

N° d'ordre :

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

-----  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE CHIMIE



*Domaine :* **Science de la matière**  
*Filière :* **Chimie**  
*Spécialité :* **Chimie Physique**

## Mémoire de Master

*Thème*

**Étude de la corrosion des cornes d'éclateurs en acier de  
type C3 et K3 des transformateurs électriques**

*Présenté par :*

**MAHMOUDI LYDIA**

*Soutenu publiquement, le 09/07/2023, devant le Jury composé de :*

<b>BOURAHLA</b>	<b>Boualem</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Président</b>
<b>OUABADI</b>	<b>Nadia</b>	<b>MC/A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>NAFA</b>	<b>Ouahiba</b>	<b>MC/A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Encadreur</b>
<b>ABEDLLAOUI</b>	<b>Hamida</b>	<b>Cadre technique</b>	<b>EI d'Azazga</b>	<b>Co-Encadreur</b>

Session 2022 / 2023

## *Remerciements*

Ce modeste travail est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire central de l'entreprise Électro-Industries (EI) d'Azazga et le Laboratoire de Physique et Chimie Quantique (LPCQ) de L'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres des deux laboratoires pour leur accueil chaleureux et leur soutien tout au long de mon séjour. Chacun de vous a contribué à la réussite de ce travail et je vous en suis profondément reconnaissante.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Madame **NAFA Ouahiba**, Maitre de Conférences à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour ses conseils et son engagement qui ont joué un rôle déterminant dans la réussite de ce travail. Son soutien précieux, ses encouragements constants et sa rigueur intellectuelle ont été des facteurs clés pour m'aider à repousser mes limites ce qu'à permis d'atteindre mon objectif. Sa passion pour l'enseignement et son investissement ont été une véritable source d'inspiration pour moi. Je lui suis profondément reconnaissante pour sa contribution précieuse à mon parcours académique et je ne saurais jamais assez la remercier.

Tous mes plus vifs remerciements à Madame **ABDILLAOUI Hamida**, cadre technique au laboratoire de chimie de l'entreprise EI d'Azazga, pour son précieux soutien et son encadrement de haute qualité lors de la réalisation de la partie expérimentale de ce travail. Son expertise, ses conseils avisés et sa disponibilité ont été d'une aide inestimable. Grâce à son expérience professionnelle, j'ai pu acquérir des connaissances précieuses et développer mes compétences techniques.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à Monsieur **BOURAHLA Boualem**, Professeur à l'université de Tizi-Ouzou, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury. Je suis aussi très sensible à l'honneur que m'a fait Madame **OUABADI Nadia**, Maitre de Conférences classe A à l'Université de Tizi-Ouzou, d'avoir accepté de juger ce modeste travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les membres du laboratoire de l'entreprise EI, Mr **OUDAHMANE**, Mr **AMOUR** et Mr **BELABBAS** qui ont également contribué de manière significative à la réussite de mon projet. Leur soutien et leur disponibilité ont été essentiels pour mener à bien mes expérimentations et obtenir des résultats concluants. Je vous remercie de m'avoir accordé l'opportunité de travailler au sein de votre laboratoire et pour m'avoir offert un environnement propice à l'apprentissage et à l'épanouissement.

Merci à mes parents pour leur soutien durant cette belle expérience ainsi qu'à mon futur mari pour leurs encouragements.

## Dédicace

*Après de nombreuses années d'étude, cette étape de ma vie tire à sa fin. Je ne saurais clore ce chapitre sans exprimer ma gratitude envers les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à son accomplissement.*

*Je dédie ce travail :*

*À mes très chers parents **Amar** et **Samira**,*

*Je vous suis infiniment reconnaissante pour votre amour indéfectible, votre patience et votre soutien constant. Votre confiance en moi et vos sacrifices pour m'offrir les meilleures opportunités d'apprentissage, votre présence à mes côtés, dans les moments de doute comme dans les moments de joie ont été une source d'inspiration inépuisable. Je vous confie le fruit de mes efforts avec la fervente prière que le tout puissant vous accorde une longue vie épanouissante.*

*À mon très cher frère : **Amine***

*Et à mes précieuses sœurs : **Cyfia, Céline et Mélina***

*Je ne pourrai jamais assez vous remercier pour le réconfort, le soutien moral, les encouragements précieux et l'aide que vous m'avez constamment prodigués tout au long de mon parcours.*

*À mon futur mari **Mohsa**,*

*Je tiens à te remercier pour ta compréhension, ta patience et ton soutien inébranlable tout au long de cette aventure. Tu as été un pilier solide sur lequel je pouvais compter, m'encourageant à donner le meilleur de moi-même et à persévérer malgré les obstacles. Cette déclaration de gratitude est une preuve concrète de mon amour et de ma profonde reconnaissance à ton égard.*

*Aux défunts **grands parents** que j'aurai aimé avoir à mes côtés tout au long de cette étape importante de ma vie. Je prie dieu pour qu'ils trouvent le repos éternel dans le vaste paradis divin.*

*À toute ma grande famille sans exception : **mes grands-mères, oncles, tantes, cousins et cousines**, Je souhaite exprimer ma profonde gratitude pour votre aide inestimable. Votre soutien revêt d'une valeur incommensurable pour moi.*

*A mes choupinettes copines plus particulièrement **Liza, Sadia, fifi, Katia, Hanane, Amina, Souad, Sabri et Imene**.*

*A toute la promotion de Master 2 Chimie Physique 2023.*

*Lydia*

## Table des matières

---

### Liste des figures

### Liste des tableaux

### Introduction générale.....1

#### Chapitre I : Généralités sur la corrosion des aciers

Introduction .....	4
I.1.Aperçu sur les aciers .....	4
I.1.1.Les différents types d'aciers .....	4
I.1.2. Propriétés des aciers.....	6
I.1.3.Les applications des aciers.....	9
I.2.Généralités sur la corrosion .....	10
I.2.1. Différents processus et types de corrosion.....	10
I.2.2.Les différentes formes de corrosion.....	11
I.2.3.Les facteurs influençant la corrosion .....	16
I.2.4. Diagramme d'équilibre thermodynamique de POURBAIX.....	17
I.3. Méthodes de protection contre la corrosion.....	18
I.3.1.Protection par revêtement .....	18
I.3.2 Protection par inhibiteurs .....	19
I.3.3 Protection électrochimique .....	20
I.3.4.Protection anticorrosion des aciers par le zinc.....	20
Conclusion.....	23

#### Chapitre II : Matériels utilisés et techniques d'étude de la corrosion des cornes d'éclateurs en acier C3 et K3

Introduction .....	24
II.1.Présentation des échantillons de cornes d'éclateur étudiés .....	24
II.1.1.Role et fonctionnement des cornes d'éclateurs .....	25
II.1.2.Type d'acier utilisé dans les cornes d'éclateurs étudiés .....	27
II.2.Dispositifs expérimentaux utilisés.....	29
II.2.1. Chambre microclimat KESTERNICH .....	29
II.2.2. PERMASCOPE .....	30
II.2.3.ELTRA CS800 Carbon-SulphurDeterminator .....	31
II.3. Méthodes Expérimentales.....	32

## Table des matières

---

II.3.1.Préparation des échantillons .....	32
II.3.2.Méthode de titrage pour dosage de Chrome .....	33
II.3.3. Méthode de complexométrie .....	35
Conclusion.....	38
<b>Chapitre III : Caractérisation et corrosion des cornes d'éclateur de type C3 et K3</b>	
Introduction .....	39
III.1.Caractérisation des matériaux des cornes d'éclateurs étudiés.....	39
III.1.1. Caractérisation de la couche de revêtement de l'acier galvanisé K3 .....	39
III.1.2.Détermination du taux de Carbone et de Soufre par ELTRA CS800 .....	40
III.1.3. Détermination du pourcentage de Nickel et de Chrome dans l'acier inoxydable .....	41
III.2.Corrosion des aciers type K3 et C3 .....	43
III.2.1. Corrosion de l'acier ordinaire galvanisé type K3.....	43
III.2.2. Corrosion de l'acier inoxydable type C3.....	44
Interprétation des résultats obtenus .....	44
Conclusion.....	45
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>46</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>48</b>
<b>Résumé</b>	

## Liste des figures

---

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : Représentation d'une corrosion uniforme (générale).....	12
<b>Figure I.2</b> : Corrosion localisée générée par une demi-réaction anodique ou cathodique.....	12
<b>Figure I.3</b> : Corrosion par piqure d'un acier .....	13
<b>Figure I.4</b> : Corrosion galvanique .....	13
<b>Figure I.5</b> : Corrosion intergranulaire .....	14
<b>Figure I.6</b> : Corrosion sélective du laiton (Cu-Zn).....	14
<b>Figure I.7</b> : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion cavernueuse. ....	15
<b>Figure I.8</b> : Étapes de développement du phénomène de corrosion-érosion. ....	15
<b>Figure I.9</b> : Corrosion filiforme.....	16
<b>Figure I.10</b> : Corrosion sous contrainte.....	16
<b>Figure I.11</b> : Diagramme potentiel-pH simplifié du fer. ....	18

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Présentation des cornes d'éclateurs type C3 et K3.....	25
<b>Figure II.2</b> : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux. ....	26
<b>Figure II.3</b> : Chambre microclimat KESTERNICH. ....	30
<b>Figure II.4</b> : PERMASCOPE ES8. ....	31
<b>Figure II.5</b> : CarbonSulphur Determinator ELTRA CS800. ....	32
<b>Figure II.6</b> : Préparation des échantillons. ....	33
<b>Figure II.7</b> : Titration de Chrome. ....	35
<b>Figure II.8</b> : Formation des cristaux.....	37
<b>Figure II.9</b> : Précipité de Nickel ((C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> Ni). ....	37

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Corrosion de la corne d'éclateur type K3 pendant 7 jours dans un climat humide (98%) et à une température de 40°C.....	43
<b>Figure III.2</b> : Corrosion d'une corne d'éclateur type K3 pendant 7 jours dans un climat humide (98%) et à une température de 40°C.....	44

## Liste des tableaux

---

### Chapitre I

<b>Tableau I.1</b> : Pourcentage maximal en masse des matériaux dans l'acier non allié .....	<b>5</b>
<b>Tableau I.2</b> : Différents types des aciers inoxydables et leurs caractéristiques. ....	<b>6</b>
<b>Tableau I.3</b> : Propriétés physiques, chimiques et mécaniques du Fer. ....	<b>7</b>
<b>Tableau I.4</b> : Principaux facteurs de corrosion.....	<b>17</b>
<b>Tableau I.5</b> : Principales caractéristiques physiques du zinc.....	<b>21</b>

### Chapitre II

<b>Tableau II.1</b> : Composition chimique de l'acier inoxydable C3 de nuance (X12CrNiS18 8) selon la norme DIN 17 440. ....	<b>27</b>
<b>Tableau II.2</b> : Composition chimique de l'acier ordinaire galvanisé selon la norme DIN 1652.....	<b>28</b>

### Chapitre III

<b>Tableau III.1</b> : Taux de Carbone et de Soufre dans l'acier K3. ....	<b>40</b>
<b>Tableau III.2</b> : Taux de Carbone et de Soufre dans l'acier C3. ....	<b>41</b>
<b>Tableau III.3</b> : Taux de chrome dans l'acier C3 obtenu par la méthode de titrage.....	<b>42</b>
<b>Tableau III.4</b> : Taux de Nickel dans l'acier C3 obtenu par la compléxométrie.....	<b>42</b>

# *Introduction générale*

## Introduction générale

---

Tout au long de l'histoire, les métaux ont joué un rôle crucial dans l'évolution de la civilisation humaine et ont grandement influencé notre mode de vie actuel [1- 2]. Parmi les plus utilisés le fer et ses alliages comme la fonte et l'acier. Ce dernier est largement utilisé dans diverses industries pour ses propriétés thermiques et mécaniques et surtout son bas coût de fabrication. Il est utilisé dans différents domaines citons le pétrolier et gazier, maritime, électrique et chimique [3]. Il présente des caractéristiques bénéfiques telles que sa bonne ductilité, sa capacité à résister à des forces de traction élevées, sa capacité à résister à des températures élevées, son aptitude à conduire l'électricité et la chaleur, ainsi que sa facilité d'assemblage et de fabrication et le plus important son abondance dans la nature, d'où son coût économique avantageux. Cependant, sa réactivité avec le milieu extérieur peut provoquer sa détérioration par attaque corrosive [3-4]. Cela entraîne un aspect inesthétique de rouille à la surface, mais surtout la formation d'entailles qui vont fortement altérer ses propriétés.

L'étude de la corrosion revêt une grande importance, car elle peut causer une dégradation considérable et coûteuse des matériaux métalliques, avec des conséquences économiques, environnementales et de sécurité importantes. En effet, la corrosion, dans les milieux industriels, peut réduire la durée de vie utile des structures et des équipements métalliques, ainsi que leur efficacité et leur fiabilité, ce qui provoquera des frais de remplacement ainsi que des pertes de rendement. En étudiant les mécanismes de la corrosion et en développant des méthodes pour prévenir ou limiter ce phénomène, il est possible de prolonger la durée de vie utile des équipements et structures, réduire les coûts de maintenance et de remplacement, améliorer la sécurité et réduire l'impact environnemental de la corrosion [5-6]. Pour cela les matériaux utilisés dans les usines sont testés au niveau des laboratoires pour sélectionner les matériaux qui répondent aux exigences demandées, avec des coûts minimes.

En outre, il est primordial de souligner que la corrosion a un impact considérable sur l'économie mondiale en causant des pertes importantes de production d'acier et d'autres matériaux, équivalent à environ 150 millions de tonnes d'acier par an, soit environ 5 tonnes par seconde. La corrosion affecte non seulement l'acier, mais aussi tous les autres matériaux, y compris les métaux, les polymères et les céramiques. Dans la plupart des pays industrialisés, les coûts annuels associés à la corrosion et à ses conséquences se chiffrent en plusieurs milliards de dollars [7]. Ces chiffres prennent en compte les pertes directes comme le remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés par la corrosion, et les

## Introduction générale

---

pertes indirectes comme les réparations, les pertes de production, les mesures de protection et les mesures de prévention. La corrosion n'est pas seulement une source de gaspillage de matières premières et d'énergie, elle peut dans certains cas provoquer des accidents graves et contribuer à la pollution de l'environnement. Toutefois, grâce aux méthodes de protection contre la corrosion, ces pertes pourraient être réduites.

La prévention contre la corrosion doit être envisagée dès la conception d'une installation, afin d'éviter les problèmes futurs et de garantir la résistance au vieillissement et une durée de vie plus longue pour les objets utilisés dans divers industries tels que nucléaire, chimique et aéronautique. Les risques d'accidents dans ces industries peuvent avoir des conséquences graves sur les personnes et l'environnement. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour lutter contre la corrosion, notamment : l'adaptation de la forme des pièces métalliques pour prévenir la corrosion, le choix judicieux des matériaux, la protection par revêtements, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion et la protection électrochimique.

