

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie des Mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Génie Mécanique

Spécialité : Génie des Matériaux

Présenté par :

AIT SAID Fares

CHEROUFA Aissa

Thème

Comportement en corrosion d'une nuance d'acier 35CrMo4

Ecrouis par vieillissement thermique

Soutenu le : 21/09/2022 devant le jury composé de :

Dr. AMARI Djamel

Encadreur

Pr. KHELFAOUI Youcef

Président

Dr. IDIR Abdelhek

Examineur

Promotion : 2021 / 2022

REMERCIEMENT

Avant tout, nous tenons à remercier celui qui nous a créé, protégé, aidé et qui nous a donné entre bien d'autres, la patience et le courage pour accomplir entre autres mon mémoire Master dans les meilleures conditions en disant « Dieu Merci ».

Nous voudrions remercier toutes les personnes qui nous ont accompagnés dans la Réalisation de ce travail.

*Tout d'abord, nous tenons particulièrement à remercier notre encadreur Monsieur **AMARI Djamel** Professeur à la Faculté de Technologie, pour son encadrement, sa Disponibilité, les discussions constructives et pour ses encouragements durant la réalisation de ce mémoire.*

Nous remercions également les membres du jury pour accepter de juger notre travail.

Nous n'oublions pas un vif remerciement à nos familles qui n'ont jamais arrêté de nous soutenir.

Nous tenons aussi à exprimer nos sincères remerciements à tous nos camarades de la promotion, et toutes les personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire de près ou de loin.

DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail à ma vie qui m'a soutenu vers le droit chemin, ma
mère bien-aimée, Karima.*

*Je salue mon cher père, Abdelkader, pour son soutien indéfectible, sa patience
et ses sacrifices, tout au long de mes études.*

Mes frères Rassim, Hassib, et à toutes ma famille,

Ainsi mes copains de chambre,

Hilal, Dai, Lamine, Fares, Bony,

à tous mes amis(e) de loin et de près.

fares

DÉDICACES

À mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis,

merci beaucoup mes parents.

Je dédie ce modeste travail à tous ceux que j'ai trouvés durant cette période à mes côtés pour m'encourager.

A tous mes amis(es) et proches, ils s'en reconnaîtront sans que je les cite.

A toute ma famille, mes chère frères et sœurs. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou loin pour que ce projet soit possible.

Aïssa

Liste des symboles et abréviations

Symboles et abréviations	Signification	Unité
ISO	Organisation internationale de normalisation.	
NACE	Organisation internationale de normalisation.	
E.C.S	L'électrode au calomel saturé.	
OCP	potentiel circuit ouvert.	
MEB	microscopie électronique a balayage.	
DRX	cristallographie aux rayons X.	
E	Potentiel.	(V)
H	Surteintion.	(V)
η_C	Surteintion cathodique.	(V)
η_A	Surteintion anodique.	(V)
RP	résistance de polarisation.	(ohm.cm ²)
EC	potentiel cathodique.	(V)
EA	potentiel anodique.	(V)
iC	L'intensité du courant.	(A)
M	Poids.	Kg
I	courant global.	(A)
E _{corr}	potentiel de corrosion	(A/cm ²)
V _{corr}	La vitesse de corrosion	
<i>n</i>	nombre d'électrons mis en jeu	(e)
F	Constante de Faraday	96485 (C/mol)
ρ	Masse volumique du métal	(g/cm ³)
T	température	(°C)
H	heure	
CE	Contre électrode ou électrode auxiliaire	
ER	Electrode de référence	
I_0	Densité de courant de corrosion en absence d'inhibiteur	
I_{Inb}	Densité de courant de corrosion en présence d'inhibiteur	

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1 : Essai de Vickers.....	7
Figure 1.2 : Essai Brinell HB.....	8
Figure I.3: Essai Rockwell.....	9
Figure I.4: Echelle galvanique du plus noble au moins noble.....	11
Figure I.5: schéma de montage du dispositif destiné a tracer les courbes de polarisations.....	12
Figure I.6: courbes de polarisations diagramme d'evans.....	13
Figure I.7: courbe de polarisation quand les deux électrodes son impolarisables.....	14
Figure I.8: courbe de polarisation quand la cathode est impolarisables.....	14
Figure I.9: courbe de polarisation quand l'anode est impolarisables.....	15
Figure I.10 : courbe de polarisation quand Les deux électrodes sont polarisables.....	15
Figure I.11: courbe de polarisation quand L'une des électrodes peut se passiver.....	16
Figure I.12: Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de tafel.....	17
Figure II.1 : Rainure de 2mm.....	20
Figure II.2 : Soudure du fil.....	21
Figure II.3 : Enrobage des échantillons.....	22
Figure II.4 : Polisseuse utilisée.....	22
Figure.II.5 : Montage de la cellule.....	23
Figure.II.6 : Schéma de l'EDT.....	24
Figure.II.7 : Image de là contre électrode.....	25
Figure.II.8 : Schéma de principe d'une électrode au calomel saturée en KCl (ECS).....	25
Figure.II.9 : Représentation de l'appareillage électronique Voltalab PGP201 utilisé.....	26
Figure.II.10 Représentation de l'appareillage électronique Autolab utilisé.....	27
Figure II.11 : Dispositif expérimental de la technique potentiodynamique.....	27

Figure III.1 : Microstructure optique de nuance d'acier 35CrMo4.....	29
Figure III.2 : Microstructure de l'acier 35CrMo4 à l'état de vieillissement. a) Vieilli à 3h, b) vieilli à 6h, c) vieilli à 9h.....	30
Figure III.3 : Diagramme de la dureté Vickers HV de l'acier 35CrMo4.....	31
Figure III.4 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4 (revenu 3h).....	32
Figure III.5 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4 (revenu 6h).....	32
Figure III.6 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4 (revenu 9h).....	33
Figure III.7 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4.....	33
Figure III.8 : Courbe de polarisation de Tafel de l'acier 35CrMo4 dans une solution NaCl à 3%. A) vieilli à 3h, B) vieilli à 6h et C) vieilli à 9h.....	35
Figure III.9 : Courbes de polarisation de l'acier 35CrMo4 enregistrées après 30 min dans une solution NaCl à 3%.....	36

LISTE DES TABLAUX

Tableau 1.1 : composition chimique 35CrMo4	2
Tableau III.1 : Paramètres électrochimiques des trois aciers dans NaCl 3% à diverses concentrations.....	37

SOMMAIRE

Liste des symboles et abréviations.....	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre I : Éléments bibliographique.....	2
I.1 Définitions de l'acier.....	2
I.2 Désignation conventionnelle et composition chimique.....	2
I.2.1 L'acier 35CrMo4	2
I.3 Traitement thermique.....	3
I.3.1 Le recuit	3
I.3.2 La trempe	4
I.3.3 Le Revenu.....	5
I.4 La dureté.....	6
I.4.1 La dureté Vickers (HV)	7
I.4.2 La dureté Brinell (HB)	8
I.4.3 La dureté Rockwell	9
I.5 Généralités sur la corrosion.....	10
I.5.1 Définition de la corrosion	10
I.5.2 Le potentiel à l'abandon	11
I.5.3 Mesure des potentiels.....	12
I.5.4 Phénomènes de polarisation	12
I.5.5 Différents types de courbes de polarisation.....	14
I.5.6 Droits de Tafel.....	16
Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales.....	18
II.1. Traitement thermique	18
II.1.1 Austénitisation.....	18
II.1.2 Revenu de vieillissement.....	18

II.2 Essais de dureté Vickers HV.....	19
II.3 Essai de résilience.....	19
II.4 Préparation des échantillons pour les tests de corrosion.....	19
II.4.1 faire une rainure aux trois échantillons.....	19
II.4.2 soudage d'un fil électrique en cuivre.....	20
II.4.3 tester la conductivité.....	21
II.4.4 l'enrobage des échantillons.....	21
II.4.5 Polissage.....	22
II.5 Manipulations de corrosion.....	23
II.5.1 Cellule électrochimique.....	23
II.5.2 Milieu d'étude	23
II.5.3 Electrodes	23
II.6 Electrolytes.....	26
II.7 Dispositifs électrochimiques utilisés	26
II.8 Technique expérimentales.....	27
II.8.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP).....	28
II.8.2 Courbes de polarisation.....	28
Chapitre III : Résultats et discussion.....	29
III.1 Analyse micrographique de l'acier 35CrMo4.....	29
III.1.1 Etat de livraison.....	29
III.1.2. les microstructures à l'état vieillis.....	29
III.2 dureté Vickers.....	31
III.3 Caractérisation électrochimique.....	32
III.3.1 POTENTIEL A L'ABONDON (OCP).....	32
III.3.2 COURBES DE TAFEL.....	35
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	38
Références bibliographiques.....	39

Introduction générale

Tous les aciers ordinaires tendent à se dégrader superficiellement lorsqu'ils sont soumis à des milieux corrosifs et spécialement des milieux acides qui sont largement utilisés. La corrosion est la détérioration ou la dégradation des matériaux par des interactions physico-chimiques avec leur environnement entraînant ainsi, des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques...etc.).

Les mécanismes mis en jeu sont divers et conduisent à des formes différentes de corrosion. Les aciers ordinaires sont utilisés dans l'industrie pétrolière pour les pipelines en premier lieu et d'autres installations industrielles, d'où l'ampleur des dégâts. Selon la thermodynamique, les métaux ne sont pas stables au contact de l'air et de l'eau, à quelques exceptions près. Mais, si la vitesse des réactions de corrosion est lente et si on emploie des techniques de protection adéquates, ils peuvent remplir leur fonction pendant la durée de vie prévue pour une réalisation technique.

Au cours de ce travail, nous avons continué le travail de nos collègues de l'année passée (les traitements thermiques de vieillissement par des revenus, après austénitisation et trempe, à une température de 180°C pendant des temps de maintien 3h, 6h et 9h. et essai de dureté).

Le but de notre travail est de voir le comportement de l'acier 35CrMo4 en corrosion sous le traitement de vieillissement à 180°C, pendant différents temps de maintien 3, 6 et 9 heures. Le milieu électrolytique choisi est une solution NaCl à 3%.

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à une présentation générale relative au traitement de vieillissement des aciers, leurs propriétés mécaniques et leur comportement en corrosion.

Le second chapitre présente l'ensemble des techniques expérimentales que nous avons utilisées dans notre travail.

Les résultats expérimentaux suivis d'une discussion sont présentés dans le troisième chapitre, Enfin, nous avons terminé notre travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus et des perspectives d'étude.

Chapitre I :

Éléments bibliographique

I.1 Définitions de l'acier

L'acier est essentiellement un alliage de fer-carbone. On ne le trouve pas à l'état naturel mais il résulte de la transformation du minerai de fer extrait des mines. Les conditions matérielles de cette transformation entraînent dans sa composition la présence en très faible proportion d'autres éléments phosphore et soufre, signalés comme des impuretés et nocifs pour l'acier. L'acier peut également contenir d'autres éléments tel que le silicium, le manganèse, le chrome, le nickel, etc.) Introduits ou non, en vue de modifier sa composition chimique et par suite ses caractéristiques mécaniques [1].

On appelle acier, un matériau contenant en masse une teneur en carbone inférieure à 2 % et sépare l'acier de la fonte [2].

I.2 Désignation conventionnelle et composition chimique

I.2.1 L'acier 35CrMo4

L'acier 35CrMo4 fait partie de la famille des aciers faiblement alliés au chrome-molybdène contenant 0,35% de carbone et 1% de chrome dont aucun des éléments alliés n'a une teneur supérieure à 5%.

Le 35CrMo4 est classé comme un acier de construction à traitement thermique, caractérisée par une résistance à chaud élevée [3].

La composition chimique, selon la norme AFNÓR 35-552 est donnée dans le tableau ci- dessous :

Tableau 1.1 : composition chimique 35CrMo4

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
Min	0.30	0.1	0.6	-	-	0.9	0.15
Max	0.37	0.4	0.9	<0.025	0.035	1.2	0.30

Le rôle des éléments chimiques du tableau ci-dessus :

- **C** : il augmente la dureté de l'acier et il diminue sa résilience.

- **Cr** : le chrome augmente la pénétration à la trempe au cœur de l'acier.
- **Mo** : il a le même rôle que le chrome pour la trempabilité, il augmente aussi la résistance à la corrosion.
- **Mn** : renforce la fragilité aux températures élevées.
- **S** : il fragilise les aciers par la formation des composés MnS, FeS, leurs teneurs ne doit pas dépasser 0,035%.
- **P** : augmente fortement la trempabilité, Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

Les teneurs moyennes de l'acier 35CrMo4 en élément C, Cr et Mo sont les suivantes :

C : 0,35%, **Cr** : 1%, **Mo** : 0,20%

I.3 Traitement thermique

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux, et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes : Augmentation de la résistance à la rupture, et de la limite élastique R_m , R_e , Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage...). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité [4].

