

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Filière : Électromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Présenté par :

AMARA Mohammed Abdallah

Thème

Comportement de l'acier DC0xEK à la corrosion

Soutenu le **25/06/2024**, Devant le jury composés de :

Pr. HADJ MELIANI Mohammed	Professeur / UHB-Chlef	Président
Pr. MERIEM BENZIANE Madjid	Professeur / UHB-Chlef	Examineur
Dr. OMAR El-Hadj	MAA / UHB-Chlef	Examineur
ZAHLOUL Hamou	Professeur / UHB-Chlef	Encadreur
AMARA Khawla	Docteur / CRTI	Co-Encadreur

PROMOTION: 2023 – 2024

ملخص

في سياق صناعي متنافس بشكل متزايد، يُطالب مصنع EIMS في ميليانا بتقليل أوقات التصنيع والتطوير وتكاليف منتجاتهم الصحية، والأهم من ذلك تقليل كمية القطع المرفوضة التي تُنتج من خلال القطع بالضغط. في هذا المصنع، تتزايد كمية القطع المرفوضة بشكل متزايد بسبب عيوب الكسر والطي والخدوش التي تظهر بعد التلميع والتشقق نتيجة للتآكل.

هدف هذا العمل هو تشخيص أسباب تآكل حوض الاستحمام المطلي. ولذلك، سيتم إجراء اختبارات كهروكيميائية في CRTI لتقييم سلوك المادة DC0xEK تجاه التآكل بدلالة معدل التشوه.

الكلمات المفتاحية: فولاذ DC0xEK, السلوك الميكانيكي, ترابط الصورة, السلوك الكهروكيميائي.

Abstract

In an industrial context that is becoming increasingly competitive, the EIMS Company in Miliana is faced with the challenge of reducing manufacturing and development times and costs for its sanitaryware products, with a particular focus on minimizing scrap generated by stamped parts. In this company, scrap rates have increased due to problems such as breakage, wrinkling, nail marks occurring after enameling and corrosion-induced cracking.

The aim of this study is to diagnose the causes of corrosion in enameled bathtubs. To achieve this aim, electrochemical tests will be carried out at CRTI to assess the corrosion behavior of the DC0xEK material as a function of strain rate.

Keywords: Steel DC0xEK, mechanical behavior, image correlation, electrochemical behavior.

Résumé

Dans un contexte industriel de plus en plus compétitif, l'entreprise EIMS de Miliana est amenée à réduire les délais et les coûts de fabrication et de développement de leurs produits sanitaires et le plus important de réduire la mise au rebut des pièces fabriquées par emboutissage. Dans cette entreprise, les rebuts sont de plus en plus excessifs à cause des défauts de rupture, de plissement, des coups d'ongle qui se forment après l'émaillage et la fissuration par corrosion.

L'objectif du travail est de diagnostiquer les causes de corrosion des baignoires émaillées. Pour cela, des tests électrochimiques seront effectués au CRTI pour évaluer le comportement du matériau DC0xEK à la corrosion en fonction des taux de déformation.

Mots clé: Acier DC0xEK, comportement mécanique, corrélation d'image, comportement électrochimique.

Remerciements

Tout d'abord, je suis reconnaissant envers Dieu, dont la guidance et la clarté m'ont permis de persévérer à travers les défis et les succès de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ma gratitude à mes promoteurs, mon encadreur **Pr. ZAHLOUL Hamou** et Co-encadreur **Dr. AMARA Khawla**, pour leur encadrement précieux, leurs conseils éclairés et leur soutien constant. Leur expertise et leur engagement ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

Un remerciement particulier à **Mr. HADJ AMAR Adel**, dont l'encadrement attentif et les suggestions judicieuses ont enrichi la qualité de ce projet de recherche.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury **Pr. HADJ MELIANI**, **Pr. MERIEM BENZIANE** et **Dr. HADJ OMAR** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de bien vouloir porter intérêt à ce mémoire.

Je suis également reconnaissant envers toute l'équipe de l'entreprise **EIMS** pour leur collaboration et l'accès aux ressources nécessaires qui ont facilité cette étude.

Mes remerciements vont également aux chercheurs et ingénieurs du centre de recherche **CRTI**, notamment **Dr. HADJI Idir**, **Mr. KERMANI Hani**, **Mr. BOUDJANA Abdrezzake**, **Dr. Haddad Ahmed**, **Mme. LOUNAS Karima** et **Dr. BEDJAOUI Walid**, et à ceux qui ont contribué de manière significative à sa réalisation pour leurs discussions stimulantes et leurs contributions techniques qui ont enrichi mes recherches et ont élargi mes perspectives.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leur compréhension tout au long de cette période exigeante.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I Revue Bibliographique

I.1.	Introduction	3
I.2.	Déformation par emboutissage.....	3
I.2.1.	Principe de l'emboutissage	3
I.2.1.1.	Emboutissage à froid	4
I.2.1.2.	Emboutissage à chaud	5
I.2.2.	Étapes de la déformation par emboutissage	5
I.2.3.	Mode d'emboutissage	6
I.2.4.	Matériaux et forme d'emboutis.....	7
I.2.4.1.	Poinçon.....	7
I.2.4.2.	Matrice	7
I.2.4.3.	Serre flan	8
I.3.	Généralités sur la corrosion des métaux et alliages.....	8
I.3.1.	Définition de la corrosion	8
I.3.2.	Classification de la corrosion.....	9
I.3.2.1.	Corrosion généralisée (uniforme).....	9
I.3.2.2.	Corrosion localisée	11
I.3.3.	Processus de la corrosion :	16
I.3.3.1.	Corrosion électrochimique :	17
I.3.3.2.	Facteurs influençant la corrosion	18
I.4.	État de l'art sur processus de fabrication des baignoires émaillées par EIMS.....	20
I.4.1.	Présentation de l'entreprise EIMS	20

I.4.1.1.	Historique	20
I.4.1.2.	Activités	20
I.4.1.3.	Ressources humaines.....	21
I.4.1.4.	Organigramme de l'entreprise EIMS Miliana.....	22
I.4.1.5.	Développement et investissement	23
I.4.2.	Étude sur la fabrication d'appareils sanitaires	23
I.4.3.	Matériaux de la tôle utilisée en emboutissage par l'entreprise EIMS	23
I.4.3.1.	Classification des aciers	23
I.4.3.2.	Tôles en aciers standards pour emboutissage.....	25
I.4.3.3.	Dénomination européenne des aciers	25
I.4.4.	Étapes de fabrication de baignoire à l'EIMS	26
I.4.4.1.	Chargeur de tôle (flan)	26
I.4.4.2.	Emboutissage :	27
I.4.4.3.	Découpage, Détourage, Pliage	28
I.4.4.4.	Chaine de soudure	30
I.4.4.5.	Dégraissage, passivation et séchage.....	31
I.4.4.6.	Chaine d'émaillage.....	31
I.4.5.	Problèmes et défauts des baignoires	33
I.4.5.1.	Défauts liés à l'emboutissage.....	33
I.4.5.2.	Défauts liés au recuit	36
I.4.5.3.	Défauts liés aux écailles de poisson (coups d'ongle) ‘‘ Fish scale’’	36
I.4.5.4.	Défauts surfaciques :	38
I.4.5.5.	Problèmes d'adhérence	38
I.4.5.6.	Bulles d'air	38
I.5.	Conclusion.....	39
Chapitre II Procédures Expérimentales		
II.1.	Introduction	40

II.2.	Analyse de la composition chimique	40
II.3.	Préparation métallographique	41
II.3.1.	Découpage et prélèvement de l'échantillon.....	41
II.3.2.	Enrobage	42
II.3.3.	Polissage	42
II.3.4.	L'attaque chimique	43
II.4.	Observation microscopique.....	43
II.5.	Essai de traction	43
II.5.1.	Préparation des éprouvettes	43
II.5.3.	Machine d'essai de traction.....	46
II.5.4.	Corrélation d'image numérique CIN	47
II.5.5.	GOM Correlate	48
II.6.	Mesures électrochimiques	50
II.6.1.	Cellule électrochimique	50
II.6.2.	Potentiel à l'abandon.....	51
II.6.3.	Polarisation potentiodynamique (courbe de Tafel).....	51
II.7.	Conclusion.....	52

Chapitre III Résultats et discussions

III.1.	Introduction	53
III.2.	Matériaux d'étude.....	53
III.3.	Microstructures	53
III.4.	Caractérisation des propriétés mécaniques de l'acier DC05EK	54
III.4.1.	Effet de l'orientation sur les propriétés mécaniques.....	54
III.4.2.	Effet du taux de la déformation sur les propriétés mécaniques de l'acier DC05EK	55
III.5.	Corrélation d'image de l'essai de traction de l'acier DCE5EK.....	58
III.6.	Comparaison des comportements électrochimique des aciers DC05EK et DC06EK61	

III.7. Effet du taux de la déformation sur le comportement électrochimique de l'acier DC05EK	63
III.7.1. Potentiel à circuit ouvert	63
III.7.2. Courbe de Tafel.....	65
III.8. Comportement électrochimique de l'acier DC06EK.....	67
III.8.1. Potentiel à l'abandon.....	67
III.8.2. Courbe de Tafel.....	69
III.9. Conclusion	71
Conclusion générale	722
Références bibliographiques	733
ANNEXE	766

Liste des figures

Figure I. 1 Procédé d'emboutissage.	3
Figure I. 2 Étape n°1 : La préparation de l'emboutissage.	5
Figure I. 3 Étape n°2 : Le serrage du flan.	5
Figure I. 4 Étape n°3 : L'emboutissage proprement.	6
Figure I. 5 Étape n°4 : L'enlèvement du poinçon puis du serre-flan.	6
Figure I. 6 Étape n°5 : Le détournage de la pièce emboutie.	6
Figure I. 7 (a) Emboutissage par expansion, (b) Emboutissage profond avec rétreint.	7
Figure I. 8 Corrosion généralisée (uniforme).	10
Figure I. 9 Corrosion galvanique (cas du couple acier - cuivre).	12
Figure I. 10 Réactions partielles dans une piqûre de corrosion [13].	13
Figure I. 11 Corrosion par effet de crevasse [9].	13
Figure I. 12 Corrosion par cavitation.	14
Figure I. 13 Corrosion sous contrainte.	15
Figure I. 14 Corrosion intergranulaire [22].	16
Figure I. 15 Schéma de l'interface d'un acier soumis à un processus de corrosion généralisée : zoom sur les échanges qui opèrent entre les zones anodiques et cathodiques qui sont réparties aléatoirement sur toute la surface : principe d'une pile électrochimique.	18
Figure I. 16 Organigramme de l'entreprise EIMS [26].	22
Figure I. 17 Presse BZE1600-32 d'emboutissage des baignoires.	27
Figure I. 18 Presse BZE 600-32 machine de découpage.	29
Figure I. 19 Machine de pliage des bords.	29
Figure I. 20 Tapis roulant.	30
Figure I. 21 Zone de soudure.	30
Figure I. 22 Ligne de nettoyage des baignoires.	31
Figure I. 23 Ligne d'enduction massique.	32
Figure I. 24 Passage au four pour recuit.	33
Figure I. 25 Défauts de rupture et taux de rebut venant du procédé d'emboutissage des baignoires.	34
Figure I. 26 Défauts de plissement dans le procédé d'emboutissage.	36
Figure I. 27 Apparition d'écailles de poisson (coups d'ongles) dans une baignoire.	37
Figure I. 28 Défauts surfaciques des baignoires après mise en forme.	38

Figure II. 1 Analyseur de la composition chimique OXFORD FOUNDRY MASTER PRO.40	
Figure II. 2 Tronçonneuse.....	41
Figure II. 3 (a) Enrobeuse Stuers labopreess-1, (b) Échantillons enrobés.....	42
Figure II. 4 Figure II.4 (a) Polisseuse Stuers labopreess – 25, (b) échantillons polis.....	42
Figure II. 5 Microscope optique Nikon Elipse LV100ND.....	43
Figure II. 6 Prélèvement des éprouvettes de traction selon différentes directions [39].....	44
Figure II. 7 Préparation des mouchetis (a) avant, (b) après peinture blanches et (c) après la pulvérisation de la peinture noire.	45
Figure II. 8 Outils nécessaires pour la réalisation du mouchetis.	45
Figure II. 9 Machine de traction MTS 100 kN.	46
Figure II. 10 (a) Machine de traction MTS 100 kN, (b) écran d’acquisition.....	47
Figure II. 11 Etape de traitement par GOM : exemple sur l’éprouvette 90° - 40%.....	49
Figure II. 12 Dispositif expérimental.....	50
Figure III. 1 Microstructure des aciers (a) DC05EK, (b) DC06EK.....	54
Figure III. 2 Courbe de traction – contrainte en fonction de déformation – de l’acier DC05EK selon les trois direction 0°, 45°, 90°.....	55
Figure III. 3 Propriétés mécaniques de l’acier DC05EK à partir de l’essai de traction (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	57
Figure III. 4 Résultats de la corrélation d’image des essais de traction effectué selon la direction 0° à différents taux de déformation de gauche à droite 2%,10%, 20%, et 40% respectivement	59
Figure III. 5 Résultats de la corrélation d’image des essais de traction effectué selon la direction 45° à différents taux de déformation de gauche à droite 2%,10%, 20%, et 40% respectivement	60
Figure III. 6 Résultats de la corrélation d’image des essais de traction effectué selon la direction 90° à différents taux de déformation de gauche à droite 2%,10%, 20%, et 40% respectivement	60
Figure III. 7 (a) Potentiel à l’abandon, (b) Courbes de Tafel des aciers DC05EK et DC06EK dans une solution de 3% NaCl.	62
Figure III. 8 Évolution du potentiel OCP de l’acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	64

Figure III. 9 Courbe de Tafel de l'acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.....	66
Figure III. 10 Évolution du potentiel OCP de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	68
Figure III. 11 Courbe de Tafel de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	70

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Classification des types de corrosion.....	9
Tableau I. 2 Facteurs influençant la corrosion.....	19
Tableau I. 3 Identification de la fiche d'entreprise.....	20
Tableau I. 4 Principaux produits fabriqués [26].	21
Tableau I. 5 Représente les effectifs et les ressources humaines de l'entreprise [26].	22
Tableau I. 6 Classification des aciers en fonction de leur composition chimique [29].	24
Tableau I. 7 Grades de tôles d'acier et leurs caractéristiques selon la norme NF EN 10209 [30].	24
Tableau I. 8 Grades de tôles d'acier et leurs caractéristiques selon la norme NF EN 10209 [31].	24
Tableau I. 9 Grades de tôles d'acier et leurs caractéristiques selon la norme NF EN 10209 [32].	25
Tableau III. 1 Composition chimique des aciers d'étude.	53
Tableau III. 2 Propriétés mécaniques de l'essai de traction de l'acier DC05EK selon les trois directions 0°, 45° et 90°.	55
Tableau III. 3 Propriétés mécaniques de l'acier DC05EK à partir de l'essai de traction.....	58
Tableau III. 4 Paramètres de l'extrapolation des courbes de Tafel des aciers DC05EK et DC06EK dans une solution de 3% NaCl.	62
Tableau III. 5 Valeurs du potentiel OCP de l'acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	65
Tableau III. 6 Extrapolation des courbes de Tafel de l'acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	67
Tableau III. 7 Valeurs du potentiel OCP de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	69
Tableau III. 8 Extrapolation des courbes de Tafel de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.	71

Chapitre I : Revue bibliographique

Introduction générale

L'emboutissage des tôles métalliques minces est une technique couramment utilisée dans différents secteurs industriels. À l'Entreprise Industrielle de Matériel Sanitaire Miliana (EIMS), l'emboutissage profond à froid est utilisé pour fabriquer des produits électroménagers et sanitaires de formes complexes. Le matériau utilisé est un acier laminé à froid de haute qualité et résistance mécanique. L'acier émaillé est largement utilisé dans la vie quotidienne pour les plans de travail, les appareils électroménagers et les baignoires imperméables à l'eau et au temps.

Les avancées en chimie et science des matériaux ont permis de créer une nouvelle baignoire résistante à la corrosion, respectueuse de l'environnement et esthétiquement attrayante.

Notre étude consiste à déformer des tôles laminées d'acier DC0xEK à différents taux de déformation (2%, 10%, 20% et 40%) pour stimuler le processus de l'emboutissage, et à étudier l'effet du taux de la déformation sur la résistance à la corrosion par les mesures électrochimiques.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présentera une bibliographie sur l'entreprise EIMS, mettant en lumière ses capacités de production, ses techniques d'emboutissage, ainsi que les défis spécifiques liés au choix des matériaux, en particulier en ce qui concerne la résistance à la corrosion. Une revue exhaustive des processus d'emboutissage enrichira cette section, soulignant leur importance cruciale dans l'industrie des produits sanitaires.

Le deuxième chapitre du mémoire est dédié aux procédures expérimentales. Elle commence par des essais de traction visant à caractériser les propriétés mécaniques des aciers DC0xEK, en analysant les déformations grâce à des techniques de corrélation d'images. Cette approche permettra une meilleure identification des champs de déformation à partir desquels des mesures électrochimiques ont été réalisées afin d'évaluer la résistance à la corrosion des aciers DC0xEK dans des conditions simulées représentatives des environnements sanitaires.

Le troisième chapitre portera sur les interprétations et les discussions des résultats expérimentaux permettant ainsi de tirer des conclusions pertinentes sur l'optimisation des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion de ces aciers.

Ce mémoire vise à apporter une contribution significative à l'amélioration des matériaux utilisés dans l'industrie des produits sanitaires, en intégrant des aspects théoriques et expérimentaux pour relever les défis actuels et futurs de l'emboutissage et de la protection contre la corrosion.

Chapitre I

Revue bibliographique

I.1. Introduction

L'emboutissage est un procédé de mise en forme des pièces en tôles métalliques, réalisé à température ambiante ou parfois à chaud. Il permet d'obtenir des pièces de formes tridimensionnelles complexes en déformant des tôles minces à l'aide d'outils. À l'EIMS de Miliana, l'emboutissage profond à froid est utilisé pour fabriquer des produits électroménagers et sanitaires de formes variées. Dans ce chapitre, nous effectuons une revue bibliographique sur le procédé de fabrication, des aciers utilisés et le phénomène de corrosion.

I.2. Déformation par emboutissage

I.2.1. Principe de l'emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique à froid ou à chaud des métaux, qui transforme une feuille de métal en une surface généralement non développable. Il est réalisé à l'aide d'un outillage comprenant un poinçon et une matrice. L'emboutissage peut être réalisé avec ou sans serre-flan, et permet d'obtenir des pièces de surfaces complexes. Ce processus nécessite l'utilisation d'outillages spécifiques et peut être réalisé à chaud ou à froid sur des tôles minces. L'emboutissage est un procédé de mise en forme qui permet de tenir des cadences de production élevées tout en respectant les tolérances géométriques exigées [1].

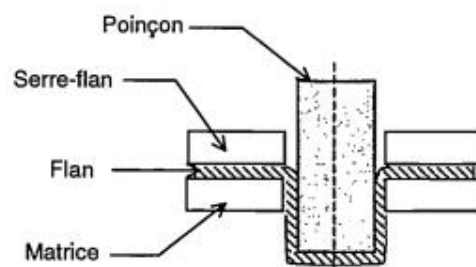


Figure I. 1 Procédé d'emboutissage.

L'emboutissage se fait à l'aide de presses hydrauliques ou mécaniques dans lesquelles on installe des outils comprenant quasiment toujours les pièces principales suivantes :

- Une matrice qui épouse à peu près la forme extérieure de la pièce à réaliser ;
- Un poinçon, ayant la forme intérieure de la pièce, qui va pousser dans la matrice ;
- Une tôle de contour adapté qu'on appelle alors flan ;
- Un serre-flan qui appuie le flan sur l'extérieur de la matrice éviter la formation de plis et réguler l'avancement du métal dans l'outil.

Le processus de l'emboutissage se décompose de la manière suivante :

- Définition de la direction de l'emboutissage ;
- Définition du contour et de la position du flan initial ;
- Dessin du serre-flan pour plaquer la tôle sur la matrice ;
- Mise en forme de la tôle par avancée du poinçon ;
- Découpage des habillages de l'embouti afin d'obtenir la pièce finale.

Les principaux paramètres du procédé sont :

- L'épaisseur initiale de la tôle ;
- La loi de comportement du matériau et l'anisotropie de ce dernier ;
- La vitesse du poinçon ;
- La position du flan initial et le dimensionnement du contour initial ;
- La force de serrage - flan et les coefficients de frottement, ainsi qu'éventuellement la forme et la position de joncs.

Les principales difficultés rencontrées pour obtenir une forme finale correcte sont nombreuses :

- L'état de la surface des tôles doit être parfaitement lisse ;
- Les zones de faibles épaisseurs doivent être contrôlées ;
- Les plis et les ruptures (par striction) doivent être évités ;
- Le retour élastique de la tôle après emboutissage doit être pris en compte.

I.2.1.1. Emboutissage à froid

L'emboutissage à froid est une technique de formage de pièces à température ambiante. Elle est principalement utilisée avec un outillage double effet, mais peut également être utilisée avec un outillage simple effet pour des emboutis peu profonds ou nécessitant peu d'effort de serrage. Cette technique offre une meilleure précision dimensionnelle, réduit les coûts et évite la formation d'oxyde. Cependant, l'épaisseur des tôles et les caractéristiques mécaniques limitent cette technique. Pour les grandes épaisseurs, l'emboutissage doit être effectué en plusieurs passes. De plus, l'écroutissage lors de la mise en forme entraîne un durcissement structural et une baisse de la ductilité. Les contraintes résiduelles créées dans la pièce finie limitent également ses applications en raison du risque de rupture par fatigue.

I.2.1.2. Emboutissage à chaud

L'emboutissage à chaud est principalement utilisé pour former des fonds de réservoir en acier sur des presses hydrauliques simple ou double effet. Cette technique permet de déformer le matériau plus facilement en chauffant le flan et la matrice, évitant ainsi l'écrouissage et la formation de contraintes résiduelles. Cependant, les cadences de production sont plus lentes que pour l'emboutissage à froid en raison de l'inertie de chauffage. De plus, les pièces finies sont de moins bonne qualité en termes d'état de surface et de dimensionnement. Enfin, cette technique nécessite des mesures de sécurité plus importantes.