Dans l'industrie électrique, la corrosion des cornes d'éclateurs des transformateurs électriques est un problème récurrent. Les cornes d'éclateurs qui protègent les transformateurs contre les surtensions, sont généralement fabriquées à partir d'acier galvanisé ou inoxydable, mais elles peuvent toujours être sujettes à la corrosion. Leur exposition à des conditions environnementales agressives, telles que l'humidité, les produits chimiques, les gaz et les températures élevées, peut causer leur corrosion. Les réactions électrochimiques qui se produisent dans ces conditions peuvent affaiblir la structure des cornes d'éclateurs, les rendant plus vulnérables aux défaillances et aux cassures. De plus, leur corrosion peut affecter leur conductivité électrique, ce qui peut entraîner une dégradation des performances du transformateur électrique. La prévention de la corrosion est essentielle pour assurer le bon fonctionnement de ces transformateurs et garantir la sécurité de l'alimentation électrique. Dans le but de prévenir la corrosion des cornes d'éclateurs, diverses solutions sont envisageables. D'une part, l'application de revêtements protecteurs sur les surfaces métalliques peut aider à empêcher l'humidité et les produits chimiques de corroder l'acier. D'autre part, l'utilisation d'aciers inoxydables résistants à la corrosion peut s'avérer une autre option pour prévenir ce problème.

## Introduction générale

---

Le but de ce mémoire est d'étudier la corrosion des cornes d'éclateurs d'acier C3 et K3, utilisés dans les transformateurs électriques fabriqués par l'entreprise Électro- Industries (EI) d'Azazga et surtout tester le comportement de leur couche passive vis-à-vis de la corrosion générée par l'atmosphère et ses conditions, pour ce faire, nous avons utilisé la chambre microclimat KESTERNICH du laboratoire de l'entreprise EI d'Azazga.

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

- Le premier chapitre est un aperçu sur la corrosion des aciers.
- Le second chapitre explique les différentes techniques et le matériel utilisés pour l'étude de la corrosion dans ce type de matériaux.
- Le troisième chapitre réunit les résultats expérimentaux et leurs discussions.
- Une conclusion générale qui résume les résultats obtenus dans ce travail et les perspectives offertes par cette étude.

*Chapitre I*  
*Généralités sur la corrosion des*  
*aciers*

L'acier est essentiellement un alliage de fer-carbone dont la teneur en carbone inférieure à 2 % ce qui le différencie de la fonte [7]. 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 comme le phosphore et le soufre, signalés comme des impuretés nocives pour l'acier. L'acier peut également contenir d'autres éléments tels que le silicium, le manganèse, le chrome, le nickel, etc. Le taux et la nature de ces éléments peuvent modifier considérablement ses caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques [8].

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter quelques notions indispensables à la compréhension du choix de ce thème et l'importance des résultats obtenus dans ce travail de mémoire. La première partie est un aperçu sur les différents types d'aciers, leurs importantes propriétés et leurs multitudes d'applications. La deuxième partie est consacrée au phénomène de corrosion de ces matériaux. Dans la troisième et dernière partie, nous avons cité les différentes méthodes utilisées pour les protéger de la corrosion.

## **I.1. Aperçu sur les aciers**

Afin de faciliter la compréhension des aspects microstructuraux discutés dans nos résultats, il est nécessaire de présenter quelques concepts de métallurgie spécifiques aux aciers.

### **I.1.1. Les différents types d'aciers**

Il est habituel de classer les aciers en plusieurs groupes correspondant à différentes particularités de leur composition chimique que nous avons résumée dans cette partie comme suit :

#### **I.1.1.a. Aciers non alliés**

Ces types d'aciers aussi appelés aciers au carbone, sont composés principalement de fer et de carbone, sans l'addition d'éléments d'alliage. Ils peuvent contenir de petites quantités d'autres éléments, mais généralement en quantités inférieures à 1%. La teneur en carbone dans les aciers non alliés détermine leurs propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction, la dureté et la ductilité. Ces aciers sont couramment utilisés dans de nombreuses industries, notamment la construction, la fabrication d'outils, les structures métalliques, les automobiles, etc. Ils sont classés en trois catégories.

- Les aciers à faible teneur en carbone, leur teneur en carbone est inférieure à 0.25%.

- Les aciers à moyenne teneur en carbone, entre 0.25% et 0.6%.

- Les aciers à forte teneur en carbone, entre 0.6% à 1.4% de carbone.

Ces aciers se caractérisent par une valeur minimale de teneur en éléments d'addition. Ces valeurs sont données pour chaque élément sur le tableau I.1.

**Tableau I.1** : Pourcentage maximal en masse des matériaux dans l'acier non allié.

Autres\* sont tous les autres matériaux à l'exception de C, P, S et N [9].

Elements	% en masse	Elements	% en masse	Elements	% en masse
Aluminium	< 0,3	Bismuth	< 0,1	Bore	< 0,0008
Chrome	< 0,3	Cobalt	< 0,3	Cuivre	< 0,4
Manganèse	< 1,65	Molybdène	< 0,08	Nickel	< 0,08
Niobium	< 0,06	Plomb	< 0,40	Sélénium	< 0,1
Silicium	< 0,6	Tellure	< 0,1	Tungstène	< 0,3
Titane	< 0,05	Vanadium	< 0,1	Autres*	< 0,05

### I.1.1.b. Aciers alliés

Les aciers alliés sont des aciers qui contiennent d'autres éléments supplémentaires d'alliage en quantités suffisantes pour modifier leurs propriétés de base. En général, ils sont alliés avec une variété d'éléments en quantités totales comprises entre 1,0 % et 50 % en poids. Ces éléments peuvent être utilisés pour augmenter la dureté, la résistance à la corrosion, l'élasticité, la résistance à l'usure ou encore pour accroître la température critique à laquelle le métal perd ses propriétés. Les aciers alliés sont répartis en deux groupes.

- Aciers fortement alliés : ce type d'acier présente un taux d'éléments d'alliage supérieur à 5% de sa composition en masse.

- Aciers faiblement alliés : ce type d'acier présente un taux d'éléments d'alliage inférieur à 5 % de sa composition en masse.

### I.1.1.c. Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages de fer, de chrome et éventuellement de nickel, contenant également d'autres éléments d'alliage tels que le carbone, l'azote, le molybdène, le titane, etc. Le terme "inoxydable" est généralement utilisé lorsque l'alliage présente une concentration minimale d'environ 11 à 12% de chrome. Selon la composition chimique de l'alliage, on distingue les aciers inoxydables au chrome, les aciers inoxydables au chrome-nickel et les aciers inoxydables au chrome-nickel-molybdène. Cependant, cette classification

est quelque peu restrictive car l'ajout d'éléments d'alliage confère à ces aciers une grande variété de structures et donc de propriétés physiques, mécaniques et chimiques distinctes[10].

Les différents types d'acier inoxydable sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau.I.2 :** Différents types d'aciers inoxydables et leurs caractéristiques [11].

Nom de l'acier	Teneur (% en masse)	Caractéristiques
<b>Martensitique</b>	Cr : 11.5 -18 Ni : < 6 Mo: <1.5	-Amélioration de la résistance à la corrosion. - Amélioration de la ténacité. - Une haute dureté. - Limite d'élasticité. - Résistance mécanique élevée.
<b>Ferritiques</b>	Cr : 13 -30 C :< 0.10	-Structure ferritique. - Résistance à la corrosion. -Très basses teneurs en C et en N
<b>Austénitiques</b>	Cr : 16 -35 Ni : 7 -26 C :< 0.12	-De type Fe-Cr-N. - Structure gamma. - Grande résistance à la corrosion.

### I.1.2. Propriétés des aciers

Afin de procéder à la caractérisation des aciers, trois critères principaux sont pris en compte : leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques.

#### I.1.2.a. Propriétés chimiques des aciers

Les métaux peuvent réagir chimiquement lorsqu'ils entrent en contact avec d'autres éléments, ce phénomène étant connu sous le nom de corrosion. La composition des métaux est spécifiée par les normes ou les catalogues des fabricants. La réactivité des aciers envers leur environnement est un facteur crucial. La corrosion atmosphérique, qui dépend de l'humidité relative et de la pollution de l'air, entraîne une détérioration du matériau en termes d'épaisseur, de poids et, par conséquent, de performances.

#### I.1.2.b. Propriétés physiques

La dilatation est une propriété physique essentielle pour les constructeurs métalliques. Le coefficient de dilatation linéaire de l'acier est de  $12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , ce qui est une valeur significative à prendre en compte.

#### I.1.2.c. Propriétés mécaniques

Parmi les propriétés mécaniques des aciers, celles qui sont le plus couramment utilisées pour des applications dans la construction métallique sont :

**-Résilience(KCV) :** la résilience est une propriété qui permet d'évaluer la capacité d'un métal à résister à une rupture soudaine. L'essai de résilience implique la rupture d'une section métallique entaillée au milieu, soutenue par deux appuis et soumise à une flexion lors d'un

seul choc. La qualité de l'acier pour les constructions soudées est largement déterminée par ce critère.

- **Résistance à la traction (RM)** : il s'agit de la limite maximale de résistance en traction que le métal peut supporter avant de se rompre. Cette valeur est utilisée pour prévenir la fatigue.

- **Allongement à rupture (A en %)** : il s'agit de la capacité d'allongement maximale tolérée par le matériau avant de se rompre.

- **Module d'élasticité(E)** : le module d'élasticité est une mesure de la rigidité du matériau, représentant le rapport entre la contrainte appliquée à une barre et l'allongement relatif de cette barre dans sa zone plastique.

- **Limité d'élasticité (Re)** : la limite élastique correspond à la charge maximale que le métal peut supporter avant de subir une déformation permanente, perdant ainsi sa géométrie initiale. À ce stade, la déformation devient plastique et irréversible. La limite élastique est utilisée pour le calcul des contraintes dans les éléments soumis à la flexion, au cisaillement et au flambement.

#### I.1.2.d. Propriétés de l'acier

Comme l'acier est un alliage de fer alors ses propriétés dépendent des pourcentages de carbone et des autres éléments qui le constitue. Les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du fer sont données dans le tableau suivant :

**Tableau.I.3** : Propriétés physiques, chimiques et mécaniques du Fer.

Point de fusion	$\theta_f = 1538^\circ\text{C}$
Structure cristalline	- CC (ferrite $\delta$ ) pour $\theta_f = 1538^\circ\text{C} - 1394^\circ\text{C}$ - CFC (austénite $\gamma$ ) pour $\theta_f = 1394^\circ\text{C} - 912^\circ\text{C}$ - CC (ferrite $\alpha$ ) pour $\theta_f = 912^\circ\text{C} - \text{l'ambiante}$
Etat magnétique	ferromagnétique à basse température paramagnétique à haute température. point de Curie à $768^\circ\text{C}$
Masse volumique	$\rho = 7870 \text{ kg.m}^{-3}$
module d'Young	E: $211400 \text{ N/mm}^2$ à $T=20^\circ\text{C}$
Module de Coulomb	G : $81600 \text{ N/mm}^2$ ; ( $T=20^\circ\text{C}$ )
Conductivité thermique	$73.3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à ( $T=20^\circ\text{C}$ )
Coefficient de dilatation linéique	(fer $\alpha$ à $20^\circ\text{C}$ ): $\alpha = 12.6.10^{-6}.\text{K}^{-1}$
Limite d'élasticité	Re = 100 à 170 MPa
Résistance à la traction	Rm= 180 à 290 MPa
Résistivité électrique	$0.104 \mu\Omega .\text{m}$

### I.1.2.e. Influence spécifique des éléments d'addition

Les principaux éléments d'addition du fer sont : le carbone, le chrome, le nickel, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le titane, le niobium, l'azote,... Ils ont une influence significative sur les propriétés du matériau.

- **Le carbone** : contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  inter-granulaires qui diminuent la résistance à la corrosion[12].

- **Le chrome** : augmente la trempabilité de l'acier par la formation de carbures de types  $\text{M}_7\text{C}_3$  (1400-1500 HV), qui améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austénisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion dans un milieu non sulfurique. Pour une teneur supérieure à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides.

- **Le nickel** : stabilise l'austénite à basse température. Son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité. Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe, ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique.

- **Le molybdène** : augmente la résistance à l'usure à chaud. Il ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu. Il améliore la ductilité, la mise en solution des carbures diminue la teneur en austénite résiduelle après trempe. Enfin, le molybdène, élément alphasphagène, est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5 % pour améliorer la résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Ce pendant, lorsque ce type d'alliage est soumis à des températures comprises entre 500 et 1000°C durant 1 à 1000 heures, on observe la formation de composés intermétalliques dont la présence altère à la fois la résistance à la corrosion et améliore les caractéristiques mécaniques.

- **Le silicium** : améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. Avec une teneur voisine de 0.3 % en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Des teneurs d'environ 1% entraînent une augmentation de la limite élastique, de la résistance à l'oxydation au delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures  $\text{M}_2\text{C}$ , ce qui abaisse la fragilité du métal.

- **Le niobium** : à hautes températures, présente les mêmes propriétés que le titane. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique à la place du titane qui devient volatil pendant le transfert dans l'arc électrique.
- **Le titane** : évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur du fait de la captation du chrome.
- **Le manganèse** : intervient dans tous les aciers comme désoxydant. Il augmente la trempabilité et permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais, il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer.
- **Le cuivre** : en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.
- **Le soufre** : diminue la résistance à la corrosion.
- **Le zirconium** : est générateur de carbures. Il est utilisé en métallurgie en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénitration et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure au rouge. Il accroît la longévité des matériaux de confection des conducteurs chauffants et provoque une striction de la zone  $\gamma$ [12].

### I.1.3. Les applications des aciers

On retrouve l'acier sous différentes formes et dans beaucoup d'applications. La composition exacte d'un acier va avoir une influence fondamentale sur ses propriétés et sur l'usage qui en sera fait industriellement. En plus du fait qu'il est léger, solide et résistant cela permet de réaliser une multitude de variétés de pièces qui peuvent être utilisées dans plusieurs domaines et applications comme la conception de machines et outillages, le domaine automobile, la serrurerie et ses dérivés, la santé, l'alimentaire, les emballages et le blindage. Avec l'acier, toutes les formes, toutes les dimensions sont permises. Les constructions en aciers sont modulables, faciles à entretenir et à réhabiliter. On donne ici quelques domaines et exemples d'utilisation.