I.3.1 Le recuit

Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes [5].

I.3.1.1 Types élémentaires de recuits

- Le recuit d'adoucissement.
- Recuit de normalisation.

- Le recuit de détente.
- Recuit de régénération.

I.3.1.2 Processus

Le recuit est un terme générique et peut être classé en fonction de la température. Il est appliqué pour diverses raisons :

- Pour adoucir un métal afin de faciliter sa rectification.
- Pour libérer les contraintes internes induites par certains processus antérieurs (souvent afin de permettre un traitement ultérieur sans fracturation).
- Pour corriger une structure à gros grains.
- Pour amener des éléments d'alliage dans une solution.

Il peut s'effectuer sous vide ou dans une atmosphère réductrice (une finition brillante est requise), dans l'air (les pièces seront ultérieurement rectifiées), ou dans une atmosphère endothermique/neutre (sans décarburation, mais avec une finition non brillante) [6].

I.3.2 La trempe

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite [7].

Une trempe se compose de trois phases principales :

❖ **Chauffage**

Destiné à amener L'acier à l'état austénitique :

- Acier hypoeutectoïde (de 0 à 0,85% de carbone) Température de chauffage (A- 50 C)
La ligne Ac3 va de 721°C à 906°C, le chauffage d'un acier hypoeutectoïde dépend donc de sa teneur en carbone.
- Acier eutoctoïde (0,85% de carbone).
- Température de chauffage (Acl 50°C) soit environ 780C.
- Acier hypereutoctoïde (de 0,85 à 1,7% de carbone) Température de chauffage (Acl - 50°C) soit environ 780°C.

❖ **Maintien à température d'austénitisation**

Dépend des dimensions et des formes de la pièce et des types d'aciers, 15 min pour les aciers ordinaires, 30 min pour les aciers alliés, en particulier pour ceux contenant des carbures.

❖ **Refroidissement (air, eau ou huile)**

C'est lui qui conditionne la structure finale De lui dépend l'apparition de nouveaux constituants tels que : (dans l'ordre croissant de dureté) troostite, bainite, martensite.

La trempe s'effectue par immersion dans l'eau, par pulvérisation d'eau ou par soufflage d'air, Le fluide le plus utilisé est l'eau froide ($T=50^{\circ}\text{C}$) ou de l'huile Dans certains cas assez rares, il est possible d'utiliser d'autres fluides comme des liquides à base de glycol pour minimiser la formation des contraintes internes.

I.3.3 Le Revenu

Le revenu est un traitement énergétique qui permet à l'acier d'acquies des propriétés R_e , R_m , dureté élevées du fait de la présence de martensite, mais dont la ductilité (A%) et la résilience (K) sont très faibles pour la même raison. Si on tient compte également d'un niveau de contraintes propres souvent important, il est évident qu'un acier ne peut être utilisé en service directement à l'état trempé. L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre R_m , R_e , d'une part et A%, K d'autre part Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal. Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste à un réchauffage refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement. Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. [8].

I.3.3.1 Les types de revenu

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

- **Revenu de relaxation ou de détente**

Il s'effectue entre 180°C et 220°C-250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe, et au changement de structure austénite--martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté, et une légère remontée de la résilience, Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc, ou devant conserver une forte dureté superficielle [8].

- **Revenu de structure ou classique**

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500 C et Acl. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [8].

- **Revenu de durcissement**

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome, ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle, puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires) [8].

I.4 La dureté

C'est l'essai le plus simple pour apprécier la limite élastique d'un matériau. L'essai consiste à appliquer sur le matériau un pénétrateur (bille, pyramide...) avec une certaine force, et à mesurer les dimensions de l'empreinte laissée par le pénétrateur Selon Ashby, la dureté réelle est égal à 3 fois la limite élastique, En fait on ne mesure jamais la dureté réelle mais une valeur approchée qui dépend de la technique utilisée des abaques permettent de passer d' une technique à l'autre. Bien que la dureté représente une pression, elle n'est jamais exprimée en MPa mais par un nombre sans unité qui dépendra de la technique employée [9].

On distinguera :

- La dureté Vickers (HV).
- La dureté Brinell (HB).
- La dureté Rockwell (HR).

On peut aussi réaliser des empreintes de micro-dureté à l'aide d'un microscope optique, et d'une pointe diamant, sous très faible charge, les dimensions de l'empreinte étant de l'ordre du micron :

- Micro-dureté Vickers (empreinte carrée).
- Micro-dureté Knoop (empreinte en losange).

I.4.1 La dureté Vickers (HV)

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée, et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue, On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur.

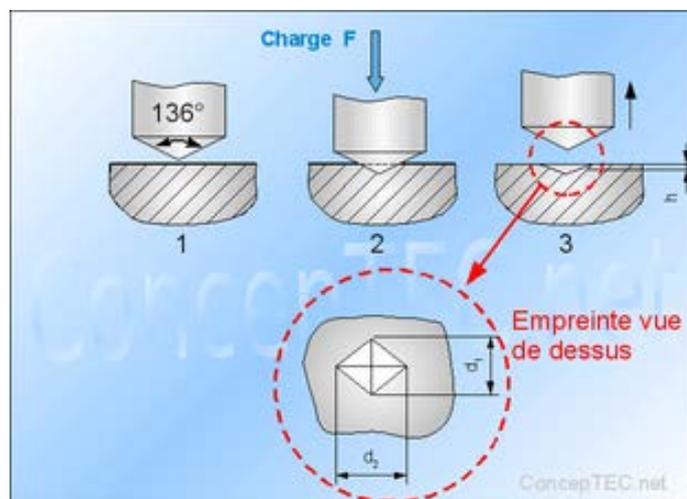


Figure 1.1 : Essai de Vickers

On utilise un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, d'angle au sommet 136° .

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2} \quad (\text{I.1})$$

F est compris entre 49 et 981 N (soit une charge de 5 à 100 kg, la charge normale étant de 30kg).

Perlite : HV = 150 – 200.

Martensite : HV > 400.

I.4.2 La dureté Brinell (HB)

L'essai a été édité dès 1924, Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène. Le diamètre utilisé peut valoir entre 1 mm, 2,5 mm, 5mm et 10mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 seconde selon le solide après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d [8].

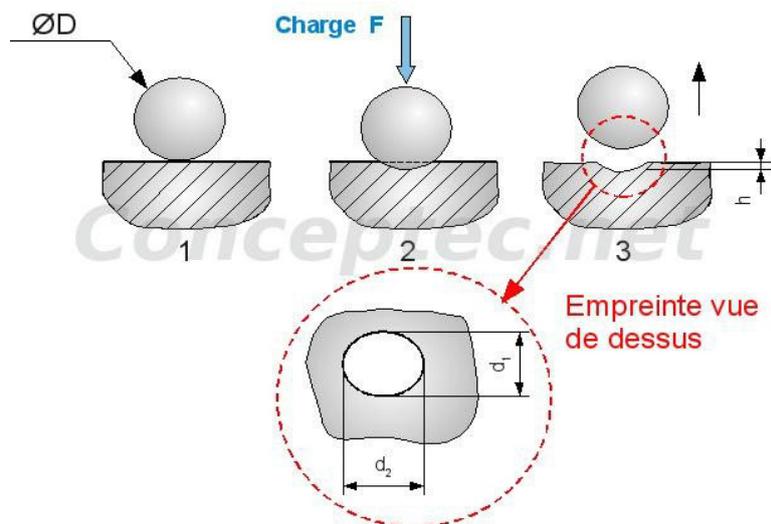


Figure 1.2 : Essai Brinell HB

On utilise un pénétrateur en forme de bille en acier ou en carbure de W

$$HB = \frac{2.F}{g.\pi.D.(D-\sqrt{D^2+d^2})} \quad (I.2)$$

- **D** : diamètre de la bille.
- **d** : diamètre de l'empreinte.
- **F** : force appliquée.

- $F=9,81KD2$.

Acier : $K= 30$; Al : $K= 2,5$ à 10 et Cu : $K=5$ à 30

I.4.3 La dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère ou bien sphérique pour le critère est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises, Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de $0,2\text{mm}$. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre $1,588\text{mm}$ ou $3,175\text{mm}$. L'essai se déroule en trois phases [8] :

- On applique le pénétrateur (cône ou bille) avec une force F_0 .
- On applique une force supplémentaire F_i pendant 2 à 8 secondes la pénétration est alors de b .
- On enlève la surcharge la pénétration n'est plus que de $c > a$.
- On mesure l'accroissement rémanent $e=c-a$.

$$\text{HRC}=100-(e/0,002)$$

(I.4)

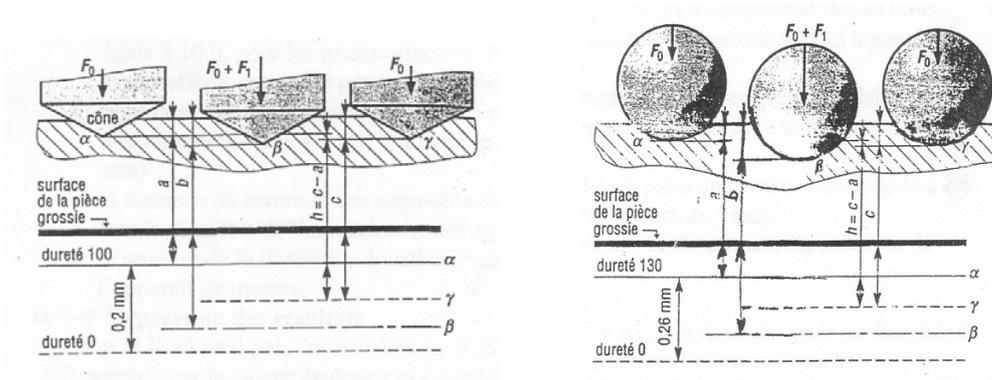


Figure I.3 : Essai Rockwell.

Il existe 15 types différents d'essais Rockwell, selon la forme et la taille du pénétrateur et la force appliquée ; pour les aciers, on a :

- Cône de 120° .

- $F_0 = 98 \text{ N}$ (10 kg).
- $F_i = 1373 \text{ N}$ (140 kg).
- Perlite : 20 HRC.
- Martensite : 40 à 60 HRC L5.4.

I.5 Généralités sur la corrosion

I.5.1 Définition de la corrosion

Étymologiquement, le mot « corrosion » provient du latin *corrodere*, signifie ronger, attaquer et de façon générale, la corrosion est souvent définie comme l'altération d'un matériau ou d'une structure par réaction chimique ou physicochimique avec le milieu qui l'entoure.

Toutefois, une multitude de définitions plus ou moins différentes peuvent être rencontrées :

I.5.1.1 Selon la norme internationale ISO 8044 du 15 août 1999

La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal, et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs [10].

I.5.1.2 Selon « National Association of Corrosion Engineers » NACE (la norme ISO 15156)

La corrosion est la détérioration d'un matériau, généralement métallique, qui résulte d'une réaction avec son environnement. C'est à dire soit un environnement gazeux (oxygène de l'air par exemple), soit un environnement liquide (eau de mer par exemple), soit un environnement de contraintes dans de tels milieux, soit même en milieu biologique (bactéries se déposant dans les tuyères industrielles - chimique ou pétrochimique - ou d'extraction pétrolière) [11].

Comme tous autres phénomènes, les phénomènes de corrosion obéissent à des lois thermodynamiques où le métal a tendance à retourner à son état d'origine, c'est à dire le retour du métal aux formes plus stables sous lesquelles il existe dans la nature [12]. Ceci provient du fait qu'à l'exception des métaux nobles (or, platine) qui se trouvent à l'état natif, la majorité des métaux se trouvent sur terre à l'état minérale des oxydes, sulfures, sulfates, carbonates et silicates [13].

I.5.2 Le potentiel à l'abandon

Le potentiel de corrosion, appelé aussi potentiel libre ou potentiel à l'abandon, est le potentiel que prend un métal ou un alliage métallique donné par rapport un électrolyte donné. Il est dépendant des conditions expérimentales et peut être mesurée par rapport à une électrode de référence.

Les électrodes de références sont des électrodes impolarisables. L'électrode de référence dont la tension est choisie égale à zéro à toute température est l'électrode à hydrogène mais cette électrode est longue à préparer et d'un emploi délicat. Celle qui est le plus utilisée est l'électrode au calomel saturé (E.C.S ou S.C.E en version anglo-saxonne). Il peut être établi une classification des métaux et alliages en fonction de la valeur du potentiel de corrosion, on parle alors de série galvanique ou échelle galvanique (Figure I.4).

De très nombreux paramètres tels que la composition, la structure cristallographique, la mise en œuvre des matériaux métalliques ont une influence sur les processus de corrosion [14].