I.2.2. Étapes de la déformation par emboutissage

Le principe est basé sur la déformation plastique du matériau. L'emboutissage passe par les étapes suivantes [2], [3] :

- **Étape 1** : Dans la première étape, le poinçon et le serre-flan sont relevés. La tôle (ou le flan), préalablement graissé(e), est posé(e) sur la matrice.

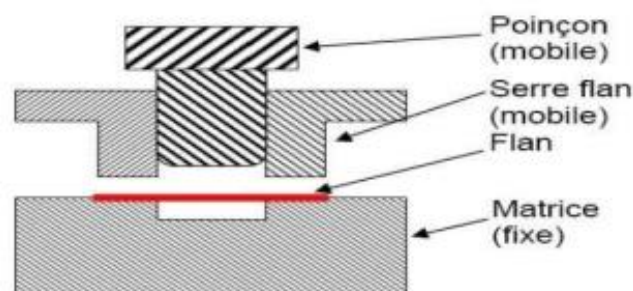


Figure I. 2 Étape n°1 : La préparation de l'emboutissage.

- **Étape 2** : Le serre-flan descend et vient appliquer une pression de serrage afin de maintenir le flan tout en lui permettant de se déformer plastiquement.

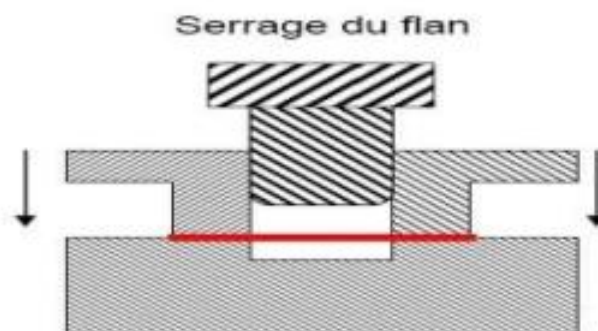


Figure I. 3 Étape n°2 : Le serrage du flan.

- **Étape 3** : Dans la troisième étape, le poinçon descend et déforme plastiquement la tôle.

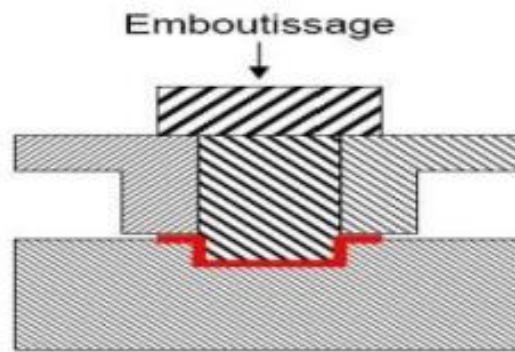


Figure I. 4 Étape n°3 : L'emboutissage proprement.

- **Étape 4** : Le poinçon puis le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).

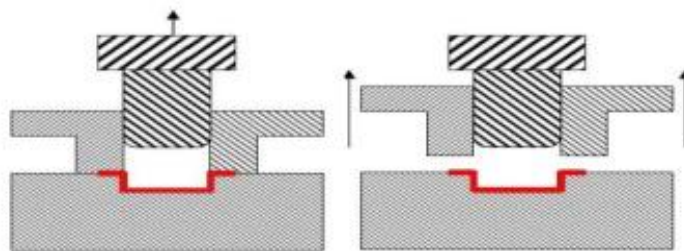


Figure I. 5 Étape n°4 : L'enlèvement du poinçon puis du serre-flan.

- **Étape 5** : La dernière étape est l'élimination par détourage des parties devenues inutiles (Essentiellement les parties saisies par le serre-flan).



Figure I. 6 Étape n°5 : Le détourage de la pièce emboutie.

I.2.3. Mode d'emboutissage

L'emboutissage des tôles implique différentes formes de déformation pour créer une surface creuse. Il existe deux cas limites de déformation :

- L'expansion, qui consiste à augmenter le diamètre d'un corps creux ;
- Rétreint, qui consiste à réduire le diamètre de l'extrémité ouverte d'un corps creux.

L'outil utilisé influence le processus de déformation [4].

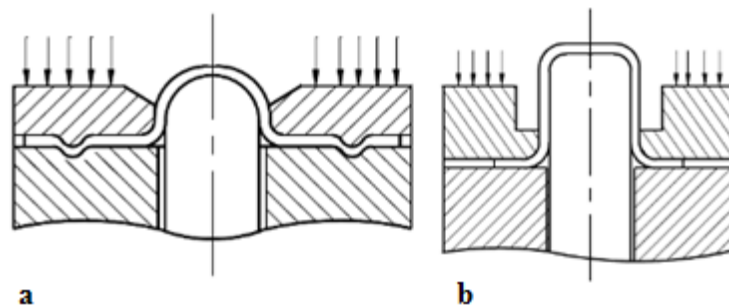


Figure I. 7 (a) Emboutissage par expansion, (b) Emboutissage profond avec rétreint.

I.2.4. Matériaux et forme d'emboutis

La technique d'emboutissage peut être utilisée pour mettre en forme différents matériaux tels que des aciers, des alliages non ferreux ou des pâtes. Cependant, la mise en œuvre de la technique sur une tôle nécessitera des ajustements ou des actions préalables spécifiques en fonction du matériau utilisé.

I.2.4.1. Poinçon

Le poinçon est un outil utilisé pour laisser une marque sur une pièce ou la percer. Il est important de vérifier sa longueur en le soumettant à la compression et au flambement. Sa forme reproduit généralement celle de la pièce voulue, mais des corrections peuvent être apportées pour compenser le retour élastique. Un poinçon doit être soigneusement poli pour éviter que le métal ne glisse dessus. Dans certains cas, un sablage du nez de poinçon peut être nécessaire pour limiter les déformations du métal.

I.2.4.2. Matrice

Une matrice est une empreinte en creux dans un bloc de matière qui représente la pièce à créer. Elle sert d'appui à la tôle pour lui donner sa forme extérieure finale, en tenant compte du retour élastique. La matrice est le plus gros élément de l'outil et doit supporter entièrement le flan. Elle comporte une cavité centrale reproduisant la forme de la pièce à fabriquer, entourée d'une surface annulaire plate ou gauche. Le rayon de matrice, qui entoure la cavité, peut varier pour faciliter l'emboutissage du métal.

I.2.4.3. Serre flan

Le serre-flan est un élément essentiel des outils d'emboutissage, utilisé pour maintenir le flan pendant l'opération afin d'assurer un écoulement homogène du métal et éviter les plis ou autres défauts. Il peut être appliqué directement sur la tôle ou sur des butées autour de la matrice pour bloquer son déplacement. Certains types industriels ajoutent un lubrifiant pour faciliter le glissement de la tôle dans la matrice [5].

I.3. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages

I.3.1. Définition de la corrosion

La corrosion est un phénomène naturel de dégradation des matériaux, en particulier des métaux, résultant d'une réaction chimique ou électrochimique avec son environnement. Elle est souvent considérée comme une transformation du métal en un composé chimiquement plus stable, tel qu'un oxyde, un hydroxyde ou un sulfure [6].

La corrosion est souvent causée lorsque la surface du métal est exposée à un milieu corrosif (gaz ou liquide). Elle peut être influencée par la température (froides ou chaudes) et la composition du milieu corrosif et son pH.

Le processus de corrosion se produit dans des conditions humides ou sèches entraînant une fragilisation et une perte d'efficacité des métaux, ce qui perturbe les systèmes techniques dans lesquels ils sont utilisés.

a. Corrosion humide

La corrosion humide est également connue sous le nom de corrosion électrolytique ou corrosion par immersion, se produit lorsqu'un matériau est exposé à un milieu corrosif contenant de l'eau ou de l'humidité. Dans ce processus, l'eau agit en tant qu'électrolyte essentiel, facilitant les réactions chimiques. Des réactions électrochimiques se produisent entre le matériau métallique, l'eau et les ions environnants, entraînant ainsi la détérioration graduelle du matériau.

b. Corrosion sèche

La corrosion sèche se réfère à la détérioration des matériaux exposés à des gaz corrosifs ou à des atmosphères sèches contenant des substances chimiques réactives. Dans ce contexte, cette forme spécifique de corrosion résulte essentiellement de réactions chimiques directes entre

le matériau et les gaz corrosifs, sans nécessité de la présence d'humidité ou de milieu liquide corrosif pour initier le processus corrosif.

I.3.2. Classification de la corrosion

La corrosion peut être classée en deux grandes familles : la corrosion généralisée et la corrosion localisée. Il existe également différentes classifications basées sur la nature, la composition chimique, les propriétés électrochimiques, la température, l'attaque corrosive, le taux d'attaque et la méthode de détection. On décrit ci-dessous les grands traits des principales formes de corrosion :

Tableau I. 1 Classification des types de corrosion.

Corrosion généralisée (uniforme)	Corrosion localisée
<ul style="list-style-type: none"> – Corrosion acide – Corrosion alcaline – Corrosion complexant 	<p>Macroscopique :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Corrosion galvanique – Corrosion par piqûres – Corrosion caverneuse (par crevasse) – Corrosion par usure mécanique <ul style="list-style-type: none"> ○ Corrosion par érosion ○ Corrosion cavitation – Corrosion filiforme <p>Microscopique :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Corrosion intergranulaire (inter cristalline) – Corrosion sélective – Corrosion sous contrainte <ul style="list-style-type: none"> ○ Corrosion fissurate sous tensions ○ Corrosion sous fatigue – Fragilisation par l'hydrogène

I.3.2.1. Corrosion généralisée (uniforme)

La corrosion généralisée, également appelée corrosion uniforme, est une forme classique de corrosion qui se manifeste par une dissolution uniforme de la surface métallique

due à une réaction chimique ou électrochimique. Elle se produit lorsque tous les points constitutifs de la surface d'un matériau sont attaqués à la même vitesse par le milieu corrosif. Cette forme de corrosion est relativement facile à quantifier et peut être suivie par des contrôles périodiques. Elle est souvent rencontrée dans des environnements acides tels que l'acide sulfurique ou l'acide nitrique. Bien que cette forme de corrosion puisse être coûteuse, elle est généralement peu dangereuse si des mesures préventives sont prises [7].

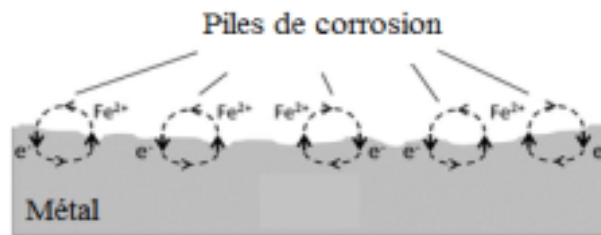


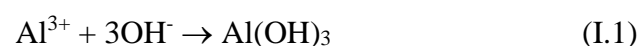
Figure I. 8 Corrosion généralisée (uniforme).

a. Corrosion acide

La corrosion acide lorsque la concentration en H^+ dans un milieu aqueux est suffisamment faible pour permettre la réduction cathodique de l'eau en hydrogène. Cette forme de corrosion est généralement généralisée, car les produits de corrosion sont solubles dans le milieu acide, évitant ainsi le dépôt d'oxyde métallique. La réaction cathodique produit de l'hydrogène moléculaire qui peut fragiliser le métal et entraîner des bris à haute température ou en présence d'un pH très acide.

b. Corrosion alcaline

La corrosion alcaline est causée par la réaction des métaux amphotères avec des substances alcalines. Par exemple, l'hydroxyde d'aluminium se précipite et forme une couche protectrice :



À un pH élevé, l'hydroxyde d'aluminium peut se resolubiliser suivant la réaction :



L'aluminium, le zinc et même le fer dans les chaudières sont particulièrement sensibles à ce type de corrosion. Cela peut être se produire suite à :

- Un pH trop élevé dans les eaux en circulation.

- Une surchauffe localisée et à la surconcentration associée en ions OH^- dans l'eau.

c. Corrosion complexant

Les complexant sont des agents chimiques qui forment des complexes solubles et stables avec les ions métalliques. Ils sont utilisés pour prévenir les dépôts dans les chaudières, mais peuvent également contribuer à la corrosion du métal de base en réagissant sur les couches passives.

I.3.2.2. Corrosion localisée

La corrosion localisée est une forme de corrosion qui se concentre sur une petite surface plutôt que d'être uniformément répartie. C'est souvent la forme la plus grave de corrosion car elle peut entraîner des dégradations profondes et rapides des composants. Elle diffère de la corrosion uniforme car elle implique des endroits anodiques et cathodiques distincts.

La corrosion localisée peut être causée par des hétérogénéités dans le matériau ou l'environnement, et peut poser de nombreux problèmes. Elle peut être mesurée par des observations métallographiques et des mesures électrochimiques [8], [9].

Les principales causes de ce phénomène de corrosion sont :

- Surface de métal chimiquement hétérogène ;
- Différence de potentiel entre les différentes parties du métal créées par déformation ;
- Endommagement local de la couche passive.

La corrosion localisée est un type de corrosion qui ne touche que certaines zones spécifiques du matériau, affectent principalement les matériaux qui peuvent être passivés et peuvent être dangereuses car :

- Certains types de corrosion localisée peuvent se produire dans des milieux peu agressifs ;
- De très faibles pertes de métal peuvent causer la destruction totale de structures importantes ;
- Elles sont souvent très difficiles à détecter avant que les dommages ne soient devenus graves et une évaluation quantitative des dommages est en général difficile ;

- La détection de défauts sur des appareils en service est coûteuse car elle nécessite des examens visuels détaillés ou des techniques de contrôle non destructif. Pour limiter les coûts, il est important de prévoir les zones les plus susceptibles de présenter des dommages.

a. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique se produit lorsque deux métaux différents en contact électrique sont immergés dans une solution conductrice, formant une pile électrochimique. Le métal le moins noble subit une corrosion plus sévère, tandis que le métal le plus noble est protégé. Cette forme de corrosion est courante en milieu aqueux et est souvent due à une mauvaise conception des installations [10].

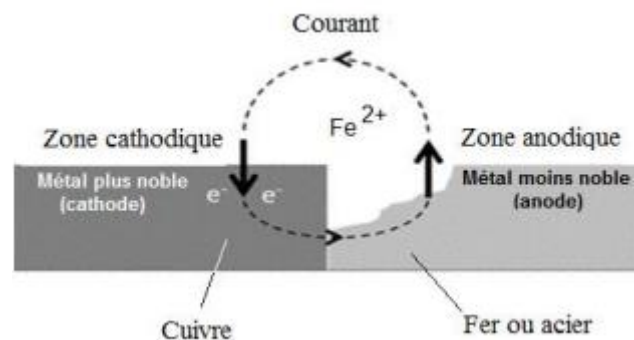


Figure I. 9 Corrosion galvanique (cas du couple acier - cuivre).

b. Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres est une forme localisée de corrosion qui produit des trous ou des piqûres à la surface du métal. Elle est souvent le résultat d'une inhibition de la corrosion incomplète ou de concentrations excessives d'ions corrosifs, tels que les chlorures.

Pour lutter contre la corrosion par piqûres, on peut envisager certaines méthodes telles que :

- Désaérer les solutions chlorurées ou au moins assurer par l'agitation une concentration uniforme en oxygène dissous ;
- Abaisser la température d'emploi ;
- Appliquer la protection cathodique dans les milieux qui ne sont pas trop résistants (l'eau de nier).

La corrosion par piqûres peut entraîner une pénétration rapide et la destruction du métal, en faisant une forme dangereuse de corrosion. Elle est couramment observée dans des matériaux

tels que l'acier inoxydable et peut être difficile à détecter en raison de la petite taille des piqûres et de la présence de dépôts de corrosion [11], [12].

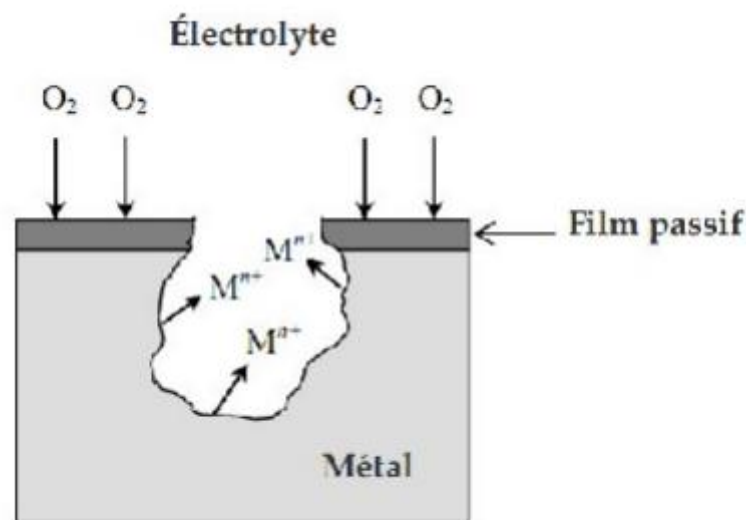
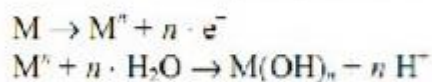


Figure I. 10 Réactions partielles dans une piqûre de corrosion [13].

c. Corrosion caverneuse (par crevasses) :

La corrosion caverneuse est provoquée par la stagnation d'eau dans des endroits privés d'oxygène, où des anions corrosifs peuvent se concentrer. Elle peut se manifester dans les cavités et recoins des structures métalliques, et est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Pour prévenir cette forme de corrosion, il est recommandé d'éliminer les interstices de construction et d'optimiser la conception des pièces pour éviter la formation de cavités artificielles [9], [14].

Réactions anodiques (zone désaérée)



Réaction cathodique (zone aérée)

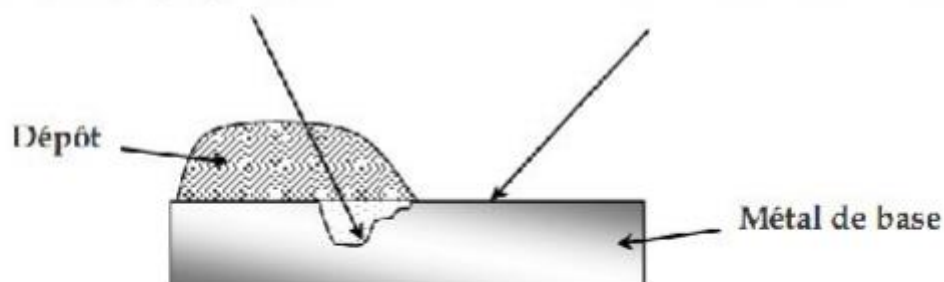
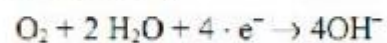


Figure I. 11 Corrosion par effet de crevasse [9].

d. Corrosion par usure mécanique

La corrosion par usure mécanique est un phénomène qui se produit lorsque le métal est soumis à la fois à l'usure mécanique et à la corrosion. L'usure mécanique dégrade la protection naturelle du métal, tandis que la corrosion reforme des films d'oxyde sur sa surface. Cela entraîne une attaque du métal selon l'un des deux processus suivants :

e. Corrosion par érosion :

La corrosion par érosion est une forme de détérioration accélérée des matériaux due à l'action combinée de l'érosion physique et de la corrosion chimique. Elle se manifeste par des cannelures ou cratères sur la surface des métaux exposés à un écoulement rapide de fluide, notamment au niveau des coudes et des tés. La corrosion-érosion entraîne l'élimination des produits de corrosion résultant de l'action érosive du fluide ou des particules en suspension dans le fluide. Cette forme de corrosion peut être accentuée par la formation de dépôts de corrosion adhérents, entraînant une accélération du processus de corrosion. Une forme spécifique de corrosion par érosion est la corrosion par cavitation, qui se produit dans les turbines hydrauliques et les pompes [15], [16].

f. Corrosion par cavitation :

La corrosion par cavitation est un phénomène qui se produit lorsque de petites bulles de vapeur se forment et implosent, créant des tensions physiques importantes sur les surfaces touchées. Cela entraîne une forme de corrosion connue sous le nom de "corrosion par cavitation". Ce type de corrosion est courant sur les éléments soumis à des grandes vitesses ou à des vibrations importantes, tels que les roues de pompes ou les composants de moteurs à explosion. Il est également observé sur les hélices des navires et des turbines [15], [17], [18].

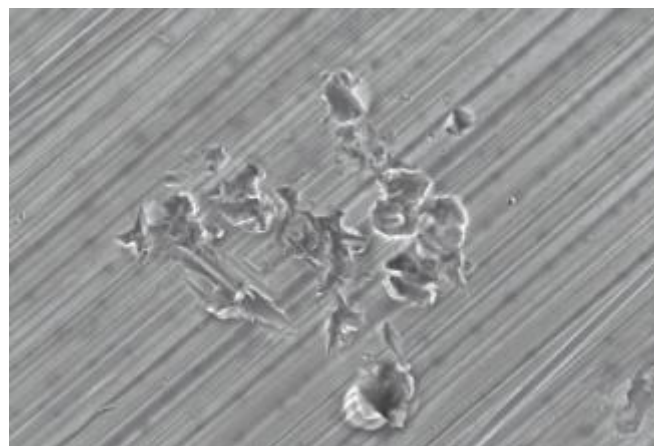


Figure I. 12 Corrosion par cavitation.

g. Corrosion filiforme

La corrosion filiforme est un type de corrosion qui se produit dans certains revêtements, tels que la peinture, sous forme de filaments filiformes distribués de manière aléatoire.

h. Corrosion sous contrainte :

La corrosion sous contrainte est un type de corrosion qui résulte de l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif. Elle se manifeste par des fissures pouvant entraîner la rupture de la pièce. Les pertes de poids sont généralement faibles, mais les conséquences pratiques peuvent être importantes. Ce phénomène peut affecter différents types de matériaux et est influencé par des facteurs tels que les contraintes, la nature du milieu, le temps et la température [19], [20].