#### I.1.3.a. Monuments et construction

Les secteurs qui ont le plus grand usage de l'acier sont les domaines de la construction de bâtiments et de ponts. Ce matériau est de plus en plus présent dans les rénovations et les constructions en raison de sa légèreté et de sa grande résistance. Citons les exemples suivants :

- La Tour Eiffel contient 18 038 pièces de fer qui ont été assemblées par des rivets en acier.
- Le Pont de Brooklyn est suspendu à 40 mètres au-dessus de l'East River à l'aide de câbles d'acier.
- La Pyramide du Louvre est constituée de 8 000 pièces en acier inoxydable.

Sans oublier les gratte-ciel rendus possibles par l'acier. Le domaine de la construction est aujourd'hui le plus grand consommateur d'acier, utilisant plus de 50 % de l'acier produit.

### **I.1.3.b. Mécanique et technologie**

Il représente, en automobile, 55 à 70 % du poids d'une voiture. On le trouve aussi dans l'aviation, dans les machines agricoles, dans toutes les machines industrielles et dans les composants électroniques.

### **I.1.3.c. Le domaine médical**

L'acier inoxydable qui est neutre par rapport au tissu humain, est beaucoup utilisé en médecine pour fabriquer les prothèses, les aiguilles et aussi les bistouris employés dans les différentes interventions chirurgicales.

### **I.1.3.d. Dans la vie quotidienne**

L'acier est énormément utilisé dans notre vie quotidienne. On le trouve beaucoup dans la fabrication des couverts, des casseroles, des boîtes de conserve, des pots de peinture des aérosols, trombones, ciseaux et beaucoup d'autres matériels du quotidien.

## **I.2. Généralités sur la corrosion**

La corrosion est un phénomène très étendu qui touche une grande variété de matériaux tels que les métaux, les céramiques et les polymères, dans des environnements variés tels que les milieux aqueux, l'atmosphère et les hautes températures. Elle se reflète par la dégradation des matériaux suite à leur interaction physico-chimique avec leur environnement, ce qui peut altérer leurs propriétés et, par conséquent, entraîner une dégradation fonctionnelle du métal. Cette altération peut affecter diverses propriétés, telles que les propriétés mécaniques, électriques, et autres [13].

### **I.2.1. Différents processus et types de corrosion**

La corrosion peut se développer suivant différents processus induisant plusieurs types de corrosion. On peut identifier différents processus de corrosion qui se manifestent selon le type de corrosion d'un métal ou d'un alliage. En général, on peut distinguer :

### **I.2.1.a. Corrosion chimique (sèche)**

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre la surface d'un matériau et une phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule sans présence d'électrolyte avec le milieu ambiant. La corrosion purement chimique s'effectue directement sans intervenir le passage d'un courant électrique et un flux électronique. Par exemple, l'oxydation de l'acier ordinaire à haute température par l'oxygène de l'air est une corrosion chimique.

### **I.2.1.b. Corrosion électrochimique (humide)**

Cette corrosion est une réaction électrochimique entre la surface d'un matériau et un liquide électrolyte. Elle est accompagnée de la formation de piles qui sont le siège de circulation de courant électrique. Dans ce type de corrosion, le milieu corrosif transporte les oxydants vers la surface du métal, tandis que les produits de corrosion sont transportés dans la solution corrosive. Citons comme exemple la dégradation de l'aluminium par l'acide sulfurique dilué.

### **I.2.1.c. Corrosion biochimique**

Cette corrosion est microbiologique et résulte de l'activité métabolique de certaines bactéries présentes dans des environnements humides, telles que les canalisations enterrées et les réservoirs. Ces bactéries peuvent produire des acides tels que l'acide sulfurique qui attaquent le métal.

## **I.2.2. Les différentes formes de corrosion**

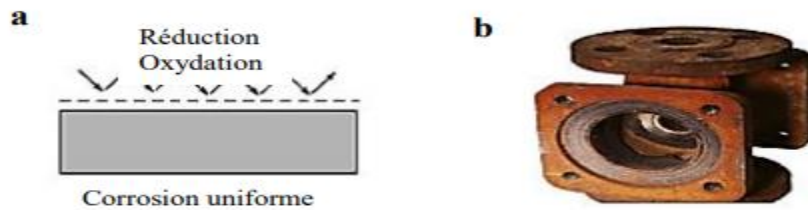
Plusieurs formes de corrosion peuvent être dénombrées. Elles sont caractérisées par des modifications de propriétés physiques du métal. Une simple observation visuelle ou au microscope est capable d'identifier la forme de la corrosion. Selon ces formes, on distingue [14-15] :

### **I.2.2.a. Corrosion uniforme ou généralisée**

La corrosion uniforme est un type de corrosion où l'ensemble de la surface d'un matériau est attaqué à la même vitesse lorsqu'il est exposé à un milieu corrosif. Cette forme de corrosion peut entraîner la formation d'une couche protectrice de carbonate de fer, qui peut ralentir le processus de corrosion. Cependant, cette couche peut se fissurer et exposer encore la surface métallique à la corrosion. Dans ce type de corrosion, l'épaisseur de la couche d'oxyde à la surface du métal diminue uniformément et régulièrement en raison de l'action corrosive du milieu environnant [16].

Cette forme de corrosion est la plus rencontrée dans la pratique. Bien qu'elle puisse causer des dommages aux pièces métalliques, elle est considérée comme la moins dangereuse car sa

durée de vie peut être approximativement calculée. Les causes de la corrosion uniforme peuvent être chimiques, électrochimiques ou mécaniques. Cette corrosion est relativement prévisible et peut être contrôlée à travers diverses méthodes de protection [17].



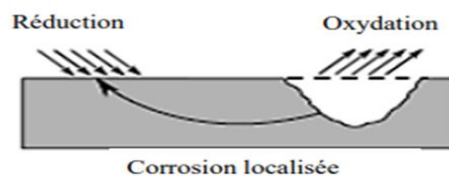
**Figure I.1 :** Représentation d'une corrosion uniforme (générale).

a. Distribution homogène

b. Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier [18-19].

### I.2.2.b. Corrosion localisée

La corrosion localisée est une forme de corrosion qui se produit spécifiquement en un point anodique particulier d'une surface métallique. Elle se manifeste sur une partie du métal à un taux de corrosion nettement supérieur à celui du reste de la surface (voir **Figure. I.2**). Dans cette forme la progression de la corrosion est inégale [20]. La corrosion localisée est souvent plus difficile à détecter et à prévenir que la corrosion uniforme car elle peut se produire dans des zones difficiles d'accès où les conditions locales sont très différentes de celles du reste de la surface.



**Figure I.2 :** Corrosion localisée [18].

Il existe plusieurs formes de corrosion localisée qui se distinguent les unes des autres [21,22]

On peut citer :

#### - La corrosion par piqûres

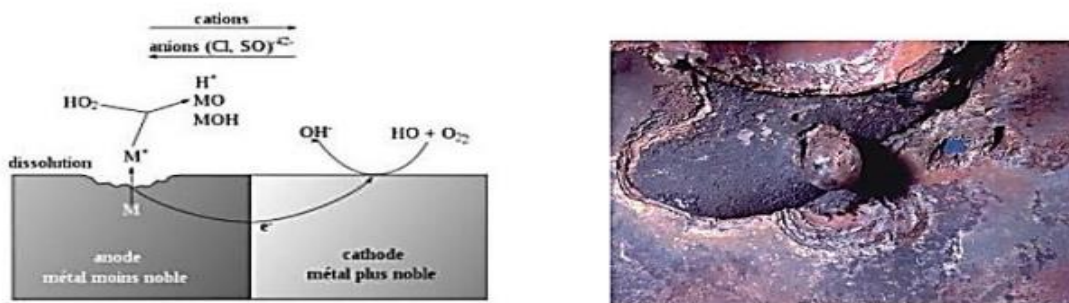
C'est une forme de corrosion localisée qui se manifeste par l'apparition de petits trous étroits à certains endroits de la surface métallique. Cette forme de corrosion est généralement causée par des hétérogénéités présentes à la surface, ce qui crée des piles locales. Cette forme de corrosion peut être très destructrice, avec des vitesses de corrosion très élevées qui peuvent conduire à la perforation des structures.



**Figure I.3 :** Corrosion par piqures d'un acier.

### - Corrosion galvanique

Elle est dite aussi corrosion bimétallique, c'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte (Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou encore des conditions physicochimiques à l'interface [23-24] (**Figure I.4**). Cette forme est souvent liée à une mauvaise conception des installations, citons comme exemple les erreurs de montage de la statue de la liberté, qui occasionne l'accès d'eau a des dispositifs constitués d'alliages cuivreux et d'acier au carbone dont la corrosion s'est trouvée accélérée de façon importante par contact avec les alliages cuivreux [2].

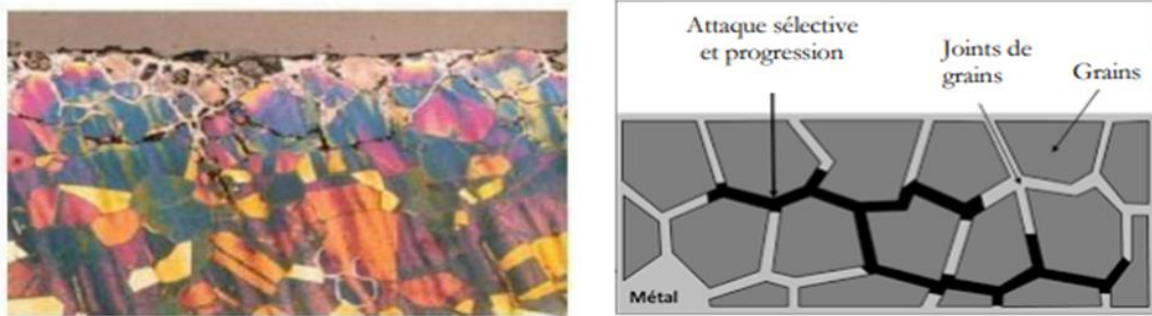


**Figure I.4 :** Corrosion galvanique [26].

### - Corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire correspond à une dissolution préférentielle des zones d'émergence des joints de grains à la surface des matériaux mis en présence de milieux agressifs. Les milieux susceptibles d'entraîner l'attaque intergranulaire sont très variés : gaz, solutions, sels fondus, métaux liquides,... Les phénomènes observés ont plusieurs origines. Ainsi, la précipitation de phases étrangères au voisinage des joints de grains peut entraîner, suivant la nature de l'environnement agressif, la dissolution préférentielle des précipités ou des zones voisines des précipités appauvries en un élément constituant la matrice. C'est le cas

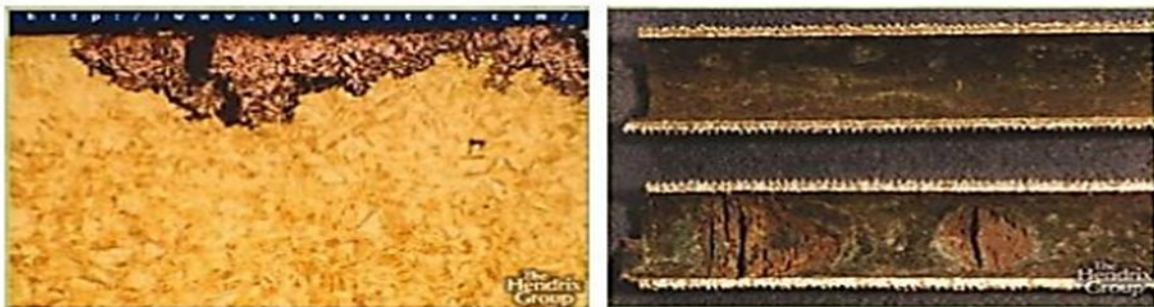
de la corrosion intergranulaire de certains alliages légers et des aciers inoxydables, austénitiques ou ferritiques, sensibilisés.



**Figure I.5 :** Corrosion intergranulaire.

#### - Corrosion sélective

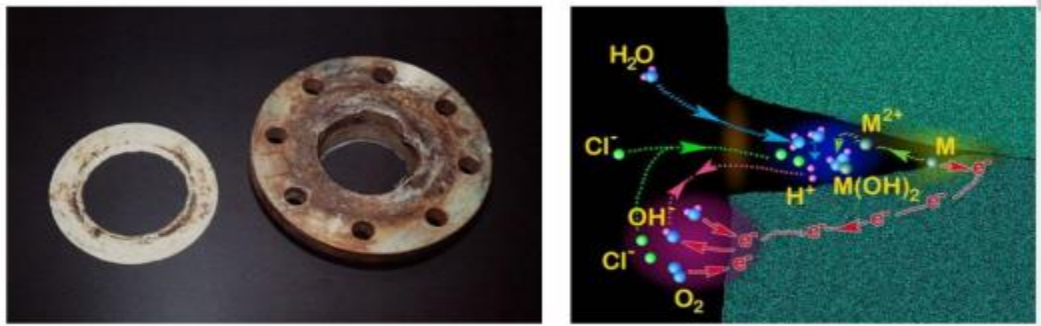
Cette forme de corrosion est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [27]. Cette corrosion ne se produit que si la teneur en éléments préférentiellement solubles qui s'oxyde dépasse un certain seuil. Le cas le plus connu sous cette forme de corrosion est le cas de la dézincification des laitons [28].



**Figure I.6 :** Corrosion sélective du laiton (Cu-Zn) [24].

#### - Corrosion caverneuse

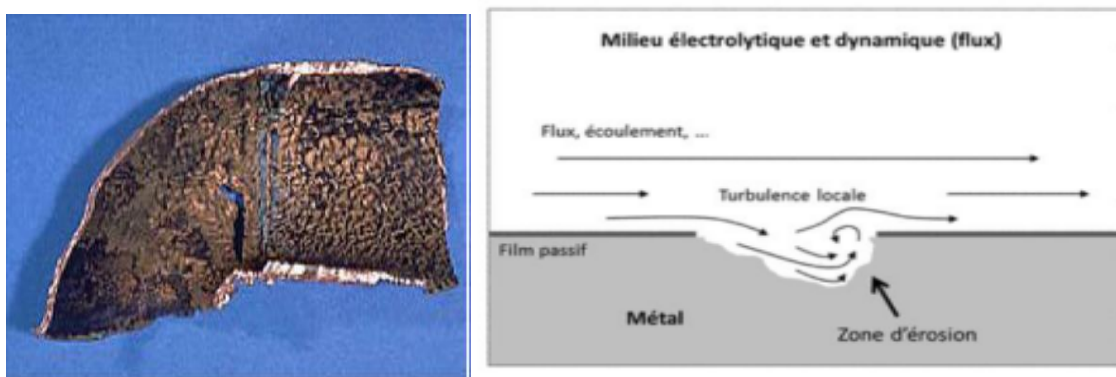
La corrosion caverneuse ou par crevasses, est un type de corrosion qui se produit en raison d'une différence d'accessibilité à l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique [24]. Cette forme de corrosion provoque une attaque sélective du métal dans les fentes et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [26]. Pour prévenir la corrosion caverneuse, il est recommandé d'optimiser la conception de la pièce de manière à éviter toute caverne artificielle. Cela peut être réalisé en évitant la création de joints mal fixés, des mauvaises soudures, de dépôts ou d'interstices entre deux tôles [29].