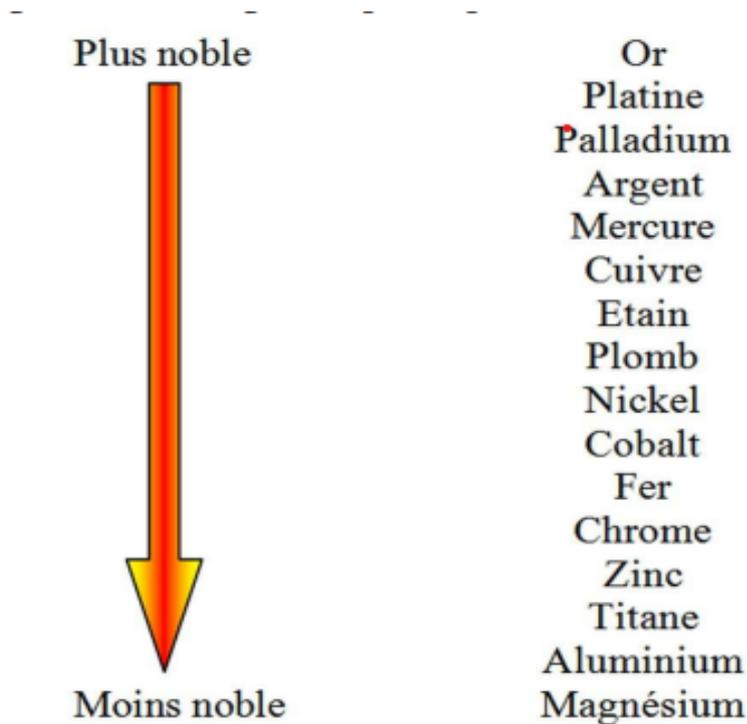


Figure I.4 : Echelle galvanique du plus noble au moins noble

I.5.3 Mesure des potentiels

On mesure le potentiel du métal par rapport à une électrode de référence dont le potentiel est connu. La mesure doit se faire en circuit ouvert pour éviter le passage d'un courant électrique qui perturberait la valeur du potentiel en favorisant la polarisation du métal. On utilise un millivoltmètre électronique dont la très haute impédance d'entrée (10^{10}) limite à une valeur très faible l'intensité du courant débité par la pile [15].

I.5.4 Phénomènes de polarisation

Lorsqu'un métal n'est pas en équilibre avec une solution contenant ses propres ions, le potentiel de l'électrode diffère du potentiel de corrosion d'une certaine valeur égale à η comme surtension. Le problème qui se pose est de savoir comment varie le potentiel des deux électrodes a et c constituées chacun par un métal pur différent, réunies entre elles et plongées dans un électrolyte, en fonction de l'intensité du courant qui circule dans la pile. La Figure I.5 montre le montage, comment cette étude peut être réalisée [16].

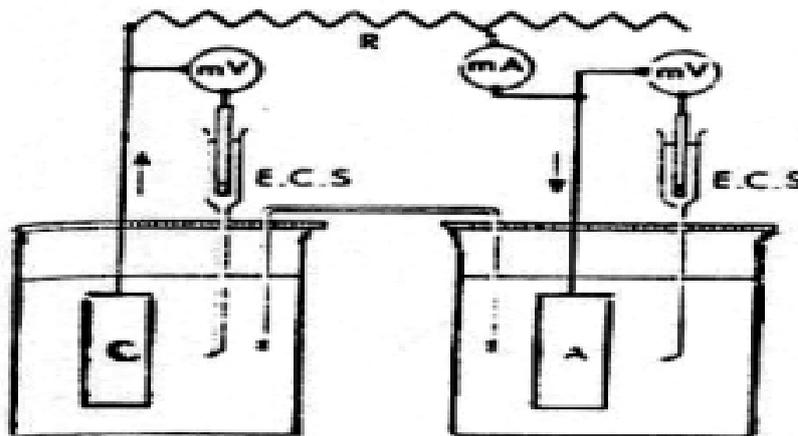


Figure I.5 : schéma de montage du dispositif destiné à tracer les courbes de polarisations.

A chaque instant, on peut mesurer le potentiel EC et EA des deux électrodes. Le rhéostat R permet de faire varier l'intensité du courant débité par la pile. A l'instant initial, lorsque le circuit est ouvert, le potentiel des deux électrodes sera ECO et EAO.

Si un courant d'intensité I circule dans la pile, on constate que le potentiel de la cathode devient plus négatif ECI et celui de l'anode plus positif EAI.

$$ECI - EAI = \eta_C \text{ sustentation cathodique.}$$

$E_{AI} - E_{CI} = \eta A$ sustentation anodique.

En faisant varier l'intensité du courant de corrosion, on pourra tracer les courbes de polarisation cathodiques $E_C = f(i)$ et anodiques $E_A = f(i)$, on observe alors pour une certaine valeur i_C de l'intensité du courant, le potentiel de l'anode et celui de la cathode prennent la même valeur E_C , i_C est l'intensité maximale que pourra débiter la pile. C'est l'intensité de corrosion du couple A-C dans le milieu donné. E_{corr} est le potentiel de corrosion du couple (potentiel mixte).

Dans certains cas, étant donné la résistance intérieure du circuit, il est possible d'atteindre la valeur i_C de l'intensité de courant de corrosion même si $R = 0$. On le détermine par extrapolation des deux courbes de polarisation anodique et cathodique, (Figure I.6).

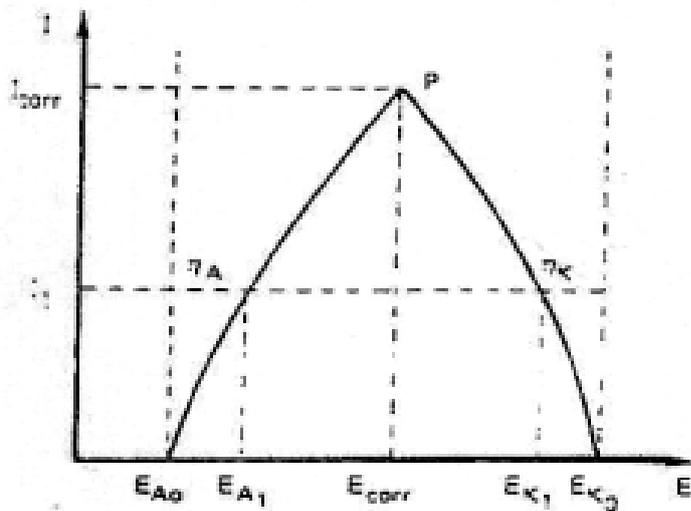


Figure I.6 : courbes de polarisations diagramme d'Evans

L'intensité du courant de corrosion i_C est une grandeur qu'il est intéressant de connaître, car elle permet de calculer la perte de poids m subie par le métal en fonction du temps. Suivant la loi de Faraday, on a la relation :

$$m = \frac{A \cdot i_C \cdot t}{F \cdot n} \quad (I.3)$$

Où A : masse atomique du métal de valence n et t = temps. Pour diminuer l'intensité du courant de corrosion, il faudra donc essayer de donner à la surtension cathodique, anodique ou bien aux deux surtensions une valeur aussi élevée que possible. Par contre, si l'on veut fabriquer une pile électrique qui débite une forte intensité, il faudra éviter les phénomènes de polarisation en

diminuant le plus possible la surtension aux électrodes à l'aide de dépolarisants (MnO_2 par exemple).

I.5.5 Différents types de courbes de polarisation

Il existe cinq types principaux de courbes pouvant présenter les diagrammes de polarisation :

I.5.5.1 Les deux électrodes sont impolarisables

L'intensité débitée par la pile dépend de la résistance totale du circuit, c'est le cas de la pile Daniel $Cu-CuSO_4 - ZnSO_4-Zn$, (Figure I.7).

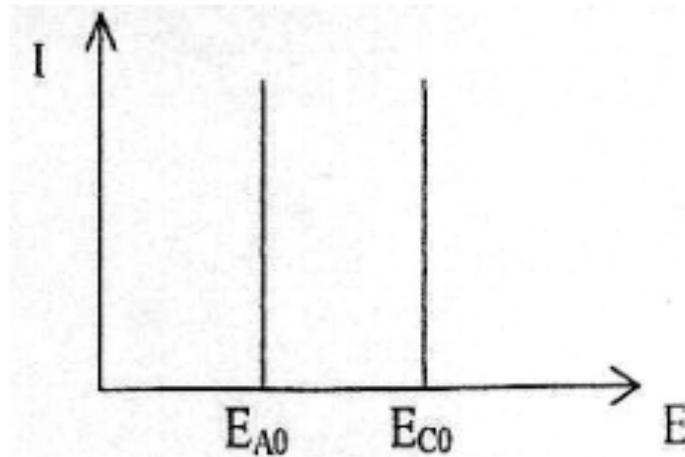


Figure I.7 : courbe de polarisation quand les deux électrodes son impolarisables.

I.5.5.2 La cathode est impolarisable

On dit que la pile fonctionne sous contrôle anodique (Figure I.8).

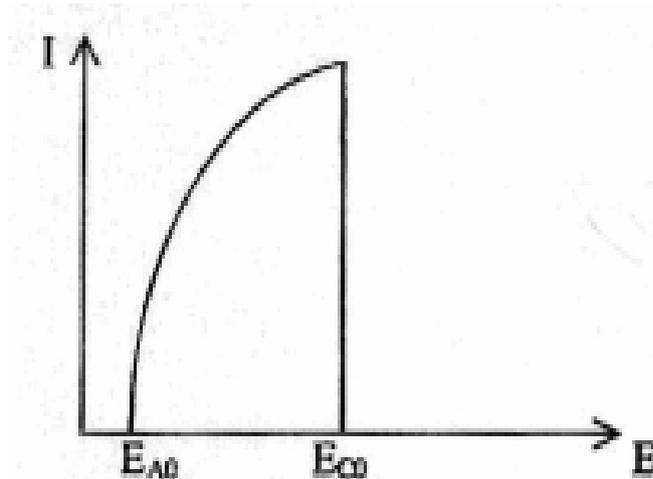


Figure I.8 : courbe de polarisation quand la cathode est impolarisable.

I.5.5.3 L'anode est impolarisable

On dit que la pile fonctionne sous contrôle cathodique (Figure I.9)

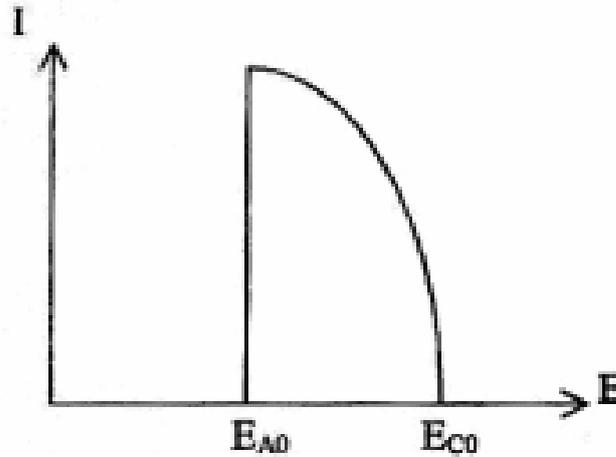


Figure I.9 : courbe de polarisation quand l'anode est impolarisable.

I.5.5.4 Les deux électrodes sont polarisables

On dit que la pile fonctionne sous contrôle mixte (Figure I.10)

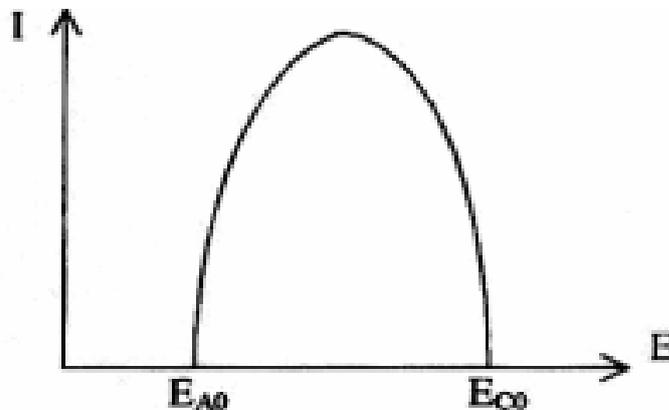


Figure I.10 : courbe de polarisation quand Les deux électrodes sont polarisables.

I.5.5.5 L'une des électrodes peut se passiver

Elle se recouvre d'un film qui introduit une résistance au passage du courant. La pile fonctionne sous contrôle ohmique, l'intensité du courant de corrosion i_C est faible (Figure I.11). Dans la pratique, les courbes de polarisation les plus fréquentes sont celles qui correspondent à un contrôle cathodique.