- La température : la corrosion sous contrainte se développant rarement en dessous de 50°C ;
- Les contraintes appliquées ou résiduelles subies localement par la pièce ;
- La corrosivité du milieu : présence de Cl^- , H_2S ou milieux caustiques NaOH , les milieux chlorurés et meilleurs même dans les milieux H_2S .

La protection contre la C.S.C peut se faire en agissant sur les différents facteurs qui interviennent en C.S.C, notamment :

- Élimination ou diminution des contraintes par traitement thermique ;
- Élimination des ions agressifs spécifiques ;
- Traitement de surface éliminant les contraintes dues à l'usinage ;
- Diminution de la température d'emploi ;
- Protection cathodique ;
- Utilisation d'inhibiteurs de corrosion ;

Choix judicieux du matériau et des traitements thermiques et mécaniques convenables.

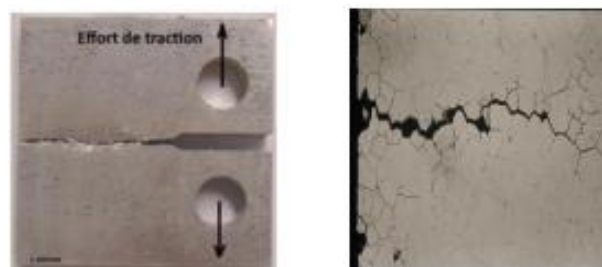


Figure I. 13 Corrosion sous contrainte.

i. Corrosion intergranulaire :

La corrosion inter granulaire est une forme de corrosion qui se manifeste aux joints de grains des métaux, provoquant des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal. Elle peut être causée par des phases précipitées lors d'un traitement thermique, conduisant à une attaque sélective en profondeur le long des joints de grains. Cette forme de corrosion est particulièrement dangereuse car elle peut affaiblir significativement la résistance mécanique du métal [21], [22].

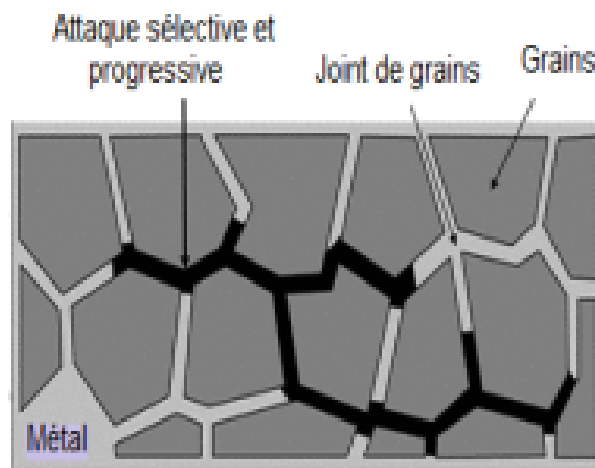


Figure I. 14 Corrosion intergranulaire [22].

I.3.3. Processus de la corrosion :

Le phénomène de corrosion résulte d'interactions complexes et variées entre un matériau et son environnement, englobant des processus chimiques et/ou physiques. Même à l'heure actuelle, une compréhension exhaustive de la corrosion demeure insaisissable en raison des limitations inhérentes aux tests de laboratoire qui ne garantissent pas toujours une prédiction précise du comportement d'un métal ou d'un alliage face à la corrosion. Il est crucial de noter que la résistance à la corrosion varie selon les conditions environnementales spécifiques ; ainsi, aucun métal n'est entièrement à l'abri de ce phénomène.

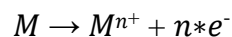
En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

- Corrosion chimique (sèche) ;
- Corrosion biochimique ;
- Corrosion électrochimique (humide) ;
- Corrosion sous contrainte (mécanique).

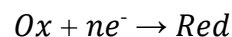
- Corrosion par impact (corrosion érosion, corrosion par impingement, corrosion par cavitation et corrosion par frottement)

I.3.3.1. Corrosion électrochimique :

La corrosion électrochimique est un processus de transformation d'un métal de l'état atomique à l'état ionique, Impliquant des réactions d'oxydation et de réduction :



Elle se produit par une réaction d'oxydation où le métal se transforme en ions positifs et libère des électrons. Pour maintenir la neutralité du milieu, ces électrons doivent être consommés par une réaction de réduction cette réaction peut être schématisée par :



La corrosion électrochimique nécessite la présence d'un agent réducteur et se produit lorsque des hétérogénéités existent dans le métal ou dans la réaction, formant une pile où la zone anodique est corrodée. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydo-réduction, dont :

- La réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction « anodique » ;
- La réaction de réduction d'un agent oxydant et appelée réaction « cathodique ».

Pour une corrosion électrochimique on a :



Ce type de corrosion est principalement causé par la présence d'eau au contact des métaux et est fréquent dans les environnements naturels et industriels.

Elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il y a une dissymétrie de composition dans le métal ou le réactif.

Les différences de propriétés entre les différentes parties du métal créent des micro-ondes et des microcathodes qui forment des couples électriques.

Lorsque ces électrodes sont plongées dans un électrolyte, elles subissent une corrosion électrochimique où les anodes sont attaquées en fonction de l'intensité du courant débité par les piles locales [23]-[25].

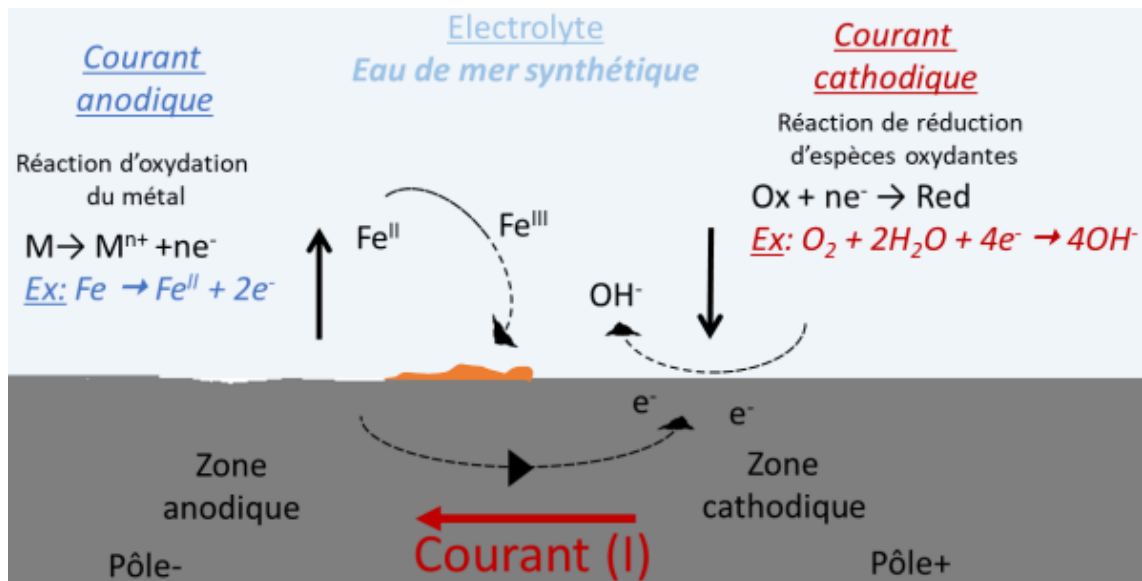


Figure I. 15 Schéma de l'interface d'un acier soumis à un processus de corrosion généralisée : zoom sur les échanges qui opèrent entre les zones anodiques et cathodiques qui sont réparties aléatoirement sur toute la surface : principe d'une pile électrochimique.

I.3.3.2. Facteurs influençant la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs. Ces facteurs sont de deux types : externes et internes, qu'elle soit humide ou sèche et qui peuvent être classés en quatre catégories principales [14] :

- Facteurs définissant les modes d'attaque ;
- Facteurs métallurgiques ;
- Facteurs définissant les conditions d'emploi ;
- Facteurs dépendant du temps.

Le tableau suivant regroupe les principaux :

Tableau I. 2 Facteurs influençant la corrosion.

Facteurs définissant les modes d'attaque	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration de réactif ; - Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO₂, NH₃ H₂S...) ; - Acidité (pH) du milieu, salinité, résistivité ; - Additions d'inhibiteurs ; - Température ; - Pression ; - Présence de bactéries.
Facteurs métallurgiques	<ul style="list-style-type: none"> - Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines ; - Impuretés dans l'alliage, inclusions ; - Procédé d'élaboration ; - Traitements thermiques ; - Traitements mécaniques ; - Additions protectrices.
Facteurs définissant les conditions d'emploi	<ul style="list-style-type: none"> - État de surface, défauts de fabrication ; - Forme des pièces ; - Sollicitations mécaniques ; - Emploi d'inhibiteurs ; - Procédés d'assemblage, (couples galvaniques, soudures, etc.) ; - Croûte d'oxydes superficiels ; - Force électromotrice extérieure (électrolyse).
Facteurs dépendant du temps	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement ; - Tensions mécaniques internes ou externes ; - Température ; - Modification des revêtements protecteurs ; - Modalité d'accès de l'oxygène ou autre gaz dissous ; - Apparition d'un dépôt (calcaire ou autre).

I.4. État de l'art sur processus de fabrication des baignoires émaillées par EIMS

I.4.1. Présentation de l'entreprise EIMS

I.4.1.1. Historique

La société nationale de construction métallique a été créée en 1976 et transférée à ENIEM en 1998. L'unité d'emboutissage et d'émaillage de Miliana a été lancée dans le cadre du programme 1974/1977 pour la fabrication d'articles sanitaires en acier embouti/émaillé. Cette unité a été créée pour répondre aux besoins nationaux en articles sanitaires et offrir un emploi aux mineurs suite à la fermeture des mines de Zaccar [26].

- En 1976, l'entreprise fabrique des produits aux annexes pour la satisfaction du marché national et être indépendant des fournisseurs étrangers.
- En 1983, elle a été transformée en PROMETAL suite à une restructuration. En 1998, elle a été rattachée à l'ENIEM et a commencé la production.
- En 1999. En 2005, la filiale EIMS a été créée. En 2018, l'entreprise a été transférée au groupe industriel ELEC EL DJZAIR.

Tableau I. 3 Identification de la fiche d'entreprise.

Nom de l'entreprise : Entreprise Industrielle de Matériel Sanitaire (EIMS).
Capital social : 485 000 000,00 DA
Forme juridique : Société par actions
NRC : 0763932 B05
Adresse : Route Hammam, BP 47 Miliana, Province d'Ain Defla
Société mère : Holding elec el djazair
PDG : M. HAMDI Benyoucef
Personnel : 150 employés.
Date de création : 1979

I.4.1.2. Activités

L'entreprise fabrique et commercialise des articles sanitaires en acier émaillé et en inox avec une capacité de production de 70 000 unités par an, en utilisant un seul groupe de travail travaillant 8 heures par jour et 6 jours par semaine.

EIMS se spécialise dans la production et la vente de produits sanitaires en acier émaillé, acier inoxydable et acrylique ABS. Ils achètent également des produits d'autres entreprises au sein du groupe industriel pour les revendre. Les articles fabriqués sont les suivants :

- Baignoires, éviers, lavabos, receveurs de douche, brouettes, acier émaillé ;
- Baignoires en acrylique Abs ;
- Cuisinière à gaz naturel ;
- Balance électronique ;
- Couvercle d'éclairage ;
- L'emboutissage ;
- Thermoformage ;
- Émaillage.

Tableau I. 4 Principaux produits fabriqués [26].

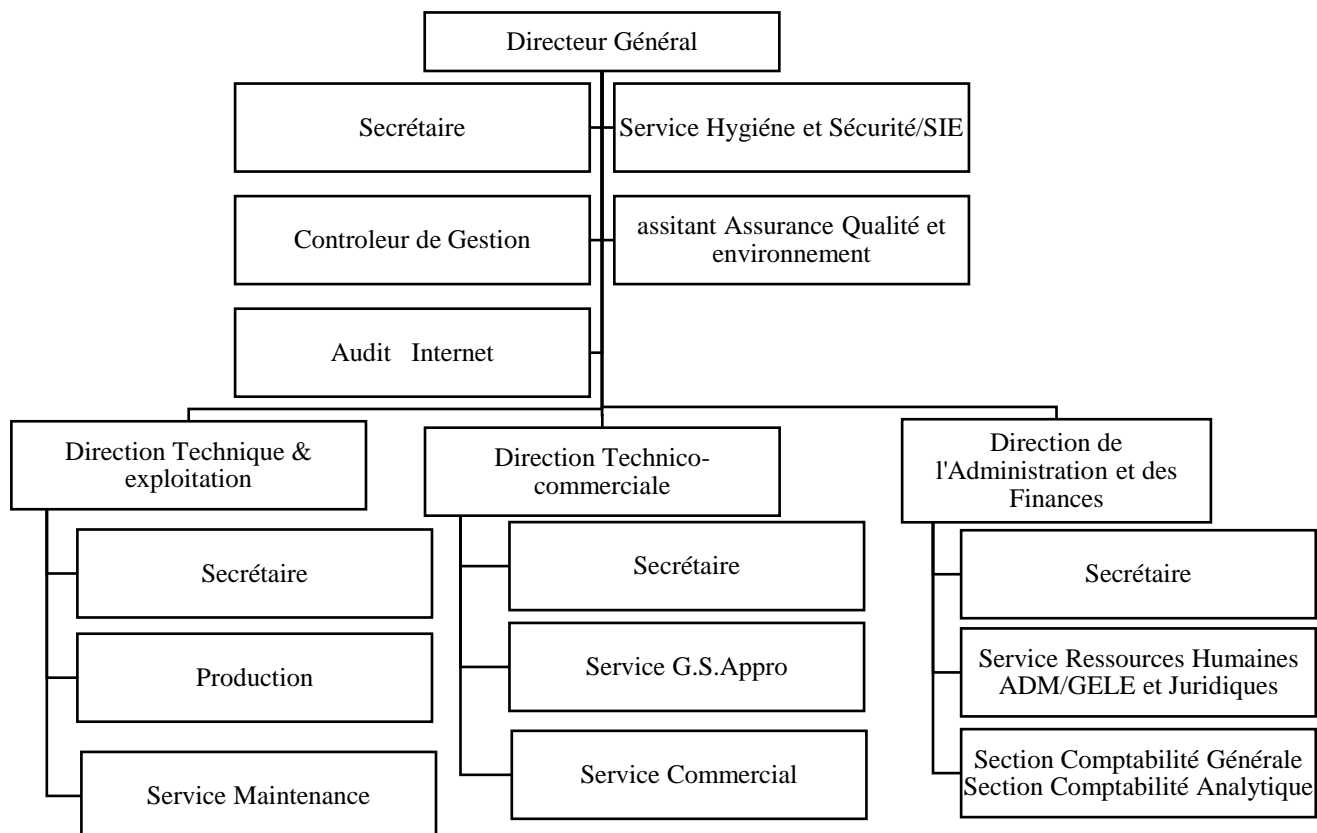
Articles sanitaires en acier émaillé	Articles sanitaires en ABSAcrylique	Electroménager et autres produits
<ul style="list-style-type: none"> - Baignoire 1,70m ; - Baignoire 1,60m ; - Baignoire 1,40m - Baignoire 1,05m ; - Receveur de douche 0,7m ; - Lavabo collectif 1,2m ; - Lavabo 0,6m ; - Evier de cuisine double bacs 1,2m ; - Evier de cuisine un bac 1m ; - Réchaud à gaz naturel ; - Bac de brouette. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baignoire 1,70m ; - Baignoire 1,60m ; - Baignoire 1,40m. 	<ul style="list-style-type: none"> - Chauffage à gaz naturel 9000Kcal ; - Réchaud plat à deux feux en acier émaillé ; - Balance de pesée électronique ; - Brouette ; - Réflecteurs poteau d'éclairage ; - Plafonnier d'éclairage pour bureau ; - Capos pour poteau d'éclairage.

I.4.1.3. Ressources humaines

Ce tableau qui suit représente les effectifs et les ressources humaines de l'entreprise.

Tableau I. 5 Représente les effectifs et les ressources humaines de l'entreprise [26].

EFFECTIF PAR GROUPE SOCIO-PROF. ET PAR SECTION ACTIF						
Structure	Group Socio-Professionnels					
	Cadre Dir.	Cadre Sup.	Cadre M.	Maitrise	Exécutant	Ensemble
Direction	1	2	2	1		6
D. Technique			3	10	1	14
Service de Production		1	3	12	41	57
DAF			3	6	4	13
Service. Qualité				2	2	4
Service. Commerce.				4	2	6
S. Appro			1	3	1	5
S. Sécurité			1	7	23	31
TOTAL	1	3	13	45	74	136

I.4.1.4. Organigramme de l'entreprise EIMS Miliana**Figure I. 16** Organigramme de l'entreprise EIMS [26].

I.4.1.5. Développement et investissement

- L'entreprise a investi dans la fabrication d'articles sanitaires en matériaux de synthèse avec un partenaire. L'objectif est de diversifier les articles sanitaires. L'entreprise prévoit de produire et de commercialiser 25 000 baignoires en ABS acrylique thermoformé et 15 000 éviers en thermo compressé. Le coût prévisionnel du projet est de 100 MDA ;
- L'entreprise prévoit de rénover son parc d'outils de poinçonnage afin de produire de nouveaux formats de baignoires ;
- La formation des ingénieurs et techniciens dans la modélisation et la simulation numérique des pièces et des opérations de mise en forme est d'un grand intérêt pour les entreprises [26].

I.4.2. Étude sur la fabrication d'appareils sanitaires

Le processus de fabrication de l'acier inoxydable sanitaire nécessite une manipulation soigneuse pour éviter la contamination de l'environnement de fabrication. Les équipements en acier inoxydable nécessitent une finition sanitaire lisse, sans rayures et non corrosive. Différentes finitions mécaniques et chimiques peuvent répondre aux exigences sanitaires, il est donc important de comprendre les critères de désignation des finitions pour choisir le type approprié [27].

I.4.3. Matériaux de la tôle utilisée en emboutissage par l'entreprise EIMS

I.4.3.1. Classification des aciers

Les aciers sont des alliages métalliques durs et résistants composés de fer, de carbone et d'autres éléments. Ils sont largement utilisés dans l'industrie pour leur aptitude à l'emboutissage et à l'émaillage. Il existe une grande variété d'aciers dans le monde, chacun ayant des compositions chimiques différentes et étant classés selon des systèmes de numérotation spéciaux [28]. Il existe donc de nombreuses classifications de l'acier et la classification la plus courante est mentionnée ci-dessous selon :

- La composition ;
- L'application ;
- La pratique de désoxydation ;
- Les méthodes de fabrication ;
- Le traitement thermique.

Tableau I. 6 Classification des aciers en fonction de leur composition chimique [29].

Type	C (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)	S (%)	Élongation (%)
Extra doux	0.15	0.4	0.04	0.03	0.02	30
Souple	0.25	0.4	0.04 - 0.06	0.03 - 0.10	0.02 - 0.03	25
Demi-tendre	0.35	0.4	0.06	0.15	0.03	20
Demi-dur	0.55	0.5	0.06	0.20	0.03	15
Dure	0.55	0.6	0.06	0.25	0.03	10
Très dur	0.65	0.7	0.06	0.3	0.03	5

L'entreprise EIMS utilise les aciers légers DC05EK et DC06EK pour l'embouteillage des baignoires en raison de leur faible dureté et de leur composition principalement composée de ferrite, de manganèse, de silicium et de carbures, offrent une large gamme de formabilités.

Les feuilles métalliques de tôles DC0xEK, fabriquées par laminage à froid et conformes à la norme NF 10209 EN, sont utilisées pour l'émaillage vitrifié des produits plats en acier doux laminés à froid.

Tableau I. 7 Grades de tôles d'acier et leurs caractéristiques selon la norme NF EN 10209 [30].

Grade	Numéro	R _m	R _{eH}	A (%)	C (%)	Ti (%)
DC05EK	1.0312	270-330	180-200	39-40	max 0.06	
DC06EK	1.0873	270-350	170-180	41	max 0.02	max 0.3

Tableau I. 8 Grades de tôles d'acier et leurs caractéristiques selon la norme NF EN 10209 [31].

Grade	Numéro	R _m	R _{eH}	A (%)	C (%)	Ti (%)
DC05EK		270-350	200	36	max 0.08	
DC06EK	1.0869	270-350	190	38	max 0.02	max 0.3

Où :

R_m : Résistance à la traction (MPa)

R_{eH} : Limite d'élasticité minimale (MPa)

A% : Allongement minimal $L_0 = 80$ mm (%)

- DC01EK, DC04EK, et DC05EK, aciers cémentés destinés à l'émaillage conventionnel utilisant une couche de fond.
- DC06EK et DC06ED, aciers sans interstitiel pour emboutissage très difficile destinés respectivement à l'émaillage conventionnel et à l'émaillage direct. Respectivement à l'émaillage conventionnel et à l'émaillage direct.

Le tableau ci-dessous illustre la composition chimique des matériaux DC05EK et DC06EK :

Tableau I. 9 Grades de tôles d'acier et leurs caractéristiques selon la norme NF EN 10209

[32].

NF EN 10209	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ti (%)
DC05EK	≤ 0.080	≤ 0.50	≤ 0.025	≤ 0.050	-
DC06EK	≤ 0.020	≤ 0.50	≤ 0.020	≤ 0.050	≤ 0.200

I.4.3.2. Tôles en aciers standards pour emboutissage

La plupart des tôles en aciers standards pour emboutissage sont des aciers doux calmés par l'aluminium, avec une matrice de ferrite légèrement alliée et peu de carbures. Il y a différentes catégories d'aciers, selon la norme NF EN 10130, allant des produits moyennement formables aux qualités très formables.

I.4.3.3. Dénomination européenne des aciers

En ce qui concerne ce domaine, la première lettre d'une désignation européenne normalisée NF EN 10130 concerne l'application de la qualité en question ; on peut trouver :

- D : acier pour formage à froid ;
- E : acier de construction mécanique ;
- H : acier à haute résistance pour formage à froid ;
- P : acier pour appareil à pression ;
- S : acier de construction avec garantie de résilience ;
- T : fer noir, blanc ou chromé (aciers pour emballage).