**Figure I.7 :** Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse.

### - Corrosion érosion

De nombreux matériaux tels que l'aluminium, l'acier, etc [30], sont affectés par la corrosion-érosion. Ce phénomène résulte de l'action simultanée d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière [24]. La corrosion-érosion se produit généralement sur des métaux exposés à un écoulement rapide de fluide [24], et elle progresse en trois étapes successives, comme représenté sur la Figure (I.8).

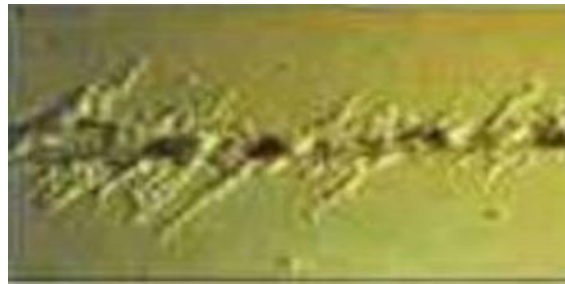


**Figure I.8 :** Étapes de développement du phénomène de corrosion-érosion.

### - Corrosion filiforme

Lorsqu'un revêtement protecteur semi-perméable à l'oxygène et à l'eau, tel qu'une peinture ou un vernis, est présent, la corrosion filiforme peut souvent se manifester. Ce phénomène se caractérise par l'émission de filaments qui se propagent dans toutes les directions à partir des défauts du revêtement. Les matériaux tels que le fer et l'aluminium peuvent être affectés par cette corrosion lorsqu'ils sont exposés à des atmosphères humides ayant une température comprise entre 20°C et 30°C. Pour que la corrosion filiforme se développe, il est impératif que l'oxygène et l'eau soient présents. Elle est initiée par la présence d'ions agressifs, tels que  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et  $\text{CO}_3^{2-}$ , qui entraînent une acidification locale. Des mesures de potentiel et de PH ont permis de constater que le filament de corrosion filiforme est constitué d'une tête

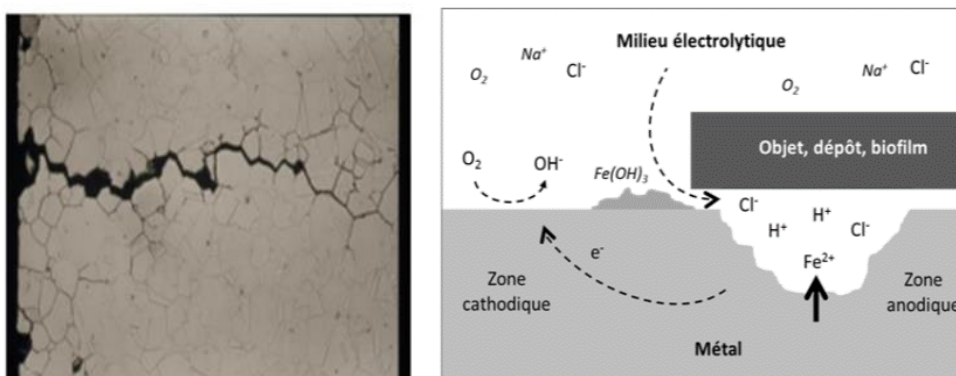
contenant une solution aqueuse acide et d'une queue alcaline contenant des produits de corrosion. Le décollement du revêtement est favorisé par des conditions alcalines [18].



**Figure I.9 :** Corrosion filiforme [31].

### - Corrosion sous contraintes

La corrosion sous contraintes est un type de fissuration du métal qui survient lorsqu'une contrainte mécanique et une réaction électrochimique agissent conjointement [30]. Ce phénomène est très dangereux. Il est influencé par trois facteurs principaux, la température qui dépasse les 50 °C, les contraintes appliquées ou résiduelles subies localement par la pièce et la corrosivité du milieu, qui peut être causée par la présence de Cl<sup>-</sup> ou de H<sub>2</sub>S, des milieux caustiques NaOH, ou des milieux chlorurés qui sont particulièrement dangereux [29]. La corrosion sous contraintes se déroule en deux phases successives. Une phase d'initiation et une phase de propagation, et elle dépend de nombreux facteurs tels que l'intensité des contraintes, la composition chimique et la structure du matériau, l'état de surface, le milieu corrosif et la température.



**Figure I.10 :** Corrosion sous contrainte.

### I.2.3. Les facteurs influençant la corrosion

Il est possible de classifier les phénomènes de corrosion en fonction de plusieurs facteurs qui peuvent être regroupés en quatre catégories principales (tableau I.4).

Tableau I.4 : Principaux facteurs de corrosion.

<i>Facteurs du milieu corrosif</i>	<i>Facteurs métallurgiques</i>	<i>Facteurs des conditions d'emploi</i>	<i>Factures dépendant dutemps.</i>
- Concentration du réactif - Teneur en oxygène - pH du milieu - Température - Pression	-Composition de l'alliage -Procédés d'élaboration -Impuretés -Traitement thermique -Traitement mécanique	-Etat de surface -Forme des pièces -Emploi d'inhibiteur -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tensions mécaniques -Modification des revêtements protecteurs.

#### I.2.4. Diagramme d'équilibre thermodynamique de POURBAIX

Le métal peut réagir avec de nombreuses espèces en raison de ses différentes valences en solution. Pour étudier ces réactions, on utilise un diagramme appelé diagramme de Pourbaix, basé sur des données thermodynamiques.

Pourbaix a démontré que le comportement d'un métal dans un système tel que l'eau à 25 °C peut être prédit en traçant des diagrammes potentiel-pH. Ces diagrammes permettent de déterminer les domaines de stabilité des espèces chimiques, ce qui aide à comprendre les mécanismes de la corrosion. Malheureusement ces diagrammes ne sont établis que pour des matériaux purs et des solutions idéales, sans prendre en compte les aspects cinétiques.

Trois domaines principaux peuvent être distingués :

- Le domaine d'immunité où le métal est stable et/ou la corrosion est complètement évitée.
- Le domaine de passivation où la corrosion du métal conduit à la formation d'un produit de corrosion stable qui peut jouer un rôle protecteur. Si cette protection est hautement efficace, ce domaine est considéré comme une zone de passivité.
- Le domaine de corrosion acide ou basique où ce sont les ions métalliques (ou complexes) qui sont stables.

Le diagramme potentiel-pH du fer est représenté sur la figure ci-dessous

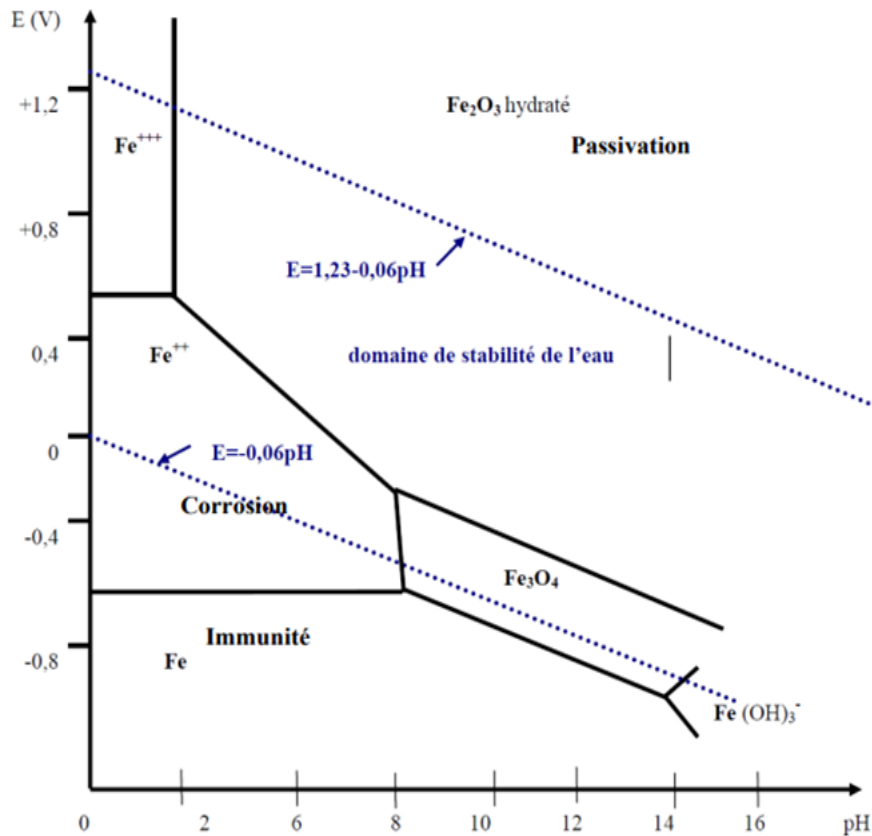


Figure I.11 : Diagramme potentiel-pH simplifié du fer [18].

### I.3. Méthodes de protection contre la corrosion

La prévention de la corrosion dès la conception d'une installation revêt une importance cruciale. En mettant en place des mesures préventives à ce stade, il est possible d'éviter de nombreux problèmes, surtout lorsqu'il est essentiel de garantir la durabilité des objets, notamment dans des secteurs tels que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accidents peuvent entraîner des conséquences graves pour les personnes et l'environnement.

#### I.3.1. Protection par revêtement

Les revêtements constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. En apparence de protection idéale, leur efficacité dépend en fait de la qualité des revêtements et de leur comportement propre vis-à-vis du milieu agressif.

##### I.3.1.a. Revêtement métallique

Ces revêtements sont largement utilisés pour protéger l'acier, en particulier contre la corrosion atmosphérique. Ils peuvent également être appliqués sur d'autres substrats tels que le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas pour les revêtements de chrome sur les robinets. En

général, on peut distinguer deux types de revêtements métalliques à savoir le revêtement anodique et le revêtement cathodique. Dans le premier, le métal utilisé comme revêtement est moins noble que le métal qu'il protège. C'est le cas du procédé de galvanisation où une couche de zinc est appliquée. En cas de défaillance du revêtement, une pile locale se forme et le revêtement en zinc se corrode tout en protégeant cathodiquement le métal de base. Ainsi, tant qu'une quantité adéquate de revêtement est présente, la protection est maintenue. Dans ce type de revêtement, l'épaisseur est un élément crucial. En général, l'épaisseur du revêtement se situe entre 100 et 200  $\mu\text{m}$ . Dans le cas d'un revêtement cathodique, le métal protecteur utilisé est plus noble que le métal qu'il protège, citons comme exemple les revêtements de nickel ou de cuivre appliqués sur l'acier. En cas de défaut du revêtement, une pile de corrosion se forme, ce qui peut entraîner une dégradation rapide du métal de base, en particulier en raison du rapport entre une petite surface anodique et une grande surface cathodique. Dans cette situation, la continuité du revêtement est donc un facteur essentiel pour assurer la protection.

#### **I.3.1.b. Revêtement inorganique non métallique**

Les revêtements peuvent être classés en deux catégories, les couches de conversion chimique de surface et les couches étrangères au substrat. Les couches de conversion sont obtenues de la réaction du métal avec un milieu spécifique, tel que la phosphatation, l'anodisation ou la chromisation. En revanche, les couches étrangères au substrat sont créées par des procédés de dépôt qui ne nécessitent pas de réaction avec le substrat lui-même, comme l'émaillage, par exemple. Dans ce cas, la composition chimique du revêtement est indépendante de celle du substrat sur lequel il est appliqué.

#### **I.3.1.c. Revêtements organiques**

Les revêtements organiques créent une barrière plus ou moins étanche entre le métal et le milieu électrolytique. Ils peuvent être classés en deux catégories. On trouve les revêtements en bitume utilisés pour la protection des structures enterrées, les revêtements polymériques et les peintures et vernis, ces derniers jouent un rôle prépondérant dans la protection contre la corrosion, étant largement utilisées pour protéger la plupart des objets en acier et de nombreux objets composés d'autres matériaux.

### **I.3.2 Protection par inhibiteurs**

Suivant la définition donnée par NACE (National Association of Corrosion Engineers), un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration [32]. La diminution de la vitesse de corrosion est réalisée soit en limitant les réactions chimiques ou électrochimiques, en agissant sur le

processus anodique, cathodique ou mixte, soit en modifiant l'agressivité de l'électrolyte à l'interface entre le milieu inhibiteur et le matériau [33]. Cette protection peut être permanente ou temporaire [34].

### I.3.3. Protection électrochimique

Cette forme de protection permet d'intervenir de manière maîtrisée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui surviennent lors du processus de corrosion. On peut identifier deux types de protections, la protection cathodique et la protection anodique.

#### I.3.3.a. Protection cathodique

La protection cathodique est une méthode proactive pour prévenir la corrosion des matériaux qui sont exposés à des environnements tels que le sol, l'eau ou le béton. Elle fonctionne en diminuant le potentiel de corrosion à un niveau où la vitesse de corrosion du métal est significativement réduite. Le principe de cette technique repose sur la régulation des paramètres électriques afin de maintenir le métal dans une plage où il est protégé de la corrosion.

#### I.3.3.b. Protection anodique

La protection anodique est plus complexe que la protection cathodique [3]. Elle est utilisée de manière spécifique dans des cas particuliers où il y a un domaine passif. Elle s'applique aux métaux passivables dont le potentiel de corrosion se situe dans la plage active ( $E_{corr} < E_{passif}$ ). La polarisation anodique déplace le potentiel vers la plage passive. Une faible densité de courant est nécessaire pour maintenir le métal dans un état passif. La protection anodique requiert un courant minimal. Cependant, la densité de courant appliquée doit être supérieure à la densité de courant de passivation [31].

### I.3.4. Protection anticorrosion des aciers par le zinc

Le zinc est un métal utilisé pour protéger contre la corrosion, l'oxydation et l'usure. Il est le quatrième métal le plus produit au niveau mondial, venant après le fer, l'aluminium et le cuivre. Le zinc est obtenu à partir de minéraux contenant du sulfure de zinc [36].

#### I.3.4.a. Les caractéristiques du zinc

Les données relatives aux principales caractéristiques physico-chimiques du zinc sont présentées sur le tableau suivant.