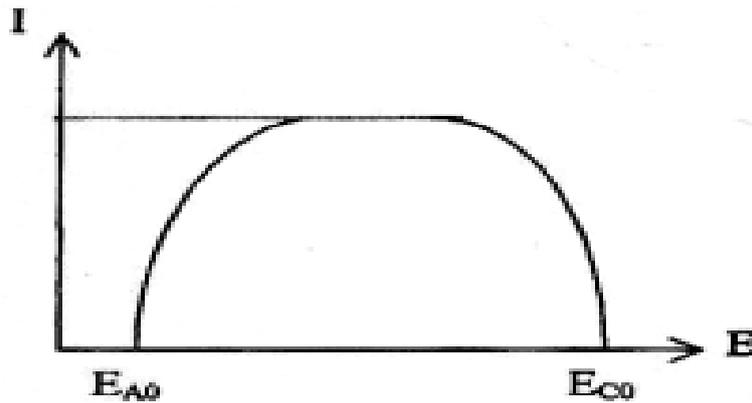


Figure I.11 : courbe de polarisation quand L'une des électrodes peut se passiver

I.5.6 Droits de TAFEL

Il s'agit en fait d'une méthode d'extrapolation basée sur l'équation $I = f(E)$ de Butler-Volmer (éq. I.4). Par conséquent, les hypothèses nécessaires à l'établissement de cette équation sont à l'origine des limites liées à l'exploitation de cette technique.

Si on représente la courbe de polarisation obtenue en coordonnées $\log i$ (densité de courant) = $f(E)$ (Figure I.12), l'intersection des droites anodique et cathodique, extrapolées au potentiel de corrosion, donne la densité de courant de corrosion i_{corr} et le potentiel de corrosion E_{corr} .

A partir de la loi de Faraday, il est alors possible de définir une relation permettant d'estimer la vitesse de corrosion :

$$v_{corr} = \frac{i_{corr} \cdot t \cdot M}{n \cdot F \cdot \rho} \quad (I.4)$$

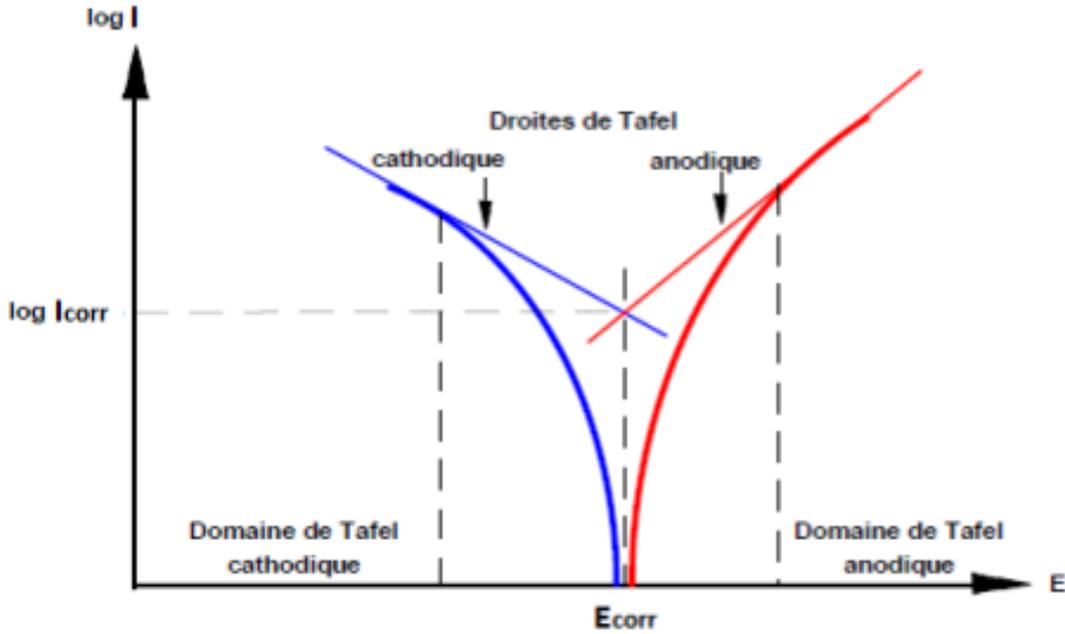


Figure I.12 : Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de Tafel.

Cette méthode peut être aisément mise en œuvre en laboratoire (par l'utilisation d'un potentiostat), mais elle présente un certain nombre de limitations :

- ✓ Les écarts de potentiel imposés à l'électrode de travail par rapport à l'électrode de référence doivent être relativement importants (généralement plus de 100 mV); il est donc probable qu'une modification appréciable de l'état de surface du métal et donc de i_{corr} se produise pendant le tracé de ces courbes.
- ✓ Les courbes $E = f(\log i)$ doivent être linéaires sur au moins une décade en courant, ce qui ne peut pas toujours être vérifié à cause de la présence de dégagement gazeux ou d'un processus de polarisation par diffusion [17].

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales

II.1 Traitement thermique :

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud destinée à modifier la Microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques, durant notre précipitation, nous effectuons deux types de traitement thermique pour chacun des deux aciers (35CrMo4).

II.1.1 Austénitisation

Il consiste à chauffer l'acier à une température dite d'austénitisation qui permet la mise en solution de l'ensemble des éléments chimiques et d'homogénéiser la structure.

- Aciers 35CrMo4 d'une teneur en carbone de 0.35 %, d'après le diagramme fer carbone la température d'austénitisation ($AC1 + 50^{\circ}C$, $T1 = 880^{\circ}C$).
- Pris le temps de maintien à température d'austénitisation de 35 min.

La trempe s'effectue par immersion rapide dans l'eau, le fluide le plus utilisé est l'eau froide $T < 40^{\circ}C$, alors les grains n'ont pas le temps de se réarranger pour reprendre leur structure à basse température.

II.1.2 Revenu de vieillissement

Le revenu se pratique après une trempe, pour réduire les contraintes internes créées durant celle-ci. Le revenu doit être fait dans les 4 heures après le traitement thermique.

La méthode consiste à chauffer les éprouvettes à une température inférieure à celle d'austénitisation, la température est déterminée en fonction du type de l'acier entre $160^{\circ}C$ et $200^{\circ}C$ pour six éprouvettes de chaque acier on pratique un revenu a trois temps de maintiens différents 3h ,6h, 9h, et les refroidir très lentement à l'air libre.

II.2 Essai de dureté Vickers HV

La mesure de dureté Vickers se fait avec un Pénétrateur en forme de pyramide normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° sur lequel ils ont appliqué une force de 50g. L'empreinte que laisse le pénétrateur peut être utilisée pour calculer la dureté du matériau 35CrMo4.

II.3 Essai de résilience

La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm², nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette.

➤ Le principe de l'essai

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en V où en U. On détermine alors l'énergie W absorbée par cette éprouvette après rupture.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Travail nécessaire (énergie absorbée)}}{\text{section au droit de l'entaille}}$$

- **L'énergie absorbée** : $w = (mgh_0 - mgh_1)$.
- **m** : la masse du marteau (g)
- **g** : la gravité qui est égale à 9,81 (m/s²).
- **h₀ et h₁** : la différence de hauteur (cm).

II.4 Préparation des échantillons pour les tests de corrosion

II.4.1 faire une rainure aux trois échantillons

La pièce fixée et serrés dans l'étau, et avec l'aide d'une scie à métaux on fait une rainure d'environ 2mm dans chaque échantillon manuellement.



Figure II.1 : Rainure de 2mm.

II.4.2 soudage d'un fil électrique en cuivre

Après avoir fait une rainure dans chaque'un des trois échantillons on le soude avec un fil d'éteint, La soudure se fait en chauffant les deux parties métalliques à souder (dans ce cas, la cosse à souder et le fil mis en place) et en y appliquant le fil de soudure (mélange étain + flux de soudure) qui fond à la chaleur et se combine aux éléments à souder. Cela permet d'obtenir un lien métallique solide entre les deux parties, qui assure à la fois la continuité électrique et la solidité mécanique.



Figure II.2 : Soudure du fil électrique.

II.4.3 tester la conductivité

Après le soudage du fil électrique on teste la conductivité de l'ensemble échantillon-phil électrique à l'aide d'un multimètre.

On à tester la continuité des deux extrémités du Fil électrique et la face apparente de l'échantillon, la résistance entre les deux extrémités est mesurée avec un multimètre. Une faible résistance signifie que le circuit est fermé et qu'il y a une bonne continuité électrique. Une résistance élevée signifie que le circuit est ouvert et qu'il y a un problème de continuité. Ce qui veut dire que votre fil électrique est défaillant.

Et on teste leur conductivité le multimètre nous a affiché une résistance nulle, cela signifie que l'électricité peut circuler librement dans votre fil électrique.

II.4.4 l'enrobage des échantillons

Pour enrober nos échantillons on les a nettoyés avant afin d'améliorer l'adhérence entre la résine d'enrobage et l'échantillon.

Puis on Choisit un moule d'enrobage et on y a installé l'échantillon propre et sec. On Déterminer les quantités précises des constituants de la résine, Mélanger soigneusement les constituants, après on a versé la résine mélangée sur l'échantillon et laisser polymériser dans le moule.



Figure II.3 : Enrobage des échantillons.

II.4.5 Polissage

Pour l'opération de polissage, on met l'échantillon dessous d'un papier verre de différentes grains (200, 400, 600, 800). Et cela pour enlever la couche de la résine qui couvrir la face de l'échantillon qu'on voulait étudier.



Figure II.4 : Polisseuse utilisée.

II.5 Manipulations de corrosion

II.5.1 Cellule électrochimique

Les mesures électrochimiques sont effectuées dans une cellule en verre contenant l'électrolyte et les trois électrodes : électrode de travail, contre électrode et électrode de référence. L'étude électrochimique est réalisée à la température ambiante et dans un milieu aéré.

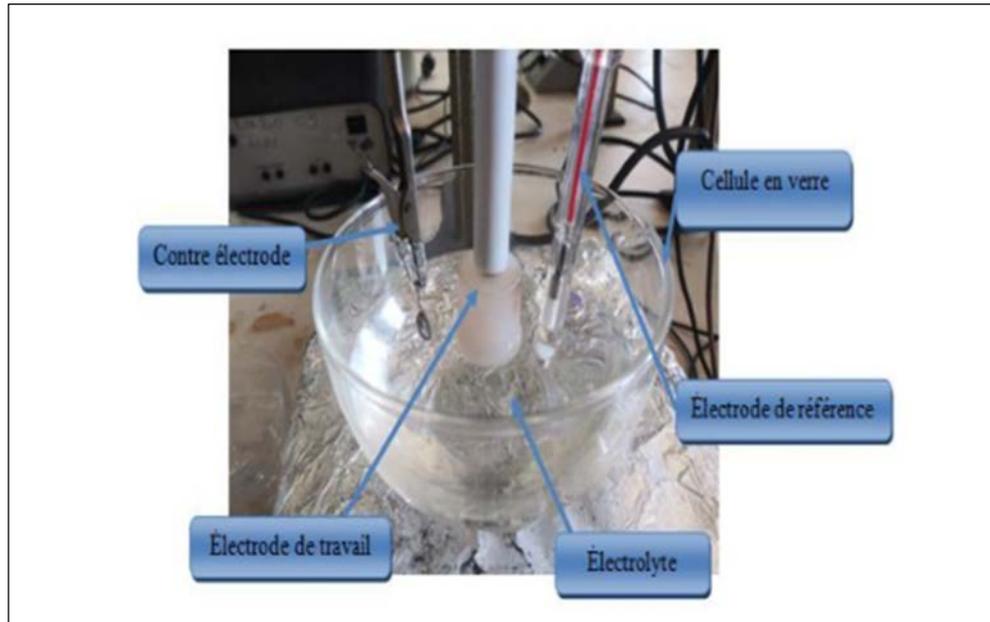


Figure.II.5 : Montage de la cellule électrochimique

II.5.2 Milieu d'étude

Les tests de corrosion ont été réalisés dans un milieu aqueux contenant du NaCl a une concentration de 3%.

II.5.3 Electrodes

Nous avons utilisé un système électrochimique à trois électrodes, dont les caractéristiques sont les suivantes :

II.5.3.1 Electrode de travail

Elle est constituée d'un barreau cylindrique en acier, Ce barreau d'acier est enrobé dans une résine époxy, qui permet de délimiter une section plane et qui évite toute infiltration d'électrolyte.

L'ensemble est ensuite monté sur une électrode à disque tournant afin de contrôler l'influence du transport de matière au voisinage de l'électrode de travail (Figure. II.6).

