

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –  
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Assemblages Soudé et Matériaux

**Par** : KLETIN Moustafa Rahmen

### Sujet

Etude de la corrosion et la protection cathodique  
par anodes sacrificielles

Soutenu publiquement, le / 06 / 2023 , devant le jury composé de :

M/ CHIKH Abdelmajid	Pr	Université de Tlemcen	Président
M/ HADJOUI Abdelhamid	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
M/ GUENIFED Farouk Abdelhalim	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2022 /2023

## **Remercîment :**

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de mon mémoire de master.

Tout d'abord, Je souhaite adresser mes remerciements à ma famille pour leur soutien inconditionnel, leur amour et leur compréhension. Ma mère et mon père et mes frères .Leur encouragement constant m'a motivé à persévérer et à donner le meilleur de moi-même.

Un grand merci également à mes camarades de classe et à mes amis qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours académique. Leurs encouragements et leur soutien moral ont été d'une grande importance pour moi.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mon directeur de mémoire, Monsieur GUENIFED Farouk Abdelhalim, pour sa guidance, ses conseils éclairés et son soutien tout au long de ce projet. Sa disponibilité et son expertise ont été précieuses pour orienter mes recherches et améliorer la qualité de mon travail.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury de mémoire, monsieur CHIKH Abdelmajid et monsieur HADJOUI Abdelhamid, pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour leurs commentaires constructifs qui m'ont permis d'améliorer mon mémoire.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mes professeurs et enseignants qui m'ont transmis leurs connaissances et leur passion pour le domaine de l'assemblage soudés et matériaux. Leurs enseignements ont été une source d'inspiration pour approfondir mes recherches et élargir ma compréhension du sujet.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à ma recherche en partageant leurs connaissances, en répondant à mes questions et en participant à des discussions fructueuses. Leurs contributions ont enrichi mon travail et ont rendu cette expérience encore plus gratifiante.

Merci à tous ceux qui ont été présents à mes côtés lors de cette étape importante de ma vie académique. Votre soutien et vos encouragements ont été essentiels pour mener à bien ce mémoire de master.

## **Résumé :**

Ce mémoire se concentre sur le calcul de la consommation de masse des anodes sacrificielles, qui sont couramment utilisées dans les applications de protection cathodique pour prévenir la corrosion des structures métalliques. La consommation de masse des anodes sacrificielles est un facteur clé pour évaluer l'efficacité et la durabilité de ces anodes dans différents environnements corrosifs.

La méthode de calcul la plus couramment utilisée pour estimer la consommation de masse des anodes sacrificielles est basée sur l'équation de la loi de Faraday. Cette équation relie la quantité de matière consommée à l'intensité du courant électrique, la durée de la corrosion, le nombre d'électrons échangés et la constante de Faraday.

Cependant, il est important de noter que cette équation est une approximation et peut varier en fonction des conditions spécifiques de la réaction électrochimique. D'autres facteurs tels que la composition de l'anode sacrificielle, les caractéristiques de l'électrolyte et les conditions environnementales peuvent également influencer la consommation de masse réelle.

Ce mémoire examine également d'autres méthodes et modèles utilisés pour prédire la consommation de masse des anodes sacrificielles, tels que les approches basées sur la cinétique des réactions chimiques et les simulations numériques. Ces approches fournissent des informations plus détaillées sur la consommation de masse et permettent une optimisation plus précise de la conception des anodes sacrificielles.

En conclusion, le calcul de la consommation de masse des anodes sacrificielles est un aspect crucial de la protection cathodique. Comprendre les principes fondamentaux et les modèles de calcul associés permet de mieux évaluer l'efficacité des anodes sacrificielles et de prendre des décisions éclairées en matière de conception et de maintenance des structures métalliques.

**Mots clés :** anode sacrificielle. Protection cathodique. Corrosion. Masse.

**Abstract:**

This dissertation focuses on the calculation of the mass consumption of sacrificial anodes, which are commonly used in cathodic protection applications to prevent corrosion of metal structures. The mass consumption of sacrificial anodes is a key factor in evaluating the effectiveness and durability of these anodes in different corrosive environments.

The most commonly used method for estimating the mass consumption of sacrificial anodes is based on the equation of Faraday's law. This equation relates the amount of material consumed to the electrical current intensity, corrosion duration, number of electrons exchanged, and Faraday's constant.

However, it is important to note that this equation is an approximation and may vary depending on the specific conditions of the electrochemical reaction. Other factors such as the composition of the sacrificial anode, electrolyte characteristics, and environmental conditions can also influence the actual mass consumption.

This dissertation also examines other methods and models used to predict the mass consumption of sacrificial anodes, such as approaches based on chemical reaction kinetics and numerical simulations. These approaches provide more detailed information on mass consumption and allow for more accurate optimization of sacrificial anode design.

In conclusion, the calculation of mass consumption of sacrificial anodes is a crucial aspect of cathodic protection. Understanding the fundamental principles and associated calculation models enables a better assessment of the effectiveness of sacrificial anodes and facilitates informed decision-making regarding the design and maintenance of metal structures.

## ملخص:

تركز هذه المذكرة على حساب استهلاك الكتلة للأنودات الضحية، التي تُستخدم عادة في تطبيقات الحماية الكاثودية لمنع تآكل الهياكل المعدنية يعد استهلاك الكتلة للأنودات الضحية عاملاً رئيسياً في تقييم كفاءة ومتانة هذه الأنودات في بيئات تآكل مختلفة.

الطريقة الأكثر استخداماً لحساب استهلاك الكتلة للأنودات الضحية تستند إلى معادلة قانون فاراداي. تربط هذه المعادلة بين كمية المادة المستهلكة وشدة التيار الكهربائي ومدة التآكل وعدد الإلكترونات المتبادلة وثابت فاراداي.

ومع ذلك، من المهم ملاحظة أن هذه المعادلة هي تقريب وقد تتغير بناءً على ظروف التفاعل الكيميائي الكهروكيميائي المحددة. عوامل أخرى مثل تركيب الأنودة الضحية وخصائص الكهروليت والظروف البيئية يمكن أن تؤثر أيضاً على استهلاك الكتلة الفعلي.

يناقش هذا المقال أيضاً أساليب ونماذج أخرى تُستخدم لتوقع استهلاك الكتلة للأنودات الضحية، مثل النهج المستند إلى حركية التفاعلات الكيميائية والمحاكاة العددية. توفر هذه النهج تفاصيل أكثر عن استهلاك الكتلة وتمكن من تحسين تصميم الأنودات الضحية بدقة أكبر.

في الختام، يُعتبر حساب استهلاك الكتلة للأنودات الضحية جانباً حاسماً في الحماية الكاثودية. فهم المبادئ الأساسية والنماذج المرتبطة بالحساب يساعد على تقييم كفاءة الأنودات الضحية بشكل

**Remercîment :**

**Résumé :**

**Abstract:**

ملخص

**Liste des figures :**

**Liste des tableaux :**

**Introduction générale :**

**Sommaire:**

<b>Chapitre I : la production des pipelines</b> .....	3
<b>I.1 Introduction :</b> .....	4
<b>I.2 Matériaux pour les pipelines :</b> .....	4
<b>I.3 Méthodes de fabrication des pipelines :</b> .....	4
<b>I.3.1 Sans Soudure :</b> .....	4
<b>I.3.2 Fabrication De Tubes Soudes Longitudinalement :</b> .....	5
<b>I.3.3 Fabrication des tubes par soudure spirale :</b> .....	5
<b>I.4 Caractéristiques d'un pipeline :</b> .....	6
<b>I.5 Epaisseur de la paroi du pipe :</b> .....	6
<b>I.6 Méthodes d'assemblage des pipelines :</b> .....	8
<b>I.6.1 Le soudage bout à bout (BW) :</b> .....	8
<b>I.6.2 Connexions vissées ou filetées :</b> .....	9
<b>I.6.3 L'emboîtement (SW) :</b> .....	9
<b>I.7 Conclusion :</b> .....	9
<b>Chapitre II : la corrosion</b> .....	11
<b>II.1 Introduction:</b> .....	12
<b>II.2 Définition de corrosion :</b> .....	12
<b>II.2.1 La corrosion humide :</b> .....	12
<b>II.2.2 La corrosion sèche :</b> .....	12
<b>II.4 Potentiel d'électrode des métaux :</b> .....	13
<b>II.5 Electrode de référence :</b> .....	14
<b>II.6 Equilibre d'un métal dans une solution</b> .....	16
<b>II.7 Equilibre de deux métaux différents dans une solution</b> .....	17
<b>II.8 Diagramme de stabilité de l'eau</b> .....	17
<b>II.9 Diagramme tension- <i>pH</i> du fer :</b> .....	18
<b>II.10 Conclusion:</b> .....	20
<b>Chapitre III : lutte contre corrosion</b> .....	21