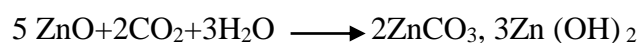
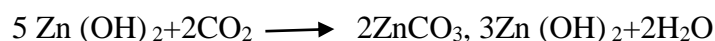
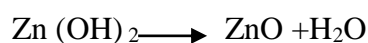
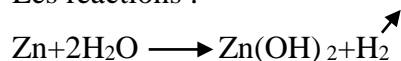
**Tableau I.5 :** Principales caractéristiques physico-chimiques du zinc.

Symbole	Zn
Numéro atomique	30
Masse atomique (g.mol <sup>-1</sup> )	65,37
Masse volumique (g.cm <sup>-3</sup> ) à 20°C	7,14
Température de fusion (°C)	419
Température d'ébullition (°C)	907

La propriété électrochimique la plus intéressante de Zn est son potentiel électrochimique inférieur à celui du fer. Lorsqu'il est en contact avec l'acier, le zinc a tendance à s'oxyder plus facilement que le fer et en se corrodant il forme des oxydes (ZnO) ou des hydroxydes Zn(OH)<sub>2</sub> et avec l'action complémentaire du gaz carbonique il forme un hydroxy-carbonate insoluble (2ZnCO<sub>3</sub>, 3Zn(OH)<sub>2</sub>) très stable qui protège l'acier même si localement le revêtement est endommagé.

Les produits de corrosion du zinc, les oxydes et les hydroxydes, sont de couleur blanche, d'où leur appellation courante de "rouille blanche" en raison de leur similitude avec la rouille du fer.

Les réactions :



#### I.3.4.b. Méthodes de protection avec Zn

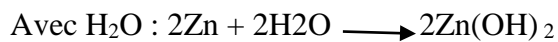
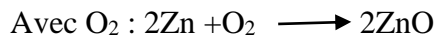
On peut utiliser plusieurs méthodes pour protéger les aciers de la corrosion par du Zinc citées ci-dessous.

**- Protection par barrière :** cette méthode de protection est considérée comme l'une des plus anciennes et la plus couramment utilisée pour prévenir la corrosion. Elle consiste à appliquer un revêtement de zinc qui isole physiquement l'acier de l'effet corrosif de l'atmosphère. Une couche de zinc se forme sur le substrat en acier, renforçant ainsi la protection par barrière contre la corrosion.

le zinc a la particularité de subir une oxydation rapide en présence d'agents oxydants, ce qui entraîne la formation d'ions (Zn<sup>2+</sup>) par l'équation suivante ( $\text{Zn} \rightarrow 2\text{e}^- + \text{Zn}^{2+}$ ). Ces ions

réagissent ensuite avec divers éléments présents dans l'atmosphère environnante pour produire des substances de corrosion peu solubles qui jouent un rôle protecteur.

Le zinc réagit de différentes manières selon les substances présentes. On trouve qu'en présence d'oxygène, il forme une fine couche d'oxyde de zinc (ZnO), en présence d'humidité, il réagit pour former un hydroxyde de zinc (Zn(OH)<sub>2</sub>). La formation de ces produits de corrosion permet de réduire la vitesse de corrosion du substrat en le protégeant contre l'exposition directe à l'atmosphère.



### - Protection cathodique

La galvanisation à chaud implique la réaction cathodique entre le zinc et l'acier, où le zinc agit en tant qu'anode sacrificielle et est préférentiellement oxydé. Cette protection cathodique lutte contre la corrosion, notamment aux endroits où le revêtement de zinc est endommagé, en formant une pile électrochimique avec l'acier agissant en tant que cathode. La durée de la protection galvanique dépend de la vitesse de la réaction cathodique, et divers produits de corrosion peuvent se former à partir de l'oxydation du zinc, avec un effet initial protecteur mais une possible détérioration à long terme du revêtement.

L'efficacité de la protection galvanique dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature de l'environnement dans lequel l'assemblage est exposé, l'état de polarisation de chaque métal et la géométrie des sites anodiques et cathodiques, y compris les formes et les surfaces relatives.

### - Galvanisation à chaud

La galvanisation est le processus à recouvrir l'acier dans un bain de zinc fondu à une température de 450 à 460 °C. L'objectif de cette opération est de former des couches intermétalliques de fer/zinc résultant de l'interdiffusion mutuelle du fer de la tôle d'acier et du zinc du bain de galvanisation. L'immersion à chaud crée une couche de zinc qui forme à la surface du matériau, une protection contre la corrosion.

La galvanisation à chaud est une méthode qui répond strictement aux exigences de robustesse, de performances techniques et mécaniques, de durabilité et d'économie. C'est pourquoi elle est largement utilisée dans divers domaines tels que les télécommunications, l'industrie, la marine et les équipements publics. Ces domaines partagent en commun une exposition à l'eau, à l'air et aux chocs.

**Conclusion**

Les aciers contiennent donc une majorité de fer et un peu de carbone, mais également, d'autres types de métaux, avec des petites proportions, ou encore des inclusions non métalliques. Ce sont ces éléments, présents en très petites quantités, qui caractérisent l'acier obtenu, et l'usage industriel adéquat. La fabrication d'une pièce en acier, demande dans un premier lieu de définir les propriétés idéales du matériau qui correspondra au domaine de son utilisation. Dans un deuxième lieu, il faut penser à sa durée de vie dans ce domaine, en la protégeant de la corrosion et du vieillissement.

## *Chapitre II*

*Matériel utilisé et techniques d'étude de la  
corrosion des aciers C3 et K3*

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les aciers sont utilisés dans divers domaines [37-38]. Leurs propriétés diffèrent selon le pourcentage de carbone et des autres éléments qu'ils contiennent [39]. Par conséquent chaque pièce doit être conforme aux normes bien définies. Ces dernières dépendent du domaine d'application et de l'utilisation de la pièce. En plus du choix de l'acier selon le fonctionnement de la pièce fabriquée, il faut aussi penser à son comportement vis-à-vis du milieu extérieur comme sa résistance à la corrosion dans l'environnement atmosphérique, acide ou alcalin ainsi que son exposition à des contraintes extérieures mécaniques, électriques ou magnétiques. La vérification des normes d'une pièce assurera sa durabilité et celle du matériel dans lequel elle est utilisée et évitera la détérioration de ses performances et les accidents qui peuvent être créés par le mauvais choix du matériau.

Ce chapitre vise à présenter le matériel et les techniques utilisées pour étudier la corrosion des cornes d'éclateurs de type C3 et K3 utilisées dans les transformateurs électriques fabriquées par l'entreprise Electro-industries (EI).

### **II.1.Présentation des échantillons de cornes d'éclateur étudiés**

Les éclateurs sont des dispositifs utilisés pour limiter les surtensions. Ils sont composés d'une électrode sous tension et d'une autre reliée à la terre, avec un espace d'éclatement d'air libre entre les deux. Ils sont largement utilisés dans les transformateurs électriques, dans les réseaux de distribution et de transport, notamment dans les situations où l'isolation dans l'air est nécessaire ou lorsque la recherche de très faibles niveaux d'isolement n'est pas économiquement constant. Le plus ancien type d'éclateur est celui à simples tiges, souvent utilisé pour protéger les isolateurs des équipements à haute tension.

Les modèles actuels les plus courants suivent le même principe, mais comportent deux "cornes" au lieu d'une seule. L'éclateur à cornes, qui a la forme d'électrodes en forme de cornes (figure II.2), permet un allongement de l'arc électrique. Entre ces cornes se trouve une tige qui empêche le court-circuit. Ce type d'éclateur est principalement utilisé pour protéger les équipements de moyenne tension. Les éclateurs peuvent être à air ou à gaz et placés à l'intérieur d'un tube hermétique. Dans cette étude, nous avons utilisé deux type de cornes d'éclateurs l'un est en acier ordinaire galvanisé K3 et l'autre est en un acier inoxydable austénitique de type C3.



**Figure II.1 :** Présentation des cornes d'éclateurs type C3 et K3.

### II.1.1. Rôle et fonctionnement des cornes d'éclateurs

Le rôle des cornes d'éclateur est de créer un point faible contrôlé dans l'isolement du réseau, de sorte qu'une amorce éventuelle se produise systématiquement à cet endroit [40].

L'écartement B entre les deux électrodes peut être réglé afin d'obtenir un niveau de protection correspondant à la tenue nécessaire de l'objet à protéger. La protection s'effectue par l'amorçage vers la terre, en partant de la tige montée sur la borne haute tension vers la tige reliée à la terre. Dans le cas des transformateurs, cet amorçage des deux tiges permet de détourner le courant de défaut vers la terre, en passant par la cuve et la prise de terre.

Ces éclateurs sont installés aux endroits les plus exposés du réseau et à l'entrée des postes moyenne tension/basse tension. Il est important de noter que les éclateurs n'ont pas la capacité de couper les circuits. Leur fonction principale est de limiter les surtensions en dernier recours, dans les cas où les autres systèmes de protection auraient échoué [40]. Ces éclateurs présentent plusieurs avantages mais aussi des inconvénients.

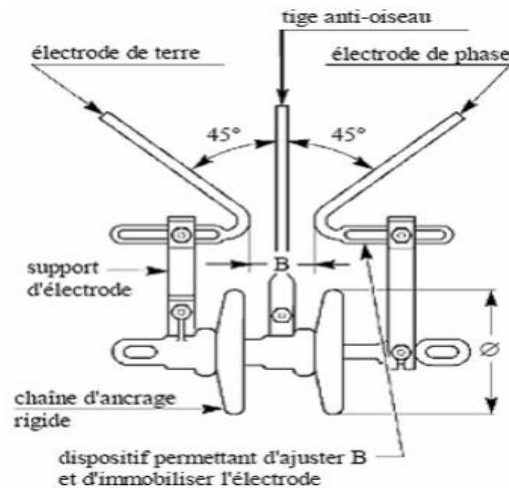


Figure II.2 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.

### II.1.1.a. Avantages des éclateurs

Ils sont économiquement avantageux en raison de leur prix abordable. Ce sont des dispositifs simples et faciles à comprendre et à installer. Il est possible de régler la tension à laquelle l'éclateur va s'amorcer, ce qui permet une adaptation aux besoins spécifiques du système. Cependant, malgré ces avantages, les éclateurs sont progressivement remplacés par les parafoudres sur les réseaux.

### II.1.1.b. Inconvénients des éclateurs

Le premier inconvénient est la variabilité des caractéristiques d'amorçage en fonction des conditions atmosphériques telles que la température, l'humidité et la pression. Ces conditions peuvent influencer l'ionisation de l'air entre les électrodes, ce qui entraîne une variabilité importante qui peut atteindre 40 % des caractéristiques d'amorçage de l'éclateur. Le deuxième inconvénient est la dépendance de l'amorçage de l'éclateur à la valeur de la surtension, ce qui peut rendre sa performance imprévisible dans certaines situations. Ajoutant que l'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase-terre à fréquence industrielle en raison de la présence continue de l'arc électrique. Ce court-circuit, appelé courant de suite, persiste jusqu'à ce qu'il soit interrompu par des dispositifs de coupure appropriés. Cela nécessite l'installation de disjoncteurs shunt ou de dispositifs de réenclenchement rapide en amont des disjoncteurs. En conséquence, les éclateurs ne conviennent pas à la protection contre les surtensions liées aux manœuvres. Sans oublier l'amorçage provoqué par une surtension à front raide qui n'est pas instantané, ce qui entraîne un retard. En raison de ce retard, la tension réelle atteinte dans le réseau est supérieure au niveau de protection choisie. Il est donc nécessaire d'étudier les courbes tension-temps de l'éclateur pour prendre en compte

ce phénomène. Ces inconvénients soulignent les limitations des éclateurs et expliquent pourquoi ils sont moins utilisés de nos jours, avec une préférence croissante pour les parafoudres.

### II.1.2.Type d'acier utilisé dans les cornes d'éclateurs étudiés

Dans ce contexte, nous avons mené une expérience visant à évaluer la performance de deux types d'aciers différents, à savoir l'acier ordinaire galvanisé type K3 et l'acier inoxydable type C3 appartenant aux familles austénitiques de nuance X12CrNiS188.

#### II.1.2.a.Composition chimique des échantillons

Comme mentionné auparavant, la composition chimique de l'acier joue un rôle important dans ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Aussi, il est très important de vérifier la conformité de l'échantillon avant son utilisation.

#### -Composition chimique de l'acier type C3

L'acier de type C3 est un acier inoxydable austénitique de type Fe-Cr-Ni. Ce type d'acier domine le marché mondial des aciers inoxydables, représentant environ 80% de celui-ci.

Ces aciers se distinguent par deux caractéristiques métallurgiques majeures. La première est la teneur en chrome suffisante pour leur conférer une résistance à la corrosion. La deuxième est la présence de nickel.

Pour garantir l'inoxidabilité, la teneur en chrome doit être supérieure à 16%, tandis que pour obtenir la structure austénitique, la teneur en nickel doit être supérieure à 8%.

La présence de nickel dans ce type d'acier a un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques du matériau, notamment sa ductilité (capacité à se déformer), ainsi que sur sa résistance à la corrosion. Le nickel participe à la formation d'une couche passive d'oxyde de nickel, qui contribue à la protection contre la corrosion [41].

Selon la norme DIN 17 440, la composition chimique de l'acier de type C3 doit répondre aux normes données sur le tableau suivant

**Tableau II.1 :** Composition chimique de l'acier inoxydable C3 (X12CrNiS18 8) selon la norme DIN 17 440.

Éléments	C	Si	S	Ni	Cr
Teneur en % massique	≤0,15	≤ 1.00	≤0,15 - 0,35	8,00 – 10,00	17,00 – 19,00

### -Composition chimique d'un acier type K3

L'acier de type K3 est un acier ordinaire galvanisé avec une couche de zinc. La composition chimique en % massique de l'acier ordinaire utilisé est présentée sur le tableau suivant, Selon la norme DIN 1652.

**Tableau II.2 :** Composition chimique de l'acier ordinaire galvanisé selon la norme DIN 1652.

Elément	C	S	Mn	P
Teneur en % massique	≤0,18	≤0,050	0.20-0.50	≤0.050

### II.1.2.b. Propriétés des aciers étudiés

Le domaine d'application et le rôle d'une pièce en acier dépendent de ses propriétés pour assurer son bon fonctionnement, sa résistance et sa durabilité. C'est pour cela qu'il est important de citer ici les propriétés des aciers étudiés.

#### - Propriétés des aciers de type C3

Ces aciers ont une structure principalement constituée d'austénite  $\gamma$  (une phase gamma amagnétique), avec la possibilité de présence résiduelle de la phase ferritique  $\delta$  (delta). L'austénite métastable peut se transformer en martensite suite à une déformation plastique et/ou à un refroidissement à basse température. L'ajout d'éléments tels que le carbone, le nickel, le manganèse, l'azote ou le cuivre peut augmenter la stabilité de l'austénite.