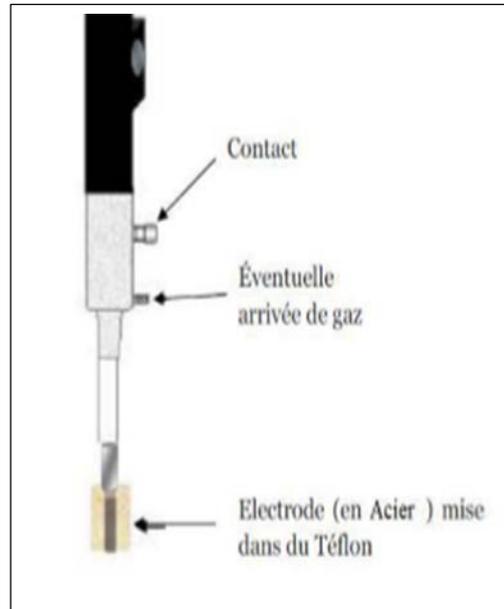


Figure.II.6 : Schéma de l'EDT.

Avant chaque manipulation, la surface de l'électrode est polie mécaniquement sous circulation d'eau, au papier émeri, rincée à l'eau distillée puis séchée.

II.5.3.2 Contre électrode (CE) ou électrode auxiliaire

La contre électrode est constituée d'une grille de platine circulaire. Sa position dans la cellule doit tenir compte des lignes du champ électrique, qui sont dans notre cas assez concentrés au voisinage de l'électrode de travail compte tenu des rapports de surface ET/CE. Ceci minimise la chute ohmique lors des mesures de potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence. Le rôle de la CE est d'assurer le passage de courant dans la cellule d'électrolyte.



Figure.II.7 : Image de la contre électrode.

II.5.3.3 Electrode de référence (ER)

L'électrode de référence utilisée pour l'étude électrochimique en milieu NaCl est une électrode au calomel saturé (ECS) en KCl. Cette dernière doit être placée le plus près possible de l'électrode de travail afin de limiter les erreurs de mesures dues à la chute ohmique.

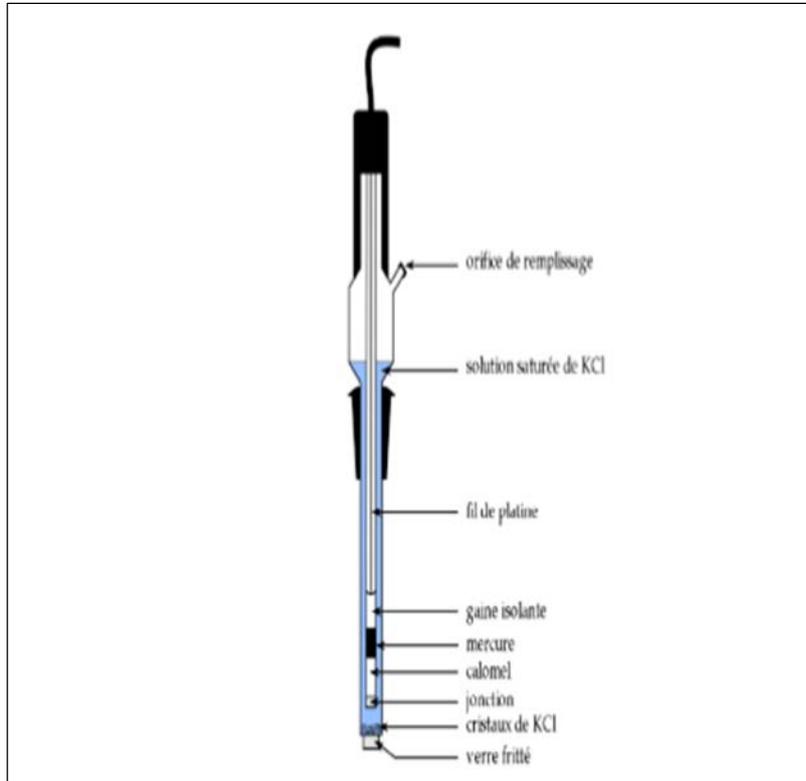


Figure.II.8 : Schéma de principe d'une électrode au calomel saturée en KCl (ECS).

II.6 Electrolytes

➤ Milieu d'étude

Les tests de corrosion ont été réalisés dans une solution aqueuse concentrée d'NaCl à 3%.

II.7 Dispositifs électrochimiques utilisés

Deux montages ont été utilisés afin de faire les mesures électrochimiques :

- Un voltalab Economical-Potentiostat de type PGP201potentiostat/galvanostat permettant d'imposer selon la fonction qui lui est assignée une intensité, un potentiel ou encore un balayage de tension en fonction du temps (figure.III.9). La cellule électrochimique comportant les trois électrodes est reliée au Voltalab et un ordinateur assure l'acquisition des données grâce à un logiciel d'application « Volta Master 4 » développé sous Windows.
- Le deuxième montage comporte la cellule électrochimique à trois électrodes reliées à un potentiostat-Galvanostat (PGSTAT 30) de marque Autolab, commandé par les logiciels GPES et FRA (figure III.10).

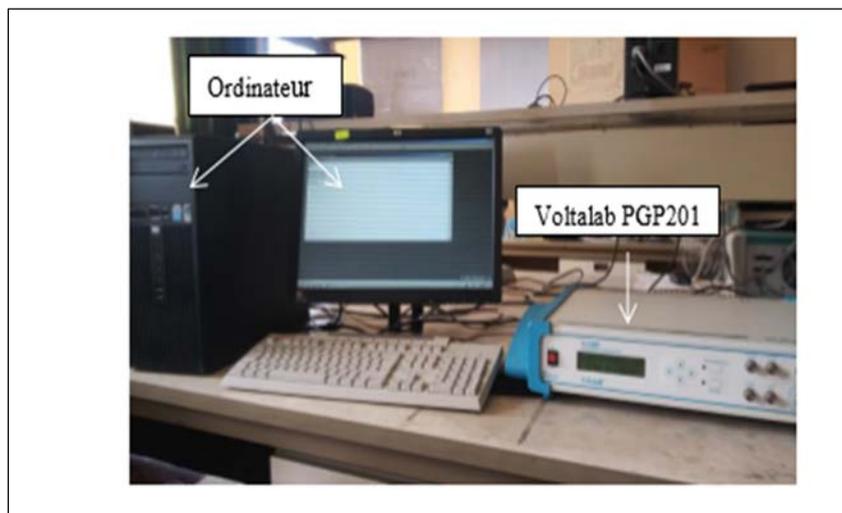


Figure.II.9 : Représentation de l'appareillage électronique Voltalab PGP201 utilisé.

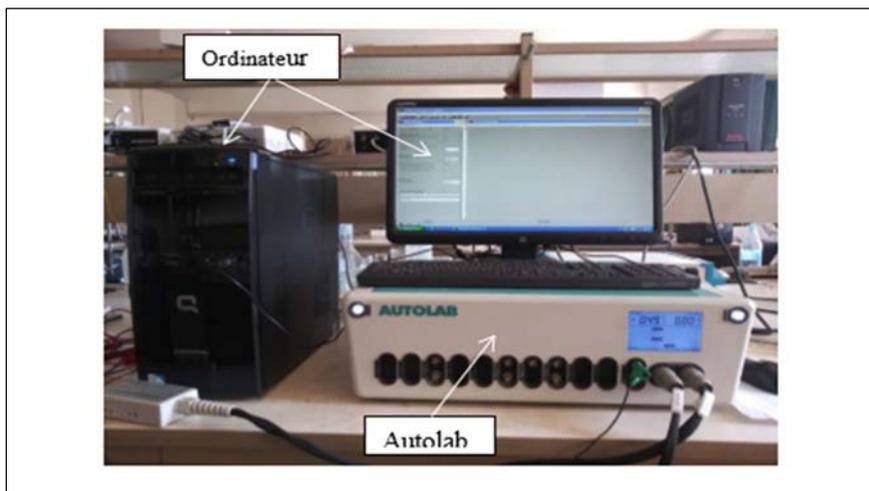


Figure.II.10 : Représentation de l'appareillage électronique Autolab utilisé.

II.8 Technique expérimentales

Chaque manipulation (les trois échantillons préparés) était appliquée dans les mêmes conditions, le même volume et concentration de la solution.

Et chaque opération on nettoya le verre avec l'eau distillée puis séché.

L'étude électrochimique (par la méthode stationnaire et transitoire) est réalisée avec un montage à trois électrodes : une contre-électrode en platine, une électrode de référence, et l'électrode de travail.

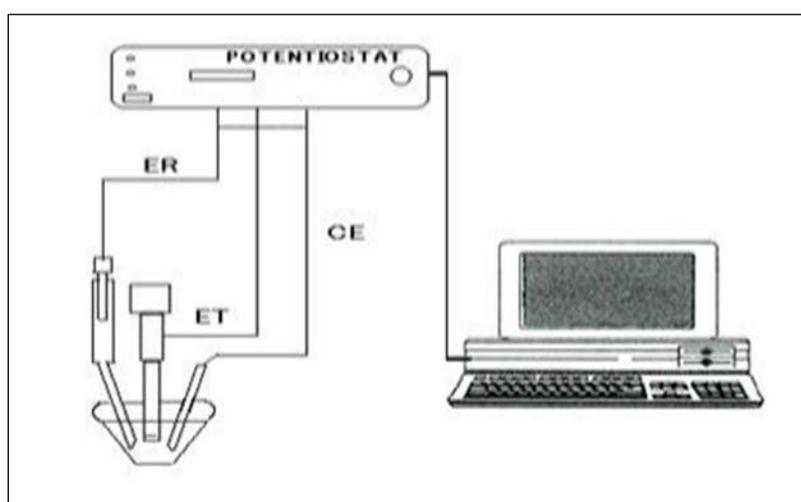


Figure II.11 : Dispositif expérimental de la technique potentiodynamique.

II.8.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP)

La chronopotentiométrie ou OCP consiste à immerger l'électrode de travail dans un électrolyte et à suivre l'évolution naturelle de son potentiel en fonction du temps à un courant nul. L'évolution du potentiel libre de l'électrode de travail, ou potentiel en circuit ouvert (E_{ocp}) est observée, vers son état stationnaire au cours d'une immersion prolongée dans la solution préparée.

- **les paramètres appliqués volta master 4 pour (OCP)**

II.8.2 Courbes de polarisation

Cette technique consiste à imposer une rampe linéaire de potentiel E à l'électrode de travail et à mesurer sa réponse en courant I . Le balayage en potentiel permet d'obtenir la courbe de polarisation $I = f(E)$ qui est caractéristique des phénomènes électrochimiques se déroulant à l'interface électrode de travail/électrolyte sur la plage de potentiels étudiée. La vitesse de balayage en potentiel utilisée doit être faible pour que le système puisse être considéré dans un état quasi-stationnaire.

Le balayage en potentiel permet d'obtenir la courbe de polarisation $i = f(E)$ qui caractérise les phénomènes électrochimiques se déroulant à l'interface électrode de travail/électrolyte sur la plage de potentiels étudiée.

Les courbes de polarisation anodiques et cathodiques et potentiodynamiques sont enregistrées à une vitesse de balayage de 8mV/s, après 30 minutes d'immersion de l'électrode de travail dans la solution.

Cette méthode permet de déterminer, La vitesse instantanée de corrosion (i_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel (β_a et β_c), la résistance de polarisation (R_p) et les courants limites de diffusion sont obtenues graphiquement par l'intersection des droites de Tafel anodique et cathodique extrapolées au potentiel de corrosion.

D'une façon précise on voulait déduire les courbes de Tafel des trois échantillons, Pour déterminer expérimentalement ces paramètres électrochimiques.

CHAPITRE III: Résultats et discussions

III.1 Analyse micrographique de l'acier 35CrMo4

L'observation au microscope optique de l'échantillon 35CrMo4 a révélé les microstructures suivantes.

III.1.1 Etat de livraison

La microstructure de l'acier 35CrMo4, à l'état de livraison, montrent la présence d'une phase ferritique en claire et d'une phase perlitique sombre, répartie d'une manière homogène.