<b>III.1 Introduction :</b> .....	22
<b>III.2 Catégories d'alliages et domaines d'emploi :</b> .....	22
<b>III.2.1 Les aciers inoxydables :</b> .....	22
<b>III.2.2 Les alliages de cuivre :</b> .....	23
<b>III.2.3 Les alliages d'aluminium</b> .....	23
<b>III.2.4 Alliage de titan :</b> .....	23
<b>III.3 Prévention par une forme adaptée des pièces :</b> .....	24
<b>III.4.1 Les revêtements anodiques:</b> .....	26
<b>III.4.3 Les revêtements inorganiques non métalliques :</b> .....	26
<b>III.4.4 Revêtements organiques :</b> .....	27
<b>III.5 Protection par inhibiteurs :</b> .....	28
<b>III.5.1 Définition d'un inhibiteur :</b> .....	28
<b>III.5.2 Classification des inhibiteurs :</b> .....	28
<b>III.5.2.1 Par domaine d'application :</b> .....	29
<b>III.5.2.2 Par réaction électrochimique partielle</b> .....	29
<b>III.5.2.2.1 Les inhibiteurs anodiques :</b> .....	29
<b>III.5.2.2 Les inhibiteurs cathodiques :</b> .....	30
<b>III.5.2.3 Les inhibiteurs mixtes :</b> .....	30
.....	31
<b>III.5.3 Par Mécanisme Réactionnel :</b> .....	31
<b>III.5.3.1 Inhibition par adsorption et passivation :</b> .....	31
<b>III.5.3.2 Inhibition par précipitation d'un film :</b> .....	31
<b>III.5.3.3 Inhibition par élimination de l'agent corrosif :</b> .....	31
<b>III.6 Propriétés :</b> .....	32
<b>III.6.1 Abaissement de la vitesse de corrosion :</b> .....	32
<b>III.6.2 Conservation des caractéristiques physico-chimiques :</b> .....	32
<b>III.6.3 Stabilité :</b> .....	32
<b>III.6.4 Compatibilité avec le milieu :</b> .....	32
<b>III.6.5 Stabilité thermique :</b> .....	32
<b>III.6.6 Efficacité à faible concentration :</b> .....	32
<b>III.6.7 Utilisation permanente ou temporaire :</b> .....	33
<b>III.7 Mode d'action des inhibiteurs de corrosion :</b> .....	33
<b>III.7.1 Interposition d'une barrière :</b> .....	33
<b>III.7.2 Renforcement d'une barrière préexistante :</b> .....	33
<b>III.7.3 Formation d'une barrière par interaction chimique :</b> .....	33
<b>III.7.4 Stabilisation des films d'oxyde :</b> .....	34

<b>III.7.5 Participation aux réactions d'électrode :</b>	34
<b>III.8 Nature inhibiteurs :</b>	34
<b>III.8.1 Inhibiteurs organiques :</b>	34
III.8.1.1 Composés azotés :	34
III.8.1.2 Composés soufrés :	34
III.8.1.3 Composés oxygénés :	35
<b>III.8.2 Les inhibiteurs inorganiques :</b>	35
III.8.2.1 Inhibiteurs passivant :	35
III.8.2.2 Inhibiteurs non passivant :	35
<b>III.8.3 Choix d'un inhibiteur :</b>	35
<b>III.9 Mode d'expression de L'efficacité d'un inhibiteur de corrosion :</b>	36
<b>III.10 Les méthodes d'étude de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion :</b>	36
III.10.1 Mesure du potentiel de corrosion :	36
III.10.2 Courbes intensité-potentiel :	37
III.10.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) :	37
III.10.4 Techniques de surveillance en temps réel :	37
III.10.5 Analyse chimique :	37
<b>III.11 Protection électrochimique :</b>	37
<b>III.11.1 Protection cathodique :</b>	37
III.11.1.1 Protection par anode sacrificiel :	38
III.11.1.2 Protection par courant imposé :	39
III.11.1.2.1 Principaux domaines d'application :	40
<b>III.11.2 Protection anodique :</b>	41
<b>III.12 Conclusion :</b>	42
<b>Chapitre IV : étude de la protection cathodique par anodes sacrificielle au milieu marin.....</b>	<b>43</b>
<b>IV.1 Introduction:</b>	44
<b>IV.2 Les caractéristiques métalliques de pipeline et d'anode sacrificielle :</b>	44
<b>IV.3 La méthode utilisée pour calculer le nombre d'anode nécessaire pour protéger ce pipeline :</b>	44
<b>IV.4 Conclusion :</b>	47

**Conclusion générale**

**Liste des références**

## Liste des figures :

### Chapitre 1 :

Fig. I 1 Pipe sans soudure [1].....	5
Fig. I 2: Tube soudé bout à bout [1].....	5
Fig.I 3 Tube soudé en spirale (1) .....	5
Fig.I 4 les trois modes de fabrication des tubes soudés [1] .....	6
Fig.I 5 les diamètres d'un tuyau [1] .....	6
Fig.I 6 Épaisseur du tuyau [1].....	7
Fig. I 7 Méthodes d'assemblage des pipelines [1] .....	8
Fig. I 8 Joints soudés bout à bout. [1] .....	9

### Chapitre 2 :

FIG.II 1 Mesure du potentiel du métal par rapport à une électrode de référence [2].....	15
FIG.II 22 Correspondance des différentes électrodes de référence [4].....	16
FIG.II 3 Equilibre d'un métal dans une solution [3].....	16
FIG.II 4 Equilibre de deux métaux dans une solution [3].....	17
FIG.II 5 Diagramme de stabilité de l'eau [3] .....	18
FIG.II 6 Diagramme tension-pH du fer [3].....	19

### Chapitre 3 :

fig. III 2 exemple de prévention par une forme géométrique adaptée des pièces [5] .....	25
fig.III 3 classements d'inhibiteur de corrosion [5].....	29
fig.III 4 Diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentielle de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte. [5].....	31
fig.III 5 principe de la protection cathodique [5] .....	38
fig.III 6 exemple de protection cathodique par courant imposé [5].....	40
fig.III 7 Principe de la protection anodique d'un métal passivable : déplacement du potentiel dans le domaine passif correspondant à : $E_{pass} < E < E_{pit}$ . [1] .....	42

## Liste des tableaux :

### Chapitre 1 :

Tableau. I 1: Épaisseur de paroi de tuyau en acier au carbone [1] .....	7
Tableau. I 2 Engagement des threads American Standard et API [1] .....	9

### Chapitre 2 :

Tableau. II 1 Potentiels standards [2] .....	15
--	----

### Chapitre 3 :

Tableau. III 1 Quelques nuances classique d'aciers inoxydables avec leur composition en éléments majeurs [5] .....	22
--	----

### Chapitre 4 :

Tableau. IV 1 données des pipelines [6] .....	44
Tableau. IV 2 données de l'anode. [6] .....	44

## Liste des équations :

### Chapitre 2 :

Équation. I 1 :.....	13
Équation. I 2 :.....	13
Équation. I 3:.....	13
Équation. I 4:.....	14
Équation. I 5: .....	14
Équation. I 6: .....	17
Équation. I 7: .....	17
Équation. I 8: .....	17

### Chapitre 4 :

Équation. IV 1:.....	45
Équation. IV 2 :.....	45
Équation. IV 3: .....	45
Équation. IV 4: .....	46
Équation. IV 5: .....	46
Équation. IV 6: .....	46
Équation. IV 7: .....	47
Équation. IV 8: .....	47
Équation. IV 9: .....	47
Équation. IV 10: .....	47

## Liste d'abréviation :

$E$  : potentiel.

$R$  : est la constante des gaz parfaits ( $8,314570 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

$T$  : est la température en Kelvin.

$a$  : est l'activité chimique de l'oxydant et du réducteur (généralement équivalente à la concentration).

$F$  : est la constante de Faraday ( $96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

$n$  : est le nombre d'électrons impliqués dans la réaction.

$[\text{ox}]$  : représente la concentration de l'oxydant.

$[\text{red}]$  : représente la concentration du réducteur.

$f_c$  : est l'efficacité du revêtement basée sur l'expérience sur le terrain.

$I_r$  : est le courant nécessaire pour protection le pipeline.

$I_c$  : est la densité de courant.

$R_v$  : est la résistance à la terre de l'anode verticale

$A_l$  : est la longueur de l'anode plus le remblai

$A_d$  : est le diamètre de l'anode plus le remblai

$\rho$  : st la résistivité.