Les aciers austénitiques présentent généralement une bonne résistance à la corrosion. Ils ne subissent pas de durcissement lors d'un traitement thermique, mais leurs propriétés mécaniques peuvent être améliorées par l'ajout de l'azote ou par une déformation à froid.

Ces aciers se caractérisent par une ductilité et une résilience importantes, y compris à basse température, une bonne résistance mécanique à chaud, une bonne capacité à la soudure, une faible conductivité thermique et un coefficient de dilatation élevé. Ces aciers peuvent être facilement écrouis sans devenir fragiles et ils ne possèdent pas de limite élastique distincte.

#### - Propriétés des aciers K3

Ces aciers non alliés sont caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les aciers les plus utilisés. Ils sont mi-durs et mi-doux avec une bonne aptitude au soudage pour la réalisation de pièces mécaniques ainsi que toutes constructions soudées, boulonnées ou rivetées. Leur densité est environ de 7,85 g/cm<sup>3</sup> avec un point de fusion entre 1420 °C et 1460 °C. La ténacité, la formabilité, la grosseur de grain sont leurs propriétés spécifiées. La plupart

sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles,...) aux dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi-finis : galvanisés, nervurés, ondulés, etc. Ils trouvent leurs applications dans les constructions soudées, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage pour être utilisés en carrosseries, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plateforme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager,...

Ces aciers présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, telles que la plasticité, la ténacité et la soudabilité, une certaine résistance et de bonnes propriétés de flexion à froid.

### II.2. Dispositifs expérimentaux utilisés

Pour atteindre les objectifs de notre travail, nous avons utilisé plusieurs équipements à savoir :

- **La chambre microclimat KESTERNICH** : elle a joué un rôle important dans ce travail. Elle nous a permis d'exposer nos échantillons dans des conditions environnementales recherchées pour étudier leur influence sur la corrosion des cornes d'éclateurs étudiés.
- **Le permascop** : il a été utilisé pour mesurer l'épaisseur de la couche de Zinc de l'acier galvanisé.
- **L'analyseur Carbon-Sulfur CS800** : ce dernier dispositif a été utilisé dans le but de déterminer le taux de carbone et de soufre dans les échantillons étudiés.

#### II.2.1. Utilisation de la chambre microclimat KESTERNICH

Cette chambre est utilisée pour déterminer la corrosion des matériaux. La mise en service de l'appareil KESTERNICH de contrôle de la résistance à la corrosion, selon les normes DIN 50 017/50 018 est soumise au mode d'emploi suivant.

##### II.2.1.a. Mode d'emploi de la chambre microclimat KESTERNICH

Il faut remplir le bac de fond de l'appareil en position ouverte avec la quantité d'eau distillée prescrite par les normes en utilisant 4 litres d'eau distillée et 2 litres de glycérine. Puis, on accroche les pièces à tester aux dispositifs de suspension à l'aide de crochets en verre et on ferme l'appareil. On règle la température de test souhaitée à 40°C en utilisant les boutons appropriés du dispositif de commande et de réglage. On branche l'appareil sur une prise de courant 220 V et on le met en marche. La touche à bascule s'allume pour indiquer que l'appareil est en position de marche ("EIN"). L'appareil est maintenant opérationnel.

Après l'analyse, on rince les pièces à l'eau, puis on utilise un chiffon doux. On évacue l'eau distillée du bac de fond, puis on nettoie soigneusement les pièces où on vérifie s'il ya arrachement de couche d'oxyde.



**FigureII.3** : Chambre microclimat KESTERNICH.

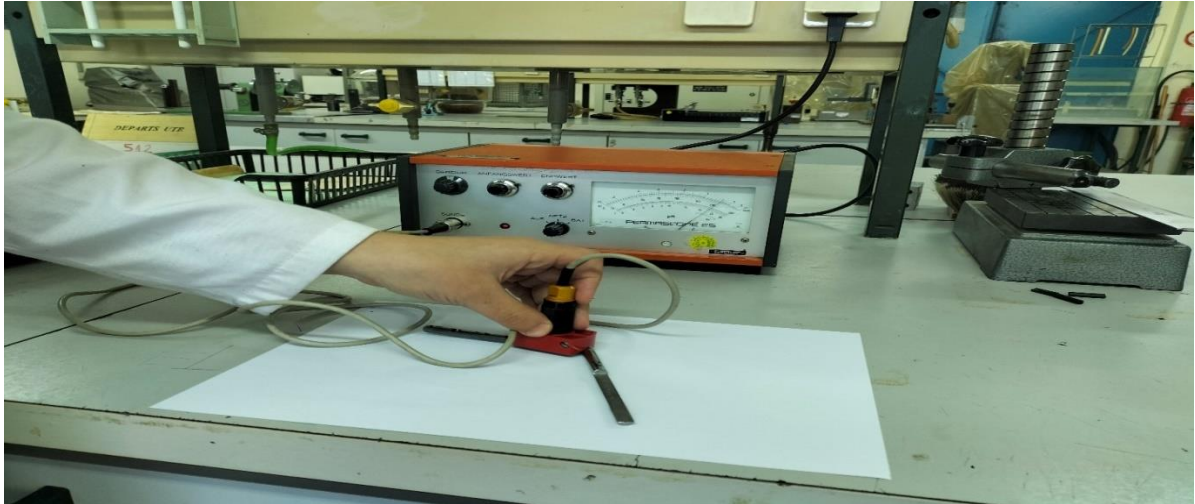
### II.2.1.b. Conditions Expérimentales

La chambre microclimat KESTERNICH a été configurée pour recréer des conditions environnementales spécifiques. La température à l'intérieur de la chambre a été fixée à 40°C, tandis que l'humidité a été maintenue à un niveau constant de 98%. Ces paramètres ont été choisis pour simuler des conditions extrêmes qui peuvent accélérer les processus de corrosion.

### II.2.2. Utilisation du PERMASCOPE

Les permascopes de la série ES8 sont utilisés pour une application de mesure non destructive, rapide et précise des revêtements non magnétiques, qu'ils soient métalliques ou non, sur des matériaux supports ferromagnétiques tels que le cuivre, le chrome dur, le cadmium, le zinc, l'étain, le plomb, la phosphatation, les peintures, les lacs, les émaux, les matières synthétiques et le caoutchouc appliqués sur du fer ou de l'acier. Ces permascopes se basent sur le principe de l'induction magnétique, où une sonde unipolaire ou bipolaire est appliquée sur le revêtement, créant ainsi un circuit magnétique avec le support ferreux où la couche agit comme un entrefer. La réluctance du circuit est directement liée à l'épaisseur de la couche, et les variations de réluctance causées par les variations d'épaisseur sont converties par la sonde permascopie et affichées en micromètres ( $\mu\text{m}$ ) ou millimètres (mm) sur le galvanomètre.

Ce procédé de mesure, connu sous le nom de PERMASCOPE, est réputé pour sa grande précision et il est largement utilisé dans différents secteurs de la production et de la recherche.



**Figure II.4 : PERMASCOPEES8.**

### II.2.3. Utilisation de l'ELTRA CS800 Carbon-Sulphur Determinator

Le Carbon-Sulfur Determinator CS800 a été conçu pour l'analyse d'une grande variété d'échantillons, qu'ils soient sous forme de métaux, de matériaux en poudre, de copeaux, de fragments, voire même de quelques substances liquides telles que des métaux ferreux, le ciment, le caoutchouc, le plastique, le sol, les cendres, etc...

Le principe de mesure repose sur la combustion de l'échantillon et la mesure des gaz générés par absorption infrarouge. Les matériaux couramment analysés sont le charbon, les cendres, les aciers, le ciment, le sol, le caoutchouc, etc.

Pendant la combustion, le carbone (C) et le soufre (S) dans l'échantillon se transforment en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et en dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Les températures de combustion habituelles se situent entre 1250°C et 1400°C pour les échantillons de ciment. La combustion se fait sous un courant d'oxygène, qui sert également de gaz de transport. Un régulateur électronique maintient un débit constant à 180 L/h.

Des pièges à poussière et un absorbeur d'humidité veillent à ce que les cellules de détection infrarouge ne soient exposées qu'à des gaz propres. Les signaux provenant de ces cellules sont spécifiques et correspondent à la concentration de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) dans le mélange gazeux. Ils sont linéarisés, intégrés

électroniquement, puis affichés sous forme de pourcentage de CO<sub>2</sub> et de SO<sub>2</sub>. Les résultats sont indépendants du poids de l'échantillon grâce à la prise en compte de son poids, qui est enregistré dans l'appareil après avoir été pesé avant l'analyse. Les résultats accompagnés de la date, de l'heure, du numéro de l'échantillon, du poids, etc., peuvent être imprimés par l'imprimante intégrée.



**Figure II.5 :** CarbonSulphur Determinator ELTRA CS800.

### II.3. Méthodes expérimentales

En plus du matériel expérimental utilisé, nous avons employé plusieurs méthodes et techniques de mesure expliquées dans cette partie.

#### II.3.1.Préparation des échantillons

Pour mener à bien notre expérience, nous avons suivi une procédure détaillée afin d'exposer les échantillons à des conditions environnementales spécifiques dans la chambre microclimat KESTERNICH.

Après avoir sélectionné les cornes d'éclateurs de chaque type d'acier, les échantillons ont été soigneusement nettoyés pour éliminer toute contamination ou oxydation préexistante qui pourrait fausser les résultats de l'expérience.

Pour les cornes d'éclateurs de type K3 en acier ordinaire galvanisé, nous nous assurons de retirer entièrement la couche de zinc afin d'obtenir des résultats fiables. Une fois que la couche de zinc a été enlevée, les cornes d'éclateurs de type K3 sont prêtes pour la caractérisation de l'acier ordinaire. En revanche, pour les cornes d'éclateurs de type C3 en acier inoxydable austénitique, aucune étape de retrait de couche n'est nécessaire. Pour les copeaux découpés à partir des cornes d'éclateurs précédents, nous les plaçons dans des verres de montre, nous les lavons soigneusement pour éliminer toute graisse ou salissure éventuelle. Une fois que les copeaux sont propres, nous utilisons une étuve réglée à une température à 100°C pour les sécher.

Une fois les copeaux complètement secs, ils sont prêts à être utilisés pour l'analyse prévue.



Figure II.6 : Préparation des échantillons.

### II.3.2. Dosage du chrome par le titrage

Le titrage est une méthode précise et fiable pour le dosage du chrome et trouve des applications dans divers domaines, tels que l'analyse de l'eau, l'industrie chimique et l'industrie métallurgique.

Le titrage est une méthode couramment utilisée pour le dosage du chrome. Cette méthode consiste à ajouter une solution titrante appropriée au milieu réactionnel contenant le chrome à doser. Le titrant réagit avec le chrome présent, formant un produit de réaction qui peut être détecté à l'aide d'un indicateur coloré ou d'une méthode instrumentale. Le titrant est

ajouté progressivement jusqu'à ce que la réaction soit complète, ce qui est généralement indiqué par un changement de couleur au point d'équivalence. À ce stade, la quantité de titrant ajoutée est mesurée, ce qui permet de déterminer la concentration de chrome dans l'échantillon initial.

### II.3.2.a. Réactifs utilisés

- Solution de sel de Mohr  $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  : nous préparons cette solution avec 56.463 g de sel de Mohr dissout dans 500 cm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O, acidifier avec 60 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Volumer à 1000 cm<sup>3</sup> dans fiole jaugée avec de l'eau distillée.

- Diphénylamine :

Solution à 1% dans H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + chauffage.

### II.3.2.b. Mode opératoire

Pour réaliser le titrage du chrome dans un échantillon d'acier, nous procédons comme suit :

- nous plaçons 0,2 g d'acier dans un erlenmeyer de 500 cm<sup>3</sup>. Ensuite, nous ajoutons 20 mL d'un mélange d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) pour attaquer l'échantillon.

- nous introduisons quelques gouttes d'acide fluorhydrique (HF) pour éliminer le dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) sous forme volatile, suivi de l'ajout de 25 mL d'acide perchlorique (HClO<sub>4</sub>).

- après refroidissement, nous augmentons, progressivement la température sans atteindre l'ébullition, ce qui entraîne l'apparition rapide de fumées blanches d'oxyde de chrome (CrO<sub>3</sub>). La solution se transforme en une consistance sirupeuse et acquiert une teinte rouge orangée.

- nous maintenons le chauffage pendant environ 3 minutes après l'apparition de la couleur rouge orangée de (CrO<sub>3</sub>).

- nous laissons le mélange refroidir et nous ajoutons 50 ml d'eau. Nous laissons bouillir le mélange pendant 5 à 10 minutes pour éliminer les produits chlorés formés, de sorte qu'aucune odeur ne soit perceptible au-dessus de l'erlenmeyer à la fin de cette opération.

- après refroidissement, on ajoute 200 mL d'eau distillée froide, suivis de 30 mL d'acide phosphorique (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>).

- nous introduisons ensuite, la solution de sel de Mohr jusqu'à ce que la coloration jaune de (CrO<sub>3</sub>) s'affaiblisse considérablement. À ce stade, nous ajoutons 3 à 4 gouttes de diphénylamine en poursuivant la titration.

- La présence d'oxydants dans la solution entraîne rapidement l'apparition d'une coloration bleu-violet en présence de diphénylamine. Nous titrons jusqu'à ce que la coloration vire au

vert, ce qui indique le point de virage précis, à une goutte près. Il est à noter qu'un millilitre de solution de sel de Mohr à une concentration de 56,468 g/L équivaut à 25 mg de chrome.

### II.3.2.c. Calcul du pourcentage de Cr

$$\%Cr = \frac{\text{Volume de solution de sel de Mohr} \times 2 \times 2.5}{10}$$

Plus généralement

$$\%Cr = \frac{V \text{ sel de Mohr} \times 2.5}{\text{Prise} \times 1000} \times 100$$

Où

*Prise* : masse de prise d'essai en milligrammes (mg).

*V sel de Mohr* : en millilitres (mL).

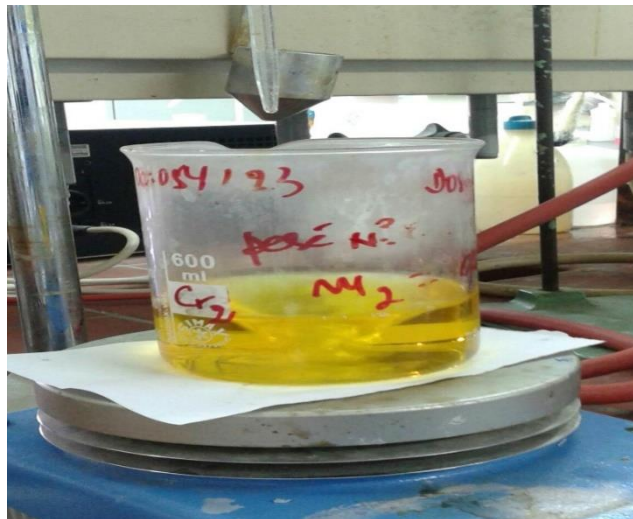


Figure II.7 : Titration de Chrome.

### II.3.3. Dosage du nickel par la complexométrie

Cette méthode dite de complexométrie est applicable pour déterminer le dosage du nickel à teneur supérieure à 4% dans les aciers (spéciaux) et les fontes ainsi qu'au nickel pur opéré sur des parties aliquotes.

#### II.3.3.a. Principe de la complexométrie

Le nickel est précipité sous forme de complexe en milieu alcalin par la diméthylglyoxime. L'acide tartrique maintient le fer en dissolution.

### II.3.3.b. Réactifs et matériels utilisés

#### -Les réactifs utilisés sont

- HCl (1/1),
- HNO<sub>3</sub> concentré,
- acide tartrique C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>6</sub>,
- Diméthylglyoxime à 1% dans l'éthanol.

#### -Matériel utilisé

- balance analytique,
- bécher,
- résistance chauffante,
- étuve,
- filtre en verre fritté.

### II.3.3.c. Mode opératoire

Dans un bécher FH de 500 ml, une prise contenant jusqu'à 0,03 g de nickel (pour une teneur de 2 à 3%, la pesée est d'environ 0,2 g) est placée, recouverte d'un couvre-objectif et dissoute dans 25 à 30 mL d'acide chlorhydrique (HCl) à parts égales. Le mélange est chauffé jusqu'à dissolution complète, le chauffage est poursuivi jusqu'à ce que le dégagement de bulles d'hydrogène cesse.

Les ions (Fe<sup>2+</sup>) ainsi que les carbures de nickel, de fer et d'autres métaux sont oxydés en ajoutant avec précaution 3 à 5 mL d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) concentré. Le mélange est chauffé jusqu'à ce que le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) cesse d'être dégagé. Le couvre-objectif est retiré, rincé, ainsi que les parois du bécher, avec de l'eau distillée, et dilué jusqu'à un volume de 150 mL.

Ensuite, 5 à 7 g d'acide tartrique sont ajoutés pour fixer les ions (Fe<sup>2+</sup>) dans un complexe interne, et la solution est alcalinisée en ajoutant de l'ammoniac (NH<sub>4</sub>OH) jusqu'à l'apparition d'une odeur. La solution doit rester complètement transparente, ce qui indique l'ajout suffisant d'acide tartrique. Si la solution devient trouble en présence de (NH<sub>4</sub>OH), de l'acide tartrique est ajouté jusqu'à ce que la solution devienne transparente.

Ensuite, de l'acide chlorhydrique dilué est ajouté jusqu'à obtention d'une réaction acide. En cas de présence de précipité, celui-ci est filtré à travers un filtre doux et lavé plusieurs fois avec de l'eau chaude.

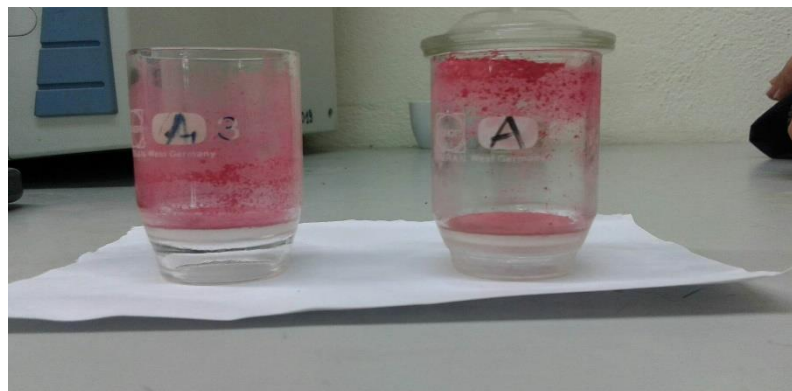
## Chapitre II Matériels utilisés et techniques d'étude de la corrosion des aciers C3 et K3

Le nickel ( $\text{Ni}^{2+}$ ) est précipité en ajoutant 18 à 20 mL de diméthylglyoxime (DMG), chauffé entre 80-90 °C, puis de l'ammoniaque  $\text{NH}_4\text{OH}$  est ajouté goutte à goutte en mélangeant avec une baguette en verre jusqu'au dégagement d'une odeur. L'ajout lent de  $\text{NH}_4\text{OH}$  favorise la formation de cristaux de couleur rouge plus gros, permettant au précipité de flotter en surface.



**Figure II.8 :** Formation des cristaux.

La solution est laissée à reposer pendant une heure, puis filtrée à travers un creuset filtrant préalablement séché et taré, lavé et séché à poids constant à 110 °C. Le précipité de  $(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_2)_2\text{Ni}$  est ensuite pesé.



**Figure II.9 :** Précipité de Nickel ( $(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_2)_2\text{Ni}$ ).

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé ainsi que les méthodes et techniques à suivre pour mener convenablement notre travail. Sachant qu'actuellement, on utilise plusieurs méthodes physico-chimiques d'analyse dans les entreprises industrielles et dans les laboratoires de recherche scientifique. Ces méthodes permettent de déterminer les teneurs des composants et celles des impuretés. Avant toute étude, il faut préparer rigoureusement les échantillons à étudier. Cette étape est fondamentale du processus analytique, les recherches ont montré que 30% de mauvais résultats obtenus sont causés par cette étape. La deuxième chose importante c'est de connaître le mode d'emploi du matériel utilisé pour avoir de bon résultat et surtout de protéger le matériel et de ne pas le détériorer. Il faut aussi connaître tous les produits chimiques à utiliser et le protocole à suivre pour atteindre les résultats attendus.

## *Chapitre III*

# *Caractérisation et corrosion des cornes d'éclateur de type C3 et K3*

Le choix d'un matériau pour une application donnée nécessite de s'assurer de ses propriétés et de sa conformité aux normes concordant à son utilisation. Pour cet effet, toute pièce reçue par l'entreprise Electro-Industries d'Azazga, doit passer par le laboratoire de l'entreprise pour la caractérisation et s'assurer qu'elle répond bien à leur demande. La connaissance de la composition chimique de la pièce n'est pas suffisante pour l'accepter et l'utiliser, mais il faut s'assurer aussi de sa durabilité dans ses conditions d'emploi, en particulier environnementales, notamment pour les systèmes destinés à travailler dans des atmosphères corrosives.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus et leurs interprétations lors de la caractérisation des deux types de cornes d'éclateurs en acier inoxydable C3 et en acier galvanisé K3. Dans la deuxième partie, nous avons utilisé la chambre microclimat KESTERNICH pour évaluer la corrosion des pièces étudiées dans des conditions atmosphériques corrosives.

### **III.1.Caractérisation des matériaux des cornes d'éclateurs étudiés**

Dans cette partie, nous avons évalué le taux de carbone, de soufre, de nickel et de chrome pour les deux aciers étudiés. Pour l'acier galvanisé, nous avons aussi vérifié la nature de la couche de revêtement après avoir déterminé son épaisseur.

#### **III.1.1. Caractérisation de la couche de revêtement de l'acier galvaniséK3**

Deux caractéristiques importantes à déterminer concernant le revêtement, la première est son épaisseur, la deuxième est sa nature.

##### **III.1.1.a.Détermination de l'épaisseur de la couche de revêtement**

L'épaisseur fait partie des critères importants de caractérisation d'un revêtement. Une couche minime sur une pièce est indispensable pour garantir les propriétés physiques, électriques, mécaniques ou esthétiques de la pièce.

Pour mesurer l'épaisseur du revêtement d'éclateur en acier galvanisé, nous avons utilisé un PERMASCOPE de la série ES8 décrit au chapitre précédent, dont le principe est basé sur l'induction magnétique. Après avoir enlevé une partie de la couche de revêtement sur une petite partie du matériau, nous mesurons l'induction magnétique du substrat pour un bon calibrage du permascop, nous réglons ce dernier puis on mesure l'épaisseur ( $e$ ) du revêtement dont la valeur obtenue est  $e=24\mu\text{m}$ .

### III.1.1.b. Analyse qualitative de la couche de revêtement

Pour évaluer la présence de zinc dans la couche de revêtement, nous avons plongé la corne d'éclateur dans une solution d'acide sulfurique (1/2). Ce dernier est couramment utilisé pour éliminer les dépôts de surface et permet d'exposer le matériau sous-jacent.

Une fois la réaction entre la corne d'éclateur et l'acide sulfurique terminée, nous avons ajouté du ferrocyanure de potassium ( $K_4Fe(CN)_6$ ) à la solution obtenue. Le ferrocyanure de potassium est un réactif utilisé pour détecter la présence de zinc dans une solution. Lorsqu'il réagit avec le zinc, il forme un précipité blanc caractéristique. Après l'ajout du ferrocyanure de potassium, nous avons observé une coloration blanchâtre dans la solution, ce qui indique la présence de zinc. Cette observation confirme que la couche de revêtement est bien une couche de zinc.

### III.1.2. Détermination du taux de carbone et de soufre par ELTRA CS800

L'analyse du taux de carbone et de soufre dans les deux échantillons peut être réalisée à l'aide d'un analyseur élémentaire comme l'ELTRA CS-800. Cet instrument est spécialement conçu pour mesurer le taux de ces deux éléments dans les matériaux.

#### III.1.2.a. Taux de carbone et de soufre dans l'acier ordinaire galvanisé

Pour déterminer le taux de carbone et de soufre dans cet acier, après avoir enlevé la couche de zinc et bien nettoyé l'échantillon. Nous avons placé ce dernier dans l'analyseur ELTRA CS-800. L'appareil effectue une combustion du matériau et mesure les quantités de carbone et de soufre. Pour limiter les erreurs, nous avons effectué trois mesures et nous avons déterminé l'écart type. Le tableau ci-dessous représente les résultats obtenus.

**Tableau III.1 :** Taux de carbone et de soufre dans l'acier galvanisé K3.

Désignation de l'échantillon	Masse (mg)	C %	S %	La moyenne	Ecart type
K3	$M_1 = 345.9$	0.0845	0.0129	C : 0,08500 S : 0,01253	C : 1,12 % S : 3,23 %
	$M_2 = 315.7$	0.0844	0.0126		
	$M_3 = 342.4$	0.0861	0.0121		

### III.1.2.b. Taux de carbone et de soufre dans l'acier inoxydable

Le taux de carbone et de soufre obtenus dans l'acier inoxydable en utilisant toujours l'analyseur ELTRA CS-800, et en effectuant trois mesures comme pour le matériau précédent et en calculant l'écart type. Les résultats obtenus sont donnés sur le tableau ci-dessous.

**Tableau III.2 :** Taux de carbone et de soufre dans l'acier inoxydable C3.

Désignation de l'échantillon	Masse (mg)	C %	S %	La moyenne	Ecart type
C3	M <sub>1</sub> : 308.1	0.0606	0.3358	C : 0,06100	C : 2,68 %
	M <sub>2</sub> : 306.5	0.0596	0.3509	S : 0.34843	S : 3,33 %
	M <sub>3</sub> : 349.6	0.0628	0.3586		

### III.1.2.c. Interprétation des résultats obtenus

Les résultats obtenus démontrent que la composition chimique des échantillons analysés est en conformité avec la norme DIN 17 440 pour l'acier inoxydable de type C3 et l'acier ordinaire galvanisé. Les pourcentages de carbone et de soufre respectent les exigences spécifiées par la norme.

L'écart type obtenu est entre 1.12% et 3.33%, il est proche de zéro ce qui montre que les résultats obtenus sont proches de la moyenne cela confirme la fiabilité de nos résultats.

### III.1.3. Détermination du pourcentage de nickel et de chrome dans l'acier inoxydable

L'objectif était de déterminer le taux de nickel et de chrome dans l'acier inoxydable de type C3, en analysant les concentrations de chrome et de nickel. Les résultats ont été obtenus en utilisant des méthodes de dosage et ont été comparés aux spécifications de la norme DIN 17 440.

#### III.1.3.a. Dosage de chrome dans l'acier inoxydable C3

Pour le dosage de chrome, nous procéderons par la méthode de titrage, expliquée dans le chapitre précédent. Nous utilisons deux échantillons de l'acier C3 l'un est de masse M<sub>1</sub>= 0.2007g et l'autre est de masse M<sub>2</sub>= 0.2020g. Les résultats obtenus sont portés sur le tableau suivant.

**Tableau III.3 :** Taux de chrome dans l'acier C3 obtenu par la méthode de titrage.

Désignation de l'échantillon	Masse (g)	V sel de Mohr (mL)	Pourcentage de Cr	La moyenne
C3	M <sub>1</sub> : 0.2007	V <sub>1</sub> : 13.8	17.18%	17.25%
	M <sub>2</sub> : 0.2020	V <sub>2</sub> : 14	17.32%	

### III.1.3.b. Dosage du nickel dans l'acier inoxydable C3

Afin de déterminer le pourcentage de nickel dans l'acier inoxydable C3, nous avons procédé par la complexométrie dont le mode opératoire est détaillé dans le premier chapitre. Dans le but de réduire les erreurs commises sur la mesure, nous avons pris deux échantillons l'un a une masse M<sub>1</sub> = 0.2028g et l'autre a une masse M<sub>2</sub> = 0.2022g. Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau ci-dessous

**Tableau III.4 :** Taux de nickel dans l'acier C3 obtenu par la complexométrie.

Désignation de l'échantillon	Masse (g)	Masse de creuset (g)	Pourcentage de Nickel	La moyenne
C3	M <sub>1</sub> : 0.2028	29.2699	9,32%	8.71%
	M <sub>2</sub> : 0.2022	30.1366	8,10%	

### III.1.3.c. Interprétation des résultats obtenus

Le tableau III.3 montre que le taux de chrome dans l'acier C3, obtenu par la méthode de titrage, est approximativement égal à 17.25%. De ces résultats nous constatons que les échantillons analysés répondent à la norme DIN 17 440, ou le taux de l'acier doit se situer entre 17.00% et 19.00%.

Concernant le dosage de nickel, l'analyse des deux échantillons de masse M<sub>1</sub> et de masse M<sub>2</sub> par complexométrie, ont permis de déterminer le pourcentage de cet élément dans l'acier C3 dont les valeurs sont respectivement de 9,32% pour la première mesure et de 8,10% pour la deuxième, données au Tableau III.4. La moyenne des pourcentages se situe aux environs de 8,71%. La comparaison de ce résultat avec les valeurs données par la norme DIN 17 440, situées entre 8,00% et 10,00%, montre bien, que les résultats répondent aux propriétés recherchées.