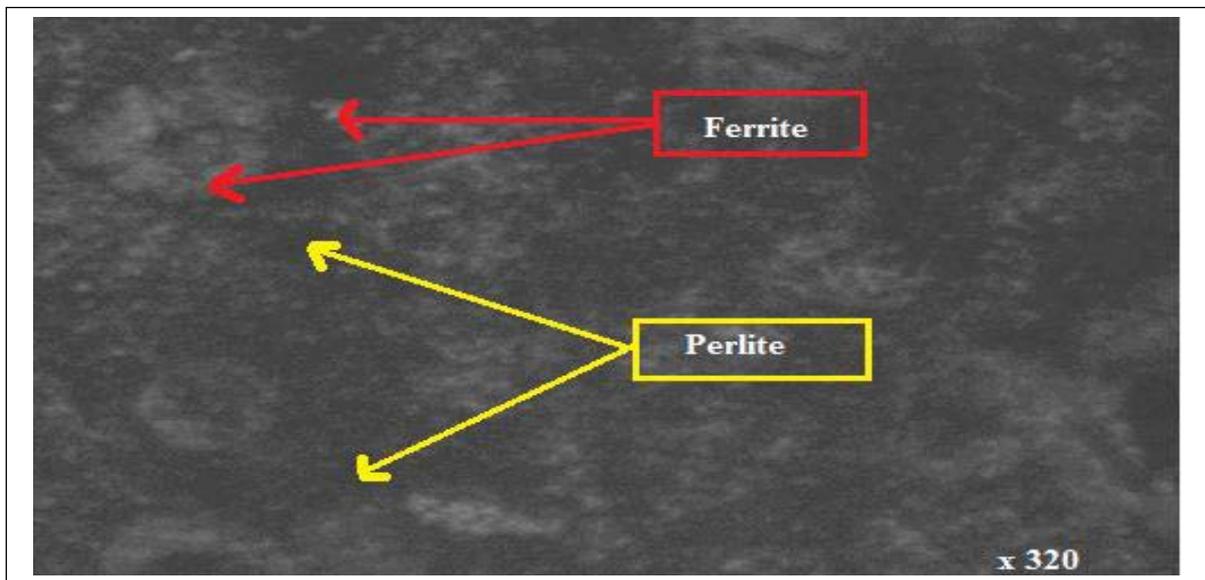


Figure III.1 : Microstructure optique de nuance d'acier 35CrMo4.

III.1.2. les microstructures à l'état vieillis

A l'état de vieillissement (revenus à 3, 6 et 9h), la microstructure de l'acier 35CrMo4 a révélée des phases sombres dans une matrice ferrito-perlitique. Ces phases peuvent être des précipités. Ils peuvent être de natures différentes, de type carbures ou de composés formés avec le métal de base par les éléments d'alliage, nitrures, composés intermétalliques. Ces précipités nécessitent des moyens de caractérisation telle que le MEB-EDS et la DRX.

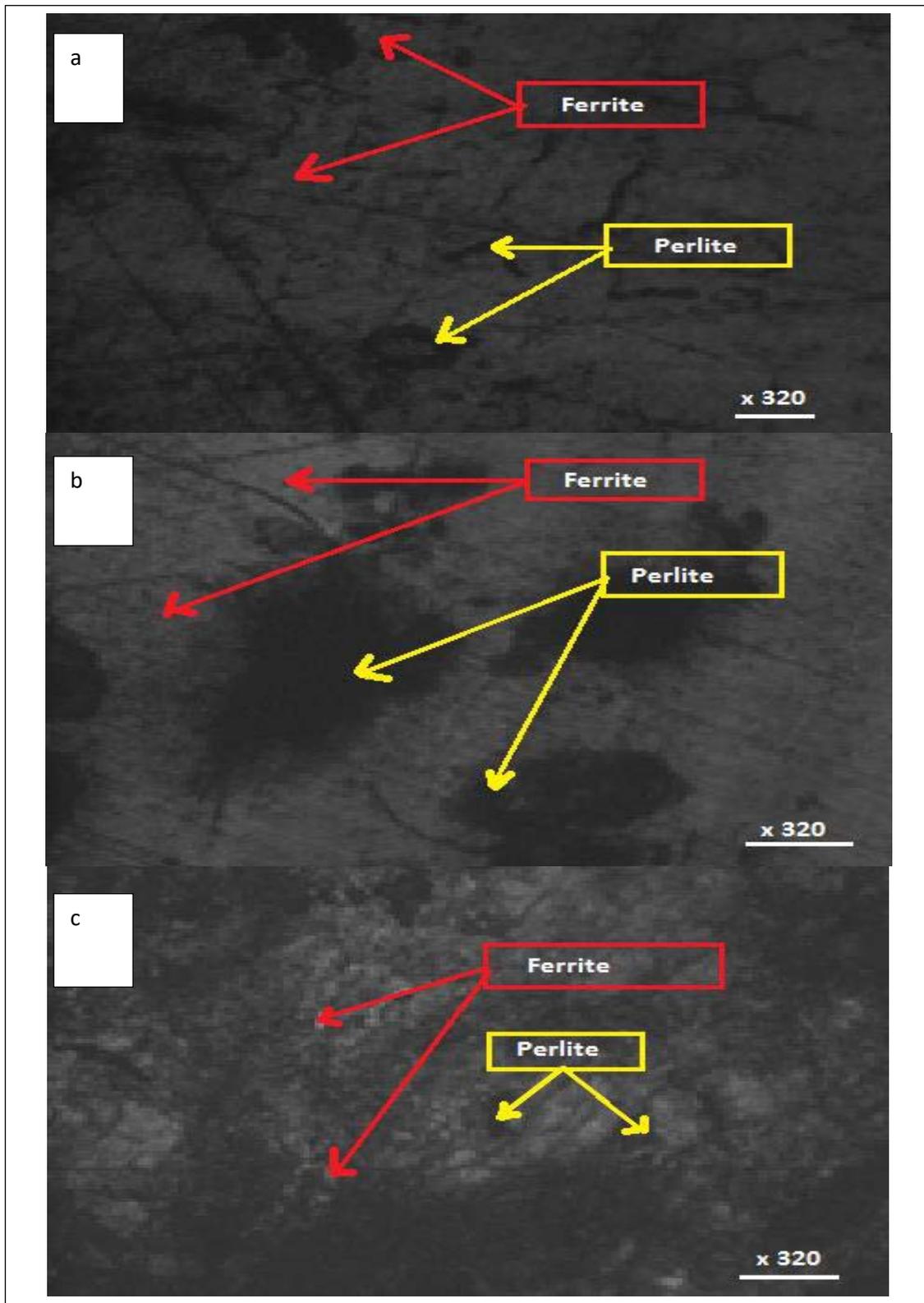


Figure III.2 : Microstructure de l'acier 35CrMo4 à l'état de vieillissement.
a) Vieilli à 3h, b) vieilli à 6h, c) vieilli à 9h

III.2 dureté Vickers

Les résultats présentés ci-dessus sont des résultats obtenus lors de l'essai de dureté HV pour l'acier 35CrMo4 trempé à la température de 860°C suivis du traitement de revenu à des différents temps de maintiens ($t_1=3h$, $t_2=6h$, $t_2=9h$) à une température 180°C.

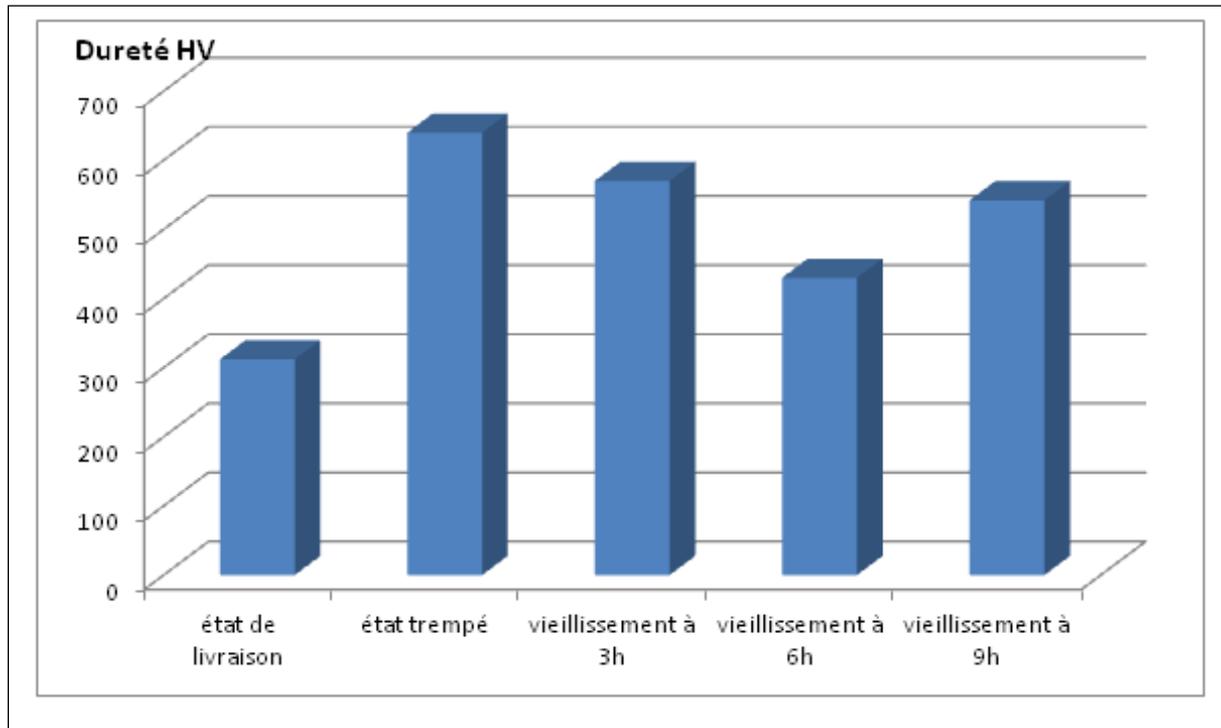


Figure III.3 : Diagramme de la dureté Vickers HV de l'acier 35CrMo4.

Nous remarquons la dureté HV pour l'acier 35CrMo4 augmente pour des revenus de 3h, 6h et 9h par rapport à l'état de référence. Cette augmentation est du probablement à la formation de précipités de type carbures ou de manganèse. Ces précipités provoquent un durcissement microstructural de l'acier qui est connu sous l'appellation de l'écrouissage. Cet écrouissage est bénéfique dans certain cas comme dans l'augmentation de la limite élastique de l'acier. Il peut être indésirable dans certains cas comme la diminution de la résistance à la corrosion. Voir ces précipités nécessite des tests plus poussés à savoir l'utilisation du Microscope électronique à Balayage (MEBEDS) et la diffraction des rayons X (DRX).

III.3 Caractérisation électrochimique

III.3.1 POTENTIEL A L'ABONDON (OCP)

Nous avons relevé les potentiels pris par l'électrode en circuit ouvert pendant 1heure d'immersions. Les figures (III.4) et (III.5) et (III.6) présente l'évolution du potentiel en fonction du temps pour les différents échantillons.

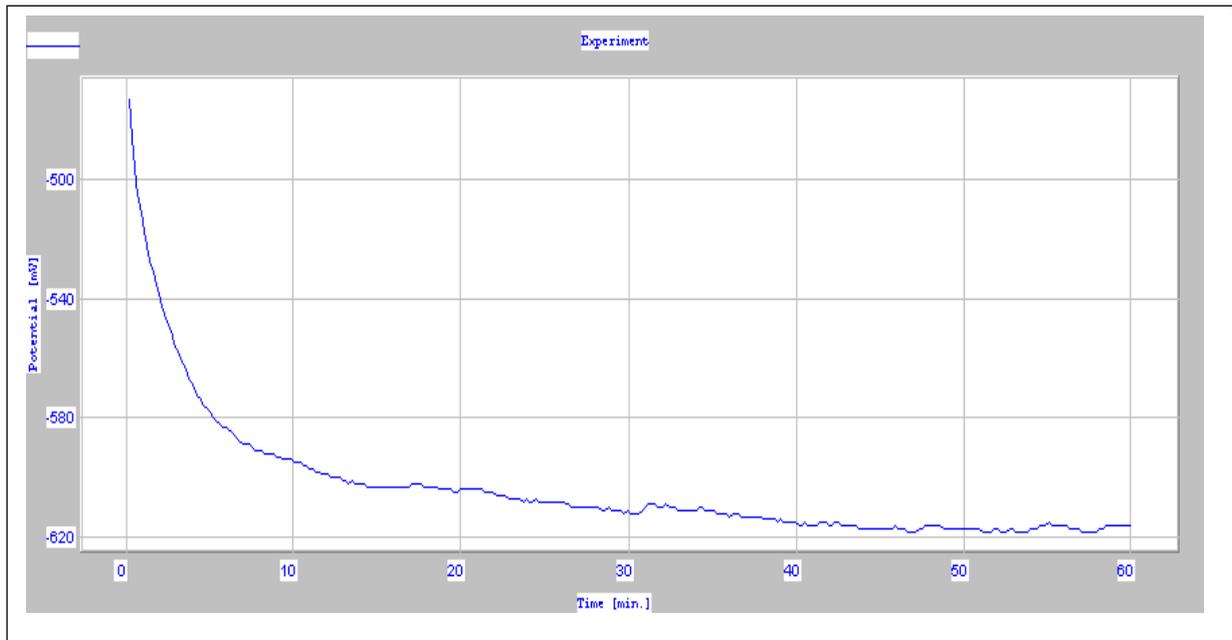


Figure III.4 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4 (revenu 3h).



Figure III.5 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4 (revenu 6h).