$da$  : durée de vie de l'anode individuelle

$u$  : facteur d'utilisation.

$s$  ; capacité électrochimique de l'anode.

$M$  : poids net total de l'anode sacrificielle nécessaire pour protéger le pipeline.

$dl$  : est la durée de vie de conception et  $W$  est le poids de l'anode.

## **Introduction général :**

Les pipelines jouent un rôle crucial dans le transport efficace et sécurisé des fluides tels que le pétrole, le gaz naturel et l'eau sur de longues distances. Cependant, l'un des défis majeurs auxquels ces infrastructures sont confrontées est la corrosion, qui peut entraîner des dégradations importantes et des coûts considérables.

La corrosion est un processus électrochimique indésirable qui altère la structure et les propriétés des matériaux métalliques utilisés dans la construction des pipelines. Elle est particulièrement préoccupante lorsque les pipelines sont exposés à des environnements agressifs, tels que les milieux marins.

Dans ce contexte, la protection cathodique par anodes sacrificielles se présente comme une solution efficace pour prévenir la corrosion dans les pipelines. Cette technique consiste à utiliser des anodes en métal plus réactif que les matériaux du pipeline, qui se corroderont volontairement pour protéger ces derniers.

L'objectif de ce mémoire est d'approfondir l'étude de la corrosion dans les pipelines et d'évaluer l'efficacité de la protection cathodique par anodes sacrificielles en tant que méthode de lutte contre ce phénomène. Nous explorerons les mécanismes de corrosion, les différentes méthodes de protection existantes et nous nous concentrerons particulièrement sur la protection cathodique par anodes sacrificielles en milieu marin.

En examinant les techniques de construction des pipelines, nous comprendrons les défis spécifiques liés à la prévention de la corrosion dès la conception et l'installation. Ensuite, nous analyserons les différents types de corrosion rencontrés dans les pipelines et les méthodes de détection et d'évaluation de la corrosion.

Nous étudierons également en détail le principe de fonctionnement de la protection cathodique par anodes sacrificielles, les matériaux utilisés et les facteurs qui influencent son efficacité. En outre, nous aborderons les aspects pratiques de la mise en œuvre de cette technique dans les pipelines et nous évaluerons les calculs nécessaires pour déterminer le nombre d'anodes et leur durée de vie.

En réunissant ces connaissances, nous pourrons mieux comprendre comment la protection cathodique par anodes sacrificielles peut être optimisée pour assurer une prévention efficace de la corrosion dans les pipelines, en minimisant les risques pour l'intégrité des infrastructures et en réduisant les coûts d'entretien.

En conclusion, cette étude contribuera à approfondir notre compréhension de la corrosion dans les pipelines et à évaluer les avantages et les limitations de la protection cathodique par anodes sacrificielles en tant que méthode de lutte contre ce phénomène. Ces connaissances sont essentielles pour garantir la durabilité et la fiabilité des infrastructures de transport de fluides, notamment dans des environnements marins exigeants.

# **Chapitre I : la production des pipelines**

## **I.1 Introduction :**

Le pipeline est un dispositif conçu pour acheminer des matières fluides, telles que des liquides, des gaz ou des mélanges polyphasiques, sur de grandes distances sous pression. Il s'agit d'un système industriel composé de tubes et d'accessoires, comme des robinets, des vannes et des compresseurs, qui sont souvent organisés en réseau.

## **I.2 Matériaux pour les pipelines :**

Une variété de matériaux est utilisée pour fabriquer des tuyaux, la liste complète serait assez longue. Parmi ces matériaux, on retrouve le béton, le verre, le plomb, le laiton, le cuivre, le plastique, l'aluminium, la fonte, l'acier au carbone et les alliages d'acier. Étant donné la diversité de choix, il peut être déconcertant de sélectionner le matériau approprié pour répondre à un besoin spécifique. Une compréhension approfondie de l'utilisation prévue du tuyau est essentielle

Dans ce mémoire, nous nous concentrerons principalement sur les tuyaux en acier au carbone, qui sont le matériau le plus couramment utilisé dans l'industrie de la tuyauterie.

## **I.3 Méthodes de fabrication des pipelines :**

Différentes techniques peuvent être utilisées pour fabriquer des tuyaux en acier au carbone, chacune donnant au tuyau des caractéristiques spécifiques. Ces caractéristiques incluent la résistance, l'épaisseur de paroi, la résistance à la corrosion, ainsi que les limites de température et de pression. Par exemple, des tuyaux ayant la même épaisseur de paroi mais fabriqués par des méthodes différentes peuvent présenter des variations de résistance et de limites de pression. Les méthodes de fabrication couramment utilisées comprennent les tuyaux sans soudure, les tuyaux soudés bout à bout et les tuyaux soudés en spirale.

### **I.3.1 Sans Soudure :**

Un tuyau sans soudure est créé en perçant une billette d'acier solide, presque fondue, à l'aide d'un mandrin pour obtenir un tuyau sans joints ni soudures. Le processus de fabrication d'un tuyau sans soudure est illustré dans la figure 1.1.

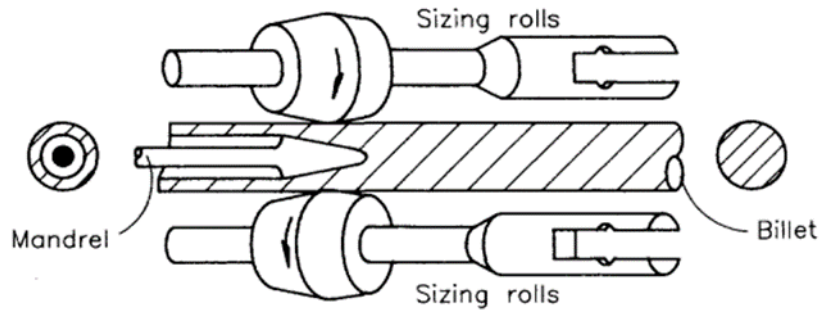


Fig. I 1 Pipe sans soudure [1]

### I.3.2 Fabrication De Tubes Soudés Longitudinalement :

Pour fabriquer un tuyau soudé bout à bout, une plaque d'acier chaude est alimentée à travers des façonneurs qui la plient en une forme circulaire creuse. Les deux extrémités de la plaque sont ensuite serrées avec force pour créer une couture ou un joint fusionné. La figure 1.2 représente la plaque d'acier au début du processus de formation des tubes soudés bout à bout.

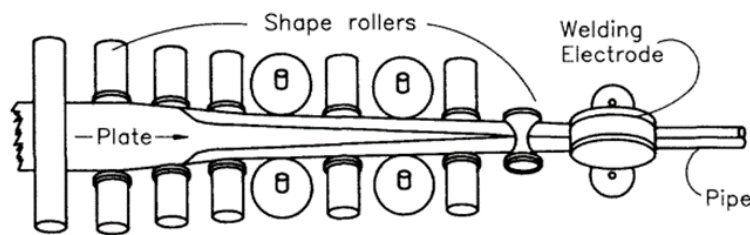


Fig. I 2: Tube soudé bout à bout [1]

### I.3.3 Fabrication des tubes par soudure spirale :

La méthode la moins courante parmi les trois est le tuyau soudé en spirale. Ce type de tuyau est formé en tordant des bandes de métal en forme de spirale, comme un ruban de barbier, puis en soudant les bords lorsqu'ils se rejoignent pour former une couture. Cependant, en raison de ses parois minces, ce type de tuyau est limité aux systèmes de tuyauterie à basse pression. La figure 1.3 représente un tuyau soudé en spirale tel qu'il apparaît avant le soudage.



Fig.I 3 Tube soudé en spirale (1)

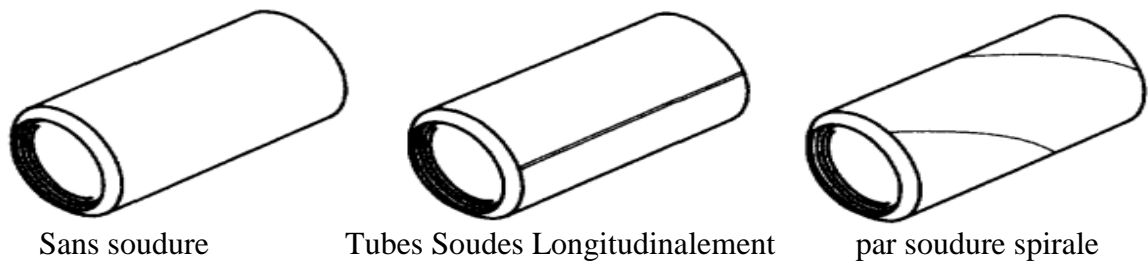


Fig. 4 les trois modes de fabrication des tubes soudés [1]

#### I.4 Caractéristiques d'un pipeline :

En effet, tout comme les méthodes de fabrication diffèrent, il existe également différentes façons de classer les tuyaux. Un tuyau est identifié par :

- la taille nominale du tuyau
- $D_o$  le diamètre extérieur
- $D_i$  le diamètre intérieur

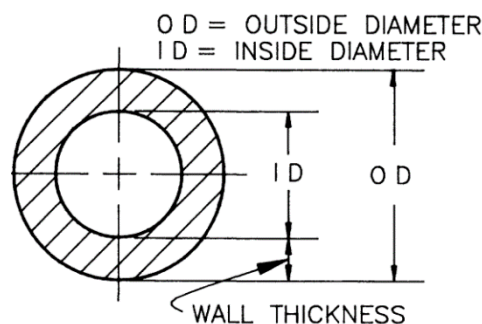


Fig. 5 les diamètres d'un tuyau [1]

#### I.5 Epaisseur de la paroi du pipe :

L'épaisseur de paroi est un terme utilisé pour décrire l'épaisseur du métal utilisé pour fabriquer un tuyau. Elle est également couramment appelée poids du tuyau. À l'origine, les tuyaux étaient fabriqués dans des poids standard connus sous les noms de standard, extra fort et double extra fort. Cependant, avec le développement de nouveaux procédés chimiques et l'évolution des produits ayant des propriétés corrosives, des températures élevées et des pressions extrêmes, de nombreuses sélections supplémentaires d'épaisseurs de paroi ont été développées pour les tuyaux.

Ces sélections supplémentaires d'épaisseurs de paroi, maintenant appelées nomenclatures, permettent de choisir un tuyau répondant aux exigences précises nécessaires à un fonctionnement sûr. Ces différentes épaisseurs de paroi garantissent une résistance et une

durabilité appropriées pour des conditions de fonctionnement spécifiques. Elles permettent de faire face à des environnements corrosifs, des températures élevées ou des pressions extrêmes. La variation d'épaisseur de paroi peut être illustrée par différents tuyaux qui ont des épaisseurs de paroi différentes, comme le montre la figure 1.6. Cette variation permet de sélectionner le tuyau adapté pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application, assurant ainsi un fonctionnement sécurisé et efficace du système de tuyauterie.

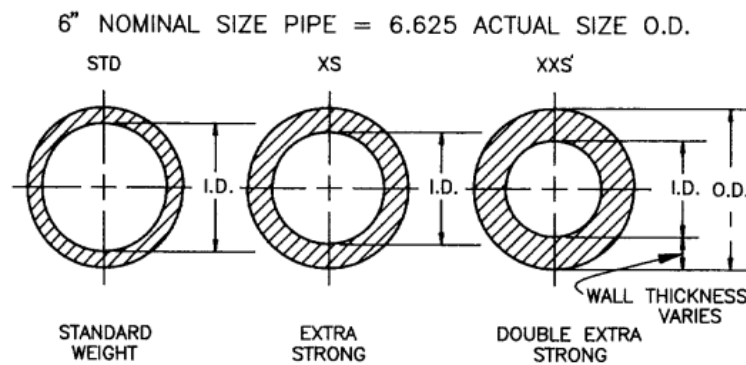


Fig. 1 6 Épaisseur du tuyau [1]

Effectivement, comme indiqué dans le tableau 1.1, la taille nominale d'un tuyau ne correspond pas au diamètre extérieur réel ou au diamètre intérieur d'un tuyau de 12" et moins.

Tableau. 1 1: Épaisseur de paroi de tuyau en acier au carbone [1]

Diamètre nominal de pipe		Diamètre extérieur		Standard		Extra fort		Double extra fort	
In.	mm	In.	mm	In.	mm	In.	mm	In.	mm
2	50.8	2.375	60.3	-154	3.912	-218	5.53	-436	11.07
3	76.2	3.5	88.9	-216	5.486	-300	7.62	-552	15.24
4	101.6	4.5	114.3	-237	6.02	-337	8.58	-674	17.12
6	152.4	6.625	168.3	-280	7.12	-432	10.79	-864	21.94
8	203.2	8.625	219	-322	8.17	-500	12.70	-875	22.22
10	254	10.75	273	-365	9.25	-500	12.70	1.00	25.4
12	304.8	12.75	323.9	-375	9.525	-500	12.70	1.00	25.4
14	355.6	14	355.6	-375	9.525	-500	12.70		
16	406.4	16	406.4	-375	9.525	-500	12.70		
18	457.2	18	457.2	-375	9.525	-500	12.70		

La taille nominale est simplement une méthode pratique pour référencer un tuyau. Cependant, pour les tuyaux de 14" et plus, ils sont identifiés par leur mesure extérieure réelle. Le tableau 1.1 présente des diamètres de tuyau et des épaisseurs de paroi typiques.

La formule suivante peut être utilisée pour calculer le diamètre intérieur (ID) d'un tuyau :

$$ID = OD - (2 \times \text{épaisseur de paroi}) \quad [1]$$

Avant de sélectionner un tuyau, il est essentiel de prêter une attention particulière à des facteurs tels que le matériau du tuyau, les tolérances de température et de pression, la résistance à la corrosion, etc. L'achat et l'installation de tuyaux qui ne répondent pas aux exigences minimales peuvent présenter des dangers pour la sécurité et la vie des personnes. De plus, l'utilisation de tuyaux qui dépassent largement les spécifications requises peut entraîner des dépenses excessives.

Il est donc crucial de prendre en compte tous ces aspects lors de la sélection et de l'utilisation de tuyaux afin de garantir la sécurité, la performance et l'efficacité du système de tuyauterie, tout en évitant les risques potentiels et les coûts inutiles.

### **I.6 Méthodes d'assemblage des pipelines :**

Il existe plusieurs méthodes couramment utilisées pour assembler des tuyaux. Parmi celles-ci, nous allons nous concentrer sur les trois méthodes les plus répandues dans les systèmes de tuyauterie en acier au carbone :

- le soudage bout à bout (BW)
- le vissage (Scrd)
- L'emboîtement (SW),

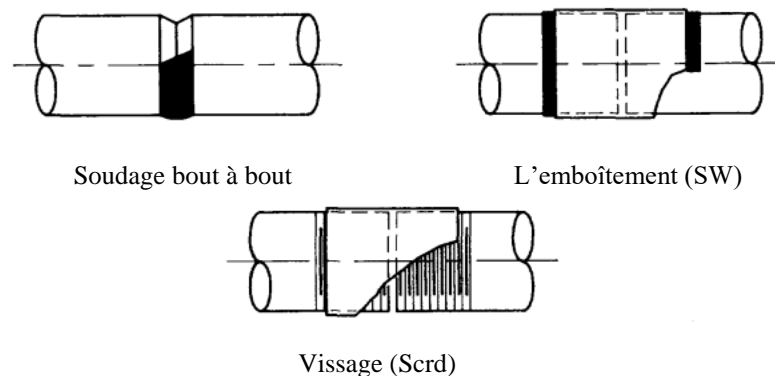


Fig. I 7 Méthodes d'assemblage des pipelines [1]

#### **I.6.1 Le soudage bout à bout (BW) :**

Lorsqu'un joint soudé bout à bout est réalisé, les extrémités des tuyaux sont biseautées avant d'être soudées ensemble. Les extrémités biseautées (BE) sont coupées ou meulées pour avoir un bord effilé plutôt que d'être coupées d'équerre.

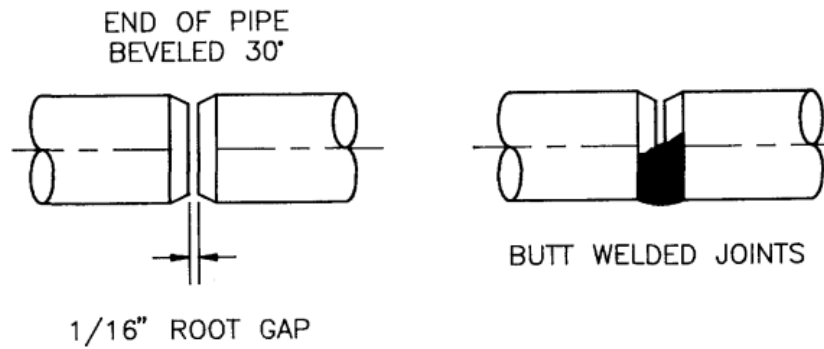


Fig. I 8 Joints soudés bout à bout. [1]

### I.6.2 Connexions vissées ou filetées :

la connexion à extrémité filetée (TE) est une méthode courante pour raccorder les tuyaux, principalement utilisée pour les tuyaux de 3" et moins. Cette méthode est également appelée "tuyau vissé". Elle implique l'utilisation de rainures coniques coupées dans les extrémités des tuyaux, permettant ainsi l'assemblage facile des tuyaux et des raccords sans nécessiter de soudure ou d'autre moyen de fixation permanent.

THREAD ENGAGEMENT	DIMENSIONS : INCHES - MILLIMETERS			
	PIPE SIZE		THREAD ENGAGEMENT	
	INCHES	MM	INCHES	MM
<p>SCREWED</p>	1/2	13	1/2	13
	3/4	20	9/16	14
	1	2.54	11/16	18
	1 1/2	38	11/16	18
	2	50.8	3/4	20
	2 1/2	63.5	15/16	24
	3	76.2	1	25.4

Tableau. I 2 Engagement des threads American Standard et API [1]

### I.6.3 L'emboîtement (SW) :

L'emboîtement des pipelines, également appelé la chaîne de pipelines, fait référence à une technique de traitement des données qui consiste à connecter plusieurs étapes ou opérations de traitement les unes après les autres, formant ainsi une séquence ou une chaîne de traitements. Chaque étape du pipeline effectue une opération spécifique sur les données d'entrée et passe les résultats à l'étape suivante.

### I.7 Conclusion :

En conclusion, la modélisation des pipelines offre une approche structurée et flexible pour la résolution de tâches complexes de traitement et d'analyse des données. Elle permet une

modularité, une réutilisation du code, une facilité d'expérimentation et une parallélisation des opérations, ce qui se traduit par une amélioration de l'efficacité, de la productivité et des performances des flux de travail de modélisation.

# **Chapitre II : la corrosion**

## **II.1 Introduction:**

La corrosion est un phénomène préoccupant qui touche de nombreux secteurs industriels et représente un défi majeur en termes de maintenance, de sécurité et de durabilité des infrastructures. Dans ce chapitre, nous explorerons les aspects clés de la corrosion, en examinant ses mécanismes, ses effets et les méthodes de prévention.

## **II.2 Définition de corrosion :**

Est un processus naturel de détérioration des matériaux, en particulier des métaux, par réaction chimique avec leur environnement. Elle peut se produire dans des conditions humides ou sèches.

### **II.2.1 La corrosion humide :**

La corrosion électrolytique, connue également sous le nom de corrosion par immersion, survient lorsqu'un matériau est exposé à un environnement contenant de l'eau ou de l'humidité. L'eau joue un rôle essentiel en tant qu'électrolyte, permettant ainsi la réalisation de réactions chimiques. Au cours de ce processus, des réactions électrochimiques se déclenchent entre le matériau métallique, l'eau et les ions présents dans l'environnement, ce qui entraîne la détérioration progressive du matériau.

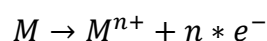
### **II.2.2 La corrosion sèche :**

La corrosion atmosphérique, quant à elle, se produit lorsque le matériau est exposé à des gaz corrosifs ou à des atmosphères sèches contenant des substances chimiques réactives. Dans ce cas, la corrosion résulte principalement de réactions chimiques directes entre le matériau et les gaz corrosifs, sans nécessiter la présence d'eau ou d'humidité.

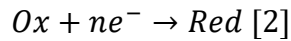
Il convient de souligner que ces deux formes de corrosion peuvent se produire simultanément dans certaines conditions, car l'humidité présente dans l'air peut agir comme un déclencheur pour la corrosion atmosphérique.

## **II.3 Principe de la corrosion électrochimique :**

La corrosion d'un métal tel que le fer correspond à sa transformation de l'état atomique à l'état ionique, selon la réaction. De manière générale, la corrosion d'un métal se produit par une réaction d'oxydation :



Afin de préserver la neutralité du milieu, les électrons libérés par la dissolution du métal doivent être consommés par une deuxième réaction qui peut être représentée par les réactions, selon l'électrolyte présent. De manière générale, cette réaction peut être schématisée par :



#### II.4 Potentiel d'électrode des métaux :

Les courants électriques échangés à l'interface entre un métal et un électrolyte sont régis par des différences de potentiel. Chaque réaction électrochimique est associée à un potentiel d'électrode, tel que décrit par l'équation de Nernst [2]:

$$E = E_0 - \left(\frac{R*T}{n*F}\right) * \ln(a_{red}) \quad (1)$$

$$E = E_0 + \left(\frac{R*T}{n*F}\right) * \ln(a_{ox}) \quad (2)$$

Dans ces équations, l'activité (a) est généralement équivalente à la concentration. Ainsi, nous pouvons réécrire les équations comme suit:

$$E = E_0 + \left(\frac{R*T}{n*F}\right) * \ln(ox) \quad (3)$$

Où :

- E0 représente le potentiel standard (ou normal) en volts par rapport à une électrode de référence.
- R est la constante des gaz parfaits (8,314570 J\*K<sup>-1</sup> \* mol<sup>-1</sup>).
- T est la température en Kelvin.
- a est l'activité chimique de l'oxydant et du réducteur (généralement équivalente à la concentration).
- F est la constante de Faraday (96485 C\*mol<sup>-1</sup>).
- n est le nombre d'électrons impliqués dans la réaction.
- [ox] représente la concentration de l'oxydant.
- [red] représente la concentration du réducteur.

Le potentiel standard de la réaction  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$  est généralement pris comme référence, et donc égal à zéro. L'électrode standard à hydrogène est utilisée comme électrode de référence officielle pour mesurer les potentiels d'électrode.

En appliquant la loi de Nernst aux réactions. Nous obtenons :

$$E_1 = E_{01} + \left(\frac{RT}{nF}\right) * \ln Mn \quad (4)$$

$$E_2 = E_{02} + \left(\frac{RT}{nF}\right) * \ln ox \quad (5)$$

Selon la convention, la corrosion se produit lorsqu'a  $E_2$  est supérieur à  $E_1$ .

### **II.5 Electrode de référence :**

En pratique, il n'est pas directement possible de mesurer le potentiel d'une électrode métallique lorsqu'elle est plongée dans un électrolyte. Toutefois, il est possible de mesurer la différence de potentiel entre une électrode métallique et une électrode de référence en contact avec le même électrolyte. Cette mesure est réalisée en créant une pile électrochimique.

Dans le domaine industriel, différentes électrodes de référence sont utilisées, lesquelles diffèrent de l'électrode standard à hydrogène (ESH) utilisée en laboratoire de recherche. Par exemple, dans les canalisations de transport d'hydrocarbures, l'électrode cuivre-sulfate de cuivre saturé (Cu/CuSO<sub>4</sub>) est souvent utilisée comme électrode de référence. Dans les environnements marins, l'électrode de référence Ag/AgCl est couramment employée.

Ces électrodes de référence alternatives ont été développées pour répondre aux besoins spécifiques des différentes applications industrielles. Elles permettent d'obtenir des mesures fiables de la différence de potentiel électrode-électrolyte, ce qui est essentiel pour évaluer et surveiller les processus de corrosion dans des conditions réelles.

En utilisant ces électrodes de référence appropriées, il devient possible de mesurer et de surveiller les potentiels d'électrode dans des environnements spécifiques, tels que les canalisations de transport d'hydrocarbures ou les eaux de mer. Cela permet de détecter les conditions propices à la corrosion et de prendre des mesures préventives pour assurer la protection des infrastructures et des équipements contre les effets néfastes de la corrosion.