La deuxième lettre, s'il y en a une, donne des indications sur l'élaboration de l'acier :

- C : acier laminé à froid ;
- D : acier laminé à chaud ;
- X : indéfini, acier laminé à chaud ou à froid ;
- S : recuit sur base (aciers pour emballage) ;
- H : recuit continu (aciers pour emballage).

Il peut y avoir une troisième lettre :

T : indique que le nombre qui suit spécifie la résistance à la traction de la nuance.

Les chiffres qui suivent les lettres peuvent avoir trois significations :

- Après les premières lettres H, P ou S, la limite d'élasticité minimale garantie ;
- Après les deuxièmes lettres D, C et X, un indice de qualité (deux chiffres) ;
- Après la troisième lettre T, la résistance à la traction garantie, en MPa.

De plus, des indices additionnels peuvent être ajoutés après les chiffres pour préciser les conditions d'obtention ou d'utilisation :

- D : acier pour fromage à froid ;
- C : acier laminé à froid ;
- ED pour émaillage direct ;
- EK pour émaillage conventionnel.

Par exemple, le cas qui correspond au matériau de la tôle métallique utilisé par EIMS dans le procédé d'emboutissage de baignoire est les DC05EK et DC06EK :

Acier laminé à froid pour fromage à froid, indice de qualités 05 et 06, pour émaillage conventionnel (EK).

I.4.4. Étapes de fabrication de baignoire à l'EIMS

La production des baignoires se fait en deux phases principales : l'emboutissage et l'émaillage vitrifié.

La fabrication des baignoires repose sur les étapes essentielles suivantes :

- Chaîne d'emboutissage
 - Emboutissage ;
 - Découpage, Détourage, Pliage.
- Chaîne de soudure.
- Dégraissage, passivation, séchage
- Chaîne d'émaillage
 - Émail de masse, Séchage, Cuisson ;
 - Recouvrement de l'émail, Séchage, Cuisson.

I.4.4.1. Chargeur de tôle (flan)

La production de baignoires à l'EIMS se fait principalement par emboutissage profond, Avant l'emboutissage, la tôle est chargée par un chargeur de flan à l'aide d'une pompe à vide.

La presse d'emboutissage utilisée, nommée BZE1600-32, est une machine hydraulique de 1600 tonnes de force. Cet équipement représente un investissement important et est généralement acheté pour une longue durée de travail.

La presse dispose d'un support de bride contrôlé par sept cylindres, avec trois pompes fournissant des pressions spécifiques pour les faire fonctionner. Six cylindres contrôlent le coulisseau, un contrôle l'outil de poinçonnage, et il y a un éjecteur de baignoire sous la matrice.

- La pompe du serre-flan (0-1000 bar) ;
- La pompe du coulisseau (0-600 bar) ;
- La pompe de l'éjecteur (0-50 bar).

I.4.4.2. Emboutissage :

Avant que la tôle n'atteigne la presse, un système de lubrification électropneumatique injecte un lubrifiant sur la matrice pour assurer un contact lubrifié entre la tôle et la matrice.



Figure I. 17 Presse BZE1600-32 d'emboutissage des baignoires.

Cette opération de lubrification est importante pour le succès de l'opération de poinçonnage. Une fois que la tôle est chargée dans la presse, le serre-flan presse la tôle sur la matrice avec différentes pressions. Après que la tôle est fixée, le poinçon descend pour donner la forme de la baignoire. Lorsqu'il atteint la fin de sa course, il remonte avec le serre-flan et la baignoire est automatiquement éjectée par l'éjecteur.

Après l'opération de poinçonnage, un système de crémaillère commandé électriquement et des vérins pneumatiques à simple effet sont utilisés pour transporter la baignoire et la positionner sur l'éjecteur de la deuxième presse (BZE 600-32).

La production de baignoires chez EIMS est principalement réalisée par emboutissage profond. Cette technique de fabrication consiste à charger la tôle à l'aide d'une pompe à vide qui crée un vide entre les ventouses et la tôle. La tôle est ensuite transportée vers la presse de poinçonnage à l'aide d'un système de crémaillère motorisé.

La presse BZE1600-32 est une grande machine hydraulique d'une force de 1600 tonnes (600 tonnes pour le poinçon et 1000 tonnes pour le serre-flan). C'est un investissement important et est généralement acheté pour environ quarante ans de travail. La presse est composée d'un coulisseau contrôlé par sept vérins, six vérins pour le serre-flan, un vérin pour le poinçon et un éjecteur de baignoire sous la matrice. Trois pompes sont utilisées pour alimenter ces vérins en pression. Le système de lubrification mentionné précédemment est utilisé pour faciliter l'écoulement du matériau pendant l'opération de poinçonnage.

I.4.4.3. Découpage, Détourage, Pliage

La presse BZE 600-32 est utilisée pour découper et plier les bords des baignoires en utilisant un coulisseau commandé par un vérin hydraulique. Une fois le découpage terminé, la baignoire est éjectée de la presse et les pièces coupées sont utilisées pour fabriquer des accessoires. Ensuite, la baignoire est transférée à une machine de pliage des bords et les trous d'évacuation sont poinçonnés.



Figure I. 18 Presse BZE 600-32 machine de découpage.

Le pliage des bords est réalisé par 12 vérins hydrauliques et les trous d'évacuation par deux poinçons. Après ces opérations, la baignoire est à nouveau éjectée et transférée à un tapis roulant pour la soudure des pâtes de fixation et des oreilles pour le levage.



Figure I. 19 Machine de pliage des bords.

Les opérations de fabrication sur la baignoire sont terminées et sur un tapis roulant la baignoire est transportée à soudage.



Figure I. 20 Tapis roulant.

I.4.4.4. Chaîne de soudure

La chaîne de soudage implique des tâches telles que la soudure des oreilles de transport sur les côtés gauche et droit de la baignoire, la soudure des pattes de fixation pour les pieds de la baignoire, la mise en place de la baignoire avec les pièces soudées sur le tapis roulant à la sortie de la station de soudage, et l'inspection visuelle et les réparations.



Figure I. 21 Zone de soudure.

I.4.4.5. Dégraissage, passivation et séchage

Avant d'appliquer l'émail sur les articles émaillés, ceux-ci doivent subir un processus de prétraitement. Ce processus est plus complexe pour l'acier et comprend le nettoyage, le décapage et le séchage dans la fabrication des baignoires. La première étape est le nettoyage chimique, également appelé dégraissage, suivi du décapage, qui peut également être appelé passivation.



Figure I. 22 Ligne de nettoyage des baignoires.

L'objectif du prétraitement est d'éliminer tous les contaminants de la surface de la pièce afin d'assurer une bonne adhérence entre le substrat et l'émail.

I.4.4.6. Chaîne d'émaillage

L'émaillage consiste à appliquer une fine couche de verre sur le métal, qui fusionne sous l'effet de la chaleur. Il existe différents procédés d'émaillage : deux couches/deux feux, deux couches/un feu et une couche/un feu. L'émaillage conventionnel est utilisé pour l'émaillage des baignoires, où l'émail est pulvérisé sur la baignoire prétraitée à l'aide d'un pistolet pneumatique. La pulvérisation manuelle nécessite une certaine habileté pour éviter d'appliquer trop d'émail.



Figure I. 23 Ligne d'enduction massive.

Cette partie elle est devisée en trois lignes :

- Ligne d'enduction massive : après le nettoyage, consiste à émailler les baignoires avec une couche de tolérance allant de 80 à 120 μm . Ensuite, elles sont séchées en les passant au four pour être cuites. Enfin, on peut éventuellement vérifier l'état de surface cuite à la fin de cette ligne.
- Ligne de couverture : Dans cette étape, on applique une couche d'email de couverture sur la surface avant de la baignoire, avec une tolérance comprise entre 80 et 120 μm . Par la suite, on procède au séchage dans un four pour cuisson à une température comprise entre 820 et 840°C afin d'obtenir une baignoire achevée.



Figure I. 24 Passage au four pour recuit.

I.4.5. Problèmes et défauts des baignoires

Afin d'améliorer la qualité des produits sanitaires, il est important d'analyser les défauts et les raisons de leur apparition afin de résoudre les problèmes de rupture. Les principaux défauts constatés lors de la production des baignoires sont énumérés ci-dessous :

I.4.5.1. Défauts liés à l'emboutissage

L'emboutissage est un processus complexe qui consiste à former une pièce en gérant les déformations de rétreint et d'expansion, tout en évitant les phénomènes de plissement, de striction et de rupture. Il est important de minimiser les imperfections pour optimiser le temps et les coûts de fabrication des baignoires embouties.

Il est important de prendre en compte différents paramètres lors de l'emboutissage, tels que les caractéristiques de la tôle d'acier, la configuration géométrique désirée, la pression du porte-plaquette, le type et la quantité de lubrifiant utilisé, ainsi que la vitesse d'emboutissage. Il est essentiel de soigneusement ajuster ces paramètres afin de réduire au minimum les défauts lors du processus d'emboutissage.

Les imperfections peuvent être diverses et complexes, ce qui demande une analyse approfondie afin de trouver les solutions adéquates. Il est donc essentiel de réaliser des modifications appropriées des paramètres du processus afin de prévenir ces imperfections et d'améliorer la qualité des produits finis.

- a. **Rupture :** La rupture dans les tôles embouties est souvent causée par des forces excessives de traction et de compression, résultant d'une mauvaise gestion des paramètres du processus. Des problèmes, tels que le scellement, peuvent également contribuer à la formation de fissures, compromettant la qualité du produit final [33].



Figure I. 25 Défauts de rupture et taux de rebut venant du procédé d'emboutissage des baignoires.

- b. **Fissures :** Les fissures près de la base de la baignoire sont dues à une paroi trop mince, causée par une force de poinçonnage excessive. Réduire cette force peut corriger le problème. Les déchirures dans les coins de la paroi peuvent être dues à une géométrie d'ébauche inappropriée, corrigée en augmentant le rayon d'angle. Les fissures se propagent souvent en raison de défauts de surface du flan, comme des gouges ou des

rayures. Améliorer la qualité de cette surface peut réduire ces problèmes et les coûts associés.

- c. Froissement :** Le froissement peut être causé par une insuffisance de force de maintien de l'ébauche ou par un rayon d'angle excessif. L'utilisation de goupilles de guidage et l'alignement de l'outillage peuvent aider à corriger ce défaut [34].
- d. Earings :** Les earings sur le bord de la paroi peuvent résulter d'une insertion décentrée de la pièce brute ou d'une pression irrégulière du porte-blanc. L'application de lubrifiants sur la tôle d'acier peut être une solution pratique pour éviter ce problème.
- e. Usures :** L'usure et la friction de l'outillage sont souvent causées par une surface trop rugueuse de la matrice et du porte-flan, ainsi qu'une lubrification insuffisante de la tôle d'acier. Maintenir une surface lisse pour l'outillage et utiliser le bon lubrifiant peut aider à réduire ces problèmes.
- f. Retour élastique :** Lorsque le processus d'emboutissage est terminé, le retour élastique peut modifier la forme de la pièce en raison de contraintes résiduelles. La précision de la forme de la pièce peut être compromise par ce phénomène une fois qu'elle est libérée des outils de formage [35].
- g. Formation des plis :** Les plis sont des imperfections courantes dans le processus d'emboutissage, se caractérisant par des déformations de forme lors de la compression de la pièce. Leur apparition peut être attribuée à divers facteurs tels que des erreurs de conception, des défauts d'outillage ou un excès de lubrification.

Des modifications judicieuses des paramètres du processus peuvent être entreprises pour réduire la probabilité de formation de ces plis indésirables. Ils apparaissent souvent lorsque :

- La force de serrage est faible ;
- Les dimensions du poinçon sont très petites par rapport aux dimensions de la matrice (écart important entre la matrice et le poinçon) ;
- Des rides ou des défauts existent déjà dans les outils ;
- La distance entre le serre-flan et la matrice est très grande ;
- La présence de défauts dans les outils (modèle) ;
- La lubrification est appliquée excessivement [36].



Figure I. 26 Défaits de plissement dans le procédé d'emboutissage.

I.4.5.2. Défaits liés au recuit

Le changement de structure cristalline du fer dans la tôle, passant de la ferrite à l'austénite, est responsable de la déformation lors du recuit de l'émail vitreux. Les caractéristiques du revêtement émaillé peuvent être grandement affectées par cette altération, en particulier sa résistance à la fissuration et sa longévité. En outre, les contraintes résiduelles causées par le refroidissement peuvent provoquer des déformations excessives dans les pièces en acier émaillé [37].

I.4.5.3. Défaits liés aux écailles de poisson (coups d'angle) " Fish scale"

Les écailles de poisson sont des fissures en demi-lune dans les couches de fond ou de couverture, qui se manifestent immédiatement après ou quelques heures voire jours après le recuit. La cause de ce défaut est complexe, englobant divers éléments :

- Les coefficients de dilatation entre l'émail et la tôle d'acier présentent une différence :
 - En raison de son coefficient de dilatation supérieur à celui de l'émail, l'acier est soumis à une contrainte de compression.
 - La composition de l'émail, le sur-recuit et l'absence de recuit des objets émaillés sont des éléments qui influencent ce phénomène.
- Variables qui influencent la solidité de l'email ou son adhérence au métal :
 - Parmi ces éléments figurent l'état physique de la surface du métal, la nature du verre, etc.
 - La préservation de la surface lors de sous-recuit.

- L'émission d'hydrogène à travers l'acier et dans la couche d'émail : Ce phénomène ne se produit que sur les pièces émaillées de part et d'autre. Pendant la recuit, l'hydrogène se constitue à la surface de l'acier, se propage dans l'acier et se recombine sous forme d'hydrogène gazeux.
- La solubilité de l'hydrogène diminue lorsque l'émail se solidifie, ce qui entraîne la formation de points de pression très élevés qui forment des cloques d'émail, ce qui entraîne le défaut d'écailles de poisson.

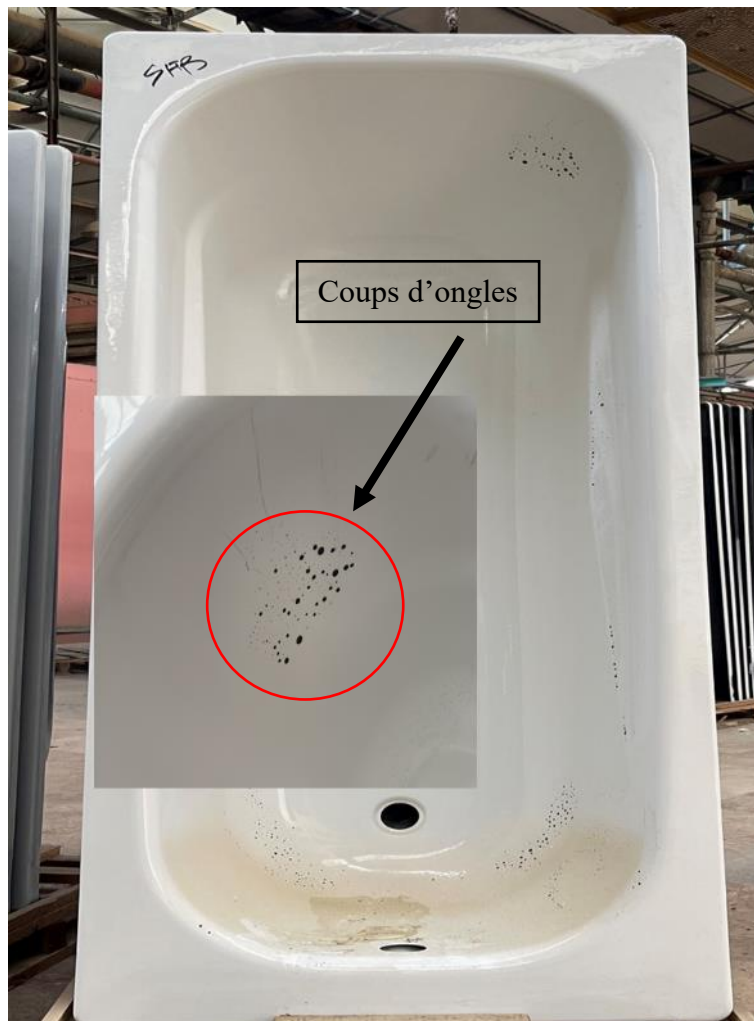


Figure I. 27 Apparition d'écailles de poisson (coups d'ongles) dans une baignoire.

I.4.5.4. Défauts surfaciques :

Les défauts de surface se répartissent en deux catégories :

- Les défauts accidentels surviennent suite à des incidents lors de la mise en place de la tôle ou de la mise en forme, et peuvent être évités en assurant une préparation minutieuse et un entretien adéquat des outils et des équipements de production.
- Les imperfections systématiques résultent d'une variabilité de la déformation ou du glissement du métal sur le rayon d'entrée de la matrice. Leur acceptabilité dépend de leur visibilité sur le produit final. Pour réduire ces imperfections de surface, il est crucial de surveiller et de maintenir en bon état tous les moyens de fabrication [38].

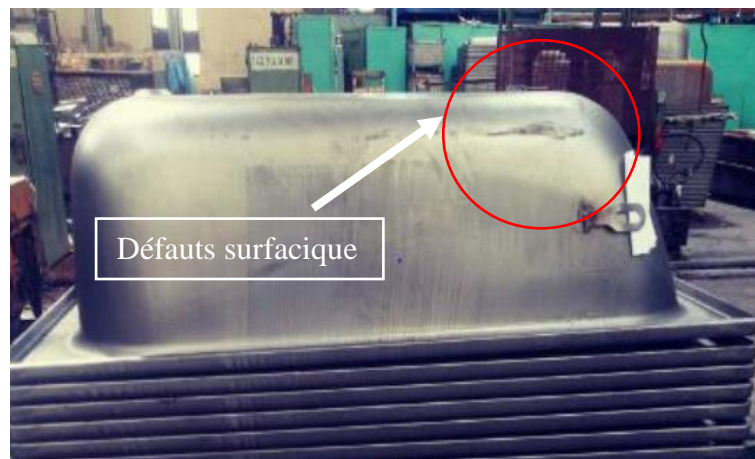


Figure I. 28 Défauts surfaciques des baignoires après mise en forme.

I.4.5.5. Problèmes d'adhérence

L'adhérence de l'émail sur l'acier non revêtu est le résultat de réactions chimiques entre les oxydes métalliques contenus dans l'émail et la surface de l'acier, avec le carbone jouant un rôle crucial. Une teneur en carbone excessive peut compromettre cette adhérence, tout comme un recuit insuffisant ou excessif. Une mauvaise adhérence peut entraîner une détérioration rapide du composite acier/émail. La procédure d'essai consiste à placer l'échantillon sur un bloc métallique et à positionner un tube de guidage.

I.4.5.6. Bulles d'air

De grosses billes d'air se développent près de la surface dans la couche d'émail vitreux. Ces défauts peuvent non seulement altérer la résistance à la corrosion de l'émail vitreux, mais aussi dégrader sa qualité de surface. Afin d'éviter ce défaut, l'acier doit être approprié pour

l'émaillage et une attention particulière au dégraissage, à la neutralisation, à un recuit insuffisant et aux impuretés contenues dans l'émail.

I.5. Conclusion

L'utilisation d'aciers de qualité pour l'emboutissage a été soulignée, offrant une bonne résistance mécanique et une surface lisse. L'étude a identifié plusieurs défauts dans le processus de fabrication des baignoires, notamment des problèmes d'adhérence, de déchirures et de plis. Ces défauts peuvent être contrôlés en ajustant les paramètres du processus. L'accent a été mis sur les défauts causés par la fissuration par corrosion sous tension.

Chapitre II

Procédures Expérimentales

II.1. Introduction

Dans le cadre de ce projet, deux aciers de la nuance DC0xEK, sous forme de tôles laminées, ont été utilisés pour la production des baignoires. Ces tôles de 1.6 mm d'épaisseur ont subi différents taux de déformation et selon différentes directions. Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes techniques d'analyse et de caractérisation (mécaniques et électrochimiques) qui ont été effectuées au niveau du Centre de Recherche en Technologies Industrielles CRTI.

II.2. Analyse de la composition chimique

L'analyse de la composition chimique a été effectuée au sein du laboratoire d'analyse au CRTI par un analyseur à étincelles de la référence **OXFORD FOUNDRY MASTER PRO** (figure II.1). Et ce pour confirmer la composition des deux aciers DC05EK et DC06EK.

La spectrométrie étincelle est une méthode d'analyse qui consiste à soumettre un échantillon métallique à une décharge électrique intense, ce qui provoque l'émission d'énergie lumineuse. Les étapes clés du processus comprennent la préparation de l'échantillon, l'excitation de l'échantillon par un courant électrique, la formation d'un plasma autour de la surface métallique, l'excitation atomique des atomes constitutifs de l'échantillon, l'émission de lumière visible lorsque les électrons retournent à leur état initial, et l'analyse spectrale de la lumière émise pour déterminer la composition chimique de l'échantillon.



Figure II. 1 Analyseur de la composition chimique OXFORD FOUNDRY MASTER PRO.

II.3. Préparation métallographique

La préparation des éprouvettes destinées à l'observation microscopique est divisée en plusieurs quatre étapes :

- Découpage et prélèvement de l'échantillon ;
- Enrobage ;
- Polissage ;
- Attaque chimique ; révélatrice de la microstructure.

II.3.1. Découpage et prélèvement de l'échantillon

Le prélèvement de l'échantillon est crucial pour une étude microstructurale, car il doit représenter fidèlement l'ensemble d'où il provient en termes de composition chimique et de caractéristiques physiques. Lors de la préparation des échantillons, il est important de les couper délicatement avec un disque, en les lubrifiant pour éviter tout échauffement ou déformation qui pourrait altérer la microstructure et rendre l'échantillon non-représentatif. Le découpage a été effectué sur une tronçonneuse de la figure II.2.



Figure II. 2 Tronçonneuse.

II.3.2. Enrobage

Un enrobage est réalisé à l'aide de résine pour faciliter la manipulation de l'échantillon et garantir la planéité de la surface. L'enrobeuse utilisée est une **Stuers labopress-1** (figure II.3.a). Les échantillons enrobés destinés au polissage et observation microscopique sont présentés sur la figure II.3.b.

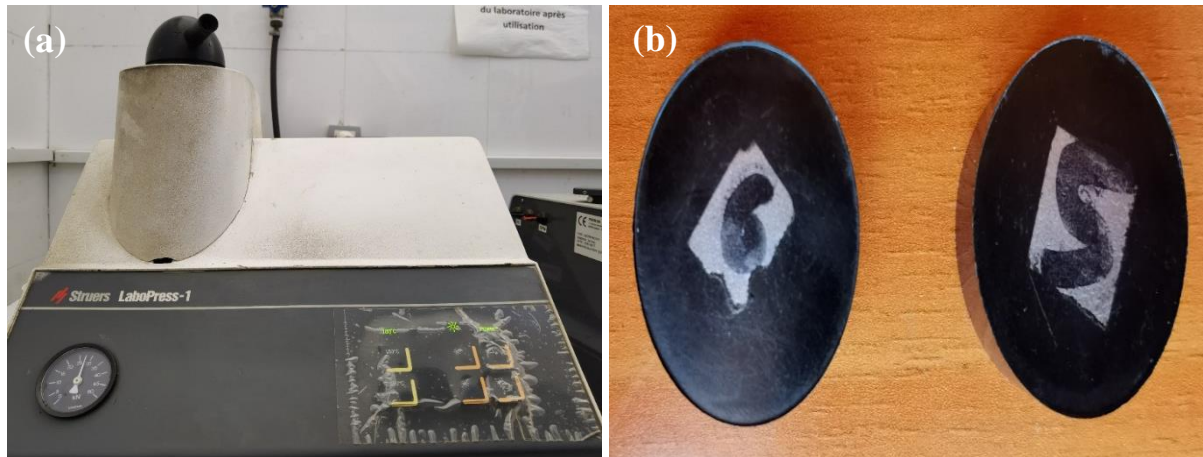


Figure II. 3 (a) Enrobeuse Stuers labopress-1, (b) Échantillons enrobés.

II.3.3. Polissage

Le polissage a pour objectif d'obtenir une surface lisse avec une rugosité minimale et de retirer la couche superficielle qui ne correspond pas à l'échantillon. On procède en premier temps à un polissage à l'aide d'un papier abrasif grossier allant de 320p jusqu'à une granulométrie plus fine de 2400p. Ensuite, à un polissage de finition jusqu'à état miroir, comme présenté sur la figure II.4.b, en utilisant un papier feutre avec une suspension d'alumine d'une granulométrie de 0.3 μm . Le polissage a été effectué sur une polisseuse de type **Stuers labopress – 25** (figure II.4.b).

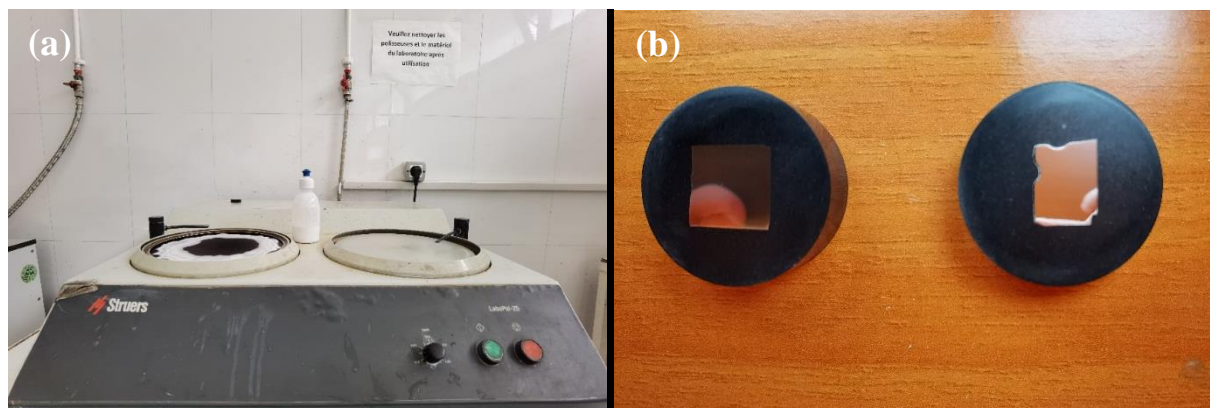


Figure II. 4 Figure II.4 (a) Polisseuse Stuers labopress – 25, (b) échantillons polis.

II.3.4. L'attaque chimique

Les attaques des échantillons permettent de révéler la morphologie des grains. L'attaque chimique utilisée consiste en Nital (4% de HNO_3 et 96% d'éthanol).

II.4. Observation microscopique

La microscopie est une technique précieuse pour examiner la structure interne des matériaux à une échelle fine. Elle permet de mesurer la taille des grains et d'identifier les inclusions s'ils y auraient lieu. Comprendre la microstructure est essentiel pour garantir la qualité des matériaux métalliques et établir des corrélations entre les propriétés microscopiques et macroscopiques.

L'observation microscopique des deux échantillons a été réalisée à l'aide d'un microscope optique de type **Nikon Elipse LV100ND**, comme présenté sur la figure II.5, avec des grossissements allant de x200 jusqu'à x500.

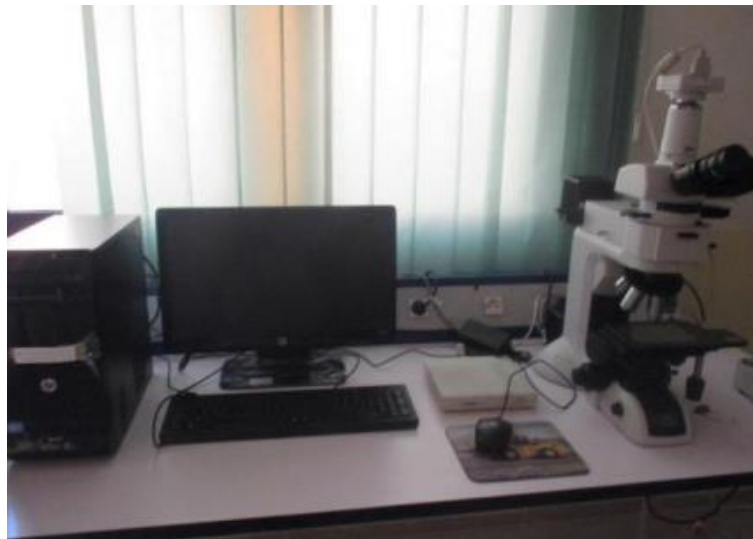


Figure II. 5 Microscope optique Nikon Elipse LV100ND.

II.5. Essai de traction

II.5.1. Préparation des éprouvettes

Plusieurs éprouvettes de traction ont été découpées dans trois différentes directions, 0° , 45° et 90° , à partir de l'acier DC05EK. La direction 0° correspond à la direction de laminage, comme illustré sur la figure II.6.

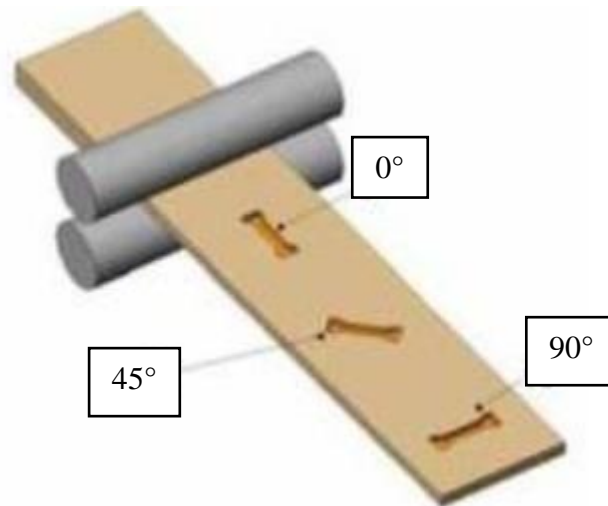


Figure II. 6 Prélèvement des éprouvettes de traction selon différentes directions [39].

II.5.2. Préparation des mouchetis

La surface des éprouvettes de traction doit être soigneusement polie pour éliminer toute peinture, graisse, oxydes et rugosité en utilisant du papier verre de granulométrie 60 et/ ou 120 selon les besoins.

La préparation de la surface de l'éprouvette en réalisant un mouchetis par pulvérisation de peintures noire sur la peinture blanche afin de créer le maximum de gradient de niveaux de gris (figures II.7-b et II.7-c). Un décapant a été utilisé pour éliminer la poussière et les impuretés restantes après le polissage, assurant ainsi une meilleure adhérence de la peinture.

Une fois l'éprouvette sèche, une peinture blanche mate a été appliquée sur la zone utile pour la corrélation d'images numériques (voir Figure II.7-b) ;

Une fois l'éprouvette est sèche, les éprouvettes peintes en blanc ont été placé sous des feuilles en masquant les zones non peintes et en laissant la zone utile. Cette dernière a été peinte par pulvérisation de la peinture noire (figure II.7-c)

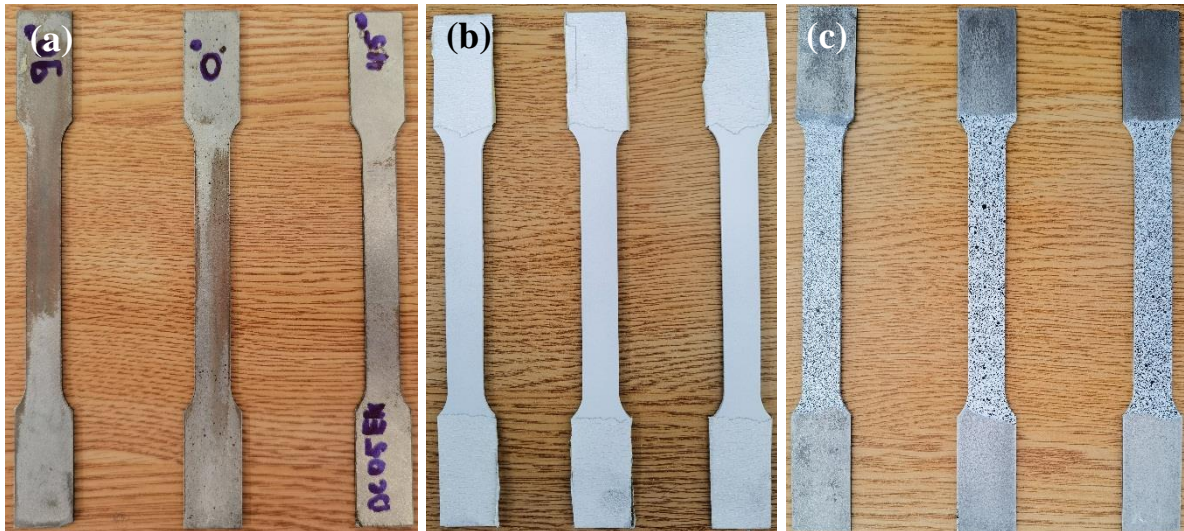


Figure II. 7 Préparation des mouchetis (a) avant, (b) après peinture blanches et (c) après la pulvérisation de la peinture noire.

Afin d'obtenir un mouchetis de qualité, il est essentiel qu'il soit :

- Aléatoire ;
- Avec des tailles de taches appropriées à la mesure effectuée.

L'obtention du mouchetis nécessite plusieurs outils, citons donc (Figure II.8) :

- Les outils de protection (masque, tablier et gants) ;
- Papiers à verre 60 et 120 ;
- Un décapant ;
- Du papier absorbant servant à essuyer le décapant ;
- Peintures à aérosol (blanc mate, noire mate).



Figure II. 8 Outils nécessaires pour la réalisation du mouchetis.

II.5.3. Machine d'essai de traction

La figure II.9, ci-dessous, présente la machine de traction de type MTS 100kN utilisé dans cette étude.

Les essais de traction uniaxiale ont été réalisés sur une machine d'essai de la figure II.9, fonctionnant à une vitesse constante de 1 mm/min avec une capacité de 10 kN conformément à la norme ASTM E8 [41]. Les essais de traction a été performé selon les trois directions à des taux de déformation de 2%, 10%, 20% et 40%.

Trois éprouvettes ont été testées pour chaque direction pour garantir la reproductibilité des résultats.



Figure II. 9 Machine de traction MTS 100 kN.

II.5.4. Corrélation d'image numérique CIN

La corrélation d'images numériques est une méthode de mesure utilisant des images de caméras pour suivre les déplacements et déformations d'un solide en mouvement. Au cours des essais de traction, elle permet de visualiser les déformations dans éprouvettes sous chargement et mesurer les champs de déplacement complets. Le principe repose sur le suivi d'informations d'une image de référence dans les images déformées pour extraire une mesure [40].

La figure II.10 présente le dispositif complet de l'essai de traction associé à la corrélation d'image. La mise en œuvre de la corrélation d'image nécessite les étapes suivantes :

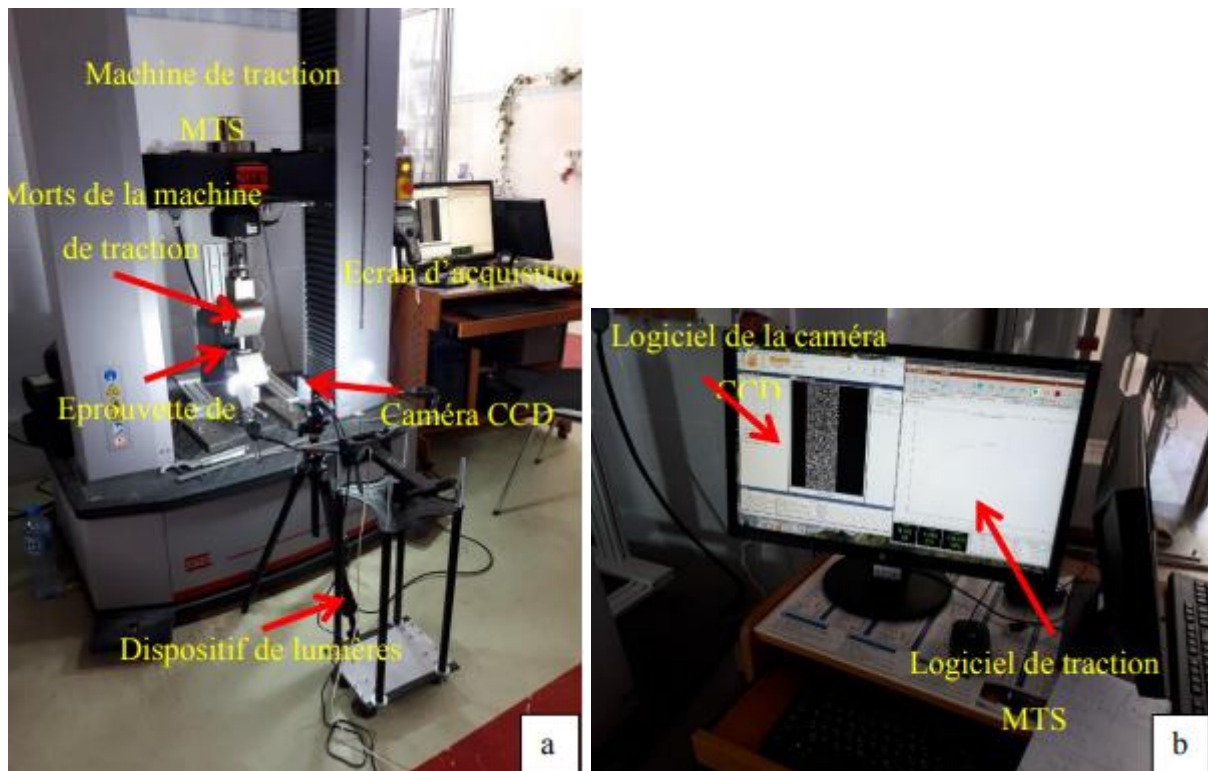


Figure II. 10 (a) Machine de traction MTS 100 kN, (b) écran d'acquisition.

- Réglage de la caméra avant le démarrage de l'essai : il est très important que le capteur de la caméra soit parallèle au plan de l'éprouvette observée. Ceci évite toute déviation et/ou déplacement hors plan qui introduit des erreurs de calcul supplémentaires
- Ajustez les paramètres de la caméra pour obtenir une netteté maximale ;
- Réglez le zoom de la caméra pour capturer l'éprouvette de manière adéquate.
- Configurez les lumières de sorte à obtenir une distribution uniforme sur toute la surface de l'éprouvette ;

- Ouvrez les logiciels nécessaires à l'acquisition et à l'analyse des données : le logiciel de la caméra pour l'acquisition vidéo, le logiciel de l'essai de traction pour le contrôle de l'essai, et éventuellement un logiciel comme CAMTASIA pour l'enregistrement vidéo et photo des données.
- Acquisition des images au cours de l'essai avec une vitesse d'acquisition de 1 image/s ;
- Traitement des images par corrélation (ch. II.5.5).

II.5.5. GOM Correlate

Le logiciel GOM Correlate permet le traitement des images obtenues à partir de la corrélation d'image numérique afin d'obtenir la distribution et les étendues des champs de déformation en fonction des taux de déformation et la direction de prélèvement des éprouvettes.

Les différentes étapes de traitement des résultats par GOM sont classées comme suit :

- a. Ouvrir GOM → Nouveau projet → fichier → importer les images (images traités par ImageJ et renumérotée par des chiffres neutre 1, 2,3,...)
- b. Identification de (02) points (figure II.) sur la première image prise qui représente l'état non déformé. Le logiciel enregistre ces deux points pour suivre leurs déplacements sur les images prises au cours de la déformation.
- c. Sélectionner la surface de traitement sur l'image initiale.
- d. Choisir l'option "déformation principale" ; déformation selon l'axe Y. Changer la vue de face de la dernière image pour faciliter l'identification des champs de déformation.
- e. Indique les points où la déformation est maximale.
- f. Image finale traitée par GOM indiquant le champ de déformation le plus intense et qui contient les points sélectionnés dans l'étape "e".

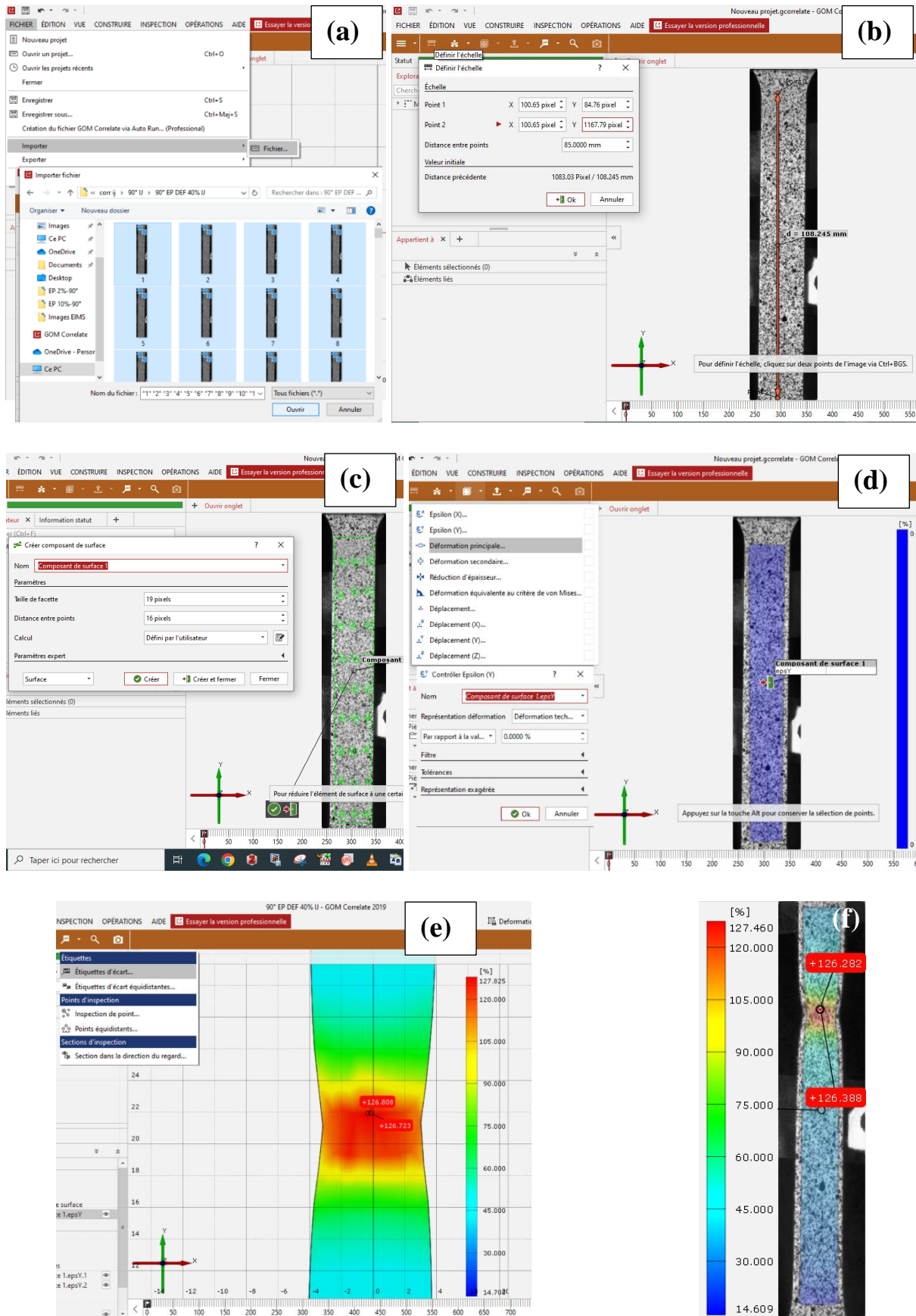


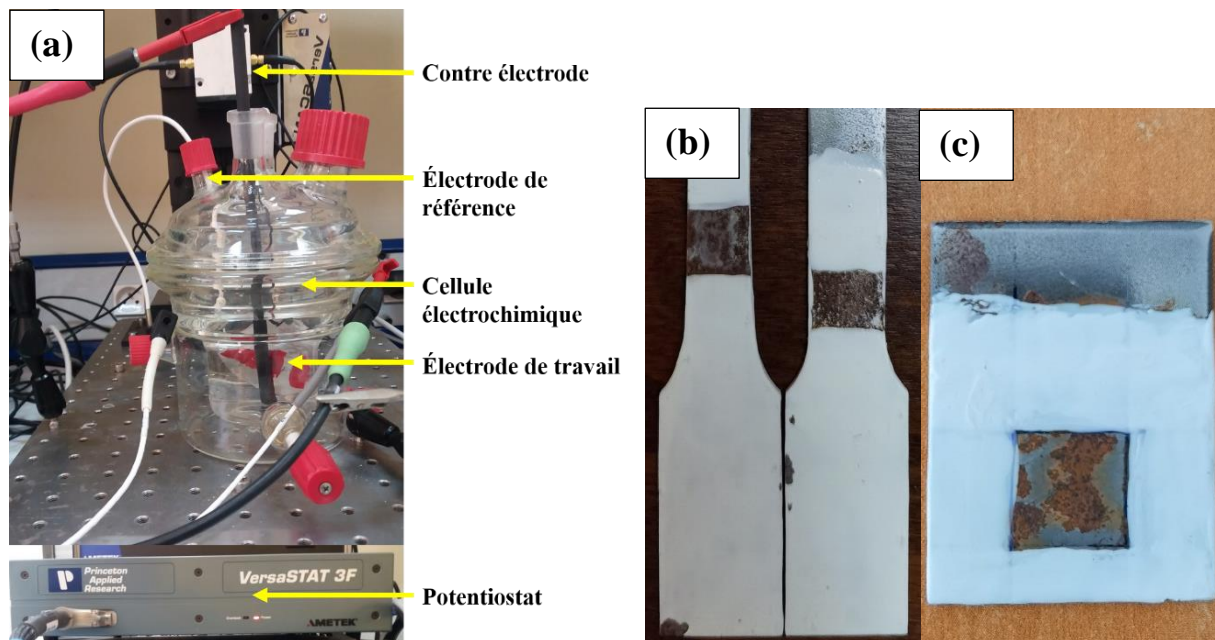
Figure II. 11 Étape de traitement par GOM : exemple sur l'éprouvette 90° - 40%.