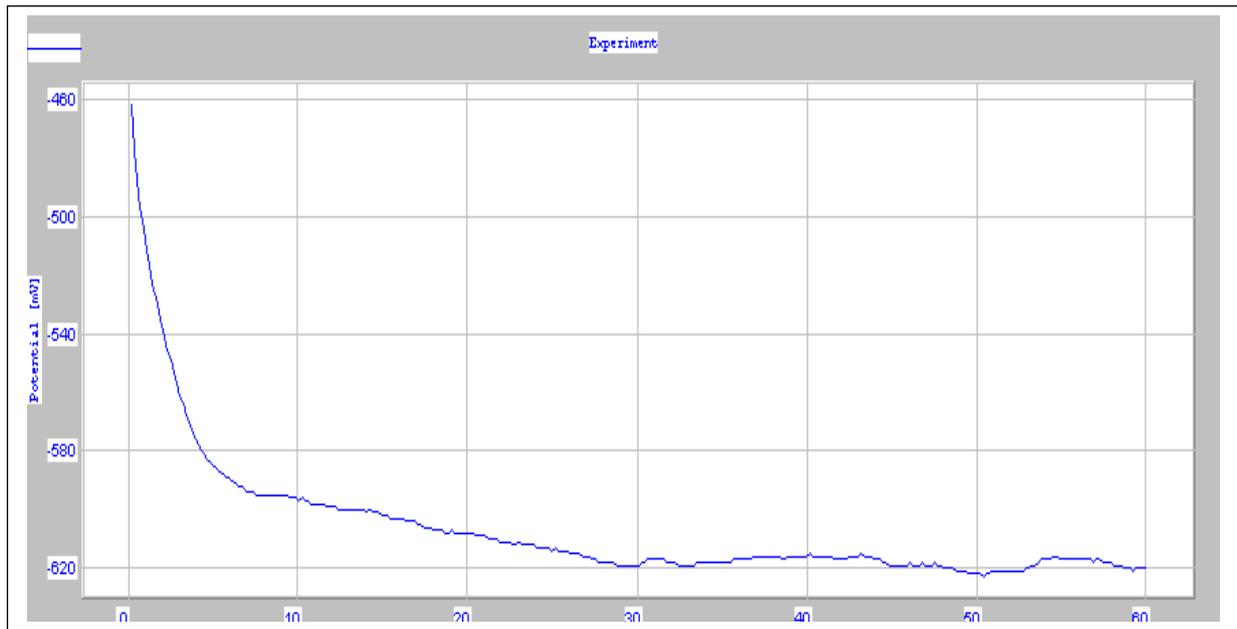


Figure III.6 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4 (revenu 9h).

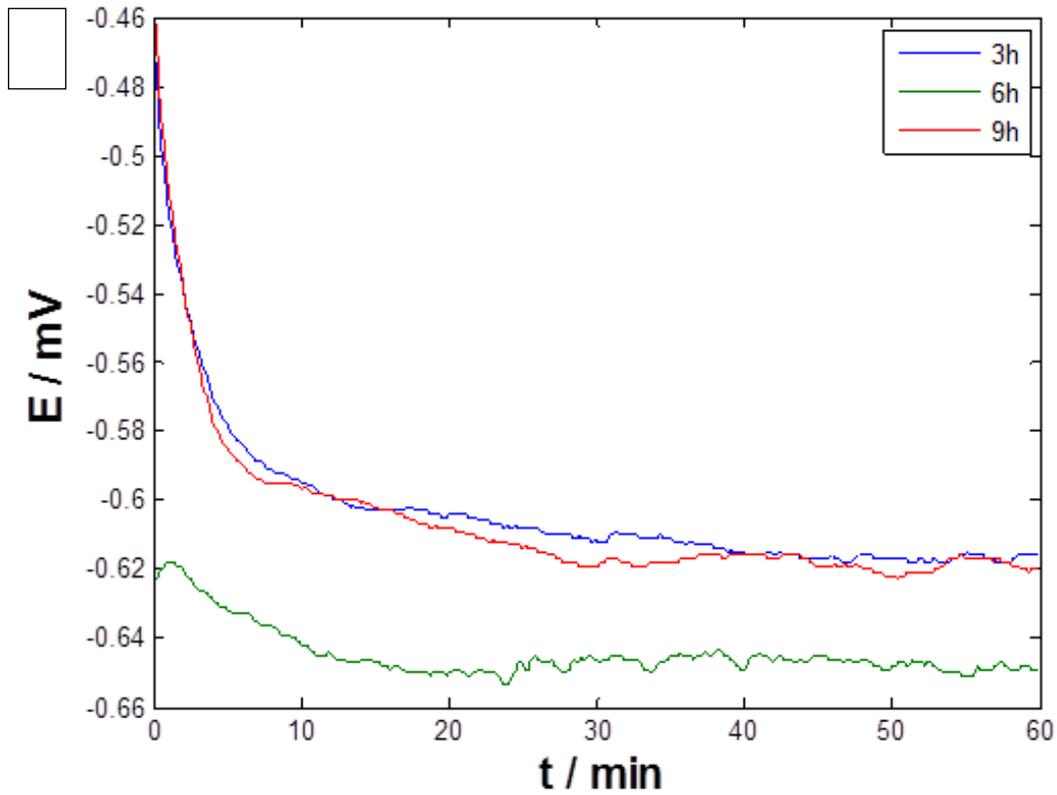


Figure III.7 : potentiel à l'abandon de l'acier 35CrMo4.

Dans la figure **III.7** on a trois graphes de l'acier 35CrMo4 (**3h, 6h, 9h**), qui présente le potentiel à l'abandon en fonction du temps (une durée d'une heure).

On remarque que l'allure des deux graphes de 3h et 9h sont presque identique. Au début jusqu'à 10 minute, nous remarquons une attaque très rapide de la surface de l'acier 35CrMo4. De 10 minutes jusqu'à environ 40 minutes, nous remarquons une tendance vers la stabilisation du potentiel à l'abandon, avec une faible attaque de la surface de l'acier. Cette faible attaque est caractérisée par la faible pente de la courbe du potentiel à l'abandon.

A partir 40 minutes jusqu'à la fin de la manipulation (1h), nous remarquons une stabilité du potentiel à l'abandon, indiquant la polarisation de la surface de l'acier. Cette polarisation nous renseigne aussi sur le potentiel de dissolution de l'acier (environ -620 mV/ECS) ou le potentiel de corrosion.

L'attaque très rapide de la surface de l'acier 35CrMo4, dès sont immersion dans la solution NaCl à 3%, indique un changement au niveau de la microstructure de cet acier. En effet, le vieillissement de cet acier à 3 et 9 heures a engendré une précipitation de composés chimique, probablement des carbures, qui font accélérés la vitesse de corrosion.

Le résultat de la dureté Vickers (figure III.3) de cet acier à 3 et 9 heures de vieillissement, montre des valeurs très importantes 570 HV et 640 HV, respectivement. Cette augmentation de la dureté Vickers témoigne du durcissement par écrouissage de cet acier. La formation de précipités, probablement de type carbures, provoque un durcissement par écrouissage fait augmenter la dureté Vickers et la vitesse de corrosion.

Pour l'acier vieilli à 6 heures, nous remarquons une allure totalement différente de celles des aciers vieillis à 3 h et 9h. En effet, nous remarquons pendant un temps très court (environ 2 minutes), une protection de la surface de cet acier, probablement par un film passif et protecteur préexistant avant immersion dans la solution NaCl à 3%. Ce film passif à tendance à se disparaître, puisque nous remarquons une attaque de la surface de cet acier dans un intervalle de 18 minutes (2 à 20 minutes). Enfin, nous remarquons une stabilité du potentiel à l'abandon de 20 minutes jusqu'à 1heure. Cette stabilité indique à nouveau la passivation de la surface de l'acier et nous donne un potentiel de dissolution ou de corrosion d'environ -650 mV/ECS.

III.3.2 COURBES DE TAFEL

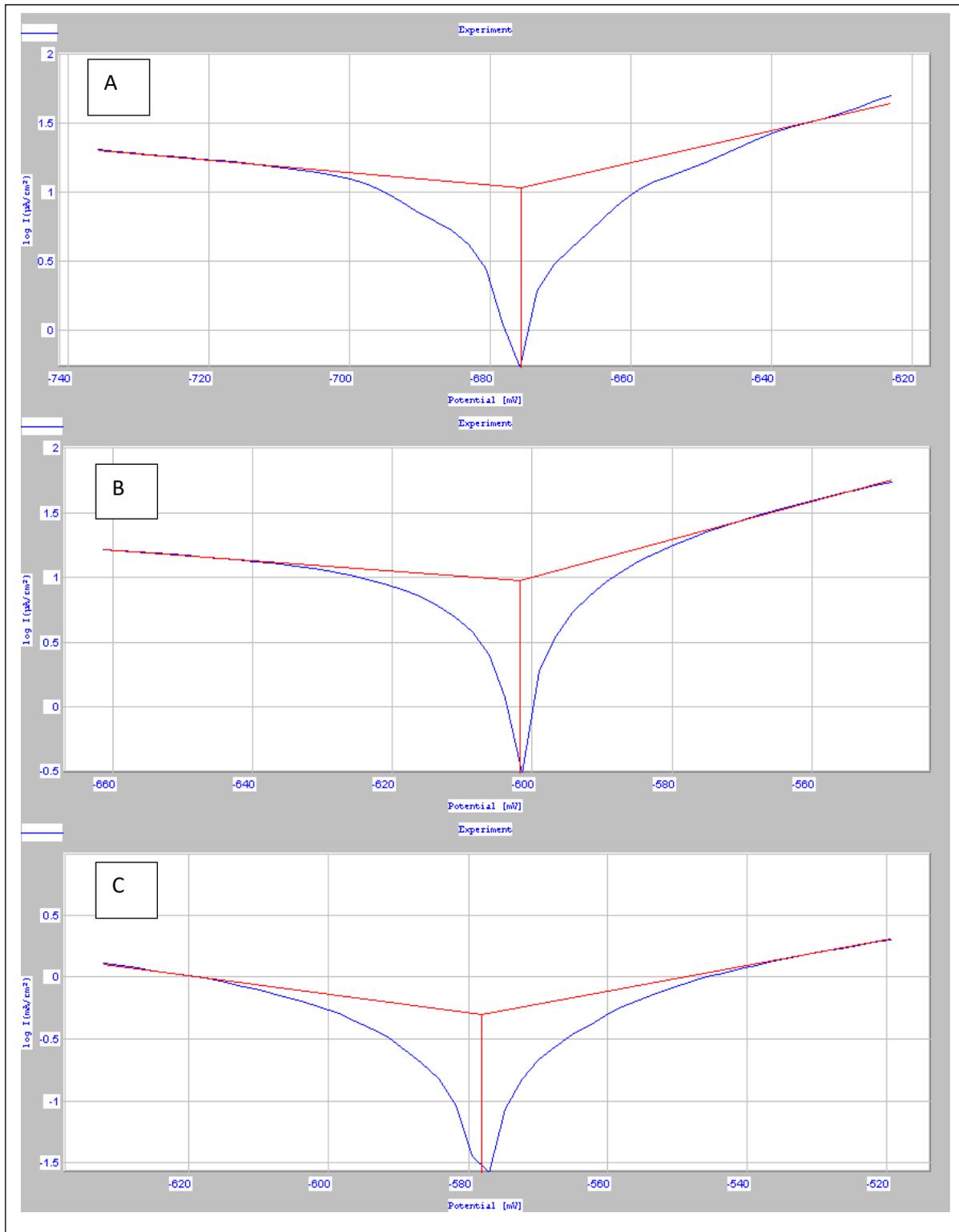


Figure III.8 : Courbe de polarisation de Tafel de l'acier 35CrMo4 dans une solution NaCl à 3%. A) vieilli à 3h, B) vieilli à 6h et C) vieilli à 9h.