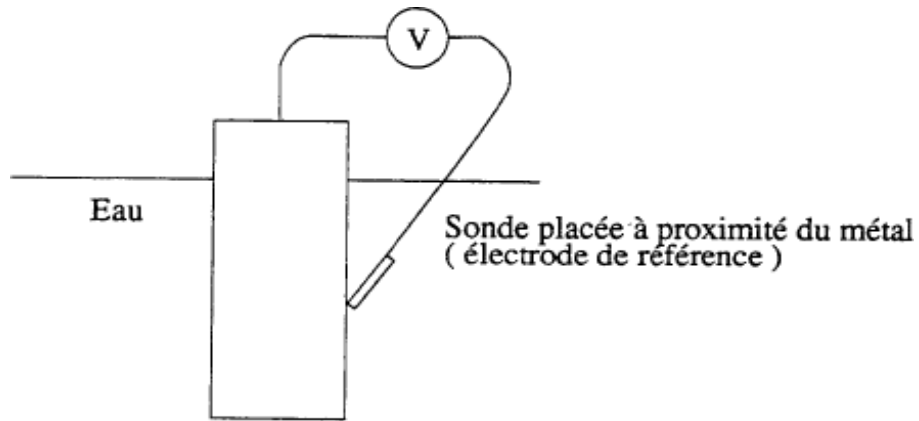


FIG. II 1 Mesure du potentiel du métal par rapport à une électrode de référence [2]

Le tableau suivant donne les potentiels standards des principales réactions électrochimiques :

Tableau. II 1 Potentiels standards [2]

Electrode		Potentiel par rapport à l'électrode d'hydrogène (V)
Or	$\text{Au} / \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1,50 Métaux
Platine	$\text{Pt} / \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+1,20 Nobles
Argent	$\text{Ag} / \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0,80
Oxygène	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- / 4\text{OH}^-$	+0,40
Cuivre	$\text{Cu} / \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,34
Inox - Duplex		0 (après qq jours)
Hydrogène	$2\text{H}^+ / \text{H}_2 + 2\text{e}^-$	0
Plomb	$\text{Pb} / \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,13
Nickel	$\text{Ni} / \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,26
Fer	$\text{Fe} / \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,447
Chrome	$\text{Cr} / \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,74
Zinc	$\text{Zn} / \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,76
Titane	$\text{Ti} / \text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^-$	-1,63
Auminium	$\text{Al} / \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,66
Magnésium	$\text{Mg} / \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,37

Le schéma ci-après représente la correspondance entre les différentes électrodes de référence couramment utilisées

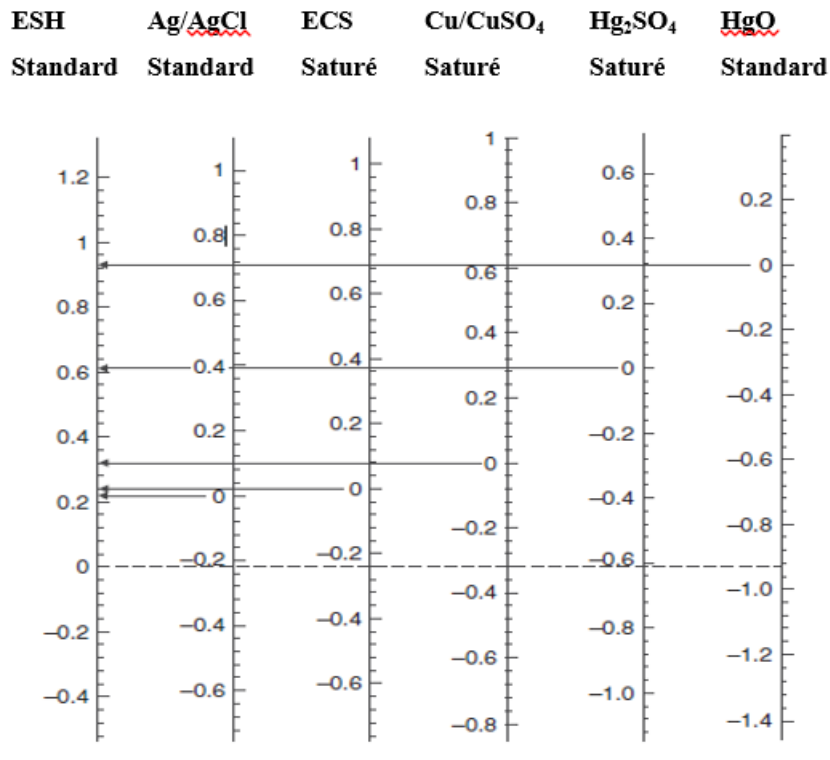
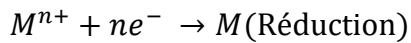
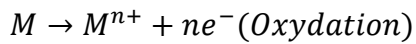


FIG.II 22 Correspondance des différentes électrodes de référence [4]

## II.6 Equilibre d'un métal dans une solution

Il y a équilibre entre le métal ses ions et ses électrons selon les deux demi réactions :



Et avec établissement d'un potentiel entre le métal et la solution

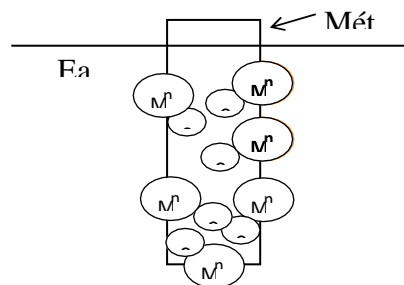


FIG.II 3 Equilibre d'un métal dans un solution [3]

## II.7 Equilibre de deux métaux différents dans une solution

Chaque métal a son propre potentiel dans la solution, le métal M1 représenté dans la figure suivante qui a le plus tendance à s'ioniser, a un potentiel plus faible que le métal M2.

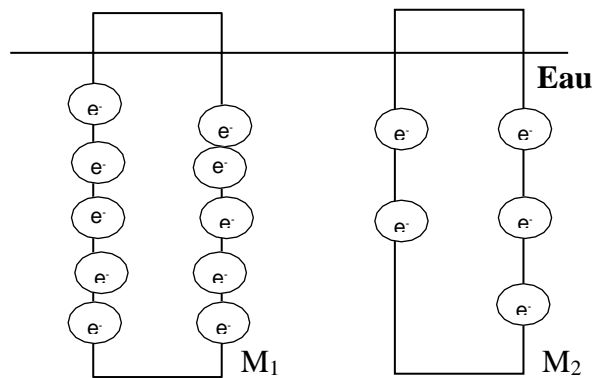
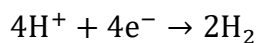
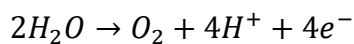


FIG.II 4 Equilibre de deux métaux dans une solution [3]

## II.8 Diagramme de stabilité de l'eau

Les diagrammes tension-pH permettent de prédire les réactions thermodynamiquement possibles lorsqu'on met en présence différents réactifs ou solutions, ainsi que de connaître les espèces prédominantes une fois l'équilibre établi.

Lorsqu'on considère l'eau comme solvant à température ordinaire, elle se décompose en dihydrogène et en dioxygène selon les deux demi-réactions suivantes :



En appliquant la loi de Nernst aux réactions lorsque la pression d'oxygène et d'hydrogène est égale à 1 atm, on obtient :

$$E(11) = 1.230 - 0.059pH \quad (6)$$

$$E(12) = -0.059pH \quad (7)$$

$$E = (V/E^0) \quad (8)$$

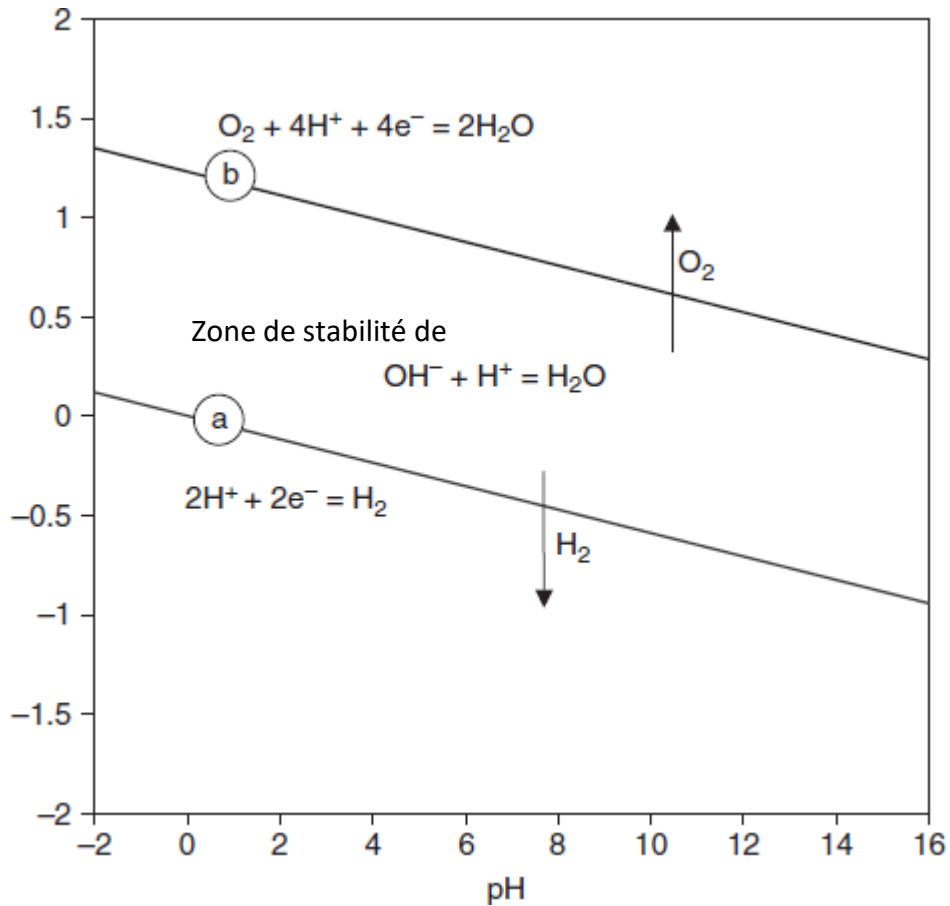


FIG.II 5 Diagramme de stabilité de l'eau [3]

## II.9 Diagramme tension- *pH* du fer :

Les diagrammes de "Marcel Pourbaix", également connus sous le nom de diagrammes tension-*pH*, présentent sur un plan E-*pH* les plages où un élément existe ou prédomine. Ces diagrammes sont construits à partir de données thermodynamiques [4].

Le domaine d'immunité correspond à la plage de potentiel où le métal est thermodynamiquement inattaquable en l'absence de courant extérieur. Cet état est généralement observé pour les métaux nobles tels que l'or et le platine. Pour les autres métaux, il est nécessaire de réduire leurs potentiels afin d'atteindre cet état. C'est le principe fondamental de la protection cathodique.

Le domaine de passivité indique que le métal est attaqué, mais il peut être protégé par la formation d'une couche protectrice d'oxyde ou d'hydroxyde. Cette couche limite la corrosion du métal et le protège contre l'attaque chimique.

Le domaine de corrosion représente la plage de potentiel où le métal est attaqué et se corrode. Dans cette région, la réaction de corrosion du métal est favorable et peut se produire en présence d'un environnement corrosif.

Ces informations fournissent des indications précieuses pour comprendre le comportement des métaux dans différents milieux et pour concevoir des stratégies de protection contre la corrosion.

La figure suivante représente le diagramme tension-pH du fer on ne considérant que les corps solides Fe, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à 25°C:

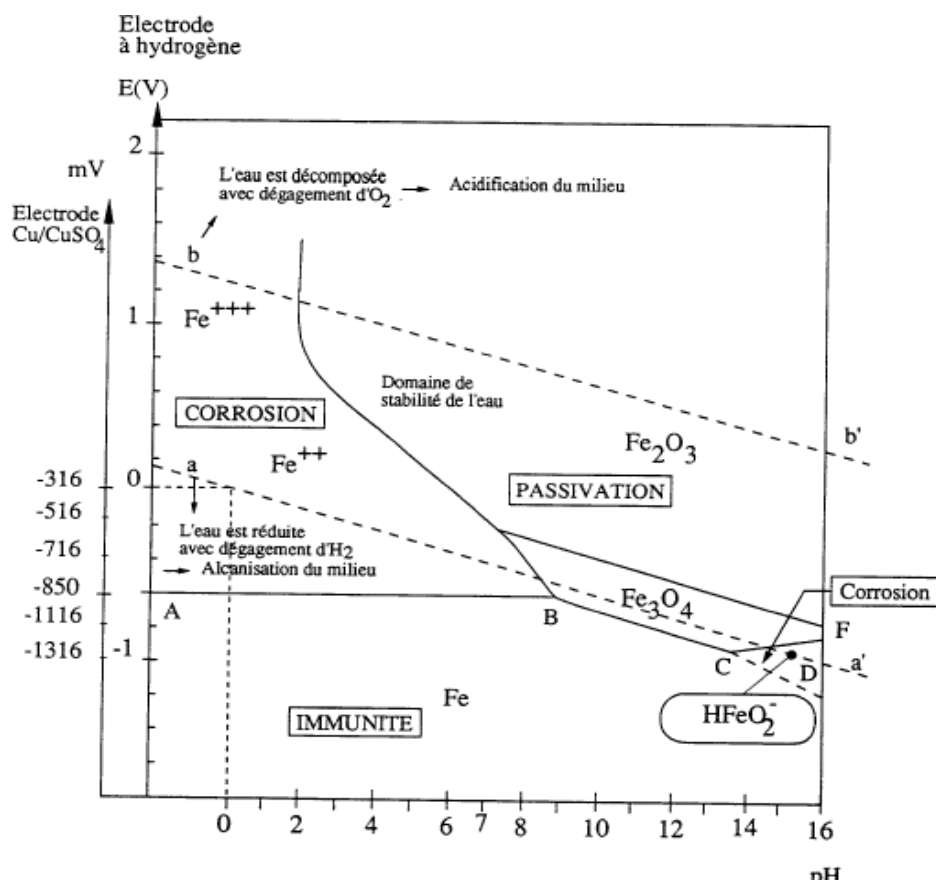


FIG.II 6 Diagramme tension-pH du fer [3]

En effet, de manière générale, la corrosion d'un métal par l'eau se produit lorsque le domaine d'immunité du métal et le domaine de stabilité de l'eau ne se superposent pas. En d'autres termes, si les plages de potentiel où le métal est thermodynamiquement inattaquable ne se

chevauchent pas avec la plage de potentiel où l'eau est stable, alors la corrosion peut se produire.

Cependant, lorsque le domaine d'immunité du métal et le domaine de stabilité de l'eau ont une partie commune, cela signifie que le métal est thermodynamiquement protégé dans cette plage de potentiel et qu'il ne subira pas de corrosion en présence d'eau.

Cela met en évidence l'importance de la compatibilité entre le potentiel du métal et les conditions du milieu environnant, en particulier l'eau, pour déterminer si la corrosion peut se produire ou non.

### **II.10 Conclusion:**

En conclusion, ce chapitre sur la corrosion met en évidence l'importance de comprendre ce processus destructeur qui affecte les matériaux métalliques. La corrosion est un phénomène complexe influencé par de multiples facteurs, tels que l'environnement, la composition des matériaux et les réactions électrochimiques.

## **Chapitre III : lutte contre corrosion**

### III.1 Introduction :

Il est essentiel de considérer la prévention de la corrosion dès la phase de conception d'une installation. En effet, prendre des mesures préventives au bon moment permet d'éviter de nombreux problèmes, notamment dans des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent entraîner des conséquences graves pour les personnes et l'environnement. Lutter contre la corrosion implique l'utilisation de plusieurs méthodes, notamment :

- Concevoir des pièces métalliques adaptées pour prévenir la corrosion.
- Faire un choix judicieux des matériaux pour prévenir la corrosion.
- Utiliser des revêtements de protection contre la corrosion.
- Utiliser des inhibiteurs pour protéger contre la corrosion.
- Utiliser la protection électrochimique contre la corrosion.

Avant d'explorer ces différentes méthodes, nous commencerons par passer en revue les principales catégories d'alliages et leurs domaines d'application.

### III.2 Catégories d'alliages et domaines d'emploi :

#### III.2.1 Les aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables sont des alliages d'acier contenant au moins 12% de chrome. Leur composition peut varier en ajoutant d'autres éléments tels que le nickel, le molybdène, le titane, etc. Les aciers inoxydables sont appréciés pour leur résistance à la corrosion et leur durabilité, ainsi que pour leur aspect esthétique. Ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications, notamment :

*Tableau. III 1 Quelques nuances classiques d'aciers inoxydables avec leur composition en éléments majeurs [5]*

Nuance	Dénomination AFNOR / AISI	Composition
Austénitique	Z 2 CN 18.10* / 304 L	Cr 18%, Ni 10%, Fe
	Z 2 CND 17.12 / 316 L	Cr 17%, Ni 12%, Mo 1,5%, Fe
	Z 2 CNNb 25.20	Cr 25%, Ni 20%, Nb 0,25%, Fe
Ferritique	Z 6 C 13	Cr 13%, Fe
	Z 8 CD 17.01	Cr 17%, Mo 1%, Fe
	Z 1 CD 26.01	Cr 26%, Mo 1%, Fe
Austéno-ferritique	Z 5 CNDU 21.08	Cr 21%, Ni 8%, Mo 2,5%, Fe

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est principalement attribuable à la formation d'une couche passive à leur surface. Cette couche se forme naturellement à l'air et est composée d'un oxyde riche en chrome d'une épaisseur mince d'environ 10 nm, mais qui offre une excellente résistance. Il est donc crucial d'utiliser ces matériaux dans des conditions qui préservent cette passivité, car toute détérioration localisée de cette couche protectrice entraîne inévitablement des phénomènes de corrosion localisée.

### **III.2.2 Les alliages de cuivre :**

Présentant une bonne résistance à la corrosion, ces matériaux sont adaptés aux environnements tels que l'eau de mer, l'eau douce froide ou chaude, ainsi que les acides non oxydants dilués et déaérés. Toutefois, il est préférable d'éviter leur utilisation en présence d'acides oxydants, d'ammoniac et d'amines, d'eau à circulation rapide (pouvant entraîner une érosion-corrosion), d'acide sulfhydrique, de soufre et de sulfures.