### III.2. Corrosion des cornes d'éclateurs en aciers K3 et C3

Après avoir bien nettoyé les deux types de cornes d'éclateurs, nous allons les suspendre à l'intérieur de la chambre microclimat KESTERNICH. Cette dernière a été réglée à une température 40°C et 98% d'humidité. Le choix de ces paramètres est dans le but de créer les conditions atmosphériques extrêmes d'exposition de ces matériaux à la corrosion.

La durée d'exposition pour le premier essai a été de 7 jours, ce qui correspond à une exposition équivalente à 7 années dans des conditions naturelles à l'extérieur. Puis, nous les avons remis une autre fois dans la chambre pendant sept autres jours, cela dans le but de voir l'évolution de la corrosion sur ces deux matériaux. Les échantillons ont été exposés au total 14 jours, pour prolonger leur exposition dans des conditions extrêmes. Cette procédure permettra de voir la résistance de ces deux types de matériaux à la corrosion après 14 ans.

Après la période d'exposition prévue, les cornes d'éclateurs ont été retirées de la chambre microclimat. Les échantillons ont ensuite été évalués visuellement pour détecter tout signe de corrosion ou de détérioration. Les résultats suivants ont été observés

#### III.2.1. Corrosion de l'acier ordinaire galvanisé de type K3



**Figure III.1 :** Corrosion de la corne d'éclateur type K3, après 7 jours dans un climat humide (98%) et à une température de 40°C.

### III.2.2. Corrosion de l'acier inoxydable type C3



**Figure III.2 :** Corrosion d'une corne d'éclateur type K3 après 7 jours dans un climat humide (98%) et à une température de 40°C.

### III.2.3. Interprétation des résultats obtenus

Des observations ont été effectuées pour comparer l'état des cornes d'éclateurs en acier ordinaire galvanisé de type K3 et en acier inoxydable de type C3. Les figures III.1 et III.2 montrent qu'après sept jours dans la chambre microclimatique des deux cornes, nous avons constaté que la corne en acier ordinaire galvanisé de type K3 a présenté une corrosion sous forme de petites piqûres. La corrosion peut être considérée comme un processus naturel de détérioration qui se produit lorsque le revêtement galvanisé est altéré quand l'acier est exposé à l'humidité. Après 14 jours cette corrosion n'a pas trop évolué. Cette corrosion dans certains endroits du matériau, peut être expliquée par la dégradation du revêtement qui revient à son épaisseur qui n'est pas uniforme et peut s'avérer insuffisante sur ces endroits.

Contrairement à la corne d'éclateur en acier ordinaire galvanisé, la corne d'éclateur en acier inoxydable C3 n'a montré aucun signe de corrosion.

**Conclusion**

Les résultats obtenus montrent que la composition chimique des échantillons analysés est conforme aux normes demandés. Les taux de carbone, de soufre, de chrome et de nickel sont dans les intervalles, garantissant ainsi la conformité du matériau aux exigences d'utilisation.

Les résultats obtenus pour le phénomène de la corrosion montrent que l'acier inoxydable de type C3 peut résister 14 ans ou plus à la corrosion et cela est due au taux de Ni et de Cr dans l'acier qui sont conforme à la norme DIN 17 440. Les résultats obtenus pour l'acier galvanisé ne sont pas satisfaisants. Le revêtement en zinc n'est pas uniforme ou présente des défauts de structure qui a provoqué la corrosion dans certains endroits de l'acier.

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

La corrosion des cornes d'éclateur en acier de type K3 et C3 dans les transformateurs électriques est un problème préoccupant qui peut entraîner une détérioration des performances et de la durabilité de ces équipements. Les travaux de mémoire réalisés au laboratoire centrale de l'entreprise Électro- Industries (EI) d'Azazga ont permis de mettre en lumière plusieurs éléments clés dans la compréhension du phénomène de corrosion en milieu agressif par le biais d'essais bien que ces essais ne soient pas totalement identiques aux conditions réelles rencontrées dans la nature ; ils permettent de tester simultanément plusieurs paramètres expérimentaux (température, taux d'humidité, matériaux, durée,...) .

Dans le cadre de cette étude, nous avons comparé la résistance à la corrosion de l'acier ordinaire galvanisé avec celle de l'acier inoxydable dans une chambre microclimatique simulant des conditions environnementales agressives. De plus, nous avons également examiné l'efficacité d'un revêtement de zinc en tant que mesure de protection contre la corrosion de ces cornes d'éclateur.

Le revêtement de zinc peut protéger l'acier grâce à la corrosion galvanique et que le revêtement peut agir comme barrière physique. Si la couche de zinc demeure intacte, le zinc sert de barrière physique contre l'humidité, et l'acier ne subira donc pas de corrosion. Bien que le zinc soit plus actif que l'acier, il est protégé par ses produits de corrosion, généralement le carbonate de zinc, et il se corrode plus lentement à l'extérieur que l'acier non protégé. Si la couche de zinc présente des imperfections ou elle est endommagée, l'acier ainsi exposé peut se corroder. Dans un tel cas, la corrosion galvanique n'offre aucune protection, au contraire, elle augmente le taux de corrosion du métal sous-jacent. Une fois que la majeure partie du zinc aura disparu. L'acier sera laissé sans protection et il peut être endommagé gravement par la corrosion par piqûres aux endroits où se trouvent les imperfections c'est le cas des cornes d'éclateurs en acier galvanisé de type K3. Les résultats de notre recherche ont démontré que l'application d'une couche de revêtement de zinc sur ce type d'éclateur n'est pas la solution la plus efficace et la plus économique dans ce cas.

En revanche, notre étude a révélé que l'utilisation de l'acier inoxydable type C3 présente des avantages significatifs par rapport à l'acier ordinaire galvanisé en termes de résistance à la corrosion. L'acier inoxydable, grâce à sa composition chimique spécifique, offre une protection intrinsèque contre la corrosion, même dans des environnements agressifs. Comparé à l'acier ordinaire galvanisé, l'acier inoxydable a montré une résistance supérieure à la corrosion lorsqu'il était soumis à des conditions sévères de température et d'humidité dans

## Conclusion générale

---

la chambre microclimat. Par ailleurs, l'épaisseur du revêtement de zinc a été identifiée comme une variable cruciale dans la prévention de la corrosion de la corne d'acier ordinaire. Nos résultats ont indiqué qu'une épaisseur adéquate de revêtement était nécessaire pour obtenir une protection optimale. Une épaisseur insuffisante pourrait entraîner une perméabilité du revêtement, permettant ainsi à l'humidité et aux agents corrosifs d'endommager la corne d'éclateur en acier ordinaire.

Les résultats obtenus dans cette étude révèlent des informations précieuses sur la performance des revêtements et la composition chimique des cornes d'éclateurs, aidant ainsi à orienter les efforts de développement de matériaux plus résistants à la corrosion et à optimiser leur utilisation dans diverses applications industrielles.

*Références bibliographiques et  
webographiques*

## Références bibliographiques

---

- [1] L. Jaubert, Thèse de doctorat, institut national des Sciences Appliqués, Lyon (2004).
- [2] P. Hartemann, Les métaux et la santé, *Hegel* 3, 244 (2021).
- [3] D. Landolt, *Corrosion and surface chemistry of metals* P F L Press, New York (2007).
- [4] H. Gueuné, Ph. Refait, M. Jeannin, R. Sabot, L. Paugam, J.B. Memet et E. Malard, *Matériaux & Techniques* 101, 502 (2013).
- [5] H. Derouf-Talbi, «Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (xc38) Par l'extrait aqueux de plantes sahariennes dans le milieu acide chlorhydrique 1M», Thèse de doctorat, soutenue à Tlemcen (2019).
- [6] J. Bénard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, *Métallurgie générale*, Masson Editeurs(1969).
- [7] D. Semin, «Exécution des structures métalliques : la norme EN 1090-2 Révision et compléments », no réf. Article : c2572. Editions T.I., (2021).
- [8] G. Murry, « Aciers. Généralités », *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, no M300, p. M300-1(1993).
- [9] [https://www.expondo.fr/inspirations/types-dacier/1 février 2021](https://www.expondo.fr/inspirations/types-dacier/1-fevrier-2021).
- [10] Alfred R. Akisanya, Udoka Obi, Neill C. Renton, *Materials Science And Engineering A* 535 281(2012).
- [11] Marco Breda, Massimo Pellizzari, Marco Frigo, 28, 331(2015).
- [12] H. Marouf« caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de laLiaison bimétallique Acier Ordinaire E36/Acier anti-usurenaxtra70 utilisé par l'unité Grue de Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation ».
- [13] A. Short, «Introduction to corrosion and its control, corrosion in the metals and its prevention, » National Corrosion Service, NPL, (2003).
- [14] P. Rothwell, «Corrosion phenomena in introduction, » NPL, (2003).
- [15] C. Casenave, «Etude de la protection contre la corrosion d'un alliage d'aluminium au moyen des systèmes de peinture contenant des inhibiteurs non chromatisés» Ecole Nationale supérieure de chimie Toulouse. Thèse de doctorat.(2004).
- [16] R. François, *Corrosion des matériaux dans l'industrie pétrolière ; Techniques de l'ingénieur* (2010).
- [17] A. Aldykiewicz, H. Isaacs et A. Davenport, *J. Electrochemical Society*, vol. 142, 3342(1995).
- [18] D. Landolt, « Corrosion et chimie de surfaces des métaux », Edition PressesPolytechniques et Universitaires Romandes(1997).
- [19] A. Col, M. Colombié, « Phénomènes de Corrosion, les différentes formes de corrosionAqueuse», Edition Dunod, (2010).

## Références bibliographiques

---

- [20] K. E. Heusler, D. Landolt, S. Trasatti, « Electrochemical corrosion nomenclature », Pure and Applied Chemistry 61,19-22 (1989).
- [21] J.C. Scully, « Corrosion. Protection. Principes fondamentaux », Edition Masson, Paris, p. 93(1995).
- [22] B. F. Brown, A. Agrawal, « Localized Corrosion », Edition R. W. Staehle, NACE, Houston, Texas(1974).
- [23] S. Kherraf, « Comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux. Influence de quelques inhibiteurs », Mémoire de Magister, Université de Skikda(2008).
- [24] A. Mansri, « Composites à base de copolymères et de bentonite pour la coagulation/floculation, rétention des polluants et pour l'inhibition de la corrosion », Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Boudiaf, Oran(2016).
- [25] J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet, P. Combrade, « Métallurgie. Du minerai au matériau », Edition Dunod, Paris, (2002).
- [26] A. Maillet, « Interactions argilite de Tournemire / fer métal en contexte in situ : résultats à 10 ans de contact », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers(2012).
- [27] Y. M. D. Abreu De Gonzales « Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone par l'association d'un sel de zinc et d'un acide phosphonique ; exploitation couplée des données électrochimiques et des analyses de surface » Thèse de Doctorat, I.N.P. de Toulouse, France (1995)
- [28] Khaled, « l'inhibition de la corrosion par des ions dithiolylium synthétisés », Mémoire de Magister, université de Ouargla(2009).
- [29] F. Bentiss, « Hétérocycles Pentaatomiques: Synthèses Organiques, Etudes des Propriétés Inhibitrices de la corrosion et des propriétés Complexantes », Habilitation A Diriger Des Recherches, Université des Science et Technologies de Lille(2006).
- [30] M. SerghiniIdrissi, « Étude du comportement électrochimique de l'acier C38 et l'acier Inoxydable UR45N dans différents milieux », Thèse de Doctorat, Université de Mohammed V Rabat, Maroc(2016).
- [31] G. Steele, «Filiform Corrosion on Architectural Aluminium, » Anti-corrosion Methods & Materials, vol. 41, n°11, 8-12(1994).
- [32] S. Zamfir, R. Vidu et V. Brînzoi, «Corrosion des matériaux,» Maison d'édition didactique et pédagogique, Romania(1994).
- [33] J. Khaled M. Al-Qahtani, Materials Chemistry and Physics, vol. 113, n11, 150(2009).

## Références bibliographiques

---

- [34] P. Bommersbach, «Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous influencé de la température et de conditions hydrodynamiques, caractérisation par techniques électrochimiques,» INSA de Lyon, Thèse génie des matériaux(2005).
- [35] P. Janssen Bennynck, M. Piens, Théorie de la corrosion, France (1979).
- [36] L.Darsouni, Étude de l'adhérence par indentation interfaciale et du comportement électrochimique des couches galvanisées Fer-Zinc de l'acier de type A9. Thèse de doctorat, universitébadjiMokhtar- Annaba (2018).
- [37] Smith, F.William, JavadHashemi, and Lawrence E. Murr. "Foundations of materials science and engineering." Fifth Edition, McGraw-Hill Education, Matériaux pour l'ingénierie (2017).
- [38] Lin, T. Y, and F. W. Liou. "Steel and composite structures behavior and design for firesafety." 2nd Edition, CRC Press (2017).
- [39] Callister, D.William, and G.David Rethwisch, "Materials Science and Engineering: An Introduction." 10th Edition, John Wiley& Sons(2017).
- [40] Guide de conception des réseaux électriques industriels 6 883 427/A, Schneider Electric.
- [41] Quentin Auzoux, Fissuration en relaxation des aciers inoxydables austenitiques - Influence de l'écroutissage sur l'endommagement intergranulaire, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris(2004).

## **Résumé**

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude porte sur la caractérisation et la corrosion atmosphérique de deux types de cornes d'éclateurs, l'un en acier inoxydable C3 et l'autre en acier galvanisé K3, utilisés dans les transformateurs électriques fabriqués à l'entreprise Electro-industries d'Azazga. Les résultats obtenus après caractérisation des deux aciers concordent bien aux normes demandées par l'entreprise. Les essais de corrosion, ont montré la résistance de l'acier C3 aux facteurs atmosphériques contrairement à l'acier K3 qui a présenté une corrosion en piqures qui évolue lentement après sept ans. Cela est dû à la discontinuité de la couche de Zinc ou à son vieillissement.

**Mots clés :** Acier galvanisé, acier inoxydable, transformateurs électriques, corrosion.

## **Abstract**

The work we carried out as part of this Master's thesis allowed us to better understand the characterization and atmospheric corrosion of two types of spark horns, one in C3 stainless steel and the other in K3 galvanized steel, used in electrical transformers manufactured at the Electro-industries company in Azazga. The results obtained after characterization of the two steels agree well with the standards required by the company. Corrosion tests have shown the resistance of C3 steel to atmospheric factors, unlike K3 steel, which presented pitting corrosion, which develops slowly after seven years. This is due to the discontinuity of the Zinc layer or its aging.

**Keywords:** Galvanized steel, stainless steel, electrical transformers, corrosion.