Ce traitement est appliqué sur tous les essais de traction. Les surfaces sélectionnées (comme illustré dans la figure II.11-f, font l'objet des tests de corrosion décrits ci-dessous.

II.6. Mesures électrochimiques

II.6.1. Cellule électrochimique

La cellule électrochimique est le système électrochimique où toutes les réactions chimiques se produisent. Les tests électrochimiques ont été réalisés, à la température ambiante, dans une cellule à trois électrodes à l'aide d'un potentiostat AMETEK -PARSTAT 3000 contrôlé par le logiciel VersaStudio. L'installation du dispositif électrochimique est présentée sur la figure II.12.



(a) cellule électrochimique, (b) électrode de travail DC05EK, (c) électrode de travail DC06 EK.

Figure II. 12 Dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental est composé d'une :

- **Électrode auxiliaire** : elle s'agit d'une tige de graphite.
- **Électrode de référence** : elle s'agit de l'électrode stable de calomel saturée Ag/AgCl.
- **Électrode de travail** : elle s'agit des zones déformées par essais de traction. Chaque électrode de travail (zone) a été isolée et immergée à température ambiante ($21 \pm 2^\circ\text{C}$) dans une solution à 3% NaCl. Les surfaces exposées pour les tests électrochimiques varient en fonction de la distribution du champ de déformation.

II.6.2. Potentiel à l'abandon

Le potentiel à l'abandon ou (Open Circuit Potential) est essentielle pour étudier la corrosion en mesurant le potentiel électrochimique d'un métal sans appliquer de courant externe. Le potentiel OCP représente le potentiel auquel la corrosion commence à se produire, il est défini comme le potentiel établi entre l'électrode de travail et la solution corrosive par rapport à une électrode de référence, qui est placée dans l'électrolyte à proximité de l'électrode de travail.

Pour ce fait, les différents échantillons en fonction du taux de déformation ont été immergés dans une solution de 3% NaCl à la température ambiante pendant 1000s jusqu'à ce que l'OCP atteigne à potentiel stable.

II.6.3. Polarisation potentiodynamique (courbe de Tafel)

La polarisation potentiodynamique est une technique électrochimique utilisée pour évaluer les caractéristiques de la corrosion en appliquant une gamme de potentiels à une électrode de test. Elle fournit des données sur le potentiel et la résistance à la corrosion.

Elle consiste à balayer le potentiel de l'électrode de travail avec une vitesse de balayage sur une plage de potentiel relativement large et à contrôler/enregistrer le courant produit en fonction du potentiel. La figure II.14 montre le tracé de cette technique qui est une courbe I ($A.cm^{-2}$) vs. E (V), connue sous le nom de courbe de polarisation ou sur laquelle une analyse de Tafel est effectuée pour obtenir le potentiel de corrosion, le courant de corrosion.

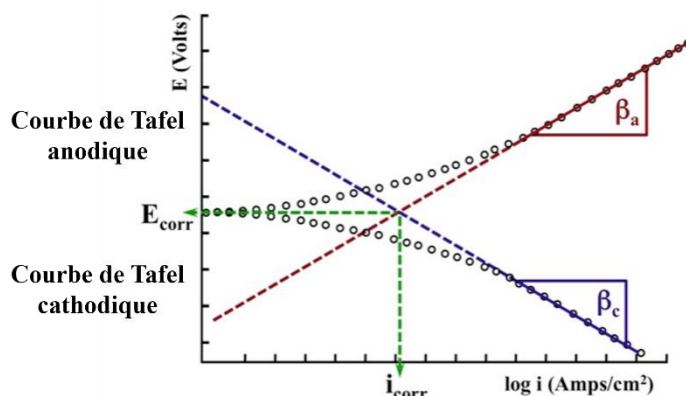


Figure II. 13Extrapolation de courbe de Tafel.

Les électrodes de travail ont été polarisés dans l'intervalle de potentiel de -0.250 mV et +0.250 mV avec une vitesse de balayage de $0.25 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$. Il convient de tracer les tangentes à la

courbe obtenue dans les domaines anodique et cathodique où l'on observe un début de linéarité à l'aide du logiciel VersaStudio en utilisant l'ajustement de Tafel, l'intersection donne le courant et le potentiel de corrosion.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la corrélation d'image numérique associée à l'essai de traction pour suivre les champs de déformation dans les aciers émaillés DC05EK et DC06EK. Ensuite, nous avons réalisé les tests électrochimiques pour étudier la résistance à la corrosion en fonction des taux de déformation et la direction de prélèvement des éprouvettes. Pour cela, différentes techniques électrochimiques ont été employées.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats ainsi que les interprétations des différentes techniques décrites dans le chapitre II. En effet, ce chapitre se concentre sur l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier DC05EK en fonction des taux de déformation 2%, 10%, 20% et 40% et l'effet de la déformation plastique sur la résistance à la corrosion.

III.2. Matériaux d'étude

Les aciers DC05EK et DC06EK sont des aciers doux non alliés laminés à froid destinés à la mise en forme par pliage ou emboutissage. Leur analyse chimique est présentée sur le tableau III.1. Ce qui est conforme à la norme aux exigences de la norme NF EN 10130 :2006.

Tableau III. 1 Composition chimique des aciers d'étude.

Élément	C	Mn	Si	Al	V	Cr	Ni	S	Ti	N
DC05EK	0.334	0.198	0.0080	0.0346	0.0042	0.0182	0.0183	0.0289	0.0011	0.0405
DC06EK	0.0052	0.276	0.0185	0.0269	0.0043	0.0142	0.0140	0.0187	0.0472	0.0329

À partir le tableau III.1 de la composition chimique pour les deux aciers DC05EK et DC06EK, on remarque que le pourcentage de carbone de l'acier DC05EK est supérieur à celui de l'acier DC06EK, ce qui influe négativement sur l'opération d'emboutissage, mais positivement l'opération à l'émaillage.

Le nickel, le chrome et le titane font partie des éléments qui confortent la **résistance** à la corrosion. Et pour les composants C, S, Ti et N, ils jouent un rôle important dans la résistance à l'émergence des coups d'angle.

III.3. Microstructures

Les figures III.1-a et III.1-b présentent les microstructures des aciers DC05EK et DC06EK respectivement.

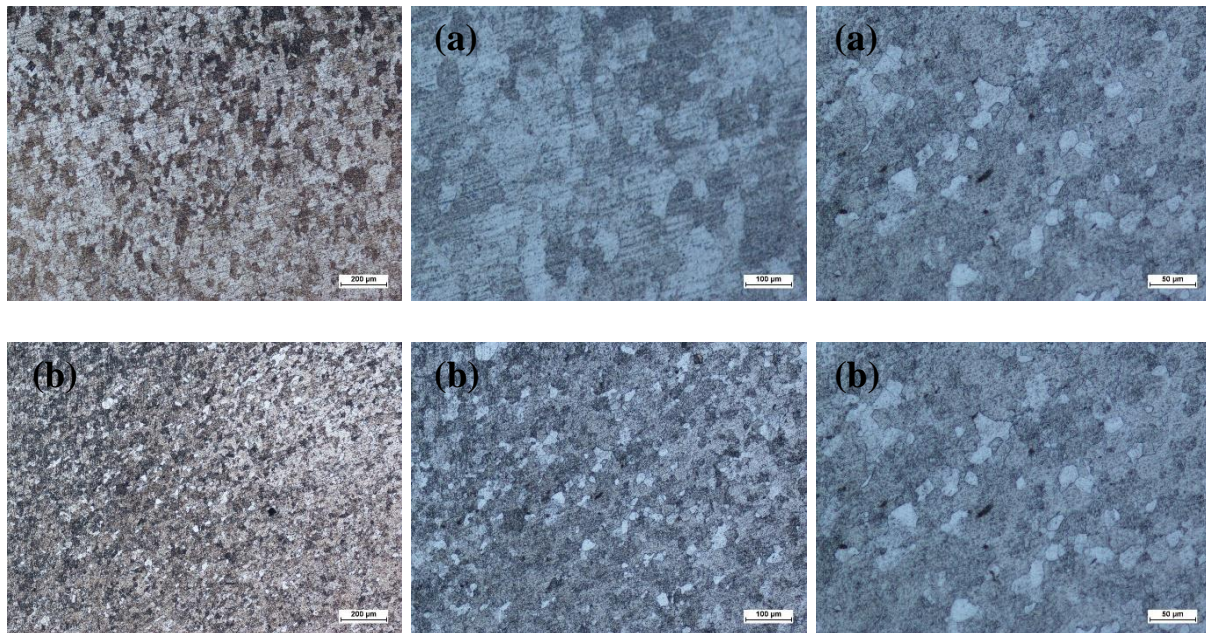


Figure III. 1 Microstructure des aciers (a) DC05EK, (b) DC06EK.

La figure III.1 obtenue par le microscope optique, montre une métallographie différente entre les deux échantillons DC05EK et DC06EK :

Selon la microstructure (a) de l'acier DC05EK il y a deux couleurs différentes, la couleur claire correspond aux grains de perlite, tandis que la couleur foncée est associée aux grains de ferrite, ce qui suggère la présence de carbone en quantité significative à partir la courbe fer-carbone.

La microstructure du DC06EK (b) révèle une prédominance de couleurs foncées et une absence notable de couleurs claires par rapport à son précédent. Ce qui suggère qu'elle appartient à la phase ferrite. Cette observation suggère un très faible pourcentage de carbone dans ce matériau.

III.4. Caractérisation des propriétés mécaniques de l'acier DC05EK

III.4.1. Effet de l'orientation sur les propriétés mécaniques

La figure III. 2 et le tableau III.2 montre la courbe d'essai de traction et les propriétés mécaniques de l'acier DC05EK respectivement, selon trois directions 0° , 45° et 90° . Les éprouvette prélevée selon la direction 90° présente un allongement, une résistance à la traction et limité d'élasticité supérieures aux ceux des éprouvettes prélevées selon les directions 45° et 0° respectivement. Au cours de l'essai de traction, la déformation s'accumule progressivement

et se localise jusqu'à la rupture. D'après la figure III.2 et le tableau III.2, l'acier DC05EK présente une certaine anisotropie

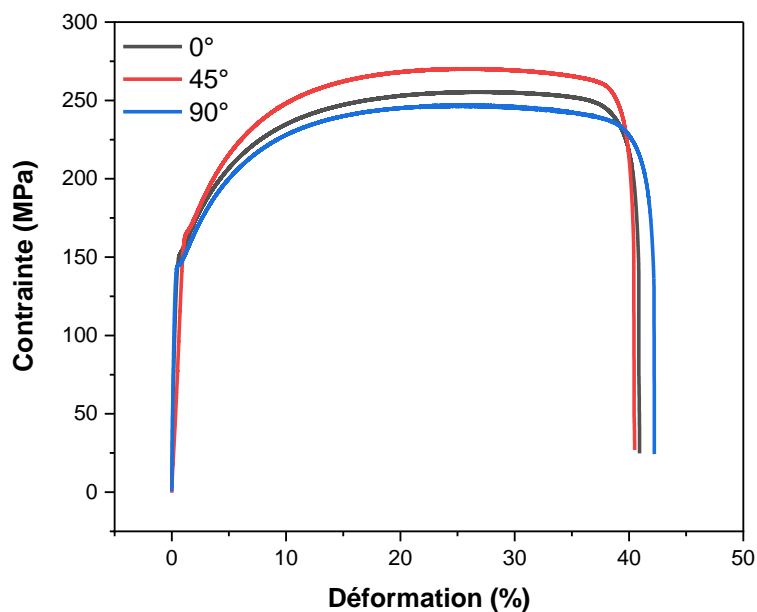


Figure III. 2 Courbe de traction – contrainte en fonction de déformation – de l'acier DC05EK selon les trois direction 0°, 45°, 90°.

Tableau III. 2 Propriétés mécaniques de l'essai de traction de l'acier DC05EK selon les trois directions 0°, 45° et 90°.

Direction de prélèvement	Force maximale Fmax (KN)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Limite d'élasticité Re (MPa)	Allongement A%
0°	5.385	255.462	132.309	40.93
45°	5.497	270.319	164.295	40.49
90°	5.620	268.182	174.895	42.23

III.4.2. Effet du taux de la déformation sur les propriétés mécaniques de l'acier DC05EK

Pour étudier l'effet de la déformation sur le comportement mécanique de l'acier DC05EK, quatre taux de déformations ont été choisis (2%, 10%, 20% et 40%) et ce selon les trois directions 0°, 45° et 90°.

- 2% : le début du domaine plastique ;

- 10% : entre le début du domaine plastique et le pic de contrainte ;
- 20% : au voisinage du pic de contrainte ;
- 40% : avant la rupture.

D'après les propriétés mécaniques (tableau III.3) extraites à partir des courbes de traction (figure III.3), et selon les trois directions, l'acier DC05EK présente une certaine anisotropie qui varie légèrement en fonction des taux de formation.

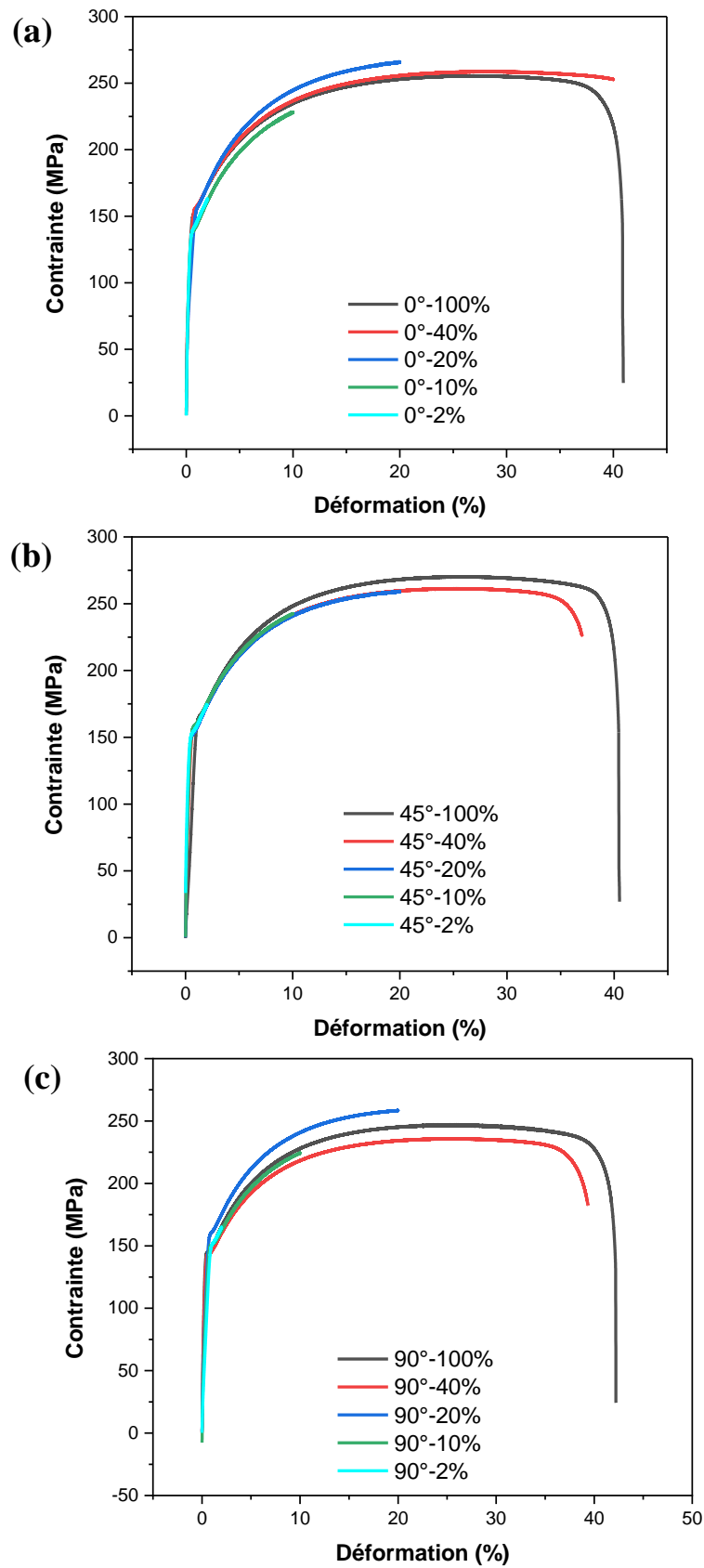


Figure III. 3 Propriétés mécaniques de l'acier DC05EK à partir de l'essai de traction (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Tableau III. 3 Propriétés mécaniques de l'acier DC05EK à partir de l'essai de traction.

Direction de prélèvement	Taux de déformation	Force maximale Fmax (KN)	Contrainte maximale Rm (MPa)	Limite d'élasticité Re (MPa)
0°	2%	3.40	163.13	128.96
	10%	4.54	228.66	129.42
	20%	5.29	266.25	98.91
	40%	5.68	258.71	123.28
45°	2%	3.56	174.54	144.84
	10%	4.85	242.61	134.96
	20%	5.15	259.45	142.12
	40%	5.34	261.39	132.46
90°	2%	3.44	165.00	126.70
	10%	4.60	224.41	105.48
	20%	5.41	258.50	127.10
	40%	4.99	235.83	136.78

III.5. Corrélation d'image de l'essai de traction de l'acier DCE5EK

Les figures III.4, III.5 et III.6 présentent les résultats de la corrélation d'image de l'essai de traction de l'acier DC05EK à différents taux de déformations (2%, 10%, 20% et 40%) et selon les directions 0°, 45° et 90° respectivement. Selon le code de couleur, le bleu représente une déformation faible et le rouge représente une déformation importante.

Pour une direction donnée, en augmentant le taux de déformation de 2% jusqu'à 40%, la distribution de la déformation devient de plus en plus hétérogène avec un gradient de déformation remarquable qui augmente comme suit :

La direction 0° : 1.019% (2%) < 2.856% (20%) < 4.198% (10%) < 24.843% (40%).

La direction 45° : 0.783% (2%) < 2.206% (10%) < 8.838% (20%) < 79.423% (40%).

La direction 90° : 1.244% (2%) < 2.859% (10%) < 6.205% (20%) < 112.851% (40%).

- Pour une déformation de 2% est quel que soit la direction de l'essai de traction, la déformation est distribuée d'une manière homogène est le gradient est très faible.
- Pour une déformation de 10%, le gradient de déformation est toujours homogène avec augmentation de la déformation.
- Pour une déformation de 20%, apparition des zones caractérisées par des déformations et un gradient relativement importants.
- Pour une déformation de 40%, le gradient de déformation est plus important et la déformation se localise dans une seule zone engendrant une striction très apparente.

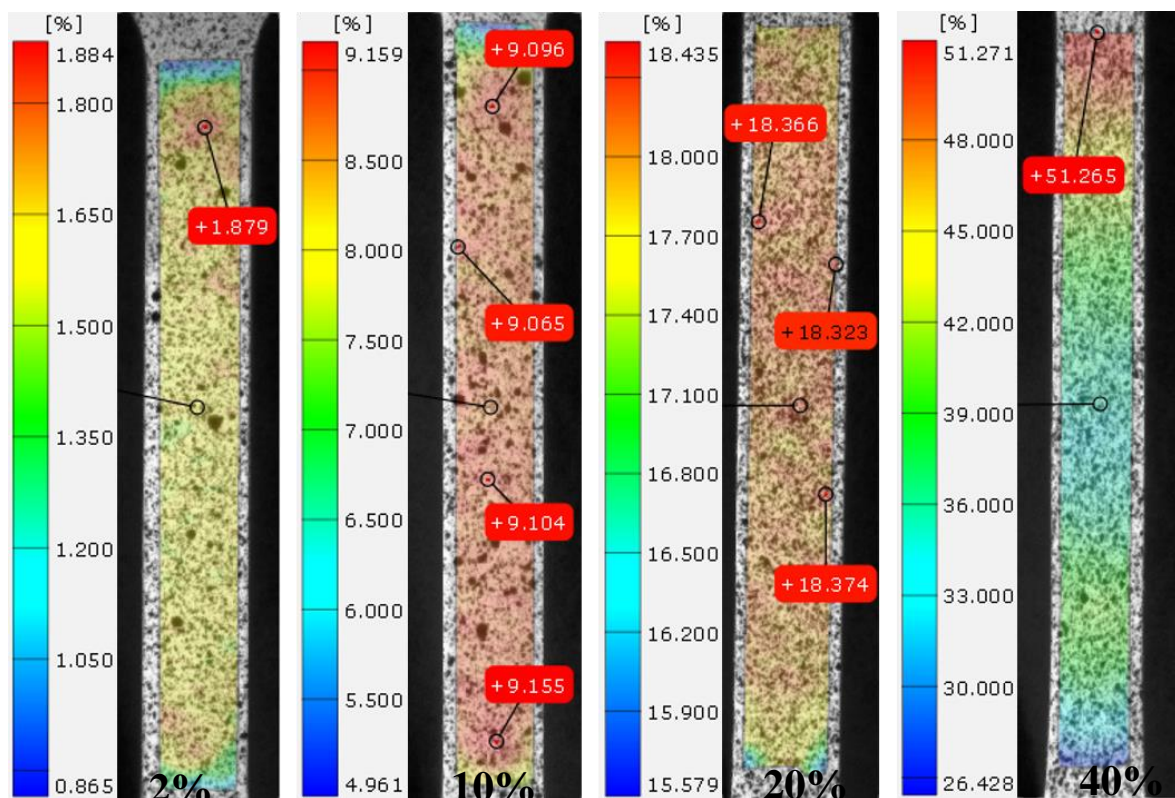


Figure III. 4 Résultats de la corrélation d'image des essais de traction effectués selon la direction 0° à différents taux de déformation de gauche à droite 2%,10%, 20%, et 40% respectivement

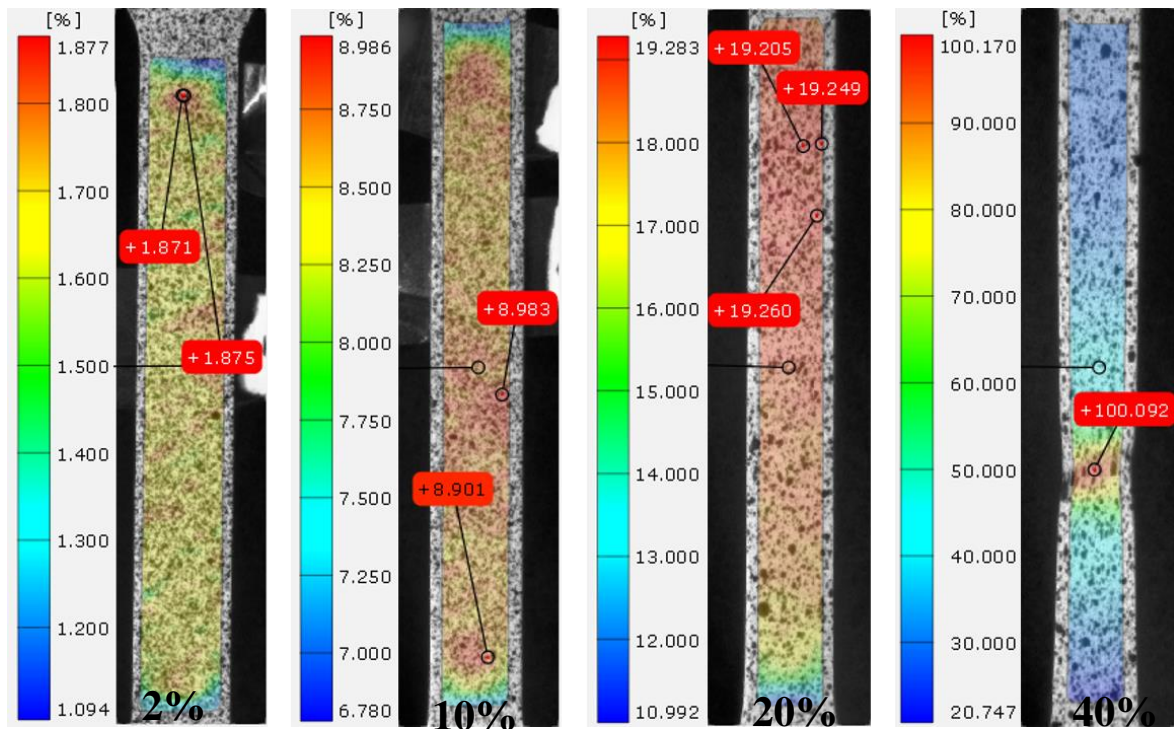


Figure III. 5 Résultats de la corrélation d'image des essais de traction effectué selon la direction 45° à différents taux de déformation de gauche à droite 2%,10%, 20%, et 40% respectivement

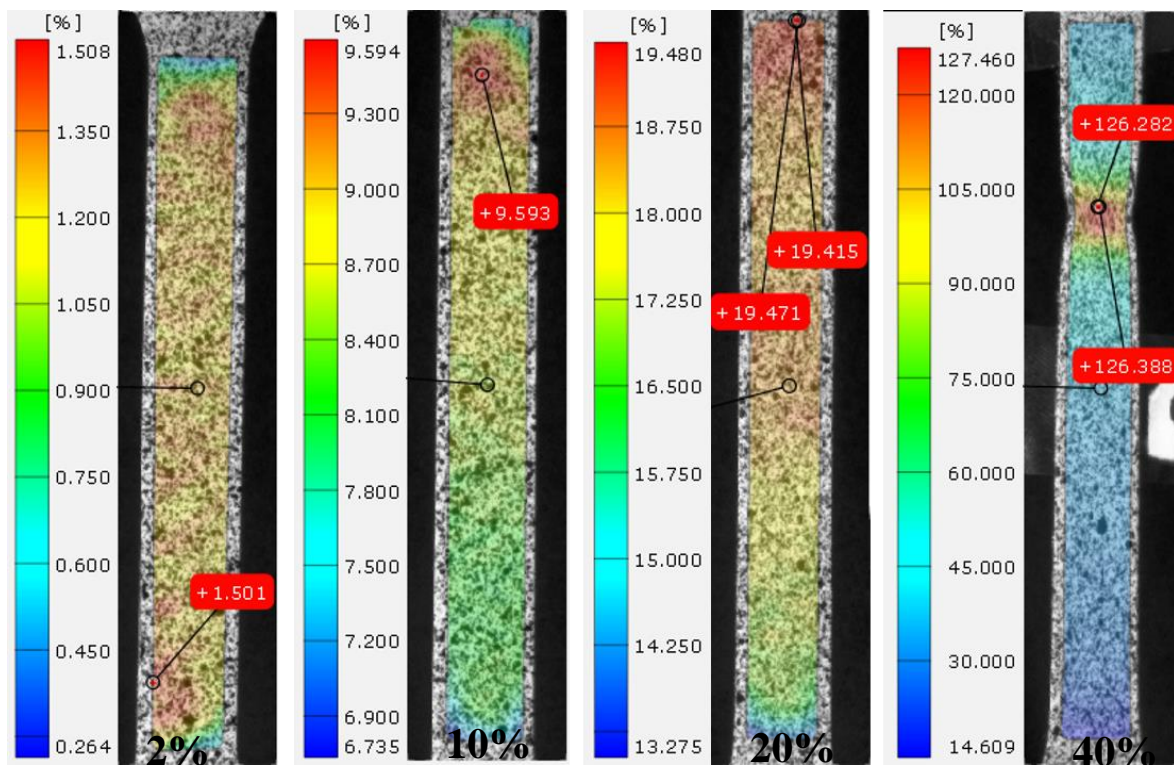


Figure III. 6 Résultats de la corrélation d'image des essais de traction effectué selon la direction 90° à différents taux de déformation de gauche à droite 2%,10%, 20%, et 40% respectivement

À partir des résultats de la corrélation d'image, nous pouvons ainsi identifier les surfaces qui ont subi exactement la déformation choisie.

III.6. Comparaison des comportements électrochimique des aciers DC05EK et DC06EK

Les Figures III.3-a et III.3-b présentent les courbe du potentiel à l'abandon et les courbes de Tafel, respectivement, des deux aciers DC05EK et DC06EK après 1000s d'immersion dans une solution de 3% NaCl. Les résultats de l'extrapolation des courbes de Tafel sont présentés sur le tableau III.4.

Le potentiel à l'abandon (E_{OCP}) du DC05EK (-619.23 mV) est supérieur à celui du DC06EK (-670.76 mV). Le potentiel de corrosion E_{corr} du DC05EK (-667.88 mV) est supérieur à celui du DC06EK (-676.00 mV) cependant, le courant de corrosion I_{corr} du DC05EK (9.53 μA) est inférieur à celui du DC06EK (18.75 μA) indiquant que l'acier DC05EK montre une résistance à la corrosion deux fois plus importante que celle de l'acier DC06EK. Plus la densité de courant est fiable plus la résistance à la corrosion est importante.

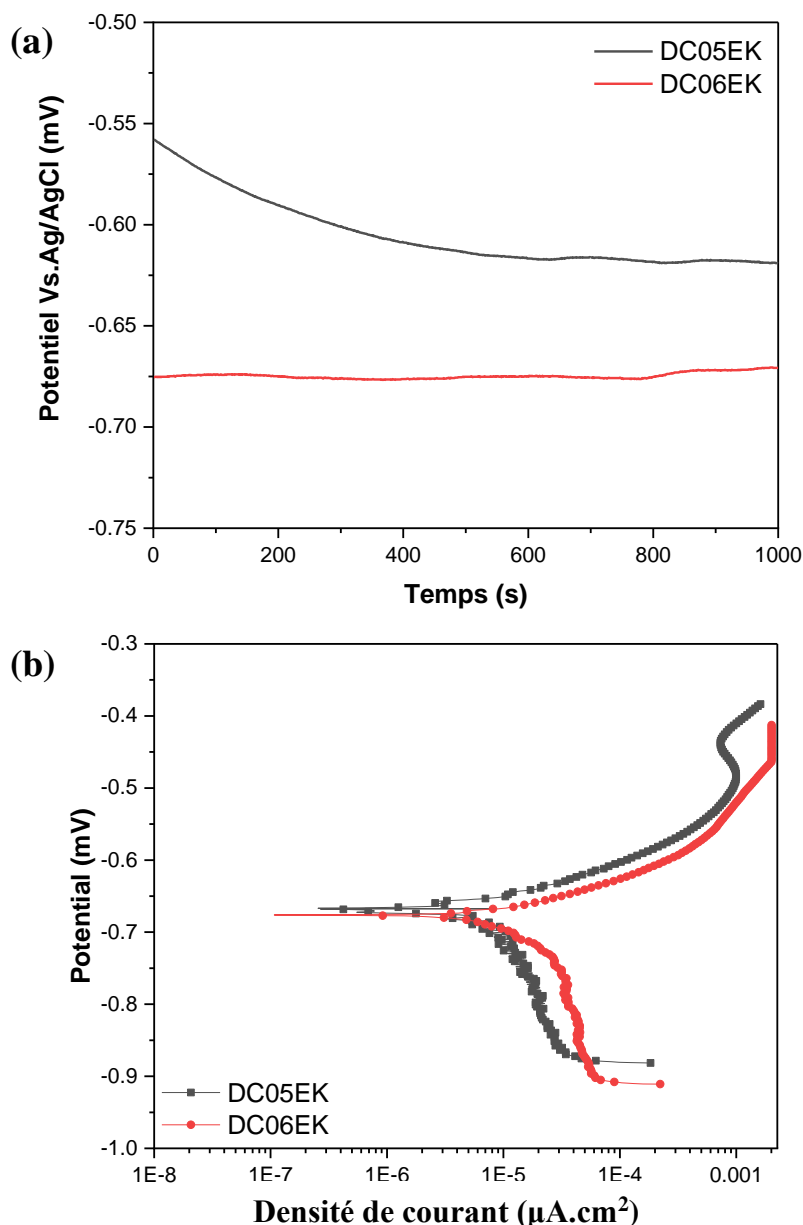


Figure III. 7 (a) Potentiel à l'abandon, (b) Courbes de Tafel des aciers DC05EK et DC06EK dans une solution de 3% NaCl.

Tableau III. 4 Paramètres de l'extrapolation des courbes de Tafel des aciers DC05EK et DC06EK dans une solution de 3% NaCl.

	E_{OCP} (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	β_c (mV)	β_a (mV)
DC05EK	-619.23	-667.88	9.529	259.71	55.46
DC06EK	-670.76	-676.00	18.75	346.62	67.92

III.7. Effet du taux de la déformation sur le comportement électrochimique de l'acier DC05EK

III.7.1. Potentiel à circuit ouvert

La figure III.8, ci-dessous présente l'évolution du potentiel à l'abandon de l'acier DC05EK en fonction des taux de déformation (2%,10%,20%, et 40%) et selon les trois directions (0°,45° et 90°), et ce dans un milieu de 3% NaCl à la température ambiante.

Les courbes d'OCP se stabilisent après immersion pendant 1000s dans la solution corrosive. Toutes les courbes d'OCP enregistrées en fonction du taux de déformation présentent des potentiels OCP inférieurs à celui de la référence (- 619.23 mV). C.à.d. que le potentiel d'OCP est plus noble ce qui indique que la déformation n'améliore pas la résistance à la corrosion dans certaines conditions.

Le tableau III.5 enregistre l'évolution des valeurs du potentiel OCP en fonction des taux de déformation et la direction.

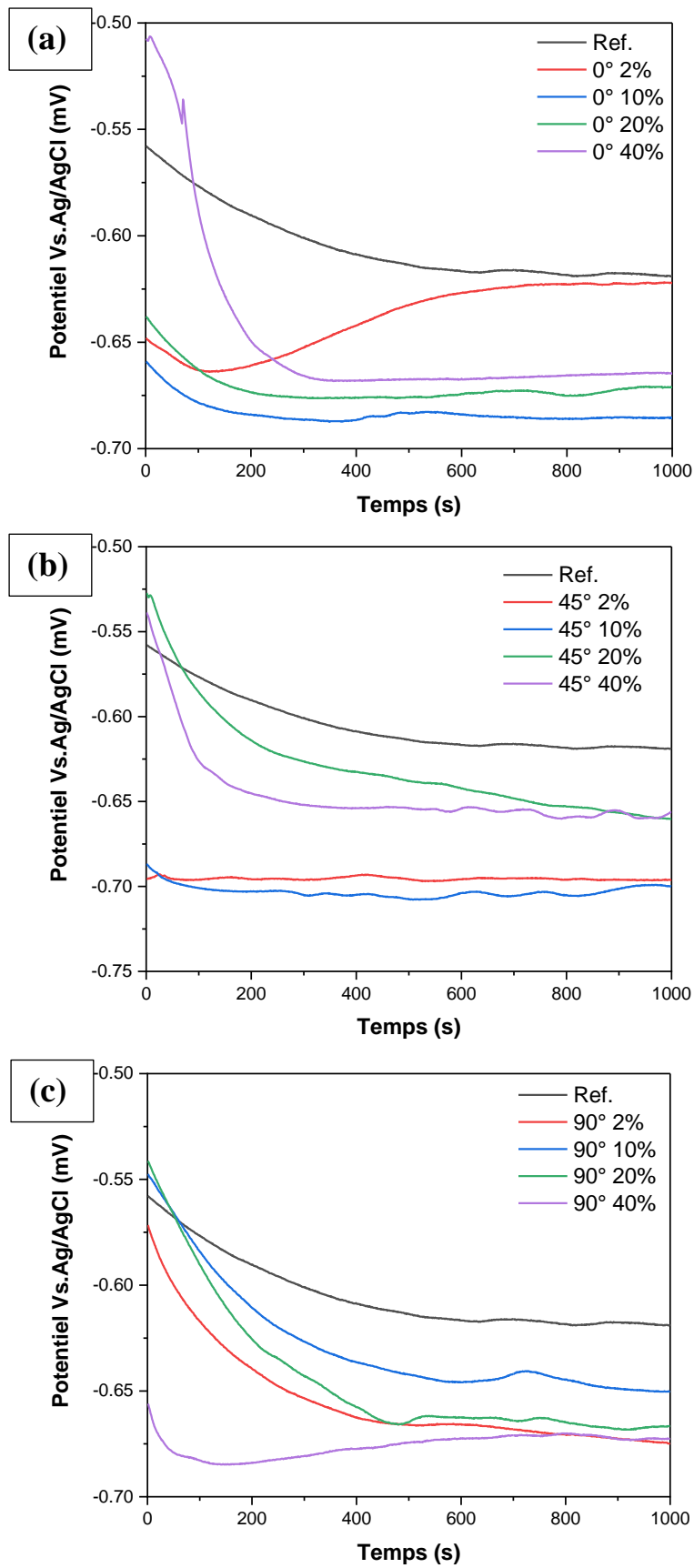


Figure III. 8 Évolution du potentiel OCP de l'acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Tableau III. 5 Valeurs du potentiel OCP de l'acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Taux de déformation /Direction	E _{OCP} (mV)		
	0°	45°	90°
Ref. (0%)	- 619.23		
2%	- 622.22	- 695.00	- 674.44
10%	- 685.48	- 703.00	- 650.29
20%	- 671.22	- 660.00	- 666.85
40%	- 664.55	- 656.27	- 672.60

III.7.2. Courbe de Tafel

La Figure III.9-a, III.9-b et III.9-c montrent les courbes de polarisation de l'acier DC05EK en fonction des taux de déformation pour les directions 0°, 45°, 90° respectivement, dans une solution de 3% NaCl à la température ambiante. Les courbes de polarisation présentent la même apparence générale ce qui indique que les taux de déformation n'influence pas les mécanismes de corrosion. Les résultats de l'extrapolation de Tafel, obtenue au point où les réactions anodiques et cathodiques sont en équilibre, sont présentés sur le tableau III.6.

Les courbes de polarisation révèlent l'effet du taux de déformation sur les réactions anodiques et cathodiques.

- Pour des valeurs de potentiel supérieures à E_{corr} , les courbes de Tafel présentent une réaction anodique qui est supposée représenter la dissolution anodique du Fe.
- Pour des valeurs de potentiel inférieures à E_{corr} , les courbes de Tafel montrent une réaction cathodique caractérisée par une évolution de l'oxygène.

Les valeurs du courant de corrosion (qui sont inversement proportionnelles à la résistance à la corrosion) présente une évolution aléatoire en fonction du taux de déformation. Ceci est probablement dû à l'anisotropie relative de l'acier DC05EK.

Les taux de déformation suivants impliquent une bonne résistance à la corrosion : 0° - 10% (11.86 μ A), 45° - 20% (10.13 μ A), 90° - 20% (18.19 μ A).

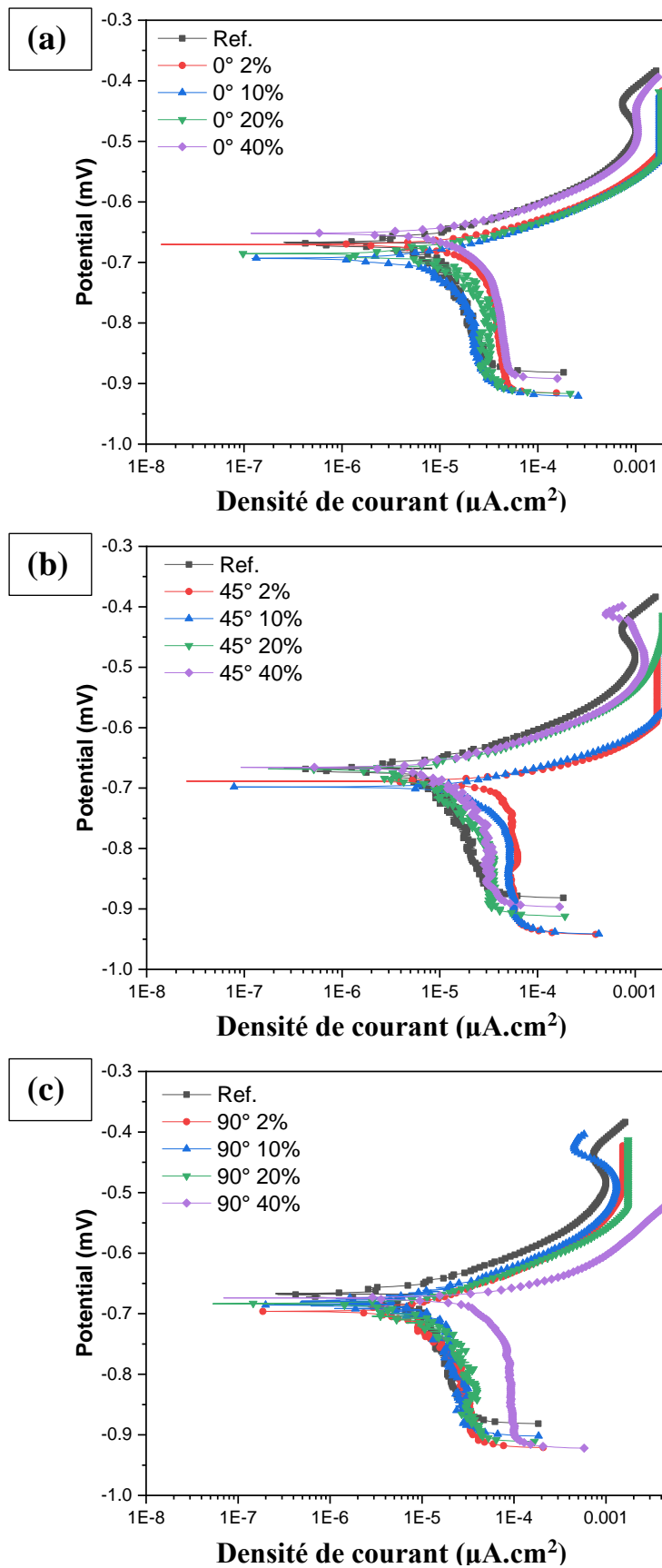


Figure III. 9 Courbe de Tafel de l'acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Tableau III. 6 Extrapolation des courbes de Tafel de l'acier DC05EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Direction	Taux def	I_{corr} ($\mu\text{A.cm}^{-2}$)	E_{corr} (mV)	β_c (mV)	β_a (mV)
Ref.	0%	9.53	- 667.88	259.71	55.46
0°	2%	20.72	- 670.23	302.00	45.16
	10%	11.86	- 693.30	276.42	54.34
	20%	22.76	- 685.48	454.55	69.97
	40%	17.12	- 651.90	238.91	49.13
45°	2%	50.17	- 688.70	426.53	35.86
	10%	33.48	- 698.13	453.96	57.16
	20%	10.13	- 669.13	266.62	48.18
	40%	6.47	- 665.70	254.86	49.73
90°	2%	20.24	- 696.06	390.12	77.76
	10%	23.45	- 680.12	527.87	76.27
	20%	18.19	- 684.47	355.14	64.52
	40%	24.93	- 673.98	504.42	43.76

III.8. Comportement électrochimique de l'acier DC06EK

III.8.1. Potentiel à l'abandon

La figure III.10 montre l'évolution du potentiel libre à circuit ouvert (en fonction du temps) de l'acier DC06EK après 1000s d'immersion dans une solution de 3% NaCl. Le tableau III.7 résume les valeurs OCP en fonction du taux de déformation. Certaines courbes présentent des valeurs OCP plus noble à celui de l'acier DC06EK (- 670.76 mV) c.à.d. que la déformation peut améliorer la résistance à la corrosion dans certaines conditions.