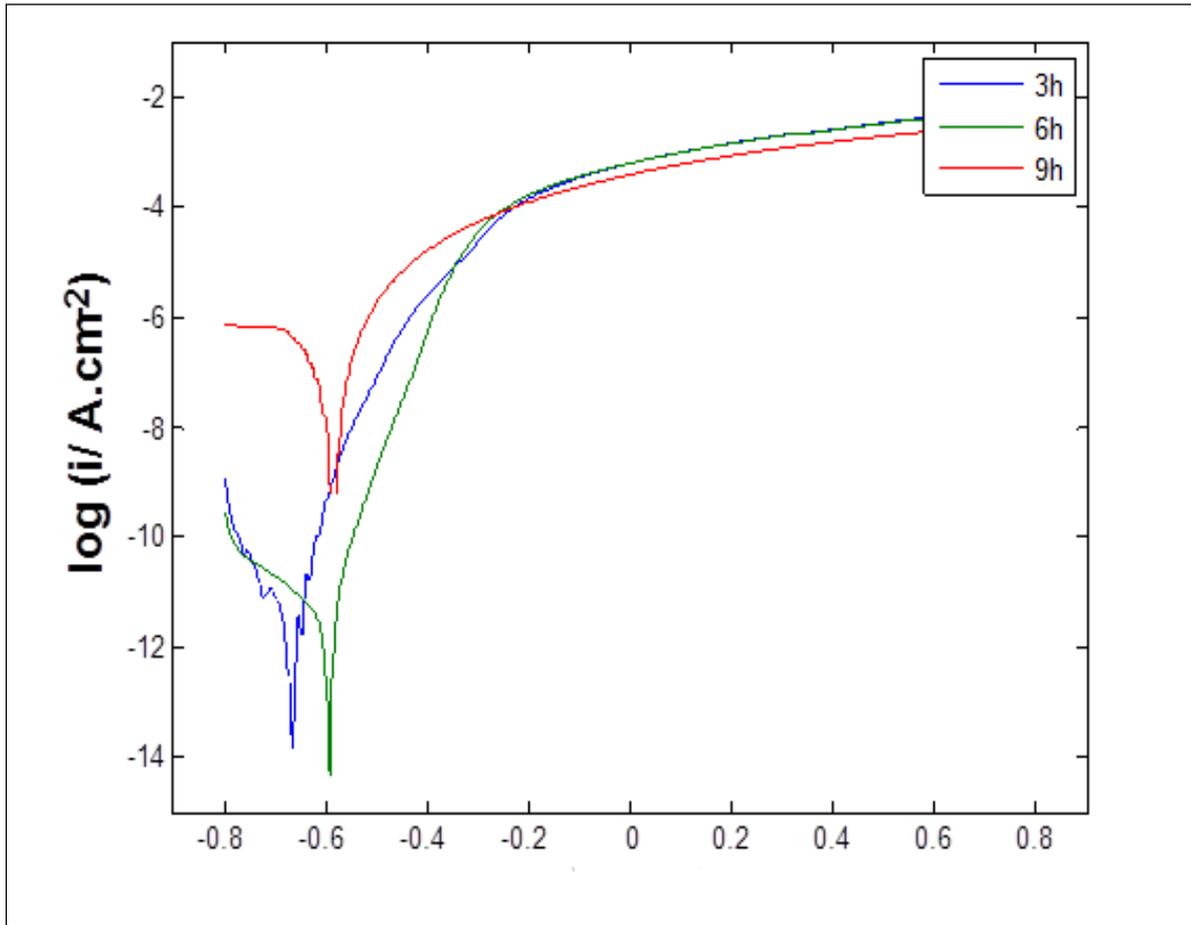


Figure III.9 : Courbes de polarisation de l'acier 35CrMo4 enregistrées après 30 min dans une solution NaCl à 3%.

La figure III. 9, indique les courbes de polarisation de Tafel de l'acier 35CrMo4 dans une solution NaCl à 3%, vieilli à 3h, 6h et 9h.

Ces courbes de polarisation indiquent les potentiels de corrosion, la densité de courant de corrosion et les paramètres cinétiques de corrosion, β_a et β_c issus de l'extrapolation des pentes anodiques et cathodiques de Tafel. La résistance à la polarisation R_p des échantillons vieillis à 3, 6 et 9h a été déterminée. Le tableau III.1, indique l'ensemble de ces paramètres électrochimiques.

Tableau III.1 : Paramètres électrochimique déduits des courbes de Tafel de l'acier 35CrMo4, vieilli à 3, 6 et 9h, immergé dans une solution NaCl à 3%.

35Cr Mo4	E (i=0) (mV)	icorr (mA/cm ²)	β_c (mV)	β_a (mV)	Rp (ohm.cm ²)
Vieillissement à 3h	-577.4	0.4296	-113.9	88.9	39.76
Vieillissement à 6h	-601.7	$9.5 \cdot 10^{-3}$	-252.0	68.5	$2.03 \cdot 10^3$
Vieillissement à 9h	-578.0	0.4871	-124.4	94.7	38.43

Nous remarquons que le potentiel de corrosion pour l'échantillon vieilli à 3h est de (-577.4 mV/ECS) et celui de 9h est de (-578.0 mV/ECS) et selon le potentiel a l'abandon est d'environ (-615 mV/ECS), par contre celle de 6h est de (-601.7 mV/ECS) et selon le potentiel a l'abandon est d'environ (-650 mV/ECS), nous remarquons une stabilité plus lente du potentiel et cette différence due aux fluctuations .

Nous constatons aussi que le potentiel de corrosion d'échantillon vieilli à 6h est très faible par rapport aux deux autres échantillons est cela dit que cet échantillon est protégé par une couche protectrice de film passif.

Et aussi nous remarquons que le courant de corrosion de l'échantillon vieilli a 3h est de (0.4296 mA/cm²) et celui de 9h est de (0.4871 mA/cm²) par contre on remarque que le courant de corrosion pour l'échantillon vieilli a 6h qui présente une valeur de ($9.5 \cdot 10^{-3}$ mA/cm²) est très faibles et cela indique que cette échantillon est plus résistant a la corrosion.

Par contre pour la résistance à la polarisation Rp nous remarquons que l'échantillon vieilli a 6h présente une très grande résistance par rapport aux deux autres échantillons et cela indique l'existence de ces films passifs.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a porté sur la caractérisation de la microstructure et propriétés mécaniques de Dureté et de résilience de l'acier de construction 35CrMo4 après des traitements de vieillissement à différents temps de maintien. Son comportement en corrosion, dans une solution NaCl à 3%, à différent temps de vieillissement a été examiné.

A l'état brut de livraison l'acier 35CrMo4 présente une hétérogénéité de microstructure donnant lieu à de faibles propriétés mécaniques en dureté Vickers et de résilience.

Après un traitement d'austénitisation à 860°C pour l'acier 35CrMo4, suivie d'une trempe à l'eau, des traitements de vieillissement à une température de 180°C à des différents temps de maintien de 3h, 6h et 9h ont été effectués.

L'observation métallographique des échantillons et les résultats des essais mécaniques de dureté et de résilience, sous l'influence du durcissement microstructural par vieillissement thermique, nous a conduits à tirer les points suivants :

- Le traitement thermique de vieillissement permet l'évolution des caractéristiques mécaniques à savoir la diminution de la résilience et l'augmentation de la dureté.
- La diminution remarquable de la résilience est due à la formation de précipités (probablement des carbures) qui a causé un écrouissage de la microstructure de l'acier 35CrMo.
- L'écrouissage joue un rôle bénéfique, comme l'augmentation de la limite élastique et la résistance mécanique de l'acier mais présente aussi des inconvénients, comme la faible résilience et la faible résistance à la corrosion.

Les essais électrochimiques de corrosion qu'on a effectués (ocp) et (méthode de Tafel) dans une solution de NaCl à 3%, nous a montré que :

- Le potentiel de corrosion d'échantillon vieilli à 6h est très faible par rapport aux deux autres échantillons est cela dit que cet échantillon est protégé par une couche protectrice de film passif.
- le courant de corrosion de l'échantillon vieilli à 6h est très faibles par rapport aux deux autres échantillons vieillis à 3h et 9h et cela indique que cet échantillon est plus résistant à la corrosion.
- L'échantillon vieilli à 6h présente une très grande résistance à la polarisation R_p par rapport aux deux autres échantillons et cela indique l'existence de ces films passifs.

Références bibliographiques

- [1] G. Murry, « Aciers. généralités », Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, no M300, p. M300-1, 1993.
- [2] D. SEMIN, « Exécution des structures métalliques : la norme EN 1090-2 Révision et compléments », no ref. article : c2572. Editions T.I., 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publicsth3/construction-metallique-42230210/execution-des-structures-metalliques-la-norme-en1090-2-c2572/>
- [3] J. Barralis et G. Maeder, Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés et normalisation, 6. éd. Paris : Afnor [u.a.], 1993.
- [4] JC-GIROUD, « Fiches pratiques lubrifiants industriels », Traitements thermiques des aciers, 24 février 2018. <http://leslubrifiants.com/2018/02/24/traitements-thermiques-des-aciers/> (consulté le 18 août 2021).
- [5] A. Constant, G. Henry, et J.-C. Charbonnier, Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques et thermochimiques des aciers, Nouv. éd. ref. et augm. Ivry-sur-Seine: Pyc éd, 1992.
- [6] Frédéric Crespel, « Aciers de construction ». <http://www.aciersspeciaux.fr/aciers-deconstruction/>.
- [7] Arfaoui Ali, Chaker Med Amir, « Traitements Thermiques et thermochimiques », Technologue Pro, 2010. <https://www.technologuepro.com/cours-materiaux-metalliques2/chapitre-6-traitements-thermiques-thermochimiques.pdf> (consulté le 28 août 2021).
- [8] A. BERBITI, « Durcissement d'écrouissage et par affinement des grains », Université BADJI Mokhtar - Annaba, 2017.
- [9] I. Lakhtine, « Métallographie et traitements thermiques des métaux. 3 ème Ed », Editions Mir, p. 55-57, 1982.
- [10] A. F. Gualdrón, E. N. Becerra, D. Y. Peña, J. C. Gutiérrez, H. Q. Becerra, J. Mater. Environ. Sci., 4(1)(2013)143-158.
- [11] C. C. Fresia.; H. S. Hernández, Cienc. Ahora, 24(2009)52-55.
- [12] H. Ashassi-Sorkhabi, D.Seifzadeh, M. G.Hosseini, Corrosion Sci., 50(2008)3363–3370.
- [13] A. G.T. Hefner, N.A. North, S.H. Tan, J. Sci. Eng., 32 (1997) 657-667.

[14] GROSGOGÉAT B, BRUGIRARD J. Les essais de corrosion des biomatériaux: leurs usages, leurs limites, leurs fondements. *Matériaux et Techniques* 5-6: 15-27, 2001.

[15] G. Daufin, J. Talbot. Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. PREMIERE PARTIE. GENERALITES SUR LA CORROSION DES METAUX ET ALLIAGES. *Le Lait*, INRA Editions, 1971, 51 (507), pp.375-398. hal-00928553.

[16] J.Lignon et M.Mijon, *Matériaux*, édition librairie Delagrave, 1967.

[17] GOUDJIL FADILA & ZAITRI SARAH, UTILISATION DES HUILES ESSENTIELLES DE PLANTES COMME INHIBITEURS DE CORROSION DE L'ACIER DANS LE MILIEU ACIDE. », *Mémoire de Fin d'études Génie des Procédés*, master en FACULTÉ DES SCIENCES TECHNOLOGIE BEJAIA, 2020, page 14.

Résumé

Ce travail étudie le comportement en corrosion d'acier 35Cr Mo4 écrouis par vieillissement thermique, à trois échantillons (3h, 6h, 9h) de vieillissement, et l'influence des phénomènes d'écrouissage de la microstructure.

Le but d'étudier le comportement envers la corrosion, et de comparer les caractéristiques de la microstructure et ses propriétés mécaniques, dans les mêmes conditions milieu acide NaCl a 3% de concentration.

Plusieurs méthodes d'analyse ont été utilisées, telles que les méthodes électrochimiques (OCP et potentiel à l'abandon), ainsi que des méthodes de caractérisation de la surface de l'acier tel que la méthode de mesure de l'angle de contact.

La corrosion c'est la tuberculose des aciers, selon les résultats obtenus une dégradation de la rigidité et ses propriétés des trois enchantions, mais on a vu une différence l'un à l'autre par ce qu'ils ont traité par des essais mécaniques a des conditions différentes (des différents temps de maintien de 3h, 6h et 9h ont été effectués).

Mots clé : corrosion, vieillissement thermique, écrouissage, OCP, potentiel à l'abandon.

Abstract

This work studies the corrosion behaviour of 35Cr Mo4 steel nuts by thermal aging, with three ageing samples (3h, 6h, 9h), and the influence of the work hardening phenomena of the microstructure.

The aim is to study the behaviour towards corrosion, and to compare the characteristics of the microstructure and its mechanical properties, under the same conditions NaCl acid medium has 3% concentration.

Several methods of analysis have been used, such as electrochemical methods (OCP and potential to be abandoned), as well as methods of characterization of the steel surface such as the method of measuring the contact angle.

Corrosion is the tuberculosis of the steels, according to the results obtained a degradation of the rigidity and its properties of the three enchantions, but we saw a difference to each other by what they treated by mechanical tests has different conditions (various holding times of 3h, 6h and 9h were carried out).

Key words: corrosion, thermal ageing, work hardening, OCP, abandonment potential.

Chapitre I :

Éléments bibliographique

Chapitre II :

Matériaux et techniques expérimentales

Chapitre III :

Résultats et discussion

CONCLUSION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES