



Résumé de la thèse

Présenté pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Sciences des matériaux

Par : Brahim BELAHCENE

Sujet

Analyse et modélisation du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique.

Résumé

Le développement de la technique d'assemblage de matériaux a été largement utilisé pour la conception de matériaux de haute résistance. La présente étude montre l'influence des paramètres et les performances d'assemblage par soudure des aciers $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ sur les différentes zones de la structure telles que la zone fondue (FZ), la zone affectée thermiquement (ZAT), et le métal de base (BM). Les effets des charges thermiques, mécaniques et de la tension appliquée sur la variation de la contrainte, taux d'endommagement, et la sollicitation en milieu physicochimique sélectif sont étudiés. Une méthode exploratoire prédictive a été utilisée pour prévoir l'influence de proportions des éléments additifs du tableau périodique sur les propriétés des aciers.

L'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement par corrosion de l'acier HLE $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ ont été déterminés par un modèle axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par l'endommagement thermomécanique et les charges appliquées. L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été déterminés par microscope électronique à balayage (MEB) et spectrométrie EDS.

L'influence de l'environnement et les paramètres physiques sur l'acier HLE $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ et son comportement d'endommagement en corrosion dans un milieu agressif à base NaCl a été étudié en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Les résultats montrent qu'il y a des variations du taux de corrosion par rapport au type de traitement thermique, fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement des échantillons. La résolution de l'équation de Nernst prouve que l'augmentation de la température a un effet direct sur le potentiel d'hydrogène de la solution, la densité de courant et la corrosion du métal. De plus, l'efficacité d'inhibition a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que l'acier $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ a une bonne efficacité.

Une méthode empirique tel que le model Norsok a été appliqué pour déterminer les paramètres sensibles les plus influencés sur la dégradation de matériaux dans un milieu riche en CO_2 . Par conséquent, le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité moyenne, la pression partielle de CO_2 , les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. En outre, l'application de scénarios nous a permis d'évaluer le risque de corrosion.

Mots clés : Acier HLE – corrosion – milieu sélectif – inhibiteur – soudure – modélisation

Introduction

Le développement des techniques d'assemblages des matériaux, comme la soudure a été développé par plusieurs auteurs [1 – 13] et a été largement appliqué dans la fabrication des structures à haute limite d'élasticité HLE pour réduire les zones endommagées, et augmenter la résistance à la variation d'environnements thermique, chimique et mécanique. Le comportement de ces assemblages soudés peut être gouverné par les conditions et les paramètres du processus de soudage.

Le soudage par résistance est un processus gouverné par la loi de Fickou les surfaces métalliques sont assemblées par l'énergie de la chaleur. La résistance à la conduction électrique pendant le soudage par point de deux plaques minces a été reporté [1]. Dans le contexte du comportement, l'évaluation des aciers a été effectuée suivant plusieurs modèles. L'identification des caractéristiques mécaniques non linéaire peut être achevée par test de la tension uniaxiale en fonction de la température [2]. L'assemblage par résistance a un effet sur la microstructure et la transformation métallurgique, cet influence est discernable au niveau des zones affectées thermiquement (ZAT) pour les aciers ferritique [3]. Des atomes comme Mo participe à l'amélioration des propriétés microstructurale et mécanique pour les aciers à haute résistance [4]. La distribution de la chaleur pendant le soudage par résistance varie en fonction du changement de phases de la zone fondue [5]. Ainsi la fusion de zones fondues à un effet sur les propriétés des assemblages métalliques [6]. Le système de refroidissement pendant le processus d'assemblage influe sur le comportement d'assemblages métalliques. Il peut être assuré par l'écoulement d'eau ayant un effet sur la distribution du champ de la température et la contrainte pendant l'opération d'assemblage [7]. Le degré de déformation a une relation avec la résistance à la déformation [8].

Des modèles de couplages entre les propriétés pendant l'opération d'assemblage modélisés par FEM ont été présentés [9]. Les contraintes résiduelles pendant le soudage par point ont été étudiés [10]. Les transitions thermiques peuvent affecter les électrodes du processus du soudage par résistance [11]. Pendant l'assemblage des plaques d'aciers par résistance la formation de la zone fondue augmente [12].

La corrélation entre microstructure et les propriétés mécaniques de la ferrite aciculaire (FA) sous contrôle du procès thermomécanique a été étudié [13].

L'objectif ciblé dans cette étude a porté sur la mise en place d'une étude sur le comportement en endommagement des assemblages métalliques sous sollicitations de contraintes thermomécaniques et des facteurs environnementaux tels que : structurel, mécanique, thermique, chimique...

Dans une première étape, l'étude a porté sur les propriétés des nuances d'aciers et l'effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électrothermomécanique. Pour estimer le potentiel de prédiction de la classification des éléments additifs, on s'est intéressé à l'une des méthodes du Datamining, c'est la méthode d'Analyse en Composante Principale « ACP ».

Cette étape passe par la conception d'une base de donnée des propriétés d'aciers et la réduction de leur dimensions par calcul des valeurs propres et des vecteur propres réalisée à l'aide du code de calcul MATLAB , méthode du Datamining pour le but de connaître les corrélations entre les nuances d'aciers d'une part et leurs propriétés en fonctions des élément d'alliages d'autre part , cette première constatation a pour but d'enrichir l'aspect physique et métallurgique avant de choisir le matériaux dans le test du simulation. L'étude exploratrice prédictive connue par la méthode datamining explique bien le comportement des aciers en fonctions des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments alliages. Cette méthode nous a permis de déterminer les conditions de travail comme l'environnement thermique tel que le refroidissement pendant le processus de soudage, l'optimisation de l'épaisseur des tôles, les paramètres principaux qui assurent l'opération du soudage, qui sont attribués dans la simulation comme des conditions aux limites.

L'étude a porté ensuite sur l'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement à faible teneur en Carbone des aciers HLE. Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par endommagement thermomécanique et des charges appliquées. L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été effectués par microscopie électrique à balayage (MEB) et par spectrométrie EDS. Le modèle utilisé dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et dans les conditions aux limites). Les

conditions aux limites sont exploitées à la base des résultats obtenus par l'effet des éléments d'addition.

Les équations gouvernantes dans l'assemblage par résistance ont été présentées. Le modèle électro-thermomécanique utilisé dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Les conditions aux limites sont exploitées à la base des résultats obtenus. L'objectif dans cette partie est l'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement de l'acier HLE

$C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$. Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par endommagement thermomécanique et des charges appliquées. L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été effectués par microscopie électrique à balayage (MEB) et par spectrométrie EDS. Les échantillons ont été exposés à des charges externes. La contrainte maximale équivalente est déterminée à 4312 ° C avec 3,7% de déformation maximale. Ainsi, la distribution du champ de contraintes, déformation, température, champs électriques, sont présentées sous formes des graphes et de cartes. La distribution de ces paramètres sont visualisés sur la zone fondue ZF jusqu'au métal de base MB dans l'échantillon modélisées sous formes des plaques minces. La zone d'endommagement repérée est la plus affecté par la variation de la tension électrique appliqué au cours de la simulation d'assemblage par résistance.

La troisième partie de cette étude a porté sur l'étude de l'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur l'acier HLE ($C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$) et son comportement en corrosion dans un milieu agressive à base de NaCl en s'approchant du contexte industriel dans l'industrie pétrolière. La méthode d'émersion (perte de poids), la résolution de l'équation Nernst et l'application des scénarios pour dévoiler l'effet de l'évolution du pH, température, l'échange électronique ont été appliqués.

L'efficacité inhibitrice a été déterminée par calcul théorique (méthode mécanique moléculaire et semi-empirique).

La quatrième partie de l'étude a portée sur l'application des méthodes empiriques telles que le model NORSOK pour déterminer les paramètres sensibles à la dégradation des aciers. Le taux de corrosion est estimé par calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité, la pression partielle de CO₂, les

paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Le risque de corrosion a été déduit de cette étude.

Dans ces dernières étapes, l'analyse et la modélisation du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités par des milieux sélectifs physicochimique NaCl et CO₂ ont été présentés.

L'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur acier HLE

C_{0.12} % Mn_{1.02}% Si_{0.29}% et son comportement en endommagement en corrosion dans un milieu agressive à base NaCl a été étudiée en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Nous présenterons dans le premier chapitre une synthèse bibliographique sur le matériau d'étude(aciers HLE), le procédé d'assemblage thermomécanique, la modélisation numérique par les éléments finis, la protection par inhibition, la mécanique moléculaire et semi empirique et les modes d'endommagements dans les milieux sélectifs

Le second chapitre sera consacré à l'étude des propriétés des nuances d'aciers et l'effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électro thermomécanique par application de la méthode du Datamining, Analyse en Composante Principale « ACP ».

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les équations gouvernantes du comportement en endommagement électro-thermomécaniques et validation du modèle.

Le quatrième chapitre est une étude expérimentale portant sur le comportement en corrosion des aciers C_{0.12}%Mn_{1.02}%Si_{0.29}% HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique CO₂%.

Le cinquième chapitre portera sur les résultats et leurs discussions et nous terminerons cette thèse par une conclusion et les perspectives

1. Synthèse bibliographique

Le présent chapitre permet de situer notre recherche avec celle qui existe dans la littérature, soit celui de la science des matériaux, et la physicochimie des milieux. Plusieurs disciplines se sont intéressées à l'étude du comportement des matériaux à différentes limite d'élasticité de nuance d'acier à base de carbone, les techniques de caractérisation mécaniques et chimiques, les procédés d'assemblages par le couplage entre les forces physiques, mécaniques, thermiques, et chimiques qui sont des solutions nodales et des paramètres de caractérisation à investiguer.

Dans notre cas, on s'intéressera aux caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, et philosophiques pour assurer cette dynamisation. Du point de vue performance, les caractéristiques de matériaux sont sensibles au type d'environnements chimiques, ce qui provoque différents modes d'endommagement. Le diagnostic de type d'endommagement permet de choisir le type de protection. Des modèles en chimie théorique tel que la mécanique moléculaire et semi empirique y sont exploitées pour déterminer certaine efficacité d'inhibition des monomères et polymères unitaires.

Il y a presque une trentaine d'années où les aciers à Haute Limite d'Élasticité sont apparus dans le marché mondial surtout dans les domaines pétroliers, maritimes, et automobiles.... Des spécifications sont variées suivant le besoins du marché et la limite économique, montre quelques spécifications mécaniques des aciers de grade API(American Petroleum Institute).

La technologie d'assemblage ou de réparation des pièces métalliques par différentes méthodes tel que : métal gaz inerte (MIG), métal gaz actif (MAG), tungstène gaz inerte(TIG)et par résistance où les résultats de soudage sont différents particulièrement dans les zones fondues (ZF).Les zones affectées thermiquement (ZAT) dépendent de plusieurs paramètres : la méthode de soudage, absence des impuretés, le nombre de cycle appliqué, le temps de soudage et le processus de refroidissement. Ces procédés consistent à assembler des pièces métalliques à l'aide d'un apport de chaleur soit par apport de métal (soudage par cordon fondu) ou sans apport de métal comme le soudage par résistance. Ce qui confère à l'assemblage soudé une continuité métallique. Des études paramétriques sur le processus de soudage par résistances peuvent être effectuées par des modèles axisymétriques [7].

Le développement des techniques d'assemblages des matériaux a été largement appliqué dans la fabrication des structures à haute limite d'élasticité pour un objectif de réduction des zones endommagées, l'augmentation des résistances à la variation d'environnements thermiques et chimiques, mécanique. L'assemblage des métaux par résistance est largement utilisé dans des applications industrielles comme industrie automobile, les systèmes à base des plaques minces, maintenance et la réparation des structures métalliques.

Le comportement des assemblages des structures métalliques peuvent être gouverné par les conditions et les paramètres du processus de soudage. Le soudage par résistance est un processus gouverné par la lois de Fick ou les surfaces métalliques adhèrent par l'énergie de la chaleur. La résistance à la conduction électrique pendant le soudage par point de deux plaques minces a été reporté [1].

L'évaluation des aciers dans le contexte comportement a été amplement reporté et réviser par beaucoup des chercheurs en sciences des matériaux. Dans ce sens, l'identification des caractéristiques mécaniques non linéaire peut être achevée par test de la tension uniaxiale en fonction de la température dans le cas des aciers 304L [2]. La résistance au soudage par résistance a un effet sur la microstructure et la transformation métallurgique, cette influence est discernable au niveau des zones affectées thermiquement (ZAT) pour les aciers ferritiques de type AISI 430 [3] quelques atomes comme Mo participe dans l'amélioration des propriétés de la microstructure et mécanique pour les aciers à haute résistance [4].

La distribution de la chaleur pendant le soudage par résistance change en fonction du mouvement de la zone fondue [5] ainsi le grand mouvement (par fusion) des zones fondues a un effet sur les propriétés des assemblages métalliques [6].

Le système de refroidissement pendant le processus d'assemblage est nécessaire, l'écoulement d'eau a un effet sur le champ de la température et la distribution de stress pendant l'opération d'assemblage le cas de l'acier [7], le degré de la déformation a une relation avec la résistance à la déformation pour l'acier X80 [8].

Des modèles de couplages entre des propriétés pendant l'opération d'assemblages modélisées par FEM ont été présentées dans [9]. Les contraintes résiduelles pendant le soudage par point ont été reporté [10]. Les transitions thermiques peuvent affecter les électrodes du processus du soudage par point [11]. Pendant l'application de soudage

par point la formation de la zone fondue augmente[12].La corrélation entre la microstructure et les propriétés mécaniques pour la ferrite aciculaire (FA) sous contrôle du procès thermomécanique a été étudié [13] .

Par ailleurs le retardement ou bien la protection contre le phénomène de dégradation du matériau par corrosion peut être achevé par l'application des inhibiteurs. D'une façon globale, un inhibiteur peut modifier l'accélération de corrosion d'un métal. D'une autre façon parallèle, il doit avoir une stabilité chimique, et thermique. Plusieurs travaux scientifiques se sont intéressés à ce sujet [17]

2. Effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électro thermomécanique par application de la méthode du Datamining

Pour estimer le potentiel de prédiction de la classification des éléments d'alliages, on s'intéresse à l'une des méthodes du Datamining, c'est la méthode d'Analyse en Composante Principale « ACP ».

Cette étape passe par la conception d'une base de donnée des propriétés d'aciers et la réduction de leur dimensions par calcul des valeurs propres et des vecteur propres réalisée à l'aide du code de calcul MATLAB , pour le but de connaitre les corrélations entre les nuances d'aciers d'une part et leurs propriétés en fonctions des élément d'alliages d'autre part , cette première constatation a pour but d'enrichir l'aspect physique et métallurgique avant de choisir le matériaux dans le test du simulation. L'étude exploratrice prédictive connue par la méthode datamining explique bien le comportement des aciers en fonctions des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments alliages. Cette méthode nous a permis de déterminer les conditions de travail comme l'environnement thermique tel que le refroidissement pendant le processus de soudage, l'optimisation de l'épaisseur des tôles, les paramètres principaux qui assurent l'opération du soudage, qui sont attribués dans la simulation comme des conditions aux limites.

La proportion des éléments additifs tels appartenus au tableau périodique influent sur les propriétés des aciers. Suivant leur proportion, ces éléments octroient à l'acier des propriétés spécifiques déterminées. En existence de plusieurs éléments, l'effet peut

être amplifié. On trouvera ci-après une description prédictive des principales influant sur l'acier.

L'analyse des données est une étape importante pour comprendre l'effet des éléments d'alliages sur le comportement des aciers sous contrainte électrothermomécanique avant de faire déterminer les paramètres influents sur le comportement des nuances d'aciers, et de dévoiler les conditions aux limites qui seront appliquées dans notre simulation ce que nous allons présenter dans le chapitre IV. La présente méthode consiste à regrouper les objets d'un ensemble de données en classes homogènes [14],[15]. Elle permet de trouver un axe u , issu d'une combinaison linéaire des X_n tel que la variance du nuage autour de cet axe soit maximale. Les nouvelles variables, appelées composantes principales (PC), sont non corrélées, et sont ordonnées par fraction de l'information totale que chacune contiennent [14][16].

3. Analyse et modélisation du comportement thermomécanique et l'évaluation du taux endommagement de l'acier HLE

Le but de ce chapitre est l'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement de l'acier HLE $C_{0.12} \% Mn_{1.02} \% Si_{0.29} \%$. Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par endommagement thermomécanique et des charges appliquées. Le modèle utilisé dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Les conditions aux limites sont exploitées à la base des résultats obtenus. Les échantillons ont été exposés à des charges externes. La contrainte maximale équivalente est obtenue à $4312^\circ C$ avec $3,7\%$ de déformation maximale. Ainsi, la distribution du champ de contraintes, déformation, température, champ électriques sont présentées sous formes des graphes et cartes. La distribution de ces paramètres estimés ont visualisé la zone fondue ZF jusqu'au métal de base MB dans l'échantillon modélisés sous formes des plaques minces, et la zone endommagée est la plus affectée par la variation de la tension électrique appliqué au cours de la simulation d'assemblage par résistance.

L'étude du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique à base de CO₂ a été faite par l'application des méthodes empiriques tel que le model NORSOK pour déterminer les paramètres sensibles à la dégradation des aciers. Le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité, la pression partielle de CO₂, les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Cette application nous a permis d'évaluer le risque de corrosion et de conclure que :

- L'augmentation de la concentration CO₂ accroît la fugacité (pression partial).
- L'augmentation de l'acidité du milieu a un rapport direct avec la nature de l'eau de saumure et de la concentration de CO₂.
- L'augmentation du potentiel de l'hydrogène à une concentration de CO₂ donnée affecte la vitesse de corrosion.
- L'augmentation de la concentration de CO₂ à un potentiel de l'hydrogène donné affecte également la résistance à la corrosion de l'acier.
- L'augmentation de la concentration de CO₂ avec le potentiel d'hydrogène affecte fortement la résistance à la corrosion de l'acier.

4. Analyse et modélisation du comportement en endommagement des aciers C_{0,12%}Mn_{1,02%}Si_{0,29%} HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique

L'analyse et la modélisation du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités par des milieux sélectifs physicochimique NaCl et CO₂ ont été présentées.

L'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur l'acier HLE

C_{0,12%} Mn_{1,02%} Si_{0,29%} et son comportement en endommagement par corrosion dans un milieu agressive à base NaCl a été étudiée en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Les résultats montrent que les variations du taux de corrosion par rapport au type de traitement thermique, fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement des échantillons. La résolution de l'équation de Nernst prouve que l'augmentation de la température a un effet direct sur le potentiel d'hydrogène de la solution, la densité de courant et la corrosion du métal.

De plus, l'efficacité d'inhibition a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que $C_{0.12\%}$ $Mn_{1.02\%}$ $Si_{0.29\%}$ acier a une bonne efficacité.

L'Étude de l'interaction entre le métal et le liquide est l'une des méthodes de prévention pour trouver des solutions fiables contre de phénomènes de dégradation sous l'effet d'agressivité du milieu. Plusieurs équipements dans l'industrie pétrolière sont essentiellement réalisés en utilisant l'acier HLE (haute limite d'élasticité) comme les installations pétrolières et gazières, des tubes de production , pipeline de transport et les tubes de refroidissement ,réservoirs de stockages .

La variation de la température et de charges externes. Ainsi, la protection de la structure d'acier API 5LX60 contre sol simulé à base NS4 est montrée par utilisation des poly-phosphates [17]. Les molécules sulfures peuvent diminuer le taux de l'API 5L X52 échantillon d'acier de la corrosion dans l'environnement riche en CO_2 [18].

Le poly (4-vinylpyridine) réduit les taux de corrosion de l'acier en présence de H_2SO_4 [19]. La réduction de densité de courant cathodique et l'augmentation de la résistance de polarisation de fer en présence d'acide sulfurique peut être réalisée en poly (4-vinylpyridine poly-3-oxyde d'éthylène) [20]. Heureusement, de nouveaux procédés ont été développés pour la modélisation chimiques tels que le modèle de corrélation établie sur le potentiel d'oxydation électrochimique de plusieurs anions [21] .

La stabilité de l'inhibition de poly (4-vinylpyridine) quaternisé greffe en bromodécane dans l'acide sulfurique sur la ferrite est rapporté dans [22]. Par conséquence, le radical de cette dernière et son dérivative a été appliqué comme inhibiteur afin de protéger le métal pur comme le fer, le cuivre et le zinc [23-24]. Les normes des bandes d'essais et les expressions de la corrosion ont été rapportés dans [25-26-27-28].L'inhibition de la corrosion de l'acier doux dans HCl en utilisant P4VP est due des phénomènes de chimisorption [29]. D'autre part, l'application de méthodes de protection oblige à identifier et étudier le comportement des matériaux sous contraintes chimiques, mécaniques, conception géométrique, contrainte thermique avant l'utilisation d'inhibiteurs de l'interface (phase vapeur, phase liquide (anodique, adsorption cathodique et mixte)).

Le but de ce chapitre est l'évaluation expérimentale du taux de corrosion d'acier $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ affecté par choc thermique qui simule la zone affectée thermiquement (ZAT) dans l'assemblage des plaques d'aciers modélisées.

La variation d'acidité est introduite en utilisant différentes concentrations de NaCl. Les techniques expérimentales sont atteintes par la mesure de perte de métal après l'attaque chimique pendant 720 heures réparties en 10 étapes. L'estimation de l'efficacité du polymère a été déterminée par calcul physique en utilisant deux méthodes : Méthode mécanique moléculaire et semi-empirique.

Dans partie portante sur l'étude de l'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur l'acier HLE ($C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$) et son comportement en corrosion dans un milieu agressive à base de NaCl en s'approchant du contexte industriel dans l'industrie pétrolière. Nous avons montrés que les variations du taux de corrosion par rapport au type de traitement thermique et fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement des échantillons. La résolution de l'équation de Nernst prouve que l'augmentation de la température a un effet direct sur le potentiel d'hydrogène de la solution, la densité de courant et la corrosion du métal. De plus, l'efficacité d'inhibition a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ acier a une bonne efficacité.

La présence de composants dangereux tels que (CO_2 , H_2S , Cl ...) dans les gisements de pétrole et de gaz et gaz à condensat peuvent fournir des phénomènes indésirables tels que la détérioration des propriétés des matériaux par phénomène de dégradation. Les entrées de l'eau et de la variation du niveau de plan d'eau affectent directement l'énergie de drainage de gaz et de pétrole. En outre, les percées l'eau affectent également de potentiels des puits.

L'interaction entre le CO_2 et l'eau fait des ions carbonates qu'il produise après l'interaction des carbonates avec fer solide ($FeCO_3$). Par conséquent, il est un bon paramètre pour contrôler phénomène de corrosion dans les installations de réseau collectées et des processus.

Étude de l'interaction entre les métaux et les fluides est l'une des méthodes préventives pour trouver des solutions fiables contre phénomène de dégradation en

présence d'un milieu agressif [30]. Plusieurs équipements dans l'industrie pétrolière sont essentiellement réalisés à base des aciers HLE (haute limite d'élasticité) [30]. Les molécules sulfures peuvent diminuer le taux de l'API 5L X52 échantillon d'acier de la corrosion dans un environnement de CO₂ [31].

L'évaluation du taux corrosion de trois états de l'acier affecté par choc thermique et sollicités en milieu agressif corrosion utilisant différentes concentrations de NaCl qui simulait phénomène de corrosion dans l'industrie pétrolière est rapportée [32].

Le choc thermique et la nature du fluide de refroidissement influe sur le comportement à la corrosion d'acier C_{0.12%} Mn_{1.02%} Si_{0.29%} en milieu physico Sélective comme NaCl.

5. Résultats et discussions

Dans l'analyse et la modélisation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement de l'acier HLE C_{0.12%} Mn_{1.02%} Si_{0.29%}, le modèle appliqué dans la modélisation est axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites) à deux dimensions pour analyser l'effet des paramètres de résistance d'assemblage électrique sur le comportement thermomécanique et le taux d'endommagement des aciers HLE. Il a été montré qu'il existe des endommagements en trois zones la zone fondue ZF, Zone affectée thermiquement ZAT et le métal de base MB, qui peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des matériaux et aux variations des contraintes internes. La zone d'endommagement est fortement affectée par la variation de la tension appliquée, car la déformation thermique et la concentration de contraintes sont plus accentuées lorsque la charge électromécanique appliquée augmente. Dans cette étude, le métal d'assemblage est affecté par la variation de dommages dans les différentes zones.

L'étude du comportement en endommagement des aciers HLE sollicités dans un milieu sélectif physicochimique a base de CO₂ a été faite par l'application du modèle empirique NORSOK. Le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité, la pression partielle de CO₂, les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Cette application nous a permis d'évaluer le risque de corrosion et de conclure que :

- L'augmentation de la concentration CO_2 accroît la fugacité (pression partial).
- L'augmentation de l'acidité du milieu a un rapport direct avec la nature de l'eau de saumure et de la concentration en CO_2 .
- L'augmentation du potentiel de l'hydrogène à une concentration de CO_2 donnée affecte la vitesse de corrosion.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 à un potentiel de l'hydrogène donné affecte également la résistance à la corrosion de l'acier.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 avec le potentiel d'hydrogène affecte fortement la résistance à la corrosion de l'acier.

L'influence de l'environnement et des paramètres physiques sur l'acier HLE $\text{C}_{0.12\%}$ $\text{Mn}_{1.02\%}$ $\text{Si}_{0.29\%}$ et son comportement en endommagement par corrosion dans un milieu agressif à base de NaCl a été étudiée par la méthode de perte de poids. Les résultats montrent que le taux de corrosion varie en fonction de plusieurs paramètres : type de traitement thermique, le fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement lors du processus d'assemblage par soudure. L'efficacité inhibitrice a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que $\text{C}_{0.12\%}$ $\text{Mn}_{1.02\%}$ $\text{Si}_{0.29\%}$ acier a une bonne efficacité.

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Le taux de corrosion a une relation avec la forme, la taille des échantillons et la concentration du milieu agressif.
- La densité de courant et l'acidité du milieu par augmentation de la température a un impact direct sur le comportement à la corrosion de métal.
- Les molécules ayant une faible électronégativité que le métal de base peuvent le protéger contre les milieux agressifs.
- Le polymère $(\text{C}_7\text{H}_7\text{N})_n$ a une bonne zone de couverture sur le métal de base montré par la distribution de la densité de charge et le potentiel électrostatique.

6. Conclusion

Le travail présenté dans ce manuscrit a porté sur l'étude du comportement de l'acier à haute limite d'élasticité HLE sollicité par des contraintes externes électrothermomécaniques et un milieu sélectif physicochimique à base de NaCl et CO₂.

À cet effet une recherche bibliographique a été établie afin de tracer les chemins de l'étude et d'apprécier sa faisabilité au regard de nos objectives: évaluation de l'endommagement thermomécanique et physicochimique du matériau affecté par des contraintes d'assemblage par résistance.

Dans l'étude bibliographique, nous avons présenté les propriétés de nuance d'acier à bas carbone, les techniques de caractérisation mécaniques et chimiques, les procédés d'assemblages par le couplage entre les forces physiques, mécaniques, thermiques, et chimiques. Du point de vue performance, les caractéristiques des matériaux sont sensibles au type d'environnements chimiques, ce qui provoque différents modes d'endommagement. Le diagnostic de type d'endommagement permet de choisir le type de protection. Des modèles en chimie théorique tel que la mécanique moléculaire et semi empirique ont été exploités pour déterminer l'efficacité inhibitrice des monomères et polymères unitaires.

L'étude exploratoire prédictive connue par la méthode datamining explique bien le comportement des aciers en fonctions des paramètres physico-chimique, mécanique et les éléments alliages, cette méthode nous a permis de déterminer les conditions de travail comme l'environnement thermique lié au refroidissement lors du processus de soudage, optimisation de l'épaisseur des tôles, les paramètres principaux qui assurent l'opération du soudage, qui ont été attribués dans la simulation comme les conditions limites.

Le modèle bidimensionnel axisymétrique du processus de soudage par résistance, nous a permis de réaliser une microstructure sur un plan de la topologie. Ainsi, il permet de définir les changements des propriétés au voisinage de la zone affectée thermiquement. Les résultats obtenus montrent que le comportement macroscopique des plaques d'aciers étudié à une corrélation directe avec les contraintes provoquées pendant l'opération du soudage par résistance.

Le comportement en endommagement thermomécanique des plaques, a été présenté par une visualisation graphique et image, qui comportent (le déplacement, la distribution des contraintes, déformation, la température, taux endommagement.).

Le choc thermique et la nature du fluide de refroidissement influent sur le comportement à la corrosion d'acier $C_{0.12\%} Mn_{1.02\%} Si_{0.29\%}$ en milieu physico Sélective comme NaCl.

- Le taux de corrosion a une relation avec la forme, la taille des échantillons et la concentration de milieu agressif.
- La densité de courant et de l'acidité du milieu par augment par la variation de la température qui a un impact direct sur le comportement à la corrosion de métal.
- Les molécules ont faible électronégativité que le métal de base peuvent être le protéger contre les milieux agressifs.
- Le polymère (C_7H_7N) n a une bonne zone de couverture sur métal de base prouvé par la distribution de densité de charge et le potentiel électrostatique.
- L'augmentation de la concentration CO_2 accroît la fugacité de la pression totale.
- L'augmentation de l'acidité de milieux à un rapport direct avec la nature de l'eau de saumure et de la concentration de CO_2 .
- L'augmentation du potentiel de l'hydrogène à une concentration de CO_2 donnée affecte la vitesse de corrosion.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 à un potentiel de l'hydrogène donné affecte également la résistance à la corrosion de l'acier.
- L'augmentation de la concentration de CO_2 avec potentiels d'hydrogène affecte fortement la résistance à la corrosion de l'acier.

Bilan scientifique

Les travaux scientifiques dans le cadre de la thèse de doctorat ont fait l'objet de publications et communications internationales :

1. Publications internationales dans un journal scientifique avec un facteur d'impact et indexées dans la base électronique SCOPUS

- [1] B.Belahcene,A.Benmoussat, A. Mansri and M.Doghmane,"*analyze and modeling of damage Behaviour of C_{0.12%}Mn_{1.02%} Si_{0.29%} HLE steel solicited in selected physicochemical medium*",J. Mater. Environ. Sci. 6 (6) (2015) 1765-1770. ISSN : 2028-2508

http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol6/vol6_N6/207-JMES-1659-2015-Belahcene.pdf

- [2] Belahcene B , Benmoussat A , Mansri A , Doghmane M.Z , Bacetti A , Sadek K .2016,"*Study on Corrosion Behavior of HLE steel solicited in (CO₂)% Selective Physicochemical medium*",J. Mater. Environ. Sci. 7 (8) 2965-2970,ISSN : 2028-2508 .

http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N8/309-JMES-2316-Belahcene.pdf

2. Publications internationales avec un facteur d'impact et indexées dans la base électronique Thomson WOS

- [1] BelahceneB.,MansriA.andBenmoussatA., "*InvestigationontheRheologicalBehaviorof Multigrade Oil under the Effect of Organic and Inorganic Impurities*",Engineering,Technology&Applied Science Research, ETASR journal Vol. 4 N° 6 (2014) 711-713.

<http://etasr.com/index.php/ETASR/article/download/513/271>

3. Communications internationales

- [1] B Belahcene and A.Benmoussat, "*thermomechanical behavior of API X80 steels for pipelines under the spot welding effect*",6th symposium on hydrocarbons &chemistry ISHC6, Algiers, October the 13th to 15th ,2012, <http://www.ishc6.dz/>

- [2] B Belahcene, M.Z Doghmane and K.sadek, "*investigation on corrosion behaviour of steel HLE under the Effect of Hazardous component CO₂%* " Fifteenth international conference " ,New Trends on Fatigue and Fracture – fracture and environment, NT2F15, National polytechnic School of Oran, from 20-23 October 2015

References

- [1]. Y.J.Cho, ,H.S.Cho, ,“A study on the electric conductance of resistance spot welds -the contact conductance between two thin plates.“ *Mechanics Research Communications* Volume 12, Issue 6, 1985.
- [2]. K. Jeong-Hyeon,“Numerical model to predict deformation of corrugated austenitic stainless steel sheet under cryogenic temperatures for design of liquefied natural gas insulation system.“ *Materials and Design* 57. 2014.
- [3]. M. Alizadeh-Sh , and al ,“ Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties.“, *Materials and Design* 56,2014.
- [4]. Xiao-wei . Chen , and al,“ Effects of Mo, Cr and Nb on microstructure and mechanical properties of heat affected zone for Nb-bearing X80 pipeline steels.“ *Materials and Design*, 2014.
- [5]. K. S. Yeung and p. H. Thornton,“Transient thermal analysis of spot welding electrodes.“ ,*Supplement To The Welding Journal*, January 1999.
- [6]. C.I.Tsai, o. Jammal,“Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth“ *International Congress and Exposition, Detroit, Mich, Feb. 1990.*
- [7]. Li. Chaowen , and al ,“ Three-dimensional finite element analysis of temperature and stress distributions for in-service welding process.“ *Materials and Design* 52,2013.
- [8]. H.Zhang,“Failure analysis of dissimilar thickness resistance spot welded joints in dual-phase steels during tensile shear test.“*Materials and Design* 55, 2014.
- [9]. Sun Ji-quan,“Research on mathematical model of thermal deformation resistance of X80 pipeline steel.“*Materials and Design* 32, 2011.
- [10]. R. Nodeh, S. Serajzadeh, A.H.Kokabi,“Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification.“*journal of materials processing technology*, 2008.
- [11]. K. S. Yeung and p. H. Thornton,“Transient thermal analysis of spot welding electrodes.“ ,*Supplement To The Welding Journal*, January 1999.
- [12]. C.I.Tsai, o. Jammal,“Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth“ *International Congress and Exposition, Detroit, Mich, Feb. 1990.*

- [13]. W.Wang,andal,“Relation among rolling parameters,microstructures and mechanical properties in an acicular ferrite pipeline steel“,Materials and Design 30 (2009) 3436–3443.
- [14]. H. Hotelling,"Analysis of a complex of statistical variables into principal components", Journal of E.P, vol.24 , pp.417- 441 , 1933.
- [15]. L. Ferre, "Selection of components in principal component analysis: A comparaiso of methods", Computational Statistics and Data Analysis , pp.669-682, 1995 .
- [16]. Besse, P., and Ferre, L., "Sur l'usage de la validation croisée en analyse en composantesprincipales", Revue de Statistique Appliquée, XLI (1), pp. 71-76, 1993.
- [17]. Benmoussat A., Traisnel M., Springer Science. B.V.Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop. (2011).
- [18]. Fatah M.C., ASM International.JMEPEG. (2013) 236–244.
- [19]. Larabi L., Harek Y., P.Electrochim.Acta. 22 (2004) 227–247.
- [20]. Abed Y., Arrar Z., Hammouti B., Aouniti A., Kertit S.,Mansri A., J. Chim. Phys. 96 (1999) 1347-1355.
- [21]. Hagiwara R., Ito Y.,J.Fluorine.Chem.105 (2000) 221–227.
- [22]. Chetouani A., MedjahedK.,Al-DeyabS.S.,Hammouti B.,WaradI,Mansri A.,Aouniti A., Int. J. Electrochem. Sci. 7 (2012) 6025 – 6043.
- [23]. Bhandari H., Choudhary V., Synth. Met. 161 (2011) 753.
- [24]. Kertit S., ChaouketF., J.App.Electrochem.24 (1994) 1139.
- Skothaim T.A., Dekker M.NY.2. Handbook of ConductingPolymers. (1986).
- [25]. Matsushima I., RevieR.W.,JohnWiley.Sons. Inc. Uhlig's Corrosion Handbook. (2000).p.515 .
- [26]. Matsushima I.,The Society of MaterialsScience. Japan. Vol.19 (1980) p.19 .
- [27]. Sastri V.S., Ghali E., Elboudjaini M., John Wiley. Sons Ltd.Chichester,UK. ISBN: 9780470024546 (2007).
- [28]. Larabi L., Harek Y., Traisnel M., Mansri A., J.App.Electrochem. 34 (2004) 833–839.
- [29]. Belahcene B., MansriA,Benmoussat A, ETASR. 4 (2014) N° 6 711-713.

- [30]. B.Belahcene et al'' Analyze and modeling of damage behavior of a C0.12%Mn1.02%Si0.29% HLE Steel Solicited in Selected Physicochemical medium "J. Mater. Environ. Sci. 6 (6) (2015) 1765-1770, ISSN: 2028-2508.
- [31]. A.Benmoussat, M.Traisnel, Springer Science. B.V. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop. (2011).
- [32]. M.C.Fatah, ASM International. JMEPEG. (2013) 236–244.

JMES is an Open Access Journal



Journal of Materials and Environmental Science (ISSN: 2028-2508) is a **Tri-monthly peer-reviewed Journal**.

JMES publishes original papers, brief communications, reviews and letters related to every aspect of theory and practice of Material chemistry, Environment Science and Analytical Chemistry, as well as articles in which topics on history, science education etc

The Language should be english except for some documents (papers, reviews...) may be accepted in french

JMES is publishing free of charge excellent research papers, studies and reviews (**publication gratuite**).

Universal Impact Factor 2013 :1.0923

Global Impact Factor 2013: 0.452

Current Impact Factor (JIF) 2014 : 1.21

JMES is indexed and abstracted by:

- Chemical Abstracts Service (CAS),
- SciFinder,
- Open J-Gate,
- DOAJ,
- University of Cambridge,
- Scholar Google,
- Genamics Journalseek,
- abc.chemistry,
- Ulrichsweb,
- OhioLINK,
- Pageinsider,
- British Library England
- WZB
- Biblioteca
- IndexCopernicus
- Open Access Journals Search Engine(OAJSE)
- The Open Access Digital Library
- WorldCat
- Kun Shan University Library
- Birmingham Public Library
- Indian University Bloomington
- **SCOPUS**
- Wells College
- NYU Libraries
- Colciencias
- Stanford University Librairies
- UNESCO
- CASSI SCIMAGO

http://www.jmaterenvirosci.com/Document/vol6/vol6_N6/207-JMES-1659-2015-Belahcene.pdf

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

**Direction Générale de la Recherche Scientifique
et du Développement Technologique**

N°: 762/...../D.G.R.S.D.T/2014.

Alger, le
17 NOV. 2014

**A Madame la Présidente et Messieurs les Présidents
des Conférences Régionales des Universités**

Objet : Décisions de soutenabilité et de reconnaissance des revues scientifiques.

Madame, Messieurs,

Suite aux décisions prises lors de la réunion de la Commission Scientifique Nationale de Validation des Revues Scientifiques, j'ai l'honneur de vous transmettre, aux fins de diffusion auprès des établissements d'enseignement supérieur, les conclusions suivantes :

- Liste de revues pour soutenabilité du doctorat : Les membres de la commission ont débattu sur le sujet de la soutenabilité des thèses de doctorat et il a été adopté les listes de revues scientifiques suivantes pour les soutenances de doctorat :

- La liste des revues scientifiques de all databases de Thomson Reuters,
- La liste des revues scientifiques de Scopus,
- La liste des revues scientifiques d'European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences (ERIH plus),
- La liste des revues scientifiques de l'Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (AERES),
- La liste des revues scientifiques d'Australian Business Deans Council (ABDC),
- La liste des revues scientifiques du CNRS pour les revues en économie,
- La liste des revues scientifiques de JOURNAL QUALITY LIST,
- La liste des revues scientifiques de Financial Times.

Les conseils scientifiques des établissements d'enseignement supérieur peuvent proposer et suggérer des revues scientifiques, jugées éligibles et ne figurant pas dans ces listes, à la commission scientifique

nationale, via son secrétariat assuré par la DGRSDT, pour statuer sur la pertinence et l'éligibilité de ces revues scientifique pour soutenance de doctorat.

- Les revues scientifiques prédatrices : Les revues scientifiques prédatrices seront déterminées et supprimées, par la commission scientifique nationale de validation des revues scientifiques, de la base des revues scientifiques MESRS.
- Position du doctorant dans la publication : Il a été décidé que dans le domaine des Sciences et techniques et ce à partir du 01 Janvier 2015, date de soumission de l'article scientifique, le nom du doctorant doit figurer à la première position dans l'article, publié dans la revue scientifique retenue par la commission scientifique nationale. Exception est faite au domaine des mathématiques où par tradition l'ordre des auteurs sont cités suivant l'ordre alphabétique. Toutefois, si le directeur de thèse juge opportun de mettre son nom en premier, il doit le justifier par écrit au conseil scientifique. Dans le domaine des sciences humaines et sociales, le nom du directeur de thèse doit figurer dans la publication sauf sur son autorisation écrite et remise au conseil scientifique.
- Affiliation de l'établissement d'enseignement supérieur dans la publication du doctorant : Il a été décidé que l'affiliation de l'établissement d'inscription de la thèse doit figurer dans l'article, publié dans la revue scientifique retenue par la commission scientifique nationale, du doctorant.
- Les revues scientifiques nationales : Les membres de la commission ont souligné la nécessité de définir une stratégie et une politique pour la promotion des revues scientifiques nationales. De ce fait, il a été adopté la démarche suivante : l'étude et l'éligibilité d'une revue scientifique nationale, passe par :
 - La normalisation et la standardisation de la revue scientifique nationale qui sera assurée par les agences thématiques de recherche
 - L'aspect scientifique de la revue et sa reconnaissance sera du ressort de la commission scientifique nationale qui statue sur la notoriété et l'inclue dans la base des revues scientifiques MESRS.

La commission scientifique nationale accompagne les revues scientifiques nationales non retenues pour leur promotion et leur inclusion future dans la base des revues scientifiques MESRS.

Veillez agréer, Mesdames, Messieurs, l'expression de mes cordiales salutations.



**Le Président de la Commission
Scientifique Nationale de Validation
des Revues Scientifiques**

Author details

The Scopus Author Identifier assigns a unique number to groups of documents written by the same author via an algorithm that matches authorship based on a certain criteria. If a document cannot be confidently matched with an author identifier, it is grouped separately. In this case, you may see more than 1 entry for the same author.

Print | E-mail

Belahcene, Brahim

Universite Abou Bekr Belkaid Tlemcen,
Department of Mechanical Engineering, Tlemcen,
Algeria

Author ID: 56676435900

<http://orcid.org/0000-0001-9723-0459>

[About Scopus Author Identifier](#) | [View potential author matches](#)

Other name formats: Belahcene, B.

Follow this Author [Receive emails when this author publishes new articles](#)

[Get citation alerts](#)

[Add to ORCID](#)

[Request author detail corrections](#)

Documents: 2

[Analyze author output](#)

Citations: total citations by 1 documents

h-index: 1

[View *h*-graph](#)

Co-authors: 5

Subject area: Environmental Science , Materials Science

Author History

Publication range: 2015 - Present

References: 26

Source history:

Journal of Materials and Environmental Science

[View More](#)

[View documents](#)

[Show Related Affiliations](#)

2 Documents | [Cited by 1 document](#) | [5 co-authors](#)

2 documents

[View in search results format](#)

Sort on: **Date** [Cited by](#) [...](#)

[Export all](#) | [Add all to list](#) | [Set document alert](#) | [Set document feed](#)

Study on corrosion behavior of HLE steel solicited in (CO2)% selective physicochemical medium	Belahcene, B., Benmoussat, A., Mansri, A.,(...), Bacetti, A.,Sadek, K.	2016	Journal of Materials and Environmental Science	0
---	---	------	--	---

[Show abstract](#) | [Related documents](#)

Analyze and modeling of damage behavior of a C^{0.12%}/Mn^{1.02%}/Si^{0.29%} HLE steel solicited in selected physicochemical medium	Belahcene, B., Benmoussat, A., Mansri, A., Doghmane, M.Z.	2015	Journal of Materials and Environmental Science	1
---	--	------	--	---

[Show abstract](#) | [Related documents](#)

Display results per page

Page 1

[Top of page](#) ▲

The data displayed above is compiled exclusively from articles published in the Scopus database. To request corrections to any inaccuracies or provide any further feedback, please [contact us](#) (registration required). The data displayed above is subject to the privacy conditions contained in the [privacy policy](#).

About Scopus

- [What is Scopus](#)
- [Content coverage](#)
- [Scopus blog](#)
- [Scopus API](#)
- [Privacy matters](#)

Language

- [日本語に切り替える](#)
- [切换到简体中文](#)
- [切换到繁体中文](#)

Customer Service

[Help](#)

ELSEVIER

[Terms and conditions](#) [Privacy policy](#)

Copyright © 2016 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Cookies are set by this site. To decline them or learn more, visit our [Cookies page](#).

RELX Group™

JOURNAL SEARCH

MORE INFORMATION ABOUT

Journal, book
and proceedings
submissions to
Web of Science
Core Collection



EMERGING SOURCES CITATION INDEX

JOURNAL COVERAGE CHANGES

(for the past 12 months)

<http://ip-science.thomsonreuters.com/cgi-bin/jrnlst/jlcovchanges.cgi?PC=EX>

Engineering Letters

Engineering Review

Engineering Technology & Applied Science Researchp

ISSN (e-journal): 1792-8036

ISSN (print): 2241-4487

Hard Copy Col. Vol. 1-2 (2011-2012): **ISBN:978-960-93-4742-6** Hard Copy Col. Vol. 3 (2013):

ISBN: 978-618-81139-0-9

Belahcene B., Mansri A., Benmoussat A., ETASR. 4 N° 6 (2014) 711-713.

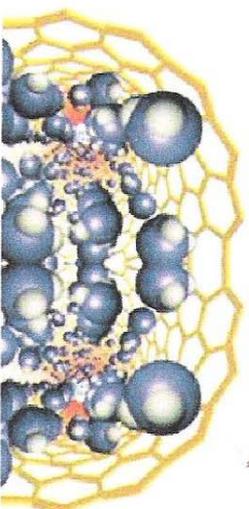
**Colloque National sur les
Techniques de Modélisation et de
Simulation en Science des
Matériaux**

Sidi Bel-Abbès, 23-24 novembre 2009

جامعة الجيلالي اللياس بسبدي بلعباس
Université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbès
Faculté des Sciences
Département Physique

التدوة الوطنية حول تقنيات النمذجة
والمحاكاة في علوم المواد

تشرين الثاني / 23-24 نوفمبر 2009 ، سبدي بلعباس



Attestation de participation

Le comité scientifique du Colloque National sur les Techniques de Modélisation et de Simulation en Science des Matériaux (CN-TMSSM'09),
atteste que Mme, Mlle, Mr : **B. Belahcene**, Université Abou-Bekr Belkaid de Tiemcen
a participé aux travaux du Colloque du 23 au 24 novembre 2009 et a présenté une communication par affiche (poster) intitulée :
Datamining de la classification périodique des éléments.

Co-auteurs : **H.I. Faraoun**



Président du Colloque
H. Bouhafis

Président du Colloque

Laboratoire de Simulation et Modélisation en Sciences des Matériaux, Université de Sidi-Bel-Abbès

Fax : 048 54 43 44, Email: bbouhafis@ictp.it, <http://tmssm.weebly.com>



الندوة الدولية السادسة للمحروقات والكيمياء
THE 6th INTERNATIONAL SYMPOSIUM
ON HYDROCARBONS & CHEMISTRY

جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'Hamed Bougara de Boumerdes
كلية المحروقات والكيمياء
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Zeralda (Cyber Park, Sidi Abdellah), Algiers from 13 to 15 October 2012

October the 15th, 2012

CERTIFICATE

This is to certify that Mr. BELAHCENE Brahim has attended the **6th International Symposium on Hydrocarbons & Chemistry ISHC6**, held in Zeralda, Cyberpark, Sidi-Abdellah, Algiers, **Algeria, from October the 13th to 15th, 2012** and has presented a paper in **Oral** session with the following references:

Title: Thermomechanical behaviour of API X80 steels for pipelines under the spot welding effect

Co-Author: A. Benmoussat

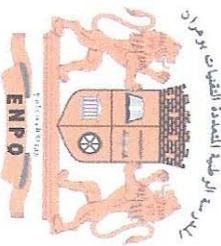
This certification has been provided to the participant upon his request, with no responsibility whatsoever on the conference or the conference organisers.

Sincerely,



A. Khelassi

Dr. Abdelmadjid KHELASSI,
Conference Chairman
Faculty of Hydrocarbons and Chemistry,
Boumerdes M'Hamed Bougara University,
Boumerdes, Algeria



National Polytechnic School of Oran, Algeria
Hassiba Benbouali University of Chlef, Algeria
the Fifteenth International Conference on
" New Trends on Fatigue and Fracture "
"Fracture and Environment"



CERTIFICATE OF ATTENDENCE

Date, 20 October 2015

This is to certify that : **Brahim Belacene**, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering LAEP0 Research Laboratory Tlemcen, Algeria; has presented a poster entitled : "Investigation on Corrosion Behavior of Steel HLE under the Effect of Hazardous Component 'CO2%' "

co- authors : **M.Z. Doghmane, K.Sadek**

on the fifteenth international conference " **NEW TRENDS ON FATIGUE AND FRACTURE - fracture and environment** ", NT2F15, held at National Polytechnic School of Oran, from 20-23 October 2015.

Organized by :

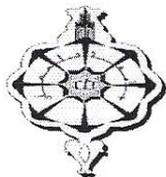
LARTFM
Laboratoire de Recherche
en Technologie de
Fabrication Mécanique,
LARTFM, ENP Oran,
Algeria.

LABAB
Applied Biomechanics
& Biomaterials. ENP
Oran. Algeria

Laboratory for Theoretical
Physics and Materials
Physics. University Hassiba
Benbouali of Chlef, Algeria

Dr. Mohammed HADJ MELIANI





Tlemcen le 02/03/2016

Lettre de recommandation

Je soussigne, Mr **MANSRI ALI**, Directeur de laboratoire d'Application des Electrolytes et des Polyélectrolytes Organiques (LAEPO), université de Tlemcen, Faculté des sciences Département de chimie, atteste par la présente que Mr **BELAHCENE BRAHIM** est membre actif dans notre laboratoire depuis septembre 2009 à ce jour.

Mr **BELAHCENE BRAHIM** a réalisé plusieurs travaux de recherche dans le cadre de son Magister, et Doctorat. Ainsi des publications internationales indexées et des communications scientifiques nationales et internationales ont été réalisées.

La présente attestation est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Université De Tlemcen
Faculté Des sciences
Laboratoire D'application
Des Electrolytes et Des Polyélectrolytes
Organiques LAEPO

Signature, Directeur du laboratoire

Pr ALI MANSRI
Directeur

Investigation on the Rheological Behavior of Multigrade Oil under the Effect of Organic and Inorganic Impurities

Brahim Belahcene

Faculty of Technology, Department
of Mechanical Engineering
LAEPO Research Laboratory
Tlemcen, Algeria
belahcene.brahim@gmail.com

Ali Mansri

Faculty of Science, Department
of Chemistry
LAEPO Research Laboratory
Tlemcen, Algeria
a_mansri@mail.univ-tlemcen.dz

Abderrahim Benmoussat

Faculty of Technology, Department
of Mechanical Engineering
LAEPO Research Laboratory
Tlemcen, Algeria
abbenmoussa@gmail.com

Abstract—The lubrication process of mechanical equipment and treatment of assembly metals structures using fluids with efficient rheological properties requires a knowledge of their behavior in the presence and in the absence of organic impurities. The intrinsic physical property of the lubricating fluids has a dependency to the mechanical and physicochemical environment. This paper is focused on the assessment of the behavior of SAE20W40 multigrade oil under normal temperature and pressure, through the addition of water in vapor phase and solid paraffin. Results show that there is a decrease in the dynamic and kinematic viscosity for heterogeneous oils. The rate of degradation is greater in the mixture of water with oil. The addition of paraffin in the mixture caused an increase in viscosity. However, after certain RPM points, it is noted that the data curve became similar to the first mixture. This relaxation phenomenon is caused by the turbulence created by the rotating cylinder in oil. The use of a retentate paraffin shows that the added agent has acted as a surfactant.

Keywords- Viscosity; oil; water; relaxation; paraffin; miscibility

I. INTRODUCTION

The mix of raw materials into oil, e.g. industrial oils, requires a continuous process of monitoring their behavior before and after their implementation in service. In the field of oil production, three main methods are applied:

- compression of the material, i.e. to crush some cold or hot petroleum products, to extract the oil
- distilling, i.e. heating of the material for the separation of oil from other ingredients.
- chemical synthesis, i.e. to manufacture an oil through reaction with chemical reagents.

Each fluid is characterized by a dynamic viscosity represented by the ratio of shear stress to shear rate, which is perpendicular to the plane of shear. The latter becomes an intrinsic characteristic; if it is divided by the density ρ fluid, it gives the kinematic viscosity ν [1]. The viscosity index VI was first proposed in 1929 [2] and it was revised in 1945 [3].

The classification of the Society of Automotive Engineers (SAE) used particularly in the automotive industry classifies oils according to their viscosity, and defines continuous intervals of viscosity with a minimum and a maximum (SAE 0W, SAE 5W, SAE 10W30, SAE 20W40 etc).

An empirical relationship showing the relationship between the viscosity (ν in cSt) and the temperature (T in Kelvin) is given in [2, 3, 8-11] and it uses two positive constants (A and B) related to the nature of the oil. In general, the presence of water molecules in lubricating oils or and its derivatives is an important issue for their physico-chemical properties. A phase of different properties relative to the fluid source, may be added (phase contamination). The separation of this new phase occurs slowly by natural settling, due to density differences. The effective viscosity of the oil-water mixture, depends on several parameters such as the volume fraction of the dispersed phase and the temperature [4]. A study of the variation of the relative viscosity of oil-water mixture as a function of the volume fraction and temperature V is performed in [5]. The thermodynamic model that shows the relationship between the relative viscosity and the volume fraction can be found in [9-12]. The relative viscosity has a relationship with the volume fraction and the ratio between the viscosity of the discontinuous phase and the continuous phases [10]. Finally, the variation of viscosity as a function of different concentrations of the emulsions was introduced in 2001 [11-13].

II. SET-UP

In this paper, viscosity measurements of a SAE20W40 mineral oil sample are presented with the use of a Brookfield DV-III viscometer. The dependence on different temperatures in the pure state and in the presence of organic impurities and water is investigated and results are presented and discussed. The rotational viscometer used (Brookfield DV-III) is shown in Figure 1. As shown, a cylindrical container contains viscous oil. This cylinder, movable on its axis of cylinder rotation, is driven by oil.

Before measurements are conducted, a calibration of the viscometer is performed using a non-Newtonian fluid (Glycerin) at room temperature, in order to find the important working parameters Brookfield DV-III. Figure 2 shows the variation of the dynamic and kinematic viscosity depending on the temperature T and the number of revolution per minute (RPM).



Fig. 1. Brookfield DV-III

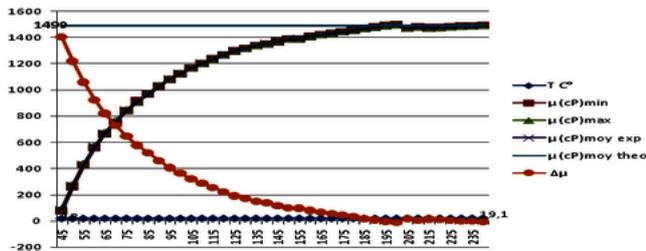


Fig. 2. Calibration using Glycerin

III. RESULTS AND DISCUSSION

Figures 3 and 4 show the curves for the new oil and the oil with impurities. A decrease in the dynamic viscosity and the kinematic viscosity for the two heterogeneous oils is noticed. The degradation rate is important for the mixing of oil with vapor. However, for the other oil mixture (water vapor and solid paraffin), an increase in viscosity was noticed compared to the oil mixed with water vapor for $70 \leq \text{RPM} \leq 185$. Furthermore, after a certain $\text{RPM} \leq 185$, it was noted that the curve thereof is almost coincident with the oil and water into steam. This should be attributed to the turbulence relaxation phenomenon created by the rotating cylinder.

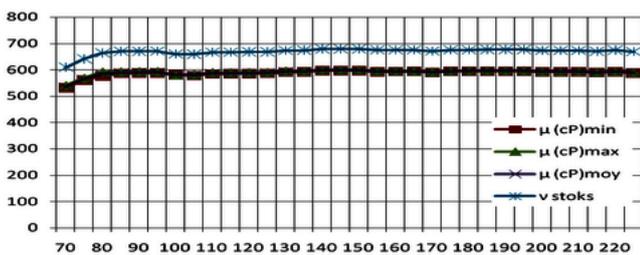


Fig. 3. Behavior of new SAE 20W40 oil ($19 \text{ C}^\circ < T \leq 25 \text{ C}^\circ$)

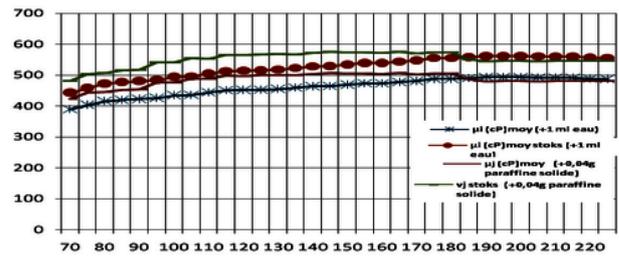


Fig. 4. Behavior of SAE 20W40 oil in the presence of organic impurities and water ($19 \text{ C}^\circ < T \leq 25 \text{ C}^\circ$)

In order to define the effect of temperature on the kinematic viscosity, it is necessary to determine the constants A and B, discussed in ASTM D341 [6], based on the data of Figure 5 [14], considering (1):

$$\log(\log(\nu + 0,7)) = A - B \log(T+273.15) \quad (1)$$

The viscosity number (VN) has been recently proposed in the characterization of the performance of lubricating oils. By applying (1) we can determine the viscosity number for different states of changes in SAE 20W40. B values are inserted in (2) [7]. The NV values are shown in Table I.

$$NV = (1 + ((B * 3.55) / 3.55)) * 100 \quad (2)$$

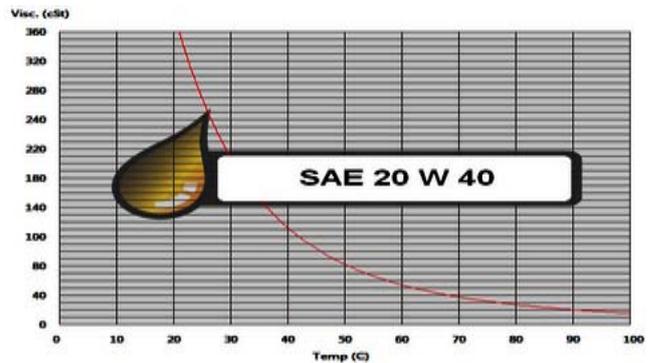


Fig. 5. SAE 20W40 Variation in function of temperature

TABLE I. VISCOSITY NUMBERS

	SAE20W40	SAE20W40+ water	SAE20W40 +water +paraffin
NV	424.7519	406.9362	401.6023

IV. CONCLUSION

The SAE20W40 oil was mixed with water in the vapor phase and then with solid paraffin. Results show that there is a decrease in the dynamic and kinematic viscosity for heterogeneous oils. Their behavior was investigated in terms of viscosity in relation with temperature and rpm. The addition of paraffin in the mixture caused an increase in viscosity for smaller RPM but the results were similar for larger RPM. This

relaxation phenomenon is attributed to the turbulence created by the rotational viscometer cylinder.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank the National Agency for the Development of University Research (ANDRU) in Algeria for its support.

REFERENCES

- [1] IUPAC, Compendium of Chemical Terminology, Gold Book, 2nd ed., 1997
- [2] E.W. Dean, G.H.B. Davis, "Viscosity variations of oils with temperature," *Chemical and Metallurgical Engineering*, Vol. 36, No. 10, pp. 618–619, 1929
- [3] E.W. Hardiman, A.H. Nissan, "A Rational Basis for the Viscosity Index System", *Journal of the Institute of Petroleum*, Vol. 31, pp. 255–270, 1945
- [4] M. A. Farah, R. C. Oliveira, J. N. Caldas, K. Rajagopa, "Viscosity of water-in-oil emulsions: Variation with temperature and water volume fraction", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 48, No. 3-4, pp.169–184, 2005
- [5] H. P. Ronningsen, "Correlations for predicting viscosity of w/o-emulsions based on North Sea crude oils", *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, 14-17 February, San Antonio, Texas, USA, 1995
- [6] American Society for Testing and Material, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 05, Philadelphia, USA 2001
- [7] P. T. Cummings, D. J. Evans, "Nonequilibrium Molecular Dynamics Properties and Non-Newtonian Fluid Approaches to Transport Rheology", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 31, pp.1237–1252, 1992
- [8] Society of Automotive Engineers, *SAE handbook*, Vol. 124, 1968
- [9] http://www.maths.usyd.edu.au/u/UG/SM/MATH3075/r/Einstein_1905.pdf
- [10] I. M. Krieger, T. J. Dougherty, "A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres", *Transaction of the Society of Rheology*, Vol. 3, pp. 137–152, 1911
- [11] R. Pal, "Evaluation of theoretical viscosity models for concentrated emulsions at low capillary numbers", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 81, No. 1-3, pp. 15–21, 2001
- [12] G. I. Taylor, "The viscosity of a fluid containing small drops of another liquid", *Proc. R. Soc., A* 138, pp. 41–48, 1932
- [13] Walther, *The evaluation of viscosity data. Erdol und Teer*, V.7, pp.382–384, 1931
- [14] Oil-Power Ltd, *ViscCalc 2*, available at <http://www.oil-power.com/>



Analyze and modeling of damage behavior of a $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ HLE Steel Solicited in Selected Physicochemical medium

Brahim Belahcene^{1*}, Abderahim Benmoussat¹, Ali Mansri², Mohamed Z. Doghmane³

¹University of Tlemcen, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Corrosion Equip of LAEPO research laboratory, Tlemcen, Algeria.

²University of Tlemcen, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, LAEPO research laboratory Tlemcen, Algeria.

³University of Boumerdes, Faculty of Hydrocarbons and Chemistry, Department of Automation, LAA laboratory Algeria.

Received 14 Jan 2015, Revised 15 Mar 2015, Accepted 15 Mar 2015

*Corresponding Author. E-mail: Belahcene.brahim@gmail.com; Tel : (+213669679766)

Abstract

The influence of environment and physical parameters on $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ HLE steel steel corrosion damage behaviour in NaCl solutions was studied using weight loss, pH evolution at 300k to 370k, electro-exchanges, and passivity. Herein, the results show that the corrosion rate changes versus type of thermal treatment and cooling fluid, solution concentration, shape, size and cooling speed of the samples. The resolution of Nernst equation proves that the increase in temperature has a direct effect on hydrogen potential of the solution, current and corrosion potential of the metal. Moreover, the inhibition efficiency was determined by theoretical calculation using mechanical molecular and semi-empirical method. These results guided us to conclude that the inhibitor, which has low electronegativity than $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ Steel has good efficiency.

Keywords: steel, HLE, damage, corrosion rate, polymer, oil, carbon, inhibition, electronegativity

Introduction

Study of the interaction between metal and fluid is one of the prevention methods to find reliable solutions of degradation phenomena under aggressive medium. Several equipment in petroleum industry are basically made using HLE steel (high limit elasticity) such as Oil and Gas facilities, production tubing, pipeline of transport, and tubing for cooling, and storage tanks which are solicited by medium acidity, temperature variation and external loads. Thus, the protection of steel structure as API 5LX60 against NS4 Simulated Soil is proved by using polyphosphates [1]. The Sulphide molecules can decrease the corrosion rate of the API 5L X52 steel sample in a CO_2 environment [2].

The poly (4-vinylpyridine) reduce corrosion rate of carbon steel in presence of H_2SO_4 [3]. Reducing cathodic current density and increasing Iron polarization resistance in presence of Sulfuric acid can be achieved by Poly (4-vinylpyridine poly-3-oxyde ethylene) [4]. Fortunately, new methods were developed for modeling chemical properties such as correlation model established on electrochemical oxidation potentials of several anions reported in [5]. In addition to that, the inhibition stability of Quaternized Poly (4-Vinylpyridine)-Graft-Bromodecane in Sulphuric Acid on pure ion is reported in [6]. Wherein, the radical of this last and its derivative have been applied as inhibitor to protect pure metal as iron, copper and zinc [7-8]. The standard testing and expressions for corrosion have been reported in [9-10-11-12]. The inhibition corrosion of mild steel in HCl by using P4VP is due of chemisorption phenomena [13]. However, the application of protection methods requires to identify and study the behavior of material under chemical, thermal, mechanical stress and geometries design before using interface inhibitors (vapor phase, liquid phase (anodic, cathodic and mixed adsorption)) or environmental conditioners.

The aim of the present work is to make an assessment on rate corrosion of three states of steel $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ affected by thermal choc which simulates heat affected zone (HAZ) in assembly metals structures. The medium acidity variation is introduced using different concentrations of NaCl. Experimental technique is reached by measuring weigh loss of metal after chemical attack during 720 hours divided in 10 stages. The polymer efficiency estimation was determined by physical calculation using two methods: mechanical molecular and semi-empirical method.

2. Materials and methods

2.1. Material Properties

The Chemical composition of steel was identified by using spectrometry analysis; it is shown from histogram in figure 1 (a, b, c and d). The microstructures were carried out using scanning electron microscopy (SEM), where figure 2 shows states of texture.

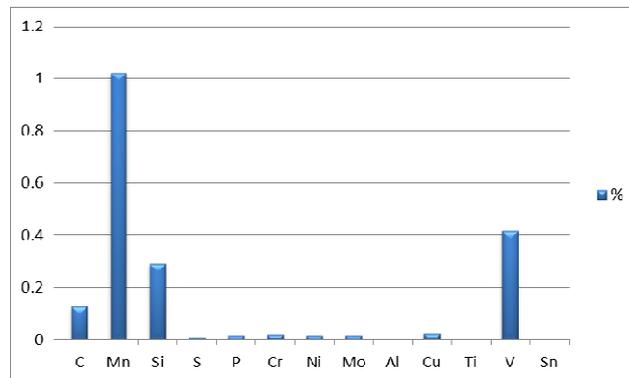


Figure 1 Chemical composition of a $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ steel

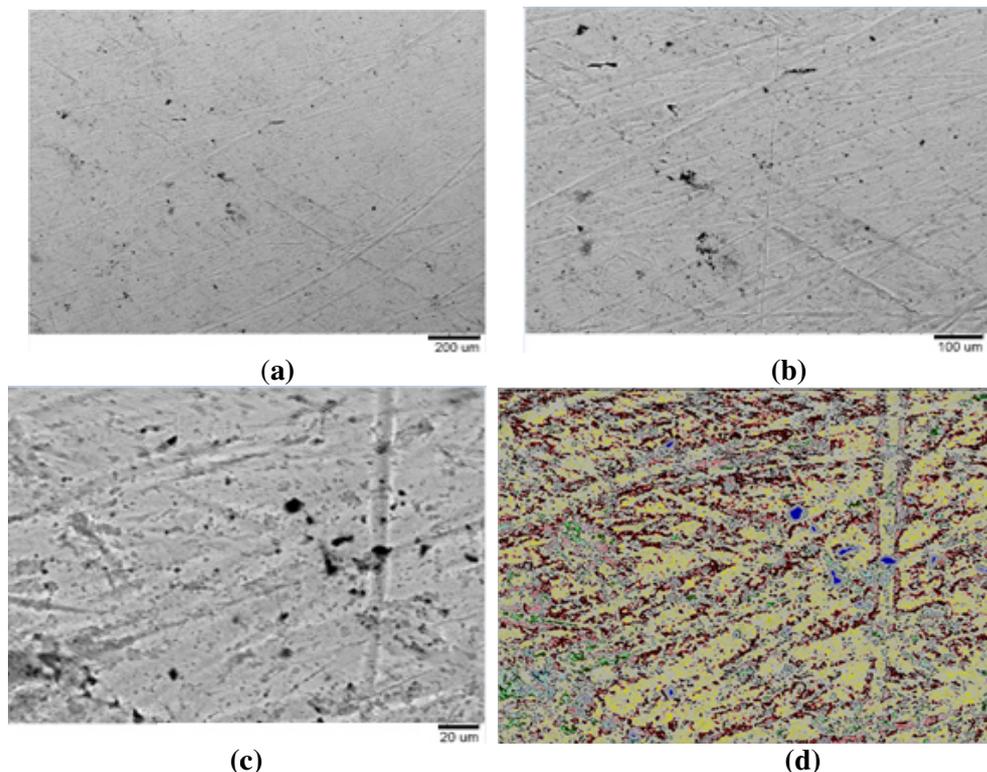


Figure 2 :SEM fractographs of the $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ Steel ,a:200um,b:100um,c:20um,d:map 20um.

2.2 Field condition

An eighteensamples of steel with different geometries and weights are used in this study; the first crew are considered as reference without thermal affect and renamed base metal (BM)). Nevertheless,The two remain crews of samples were affected by heat and cooled by air and multigrade oil respectively .The characteristic of oil was investigated in our laboratory before establishing the thermal choc on samples [14].The selective medium was prepared with different concentration from 0.1M to 0.8 M of NaCl. The rate corrosion is determined by weight loss method. The samples should be cleaned with acetone, bi-distilled water and dried by heated system before each measure. The procedures of preparation of samples, polishing, segmentation, thermal choc, and fluids cooling are shown in figure 3 (a, b, c, d, e, f, g, h and i).

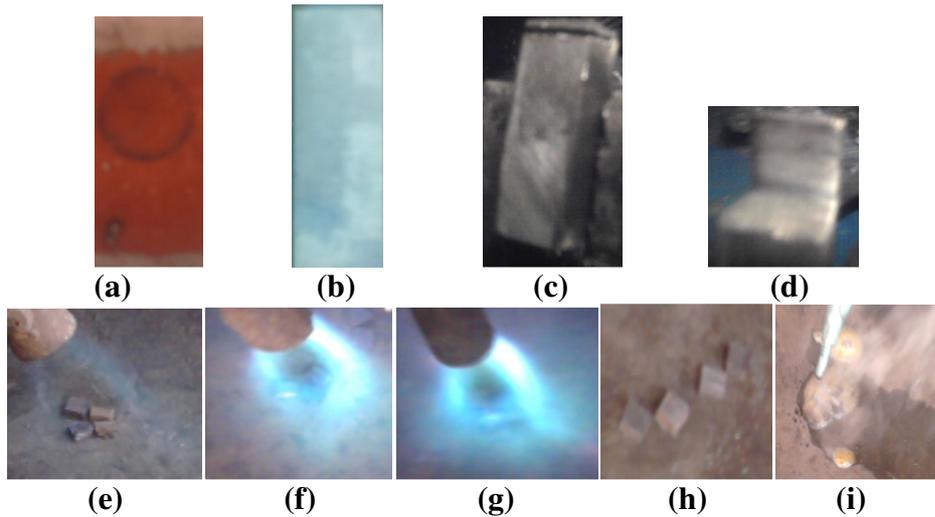


Figure 3 (a) Coupon of steel , (b) sample after polishing, (c,d) segmentation, (e,f,g) thermal choc, (h) air cooling, (i) oil cooling.

3. Results and discussions

The effect of medium aggressiveness on three states metal corrosion with different concentrations of NaCl at various weights and shapes are shown in figures (4, 5, 6, 7 and 8).

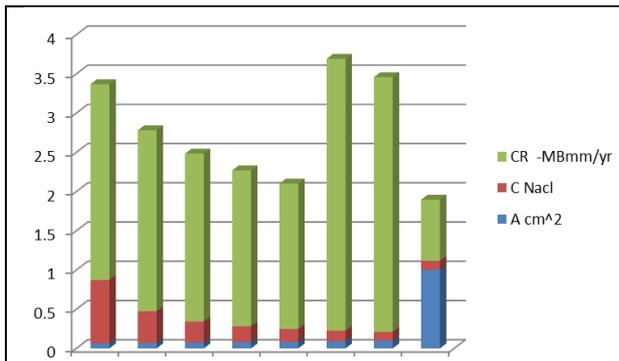


Figure 4 Corrosion rate of base metal (MB) vsNaCl concentration and sample area

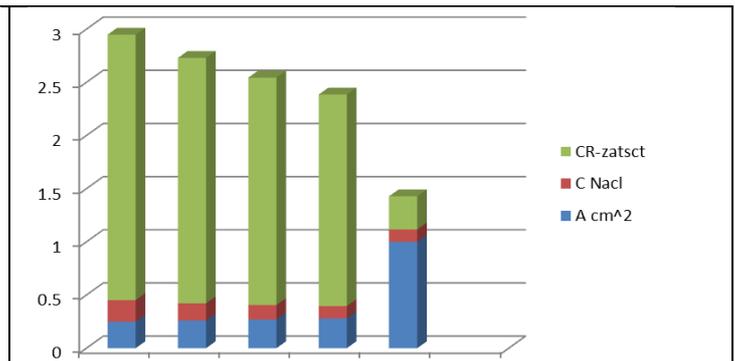


Figure 5 Corrosion rate of samples affected by heat and cooled by air (ZATsct) vsNaCl concentration and sample area

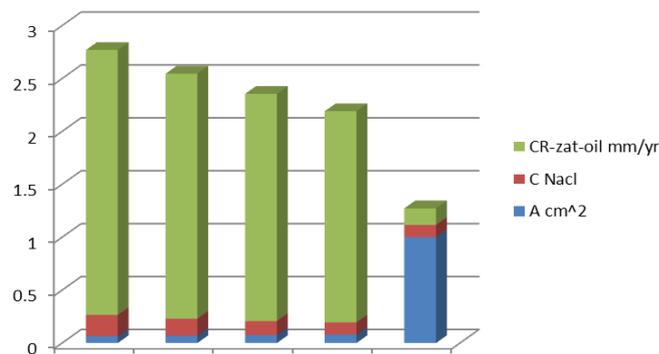


Figure 6 Corrosion rate of samples affected by heat and cooled by multigrade oil (ZATH) vsNaCl concentration and sample area

Wherein, it is noticeable that Corrosion rates of $C_{0.12\%}Mn_{1.02\%}Si_{0.29\%}$ Steel increases with halite concentrations. The increase in geometry or samples size has direct effect on corrosion rate, it can be explained by contact between atomic plan of metal and halite (NaCl).The corrosion rate has significant values for first crew of samples (MB), it reaches 0.376% for 0.135M NaCl. The second crew of samples (ZATsct) affected by heat and cooled by air, has lower corrosion rate values than the base metal, the corrosion rate grows until 0.214% for

0.135 M NaCl .This variation is justified by vicinity of cooling established by air and recrystallization of metal under standard condition .The third crew of samples(ZATH) affected by heat and cooled by multigrade oil has lower corrosion rate values at 0.135M NaCl than base metal and greater values than samples cooled by air .This variation is justified by atomic carbon deposit on metal surface for third state .We notice that the relationship between corrosion rate, sample area, medium concentration, thermal choc and fluids cooling type on corrosion rate are nonlinear.

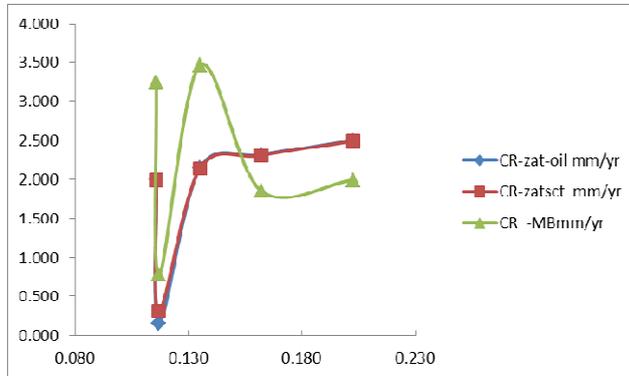


Figure 7 Corrosion rate vs NaCl concentration.

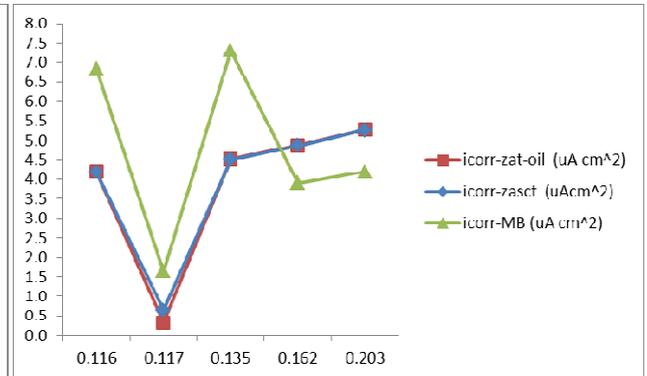


Figure 8 Current density vs NaCl concentration.

Polarization Curve

To obtain polarization curve, we resolved Nernst equation (ion equilibrium potential).Following,spectrometry analysis results obtained, we can noticed that Fe atoms are very amount dominated,it's about 98% which make one of initial condition to get solution of ion equilibrium potential equation and to estimate its' corrosion and current potential with variation temperature and PH. From Figure 9 and 10 its can be seen that the cathodic and anodic slopes changes apparently with the increase of the temperature and variation of medium PH acidity; it is clearly indicated by the existence of the cathodic proton-discharge reaction phenomena, the maximum displacement in E_{corr} and i_{corr} value is -0.45 V, 0.002 mA cm² respectively at 370K towards the cathodic region. The corrosion rates as well as current density of studied material extensively increase in aggressive medium simulated by variation of potential hydrogen and number of charge transfer.

The increasing of temperature has direct impact on potential hydrogen as shown in figure 9 which, by consequence, increases acidity of the medium and current density.

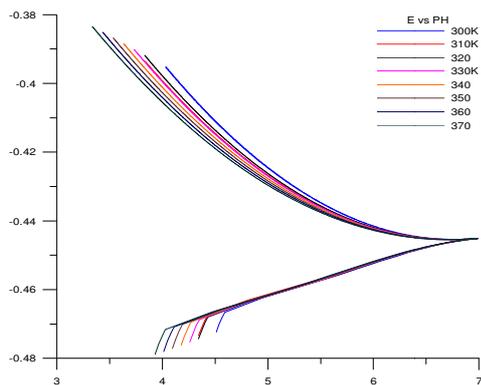


Figure 9 Effect of temperature on potential Hydrogen and potential corrosion

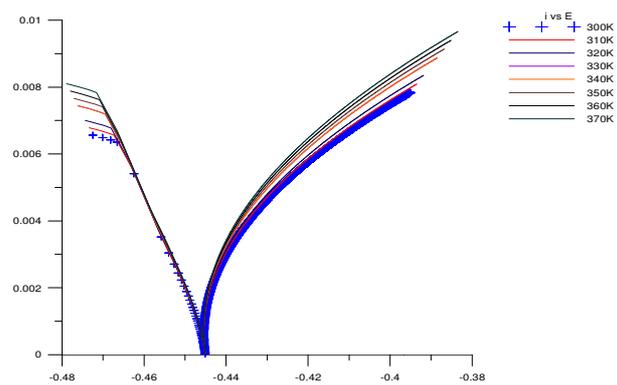


Figure 10 Effect of temperature on polarization curves

Figures 9 and 10 shows the effect of thermal agitation by increasing the temperature on polarization cutoff for 1M NaCl , after establishing slope line the corrosion potential of studied material is about -0.449 V for 2×10^{-3} (mA cm²) (which is indicated in figure11). The degradation rate evaluation is important in technical engineering field. Figure 12 shows corrosion rate (CR or R); it increases quickly with temperature increase of medium until it reaches 0.701 mm/yr at 370K. After establishing the regression method, we found an equation of five degree with 99.55% certitude which can be make relationship between corrosion rate and temperature, we note that this equation is reliable just in next temperature range of [300k, 370k] at standard concentration:

$$CR = 10^{-8} * T^5 - 2 * 10^{-5} * T^4 + 0.0152 * T^3 - 5.0071 * T^2 + 821.29 * T - 53829 ; R^2 = 99.5 \%$$

This equation has an important application in corrosion rate prediction of this type of metal just two variables function which are temperature and concentration of selective medium. The proposed equation can be programmed using assembly language for sensor corrosion measure application.

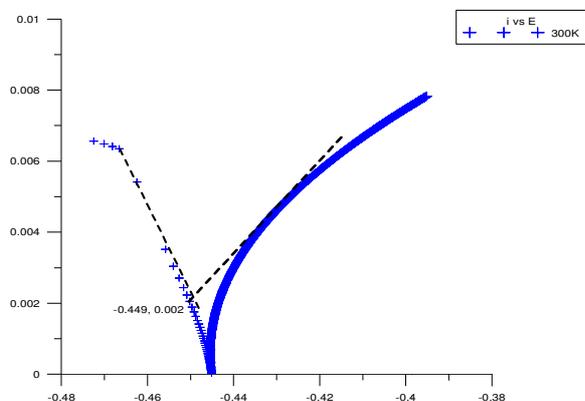


Figure 11 Tafel polarization curves for 1M NaCl at 300 k

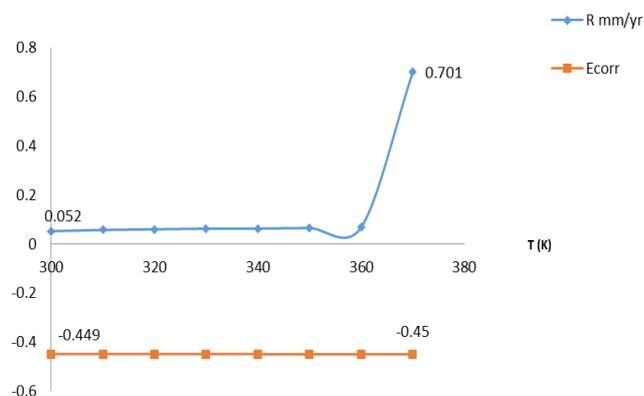


Figure 12 Corrosion rate vs temperature

Table 1 shows results obtained from mechanical molecular and semi-empirical method used to determine some proprieties for monomer and polymer, the molecule that have low electronegativity than base metal can protect the studied material from corrosion.

Table 1: Theoretical estimation of Efficient Inhibitors

Molecule	Efficient of inhibitor%
C_7H_7N	6.781
C_7H_7N-C	8.489
C_7H_7N-C-C	6.540
$(C_7H_7N)-Br-(BaSO_4)$	3.203
Na_2HPO_4	18.767
$(Na_2HPO_4)-(C_7NH_7)$	2.616
$(Na_2HPO_4)-(C_7NH_7)_2$	3.470
$(Na_2HPO_4)-H-(C_7NH_7)_2$	8.089
$(H_2N-CS-NH_2)-C_7H_7N$	7.635

Theoretical estimation

Quantum chemical calculations have been carried out by estimation inhibition effect for some polymers. In addition to that, geometric structure optimization has been established using molecular mechanic force field, and MM+ option based on electrostatic interactions used to find the coordinates of a molecular structure with potential minimum energy figures (13, 15). The Mullikan atomic charge is used to indicate chemical reactivity figure 14.

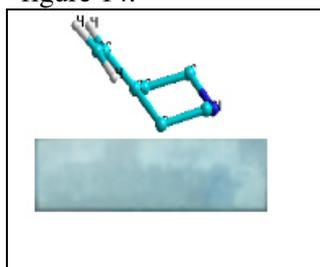


Figure 13 C7H7N Pattern on MB

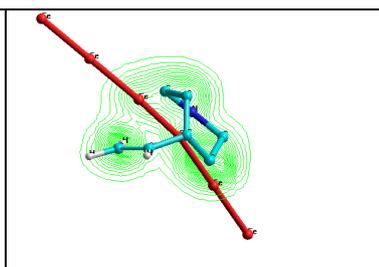


Figure 14 Charge density distribution

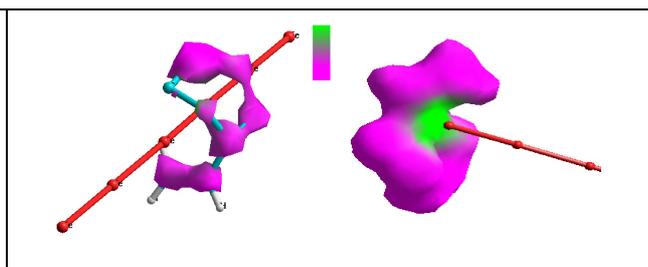


Figure 15. Electrostatic potential distributions (by using method MM+)

The values of softness η and hardness θ figure 16 were estimated by using the relationship between ionization potential I and electron affinity A obtained from theoretical calculation. These quantities are related in turn energy of the highest occupied orbital EHOMO and energy of the lower occupied orbital ELUMO:

$$A = -ELUMO \quad (1)$$

$$I = -EHOMO \quad (2)$$

$$\eta = (I-A)/2 \quad (3)$$

$$\theta = 1/\eta \quad (4)$$

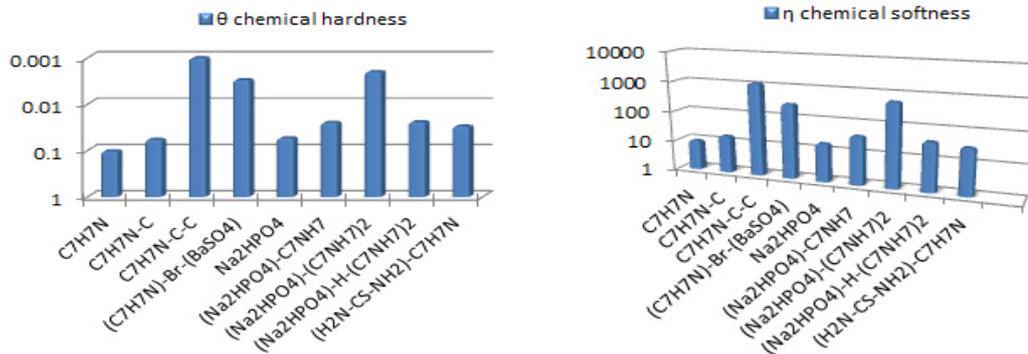


Figure 16 Chemical softness η and hardness θ

Conclusions

1. The thermal choc and nature of cooling fluid were found to have direct influence on corrosion behavior of $C_{0.12}\%Mn_{1.02}\%Si_{0.29}\%$ steel in Selected Physicochemical medium as like NaCl.
2. The corrosion rate has relationship with shape, size of samples and concentration of aggressive medium.
3. The current density and acidity of medium increase by increasing of temperature which has a direct effect on corrosion behavior of metal.
4. The molecule has low electronegativity than base metal can be protected it from aggressive medium.
5. The polymer $(C_7H_7N)_n$ has good cover area on base metal proved by charge density distribution and electrostatic potential.

Acknowledgements-The authors wish to thank the National Agency for the Development of University Research (ANDRU) in Algeria for its support.

References

1. Benmoussat A., Traisnel M., *Springer Science. B.V. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop.* (2011).
2. Fatah M.C., *ASM International.JMEPEG.* (2013) 236–244.
3. Larabi L., Harek Y., *P.Electrochim.Acta.* 22 (2004) 227–247.
4. Abed Y., Arrar Z., Hammouti B., Aouniti A., Kertit S., Mansri A., *J. Chim. Phys.* 96 (1999) 1347-1355.
5. Hagiwara R., Ito Y., *J. Fluorine Chem.* 105 (2000) 221–227.
6. Chetouani A., Medjahed K., Al-Deyab S.S., Hammouti B., Warad I., Mansri A., Aouniti A., *Int. J. Electrochem. Sci.* 7 (2012) 6025 – 6043.
7. Bhandari H., Choudhary V., *Synth. Met.* 161 (2011) 753.
8. Kertit S., Chaouket F., *J. App. Electrochem.* 24 (1994) 1139.
9. Skothaim T.A., *Dekker M.NY.2. Handbook of Conducting Polymers.* (1986).
10. Matsushima I., Revie R.W., *John Wiley Sons. Inc. Uhlig's Corrosion Handbook.* (2000) p.515.
11. Matsushima I., *Journal of the Society of Materials Science, Japan,* 19 (1980) 19.
12. Sastri V.S., Ghali E., Elboujdaini M., *John Wiley. Sons Ltd.* ISBN: 9780470024546 (2007).
13. Larabi L., Harek Y., Traisnel M., Mansri A., *J. App. Electrochem.* 34 (2004) 833–839.
14. Belahcene B., Mansri A., Benmoussat A., *ETASR.* 4 N° 6 (2014) 711-713.



Study on Corrosion Behavior of HLE steel solicted in (CO₂)% Selective Physicochemical medium

B. Belahcene^{1*}, A. Benmoussat¹, A. Mansri², M.Z. Doghmane³, A. Bacetti⁴, K. Sadek⁵

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, LAEPO laboratory, University of Tlemcen, Algeria.

²Department of Chemistry, Faculty of Sciences, LAEPO laboratory, University of Tlemcen, Algeria.

³Department of Automation, Faculty of Hydrocarbons and Chemistry, LAA laboratory, University of Boumerdes, Algeria.

⁴Department of Electrical Engineering, National Polytechnic School, IPSI Laboratory Oran, Algeria.

⁵Department of Mechanical Engineering, National Polytechnic School, LABAB Laboratory, Oran, Algeria.

Received 30 Jan 2016, Revised 19 Apr 2016, Accepted 26 Apr 2016

*Corresponding author. E-mail: Belahcene.brahim@gmail.com ; Tel : (+213669679766)

Abstract

In petroleum industry, conventional and unconventional reservoirs have to be controlled in order to decrease the effect of hazardous components on Oil and Gas facilities, as well as equipment completion, production tubing, transport pipeline, and storage tank. Herein, the study of real state of this effect using empirical method to determine sensible parameters that have huge influence on materials degradation. Therefore, the corrosion rate is estimated by application of a theoretical calculation based on physicochemical parameters and meta-field parameters, such as medium acidity, CO₂ partial pressure, thermodynamics parameters (P, T), and mechanical proprieties of studied materials. Moreover, scenarios application permitted us to assess corrosion risk.

Keywords: Steel, Hazardous components, Oil and Gas facilities, CO₂, Corrosion risk.

Nomenclature

SEM scanning electron microscopy
EDS electron dispersed scanning
HLE high limit elasticity
K_t temperature-related constant
f(pH) factor depending on pH of the solution
fCO₂ fugacity
CO₂ carbon dioxide
S shear stress
α constant
H₂S Hydrogen sulfide
Cl⁻ chloride ion.
R corrosion rate (mm/y)
pH hydrogen potential

1. Introduction

The presence of hazardous components such as (CO₂, H₂S, Cl⁻ ...) in gas and oil field can provide unwanted phenomena such as worsening of materials proprieties by deterioration phenomenon. The water influx and variation of aquifer level affect directly gas or oil production by pressure depletion. Besides, the breakthrough water or conning water affects also well potential, occurs in dissolution of hazardous gas components in acid medium, and then affect resistance of completion resistance and facilities.

The interaction between CO₂ and water forms carbonate ions which results after reaction solid iron carbonate FeCO₃. Hence, it is good parameter for controlling corrosion phenomenon in collected network and process facilities. The gas composition impurities have an influence on carbon steel corrosion [6]. Study of the interaction between metals and fluids is one of the preventive methods to find reliable solutions for degradation phenomenon in presence of aggressive medium [1]. Several equipment in petroleum industry are basically manufactured using HLE steel (high limit elasticity) [1]. Thus, the protection of steel structure such as API 5LX60 against NS₄ Simulated Soil is proved by using polyphosphates ions as corrosion inhibitors [2]. The Sulphide molecules can decrease the corrosion rate of the API 5L X52 steel sample in a CO₂ environment [3]. The assessment of corrosion rate of three states of steel affected by thermal choc and solicited in aggressive medium using different concentrations of NaCl , which simulated corrosion phenomenon in petroleum industry, is reported in the previous study [1].

The remove general and localized corrosion of carbon steel in supercritical CO₂ phase can be accelerated by increasing of the amount of H₂S [7]. Calcium carbonate reduces the corrosion rate of low carbon steel corrosion in saline CO₂ at high-pressure environment [8]. The growing CO₂ pressure had an important effect the oxidation rate [9]. The degree of turbulence of gas flow through steel pipelines plays a major role in increasing emphasis in the corrosion process associated with carbon dioxide (CO₂) [10]. The standard testing and expressions for corrosion have been reported in [10-11-12].

2. Material characterization

The Chemical composition of studied material, C_{0.12%}Mn_{1.02%}Si_{0.29%} Steel [1] was identified by using EDS; it is shown demonstrated in histogram given in figure 1 (a). The microstructures were carried out using SEM [1], where figure 1(b , c) shows states of texture.

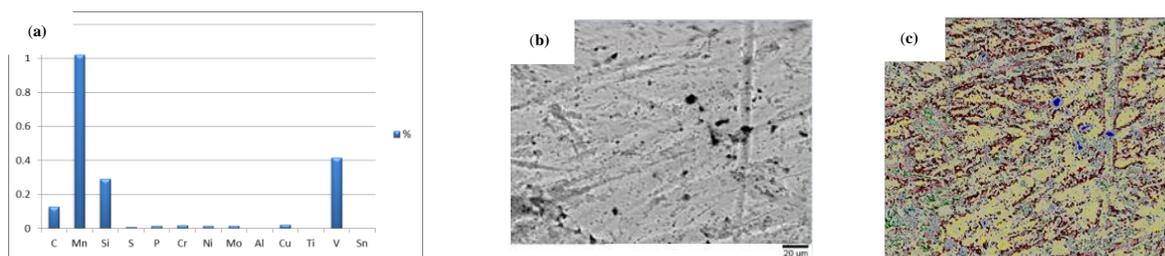


Figure 1: (a) : chemical composition of HLE steel; SEM fractographs of Steel (b): map 20um, (c): map 20um

3. Method and model

The prediction of the corrosion rate of HLE steel in (CO₂)% selective physicochemical medium is based on Norsok model. The Corrosion rate is determined by including meta-field parameters as Temperature effect, Pressure, diameter size of flow line, hydrogen potential, liquid velocity and fraction molar of CO₂.

The Norsok model is based on empirical equations (detailed in) [4,5] to predict corrosion rate in mm/year. In our case, this model is used as a proxy for multi scenario study and to determine sensitivity for each physical and chemical parameter that affect corrosion rate (given by) equation (1).

$$R_{c_{mm/y}} = \begin{cases} k_t * f_{CO_2}^{0.62} * (S/19)^{0.146+0.0324 \log(f_{CO_2})} * f(pH) , 20 C^{\circ} \leq T \leq 150 C^{\circ} \\ k_t * f_{CO_2}^{0.36} * (S/19)^{0.146+0.0324 \log(f_{CO_2})} * f(pH) , T=15 C^{\circ} \\ k_t * f_{CO_2}^{0.62} * f(pH) , T=5 C^{\circ} \end{cases} \quad (1)$$

4. Results and discussion

The effect of medium aggressiveness on corrosion rate with different scenarios are shown in figures (2, 3, 4, 5 ,6 and 7). Figures 2 and 3 describe the variation of hydrogen potential (pH) from standard medium (pH=6) to acid (pH=3.5) at low value of CO₂%. Each value of corrosion rate is coupled by two variable parameters (Temperature and pH).

The derivation of corrosion behavior in this state starts from 293K as shown in figure 3. This phenomenon is explained by metal depletion against aggressive component; it is governed by complete reaction that can be anodic, cathodic or mixed. The general law, that can model weight loss or transfer from metal matrix, is Fick's laws of diffusion and chemical kinetic.

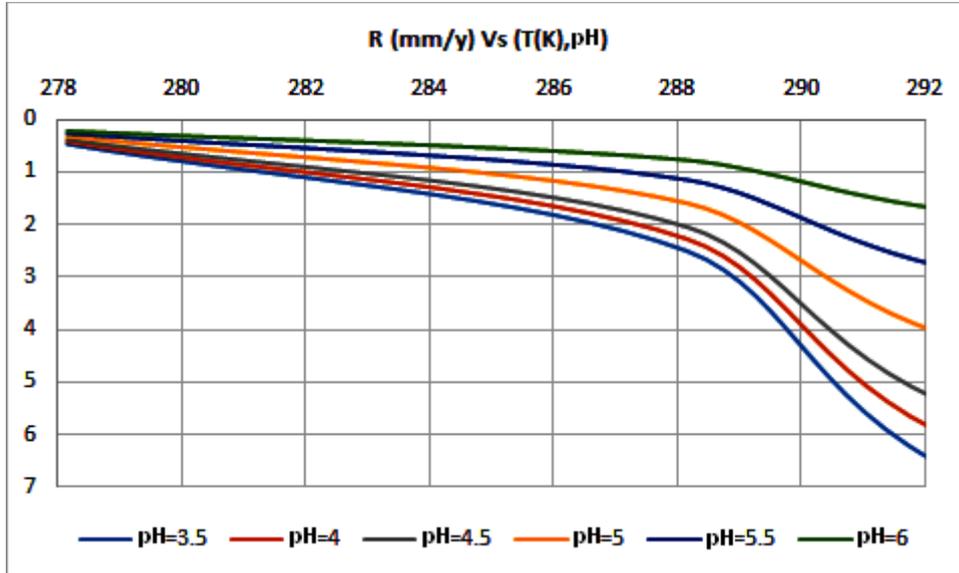


Figure 2: Effect of variation of hydrogen potential from standard medium (pH=6) to acid (pH=3.5) at low value of CO₂ % for temperature range 278K-292K.

Figures 2 and 3 describe the variation of hydrogen potential from standard medium (pH=6) to acid (pH=3.5) at low value of CO₂%. Each value of corrosion rate is coupled with two variable parameters (Temperature and pH).

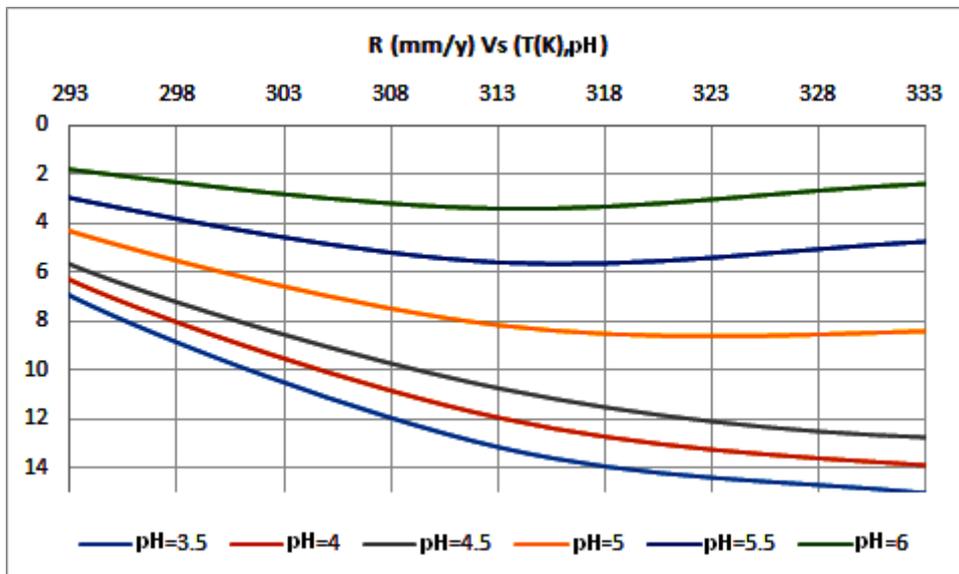


Figure 3: Effect of variation of hydrogen potential from standard medium (pH=6) to acid (pH=3.5) at low value of CO₂ % for temperatures range 293K to 333K

In Figure 3, the corrosion rate changes as a function of pH and temperature, for each temperature value at low value of CO₂ % there is increasing an increase in corrosion rate when pH decreases. This phenomenon is explained by temperature effect and H⁺ concentration on chemical potential. In this case, the variation in hydrogen potential is governed by changing in thermal energy (temperature multiplied by Boltzmann constant).

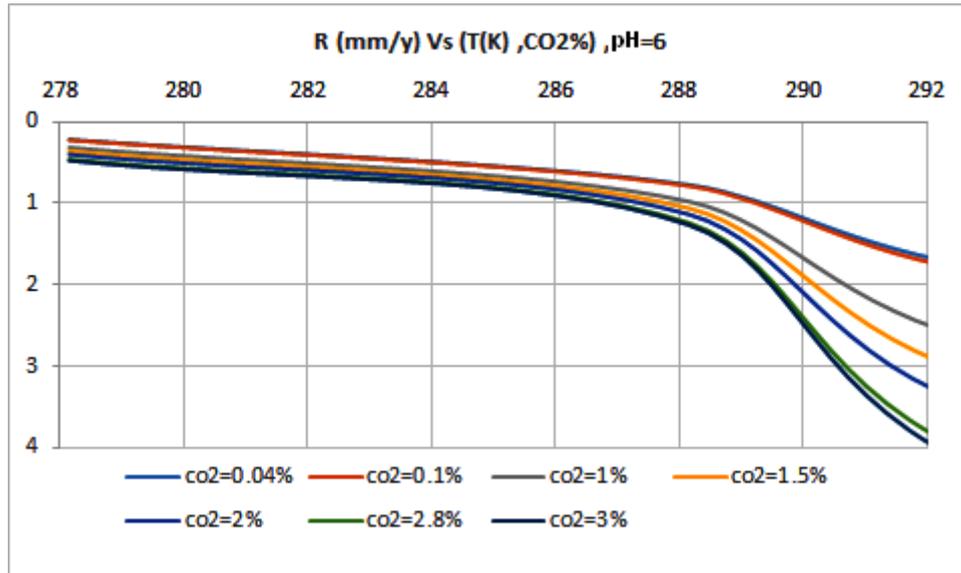


Figure 4: Effect of variation of CO₂% and temperatures at pH=6 for temperature range 278K-292K.

Figures 4, 5, 6 and 7 show corrosion rate with variation of temperature and proportion of CO₂. This phenomenon is governed by several chemical reactions such as dissolution of Fe by evolution of hydrogen which is given by equation (2).

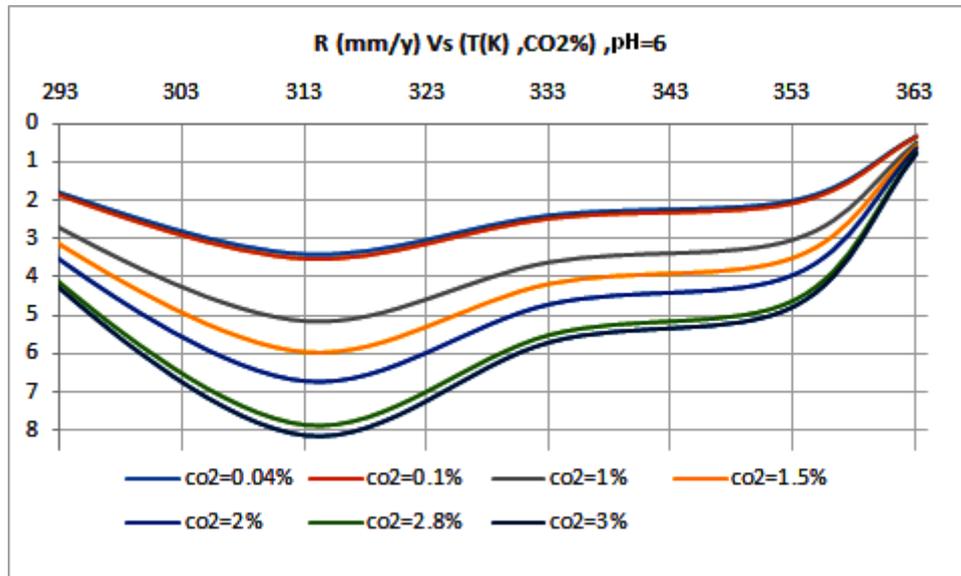


Figure 5: Effect of variation of CO₂% and temperatures at pH=6 for temperature range 293K-333K.

At normal concentration of hydrogen potential, the corrosion behavior of steel changes moderately when temperature and density of hazardous materials increases.

Hence, the decreases in potential hydrogen increase corrosion rate. Then, the temperature variation contributes directly in depletion of steel. Both parameters accelerate Weight loss or specimens transfer from base metal to aggressive medium.

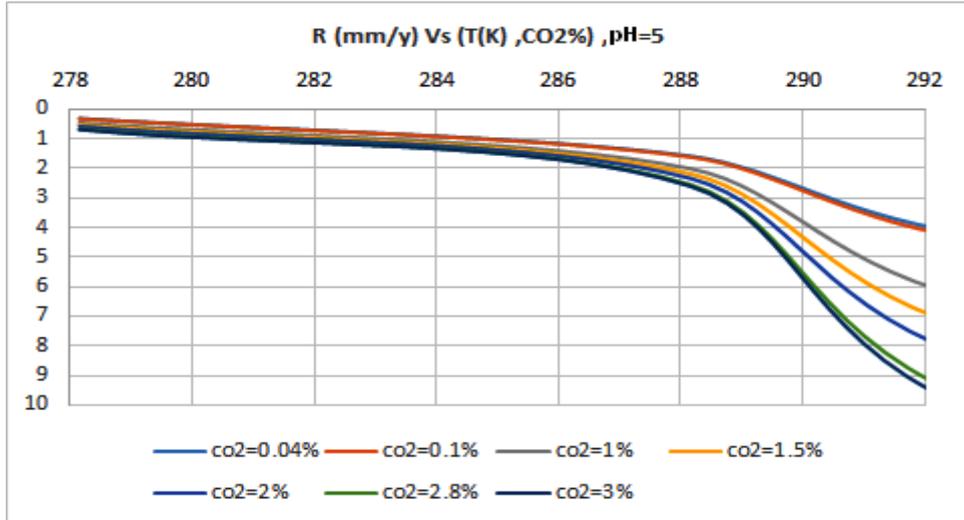


Figure 6: Effect of variation of CO₂% and temperatures at pH=5 for temperature range of 278K-292K.

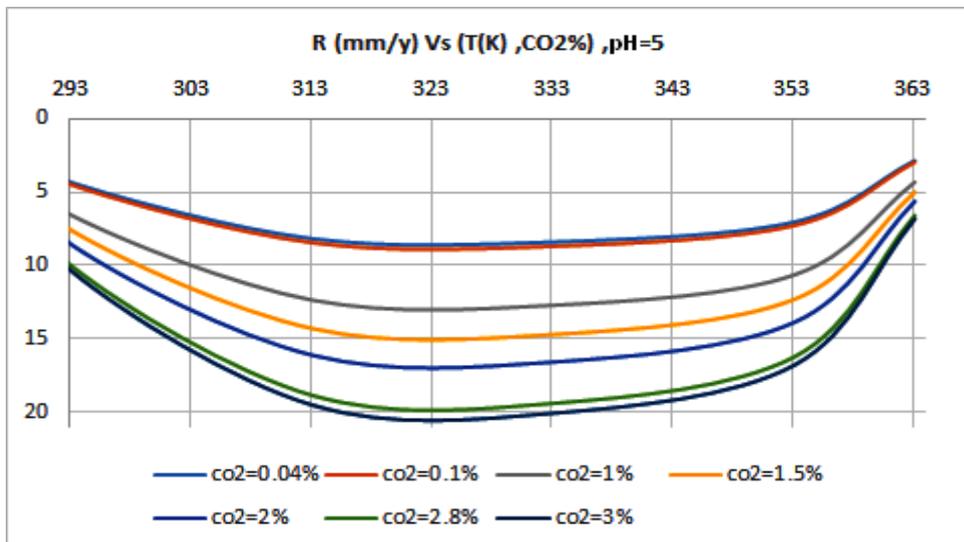


Figure 7: Effect of variation of CO₂ % and temperatures at pH=5 from 293K to 373K.

This electro reduction of CO₂ and its interaction with alloys elements of steel is very important when water cut (brine water) takes place in gas canalization.

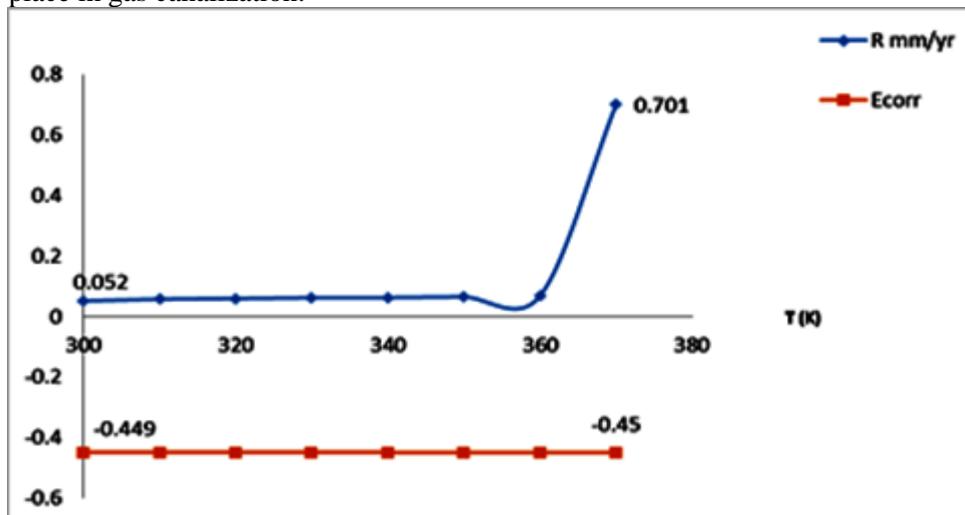


Figure 8: Corrosion rate vs temperature (NaCl medium) [1]

Figure 8 shows the influence degrees of aggressive medium based on NaCl. Wherein, the CO₂ hazardous component has a strong effect on corrosion resistance of steel compared with its behavior in NaCl medium [1].

Conclusions

- The concentration of CO₂ increases its fugacity regarding to the total pressure and medium temperature;
- The increasing medium acidity is a result of hydrogen's potential variation, which has a direct relationship with nature of brine water and CO₂ concentration;
- The increasing potential of hydrogen at same CO₂ concentration affects corrosion rate;
- The increasing CO₂ concentration at same potential of hydrogen affects also corrosion resistance of steel;
- The increasing CO₂ concentration at various potentials of hydrogen affects strongly corrosion resistance of steel;
- The temperature has an influence on stabilization interaction of corrosion phenomenon;

It is recommended, in gas and oil industry, to control variation or influx of dioxide carbon and all hazardous materials periodically by applying sampling technics or measuring directly its partials pressure in canalization by gaging. Selection of the right type of steel in gas industry is a preventive solution against aggressive materials. In our casestudy, the corrosion resistance of steel can be achieved by transition elements that have great affinity with Fe.

Acknowledgements-The authors wish to thank the National Agency of Development of University Research (ANDRU) in Algeria for its support.

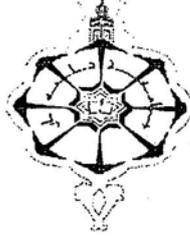
References

1. Belahcene B., Benmoussat A., Mansri A., Doghmane M.Z., *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (6) (2015) 1765-1770.
2. Benmoussat A., Traisnel M., *Spring. Sci. B.V.* (2011)167.
3. Fatah M.C., *ASM. Inter. JMEPEG.* (2013) 236–244.
4. CO₂ Corrosion Rate Calculation Model, *NORSOK standard*, N°. M-506, M-5061.
5. Olsen S., *Houst. TX.NACE.*(2003) 623.
6. Wattanaphana P., Sema T., Idem R., Lianga Z., *Inter. J. Greenh. Gas. Contr.*19 (2013) 340–349.
7. Wei L., Pang X., Gao K., *Corros. Sci.* 103 (2016) 132-144.
8. Tavaresa L.M. , Costaa E.M. d., Andradea J. J., Hublera R., Hueta B., *Appl. Surf. Sci* 359 (2015)143-152.
9. Rouillard F., Furukawa T., *Corros. Sci.* (2016)105, 120-132.
10. Matsushima I., *Wiley J., Sons. Inc. Corros*(2000) 515.
11. Matsushima I., *SocieJ., Mater. Sci* (1980)19.
12. Sastri V.S., Ghali E., Elboujdaini M., *John Wiley. Sons Ltd.* ISBN: 9780470024546 (2007).

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

قرار يتضمن ترخيص لمناقشة أطروحة دكتوراه في العلوم،
تخصص: علوم المواد.
إن رئيس جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان.
- بمقتضى المرسوم رقم: 70-87 المؤرخ في 17 مارس 1987 المتضمن تنظيم
دراسات ما بعد التدرج.
- بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 89-138 المؤرخ في ف.اتح أوت 1989، المتضمن
إنشاء جامعة تلمسان المعدل و المتمم بالمرسوم التنفيذي رقم 95-205 المؤرخ في
فاتح أوت 1995.
- بمقتضى القرار رقم: 03 المؤرخ في 06 فيفري 1991 المتضمن فتح ما بعد التدرج
الثاني لجامعة تلمسان.
- بمقتضى أحكام المادة 131 من المرسوم التنفيذي رقم 98-254 المؤرخ في غشت
1998 المتعلق بالتكوين في الدكتوراه وما بعد التدرج المتخصص والتأهيل
الجامعي.
التنفيذي رقم 98-254 المؤرخ في غشت 1998 المتعلق بالتكوين في الدكتوراه وما
بعد التدرج المتخصص والتأهيل الجامعي.

يقرر

المادة الأولى:

يرخص للسيد(ة): بلحسن براهيم
بمناقشة أطروحة دكتوراه في العلوم، تخصص: علوم المواد.

المادة الثانية:

- تشكل لجنة المداولات طبقا لملحق هذا المقرر.

المادة الثالثة:

- يكلف السيد نائب رئيس الجامعة المكلف بالدراسات ما بعد التدرج بتنفيذ هذا المقرر.

27 أكتوبر 2016

حرر بتلمسان في:

عن وزير التعليم العالي و البحث العلمي

مدير جامعة تلمسان



مدير جامعة تلمسان

مصطفى جعفرور

Résumé

Le développement de la technique d'assemblage de matériaux a été largement utilisé pour la conception de matériaux de haute résistance. La présente étude montre l'influence des paramètres et les performances d'assemblage par soudure de l'acier $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ sur les différentes zones de la structure telles que la zone fondue (FZ), la zone affectée thermiquement (ZAT), et le métal de base (BM). Les effets des charges thermiques, mécaniques et de la tension appliquée sur la variation de la contrainte, taux d'endommagement, et la sollicitation en milieu physicochimique sélectif sont étudiés. Une méthode exploratoire prédictive a été utilisée pour prévoir l'influence de proportions des éléments additifs du tableau périodique sur les propriétés des aciers.

L'évaluation du comportement thermomécanique et le taux d'endommagement par corrosion de l'acier HLE $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ ont été déterminés par un modèle axisymétrique (symétrie dans la géométrie et conditions aux limites). Différents scénarios sont appliqués afin de minimiser les zones affectées par l'endommagement thermomécanique et les charges appliquées. L'état de surface et la composition chimique des matériaux étudiés ont été déterminés par microscopie électronique à balayage (MEB) et spectrométrie EDS.

L'influence de l'environnement et les paramètres physiques sur l'acier HLE $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ et son comportement d'endommagement en corrosion dans un milieu agressif à base NaCl a été étudié en utilisant la perte de poids, l'évolution du pH de 300k à 370k, l'échange électronique.

Les résultats montrent qu'il y a des variations du taux de corrosion par rapport au type de traitement thermique, fluide de refroidissement, la concentration de la solution, la forme, la taille et la vitesse de refroidissement des échantillons. La résolution de l'équation de Nernst prouve que l'augmentation de la température a un effet direct sur le potentiel d'hydrogène de la solution, la densité de courant et la corrosion du métal. De plus, l'efficacité d'inhibition a été déterminée par calcul théorique et par la méthode mécanique moléculaire et semi-empirique. Ces résultats nous ont guidés à conclure que l'inhibiteur, qui a une faible électronégativité que l'acier $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ a une bonne efficacité.

Une méthode empirique tel que le model Norsok a été appliqué pour déterminer les paramètres sensibles les plus influencés sur la dégradation de matériaux dans un milieu riche en CO_2 . Par conséquent, le taux de corrosion est estimé par l'application d'un calcul théorique basé sur des paramètres physico-chimiques, tels que l'acidité moyenne, la pression partielle de CO_2 , les paramètres thermodynamiques (P, T), et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. En outre, l'application de scénarios nous a permis d'évaluer le risque de corrosion.

Mots clés : Acier HLE – corrosion – milieu sélectif – inhibiteur – soudure – modélisation

Abstract

The assembling technics by using resistance welding is the main element used extensively in industrial applications such as automotive industry, microchips systems, maintenance and reparation of metallic structures solicited by various environments. The development of assembling technics of materials has been widely used for designing high resistance material.

The aim of this study is to evaluate the thermomechanical behavior and damage rate of a HLE steel $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ assembled by Electric resistance welding. Different scenarios are applied in order to minimize damage zones affected by applied loads. The characterization of sample steel simulated at HAZ thermal condition is carried out using SEM- EDS. A two-dimensional asymmetric model is used in modeling. Moreover, samples were exposed to external loads. The maximum equivalent stress is obtained at 4312 C° with 3.7 % maximum strain. Thus, the displacement field vector indicates sense of stress diffusion from ZF to MB, and the damage zone area is highly affected by the variation of voltage.

The influence of environment and physical parameters on $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ HLE steel corrosion damage behaviour in NaCl solutions was studied using weight loss, pH evolution at 300k to 370k, electro-exchanges, and passivity. Herein, the results show that the corrosion rate changes versus type of thermal treatment and cooling fluid, solution concentration, shape, size and cooling speed of the samples. The resolution of Nernst equation proves that the increase in temperature has a direct effect on hydrogen potential of the solution, current and corrosion potential of the metal. Moreover, the inhibition efficiency was determined by theoretical calculation using mechanical molecular and semi-empirical method. These results guided us to conclude that the inhibitor, which has low electronegativity than $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ steel has good efficiency.

The Study of Corrosion Behavior of HLE steel solicited in (CO_2) %. Selective Physicochemical medium is achieved by using empirical method to determine sensible parameters that have huge influence on materials' degradation. Therefore, the corrosion rate is estimated by application of a theoretical calculation based on physicochemical parameters, such as medium acidity, CO_2 partial pressure, thermodynamics parameters (P, T), and mechanical proprieties of studied materials. Moreover, scenarios application permitted us to assess corrosion risk.

Keywords: Steel HLE - corrosion - selective medium - inhibitor - welding – modeling

ملخص

تعتبر تقنيات التجميع باستخدام لحام المقاومة من العناصر الرئيسية المستخدمة على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية مثل صناعة السيارات، الصناعة البترولية وصيانة الهياكل المعدنية و البحرية ; وقد استخدمت على نطاق واسع في تطوير خصائص المواد لتصميم مواد ذات المقاومة العالية.

ان الهدف من هذه الدراسة هو تقييم سلوك والأضرار الميكانيكية الحرارية لمعدن الصلب $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ من فئة HLE. عدة سيناريوهات تم تطبيقها من أجل تقليل اضرار المناطق المتضررة من الجهود المطبقة. تم تشخيص عينة المعدن الصلب باستخدام مجهر فحص استقصائي (SEM)، مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) ومحاكاة عملية التلحيم بالمقاومة. النموذج المستخدم في النمذجة اكسي سمثري ثنائي الأبعاد. وعلاوة على ذلك، تعرضت عينات لجهود خارجية. تم الحصول على أقصى قدر من الضغط عند 4312 درجة مئوية مع قدر أقصى بقد 3.7%.

وهذا، فإن شعاع مجال الإزاحة يشير الى اتجاه نشر التوتر المنطقة المنصهرة (ZF) الي المنطقة الطبيعية (MB) ; و منطقة المتضررة تتأثر بشدة من تغيرات الجهود. تمت دراسة تأثير البيئة والعوامل الفيزيوكيميائية على معدن الصلب $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ من فئة HLE، سلوك ضرر التآكل في محلول كلوريد الصوديوم باستخدام تغير الوزن، و الحموضة من 300 K إلى 370k، التبادلات الكهربائية.

فقد بينت النتائج أن معدل التغييرات للتآكل بدلالة نمط المعالجة الحرارية، سائل التبريد، تركيز المحلول، شكل، حجم وسرعة التبريد للعينات. حل المعادلة نا رست (Nernst) يثبت أن الزيادة في درجات الحرارة لها تأثير مباشر على إمكانية هيدروجين للمحلول، شدة التيار وتآكل المعدن. وعلاوة على ذلك، تم تحديد فعالية التثبيت بالحساب النظري باستخدام الطريقة الميكانيكية الجزيئية وشبه التجريبية. هذه النتائج أرشد لنا لاستنتاج أن المثبتات التي لديها السالبية الكهربائية منخفضة من المعدن الصلب $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ لديها كفاءة جيدة.

تحقق دراسة سلوك تآكل المعدن الصلب $C_{0,12\%} Mn_{1,02\%} Si_{0,29\%}$ من فئة HLE بوجود وسط فزيو كيميائي CO_2 % وباستخدام المنهج التجريبي لتحديد العوامل التي لها تأثير كبير على ضعف المواد، لذلك، تشير التقديرات إلى أن معدل التآكل بواسطة تطبيق الحساب النظري على أساس المعايير الفيزيائية، مثل حموضة الوسط، الضغط الجزئي CO_2 %، العوامل الترموديناميكية (P, T) ، و الخصائص الميكانيكية للمواد المدروسة. وعلاوة على ذلك، تطبيق سيناريوهات سمحت لنا بتقييم مخاطر التآكل .

كلمات المفتاحية: المعدن HLE - تآكل - وسط انتقائي - المانع - لحام - نمذجة