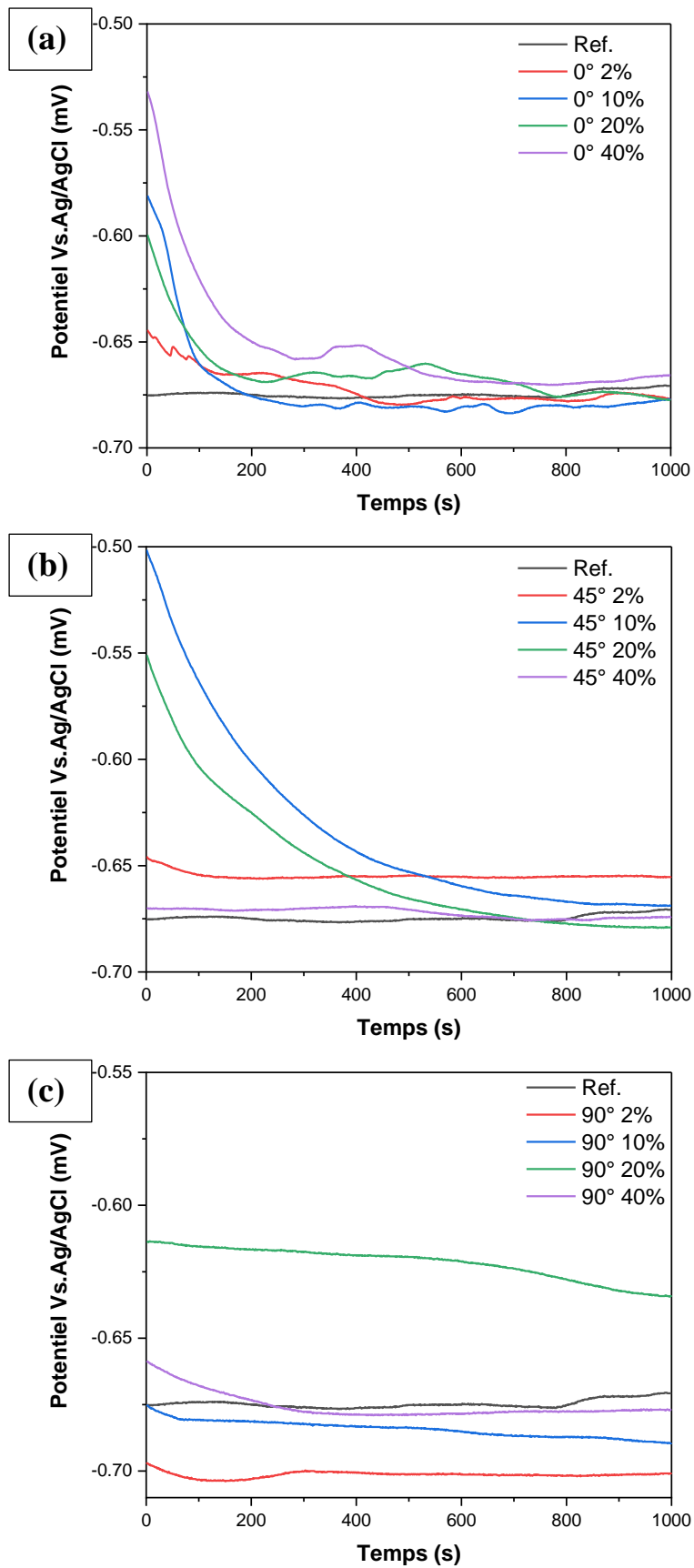


Figure III. 10 Évolution du potentiel OCP de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Tableau III. 7 Valeurs du potentiel OCP de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Taux de déformation /Direction	E _{OCP} (mV)		
	0°	45°	90°
Ref. (0%)	- 670.76		
2%	- 676.74	- 654.89	- 700.89
10%	- 677.43	- 668.92	- 689.39
20%	- 677.43	- 679.04	- 634.41
40%	- 665.70	- 674.21	- 676.97

III.8.2. Courbe de Tafel

Les courbes de polarisation de l'acier DC06EK en fonction de la déformation sont présentées sur la figure III.11. L'extrapolation de Tafel permet d'extraire les propriétés électrochimiques rassemblées sur le tableau III.8.

Les taux de déformation suivants impliquent une bonne résistance à la corrosion : 0° - 2% (7.63 μ A), 45° - 20% (8.79 μ A), 90°-2% (6.71 μ A).

Le taux de déformation 40%, même si il présente de bonne résistance à la corrosion ne peut pas être considéré parce qu'il se reproche de la rupture.

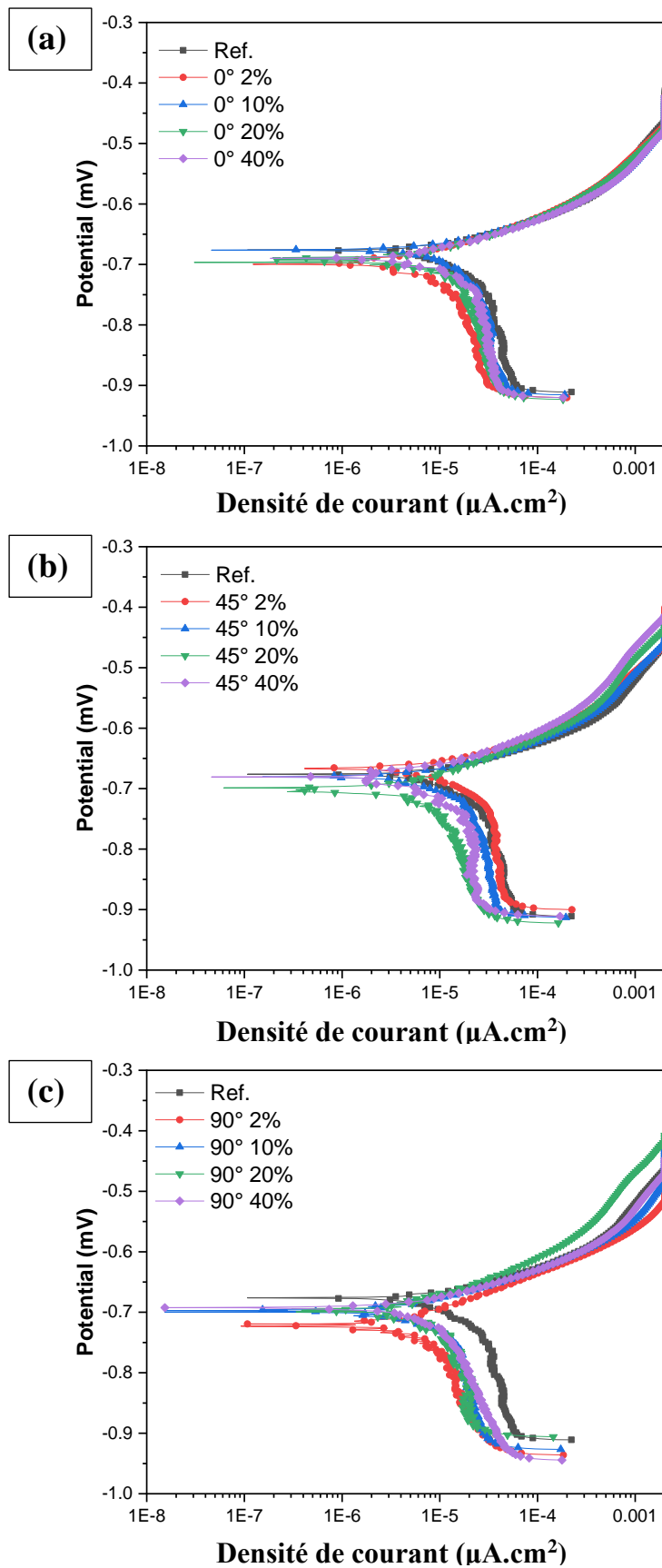


Figure III. 11 Courbe de Tafel de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Tableau III. 8 Extrapolation des courbes de Tafel de l'acier DC06EK en fonction du taux de déformation selon les directions (a) 0°, (b) 45° et (c) 90°.

Direction	Taux de déformation	I_{corr} ($\mu\text{A.cm}^{-2}$)	E_{corr} (mV)	β_c (mV)	β_a (mV)
Ref.	0%	18.75	- 676.05	346.62	67.92
0°	2%	7.63	- 699.74	210.33	69.08
	10%	18.69	- 676.32	444.00	65.57
	20%	15.72	- 692.08	494.94	80.90
	40%	17.97	- 689.85	459.59	78.52
45°	2%	27.47	- 667.31	699.20	84.14
	10%	17.96	- 680.60	501.72	76.53
	20%	8.79	- 701.17	357.37	79.29
	40%	9.48	- 680.96	259.43	71.21
90°	2%	6.71	- 721.55	226.11	69.84
	10%	11.00	- 698.55	376.62	70.19
	20%	11.80	- 695.10	423.42	89.40
	40%	10.12	- 691.57	360.11	63.07

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'essentiel des travaux expérimentaux réalisés au niveau des laboratoires du CRTI et leurs interprétations. Il a été révélé que la déformation par essai de traction augmente et s'accumule à mesure que le taux de déformation augmente. En outre, les deux aciers DC05EK et DC06EK se comporte différemment concernant l'effet du taux de déformation sur la résistance à corrosion.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, dans un environnement industriel de plus en plus concurrentiel, la société EIMS de Miliana se trouve confrontée à la nécessité pressante de réduire les délais et les coûts de fabrication tout en minimisant les rebuts de pièces embouties. Les défauts tels que la rupture, le plissement, les coups d'angle post-émaillage et la fissuration par corrosion contribuent significativement à cette problématique. Ce travail de recherche vise donc à étudier l'effet du taux de déformation sur la résistance à la corrosion des aciers DC0xEK.

Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- L'essai de traction de l'acier DC05EK selon les directions 0°, 45° et 90° et en fonction des taux de déformation (2%, 10%, 20% et 40%) révèle une certaine anisotropie.
- Le traitement des résultats de la corrélation d'image numérique montre que le gradient de déformation augmente et la déformation s'accumule dans des zones bien définies au fur et mesure que le taux de déformation augmente de 2% jusqu'à 40%.
- Les mesures électrochimiques des aciers DC05EK et DC06EK montrent que le DC05EK (9.53 μA) est plus résistant que DC06EK (18.75 μA).
- Les courants de corrosion de l'acier DC05EK diminuent en fonction des taux de déformation tandis que dans l'acier DC06EK, ils augmentent.

Pour que cette étude réponde aux exigences de l'entreprise EIMS, il est crucial d'établir un compromis entre la résistance à la traction et la résistance à la corrosion. La résistance maximale à la traction est observée à une déformation de 20%. De plus, le courant de corrosion minimum a été enregistré à des déformations de 20% pour l'acier DC05EK et entre 10% et 20% pour l'alliage DC06EK.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. Mechanics & industry, volume 7, Issue 56, September 2006, p.465 – 473
- [2]. Frédéric Mercier, Contribution à la modélisation de l'emboutissage de tôles minces par l'approche inverse. 1998. A. Col, l'emboutissage des aciers, Dunod, Paris, 2010.
- [3]. Gu.yot, J., & Mercier, P. (1958). Le rétreint dans l'emboutissage. Revue de MéTallurgie, 55(9), 801-814.
- [4]. Col. Emboutissage des tôles - Importance des modes de déformation. Techniques de l'ingénieur, M3180, 2002.
- [5]. É. Felder, Procédés de mise forme - Introduction, Techniques de l'ingénieur, M 3000, 2000.
- [6]. Evans U.R., J. Franklin Institute 208 (1929), p.45 cité dans ROBIN.J, Introduction aux méthodes électrochimiques, Edition MASSON et C (1967), 357 p.
- [7]. H. Corrosion & Corrosion control; Joan Wiley and Sons, INC, NewYork. (1963).
- [8]. Fontanna M; Green N. Corrosion engeneering. MC graw hill book compary New York. (1967).
- [9]. A.J. Sedriks, International Metals Reviewers, 28, (1983), pp. 295-307.
- [10]. M. Jean Reby, Le Choix des Matériaux en Anticorrosion, Critères à Prendre en Compte, Conférence du CETIM, (1997).
- [11]. Shreir L.J. Corrosion newness. Butter & Othsed. Vol1. London. (1977).
- [12]. S.VIRTANEN, I.MILOSEV, E.GOMEZ-BARRENA, R.TREBSE, J.SALO, Y.T.KONTTINEN. Special modes of corrosion under physiological and simulated physiological conditions. Science direct, Acta biomaterialia 4 (2008) 468–476.
- [13]. LANDOLT. Corrosion and Surface Chemistry of Metals, EPFL Press (2007)
- [14]. E. Bardal, Corrosion and Protection (Engineering materials and processes), Engineerin. USA: Spriger-Verlag London Process Limitede, 2004.
- [15]. G. Lessaffre, Y.M. Chen, CETIM Report N° 1D1230, 2001

- [16]. Richmann, Mac Naughton, Correlation of cavitation behavior with mechanical properties of metals, *Wear* 140(1) (1990) 63–82
- [17]. J.P. Franc, F. Avellan, B. Belahadji, J.L. Billard, D. Fréchet, D.H. Fruman, L. Brian, con-Marjollet, A. Karimi, J.L. Kuency, J.M. Michel, *La cavitation, mécanismes physiques et aspects industriels*, Presses Universitaires de Grenoble, 1995
- [18]. Grein, De la cavitation : une vue d'ensemble, *Revue technique Sulzer*, n° recherches, 1974, pp. 87–112
- [19]. Sculley J. *The fundamentals of corrosion*. Pergamon press. Oxford. (1975).
- [20]. P. Marcus, J.M. Herbelin, “The Application of Surface Analysis Methods to environmental/Material Interactions”, *Electrochem. Soc. Proc.*, (1991).
- [21]. J. Benard, A. Michel, J. Philibert et J.Talbot, *Métallurgie Générale*, Masson Editeurs, (1969).
- [22]. *Technologie de l'anticorrosion. Service structure et mécanique. Direction projets de centrales génie*, (1972).
- [23]. C. MAURIQUAND. « Histologie ». Les tissus (II). Armand Colin Paris, 7033.
- C. PICONI ET G.MACCAURO. Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterial* 20, (1999).
- [24]. C. Lefrou, P. Fabry, and J.-C. Pognet, *Electrochimie : concepts fondamentaux illustrés*, Nouvelle. France: Collection Grenoble Science, 2013.
- [25]. A.J. Bard, L.R. Faulkner, *Electrochimie – Principes, Méthodes et Applications*, Ed. Masson, Paris, (1983).
- [26]. EIMS, « Document de l'entreprise » 2019, [En ligne].
- [27]. *Des matériaux* / Jean-Paul Bailon, Jean-Marie Dorlot
- [28]. J.P. Bailon, J.-M.-Dorlot, *Des Matériaux*, presses internationales polytechniques ,2007.
- [29]. J Lemaitre, J Louis Chaboche, A Benallal, R Desmorat. "Mécanique des matériaux solides" 3ème édition 23 sept. 2009
- [30]. web site official de “ European Steel and Alloy Grades”
- [31]. web site official de “matmatch”

- [32]. web site official de ‘‘thyssenkrupp Materials Processing’’
- [33]. The phenomena of rupture and flow in solids. (1921). *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London. Series A, Containing Papers Of A Mathematical Or Physical Character*, 221(582-593), 163-198.
- [34]. Alsiny, A., Vardoulakis, I., & Drescher, A. (1992). Deformation localization in cavity inflation experiments on dry sand. *Géotechnique/Geotechnique*, 42(3), 395-410.
- [35]. Marron, G., & Bouhêlier, C. (1995). Le pliage des aciers HLE. Prévission et maîtrise du retour élastique. *Revue de MéTallurgie*, 92(1), 121-130
- [36]. Groche, CH. Metz, Hydroforming of unwelded metal sheets using activeelastic tools, *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005) 195–201.
- [37]. Sosin, A. (1962). Irradiation pinning and thermal depinning of dislocations. *Acta Metallurgica*, 10(4), 390-396.
- [38]. M AZAOUZI, Modélisation et optimisation numérique de l’emboutissage de pièces de précision en tôlerie, Thèse de doctorat, Ecole doctorale EMMA France. 2007
- [39] Magalhães, F.C., 2005, Estudo Numérico e Analítico das evoluções da força e da espessura em chapas de aço livre de intersticiais durante o processamento por embutimento. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [40] E.L.M. Jamal, S.N. Roland, Mesure des champs de déformation par la technique de corrélation d’images numériques, (2012).
- [41] Copyright ASTM International Provided by IHS under license with ASTM Licensee=University of Texas Revised Sub Account/5620001114 Not for Resale, 08/29/2008 10:02:45 MDT No reproduction or networking permitted without license from HIS.

ANNEXE

Acier DC05EK

FMPRO 55U0027 Optik 55U0028
Echantillon : khawla A DC05EK
Alliage : FE_100 Nuances : 4130 r
Mode : PA 24/06/2024 12:04:22

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	99,5	0,0314	0,0082	0,195	0,0084	0,0284	0,0187
2	99,5	0,0344	0,0081	0,201	0,0093	0,0301	0,0175
3	99,5	0,0343	0,0076	0,198	0,0089	0,0283	0,0184
Moyenne	99,5	0,0334	0,0080	0,198	0,0088	0,0289	0,0182

	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0,0084	0,0193	0,0338	0,0068	0,0043	0,0035	0,0013
2	0,0080	0,0177	0,0348	0,0064	0,0036	0,0036	0,0007
3	0,0086	0,0179	0,0353	0,0070	0,0044	0,0027	0,0014
Moyenne	0,0083	0,0183	0,0346	0,0067	0,0041	0,0033	0,0011

	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Zr
1	0,0043	< 0,0050	< 0,0050	0,0038	0,0001	< 0,0001	0,0047
2	0,0042	< 0,0050	< 0,0050	0,0048	0,0003	< 0,0001	0,0070
3	0,0042	< 0,0050	< 0,0050	0,0050	0,0002	< 0,0001	0,0066
Moyenne	0,0042	< 0,0050	< 0,0050	0,0045	0,0002	< 0,0001	0,0061

	Zn	Bi	As	N	Se	Sb	Ta
1	0,0022	< 0,0010	0,0026	0,0242	< 0,0010	0,0016	< 0,0050
2	0,0023	< 0,0010	0,0026	0,0506	< 0,0010	0,0022	< 0,0050
3	0,0023	< 0,0010	0,0030	0,0466	0,0012	0,0045	0,0072
Moyenne	0,0023	< 0,0010	0,0027	0,0405	< 0,0010	0,0028	< 0,0050

Acier DC06EK

FMPRO 55U0027 Optik 55U0028
 Echantillon : khawla 900DC06EK
 Alliage : FE_100 Mode : PA 24/06/2024 12:12:03

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	99,4	0,0095	0,0115	0,282	0,0087	0,0202	0,0140
2	99,4	0,0034	0,0337	0,281	0,0081	0,0186	0,0146
3	99,4	0,0026	0,0104	0,265	0,0084	0,0174	0,0139
Moyenne	99,4	0,0052	0,0185	0,276	0,0084	0,0187	0,0142

	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0,0033	0,0140	0,0258	0,0038	0,0289	0,0553	0,0491
2	0,0022	0,0142	0,0268	0,0037	0,0292	0,0537	0,0458
3	0,0034	0,0139	0,0280	0,0036	0,0304	0,0546	0,0467
Moyenne	0,0030	0,0140	0,0269	0,0037	0,0295	0,0545	0,0472

	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Zr
1	0,0043	< 0,0050	< 0,0050	0,0020	0,0001	< 0,0001	0,0028
2	0,0041	< 0,0050	< 0,0050	0,0022	0,0001	0,0002	0,0028
3	0,0045	< 0,0050	< 0,0050	0,0023	< 0,0001	< 0,0001	0,0039
Moyenne	0,0043	< 0,0050	< 0,0050	0,0022	0,0001	< 0,0001	0,0032

	Zn	Bi	As	N	Se	Sb	Ta
1	< 0,0005	< 0,0010	0,0028	0,0357	< 0,0010	0,0024	< 0,0050
2	0,0006	< 0,0010	0,0025	0,0324	< 0,0010	0,0046	< 0,0050
3	0,0006	< 0,0010	0,0029	0,0306	< 0,0010	0,0029	< 0,0050
Moyenne	0,0005	< 0,0010	0,0027	0,0329	< 0,0010	0,0033	< 0,0050