### **III.2.3 Les alliages d'aluminium**

La résistance à la corrosion de l'aluminium repose sur la formation d'une couche protectrice d'alumine ( $Al_2O_3$ ). Ainsi, l'aluminium est fréquemment utilisé dans des environnements comprenant de l'ammoniac, de l'eau distillée, des atmosphères industrielles ou urbaines, du soufre, des sulfures et des fréons. Cependant, il est important d'éviter son utilisation dans des milieux contenant des acides forts, des substances caustiques, du mercure et ses sels, de l'eau de mer ou de l'eau contenant des métaux lourds tels que le fer ou le cuivre.

### **III.2.4 Alliage de titan :**

Tout comme l'aluminium, le titane doit sa résistance à la corrosion à la formation d'une couche protectrice d'oxyde ( $TiO_2$ ). Il est largement utilisé dans l'aéronautique et l'industrie, notamment en présence d'eau de mer, d'acide nitrique, de solutions oxydantes telles que  $FeCl_3$  et  $CuSO_4$ , ainsi que d'hypochlorites. Cependant, il est important d'éviter son utilisation dans des milieux tels que l'acide fluorhydrique (HF), le fluor ( $F_2$ ), l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), les acides

organiques, les solutions alcalines chaudes, les halogénures fondus, ainsi que dans l'air, l'azote ou l'hydrogène à haute température.

Le titane est très sensible aux dommages causés par l'hydrogène, et la formation d'hydrures de titane peut se produire rapidement au-dessus de 250°C (ou à des températures plus basses en cas de chargement cathodique), ce qui affaiblit le matériau.

### **III.3 Prévention par une forme adaptée des pièces :**

Pour réduire les risques de corrosion et améliorer la durée de vie des objets, il est possible d'adopter des formes adaptées aux conditions d'utilisation. Voici quelques recommandations couramment utilisées pour limiter les risques de corrosion, en fonction du type de corrosion anticipé :

. Pour les pièces en contact avec des liquides tels que l'eau :

Assurez-vous d'avoir un système de drainage efficace pour éviter l'accumulation d'humidité. Par exemple, cela peut être crucial pour les toitures métalliques ou les récipients métalliques.

2. Pour les conduites et les systèmes de circulation de fluides :

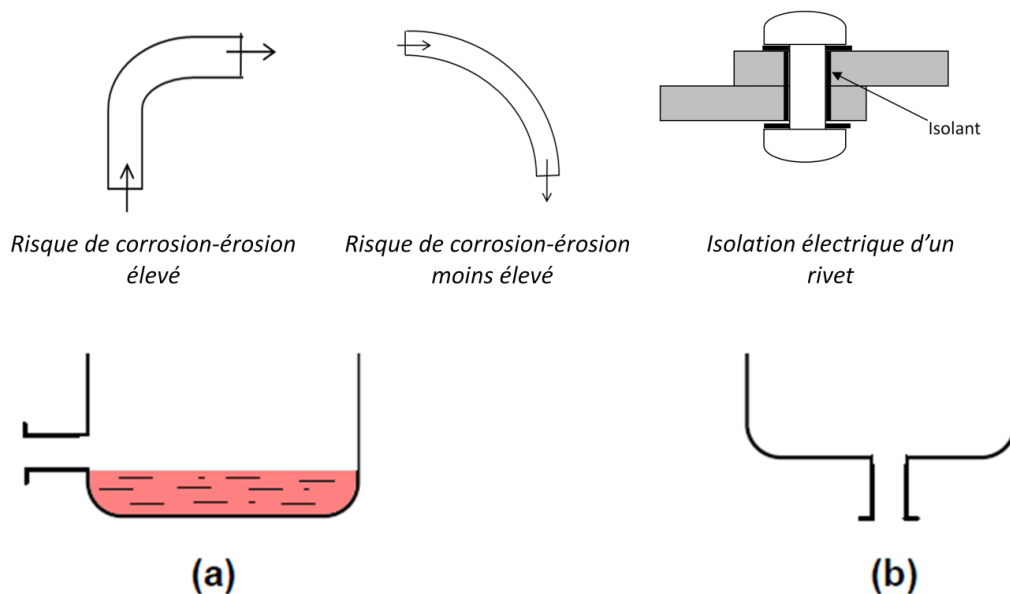
Facilitez l'écoulement des fluides en concevant des tracés de conduites appropriés. Cela permet de prévenir les risques de corrosion-érosion et de corrosion par cavitation.

3. Pour les surfaces en contact avec différents métaux :

Choisissez des matériaux appropriés pour éviter les risques de corrosion galvanique, qui se produit lorsque le métal le moins noble est attaqué par le métal plus noble. Vous pouvez également séparer les métaux en utilisant des isolants électriques pour éviter leur contact direct.

En suivant ces recommandations et en adaptant la conception des objets aux conditions d'utilisation, il est possible de réduire efficacement les risques de corrosion et d'améliorer leur durabilité. Pour réduire les risques de corrosion et améliorer la durée de vie des objets, il est possible d'adopter des formes adaptées aux conditions d'utilisation.

Voici recommandations couramment utilisées pour limiter les risques de corrosion, en fonction du type de corrosion anticipé :



Prévention par la forme du récipient. (a) : mauvais. (b) : correct.

Fig. III 1 exemple de prévention par une forme géométrique adaptée des pièces [5]

1. Pour les pièces en contact avec des liquides tels que l'eau :

- Assurez-vous d'avoir un système de drainage efficace pour éviter l'accumulation d'humidité.

Par exemple, cela peut être crucial pour les toitures métalliques ou les récipients métalliques.

2. Pour les conduites et les systèmes de circulation de fluides :

- Facilitez l'écoulement des fluides en concevant des tracés de conduites appropriés. Cela permet de prévenir les risques de corrosion-érosion et de corrosion par cavitation.

3. Pour les surfaces en contact avec différents métaux :

- Choisissez des matériaux appropriés pour éviter les risques de corrosion galvanique, qui se produit lorsque le métal le moins noble est attaqué par le métal plus noble. Vous pouvez également séparer les métaux en utilisant des isolants électriques pour éviter leur contact direct.

En suivant ces recommandations et en adaptant la conception des objets aux conditions d'utilisation, il est possible de réduire efficacement les risques de corrosion et d'améliorer leur durabilité.

#### **III.4 Protection par revêtement : Revêtement métallique :**

### **III.4.1 Les revêtements anodiques:**

Les revêtements anodiques sont utilisés lorsque le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. Un exemple courant de ce procédé est la galvanisation, où une couche de zinc est appliquée sur le métal de base. En cas de défaut du revêtement, une pile locale se forme, et le revêtement se corrode de manière cathodique pour protéger le métal de base. Ainsi, tant qu'il y a une quantité suffisante de revêtement présent, la protection est assurée.

Les revêtements cathodiques sont utilisés lorsque le métal protec

Dans les revêtements anodiques, l'épaisseur du revêtement joue un rôle crucial plutôt que l'absence de défaut. En général, l'épaisseur du revêtement anodique se situe entre 100 et 200  $\mu\text{m}$ . C'est cette épaisseur qui fournit une protection adéquate contre la corrosion, en formant une barrière entre le métal de base et l'environnement corrosif. Par conséquent, il est important de maintenir une épaisseur de revêtement appropriée pour assurer une protection efficace contre la corrosion.

### **III.4.2 Les revêtements cathodiques:**

Les revêtements cathodiques sont utilisés lorsque le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. Par exemple, l'application d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. Dans ce cas, si le revêtement présente un défaut, une pile de corrosion se forme où le métal de base devient l'anode et se corrode plus rapidement, tandis que le revêtement agit en tant que cathode.

La taille relative de la surface anodique (métal de base) par rapport à la surface cathodique (revêtement) peut accélérer la corrosion du métal de base en cas de défaut du revêtement. Ainsi, lorsque le revêtement cathodique est compromis, il est essentiel de maintenir la continuité du revêtement pour éviter les zones anodiques exposées. La présence d'une continuité dans le revêtement assure que la plus grande partie de la surface reste cathodiquement protégée, réduisant ainsi les risques de corrosion du métal de base.

Par conséquent, dans les revêtements cathodiques, la continuité du revêtement est un facteur essentiel pour assurer une protection efficace du métal de base contre la corrosion.

### **II.4.3 Les revêtements inorganiques non métalliques :**

Les revêtements de conversion chimique de surface sont formés par une réaction chimique entre le métal et un milieu spécifique. Des méthodes courantes telles que la phosphatation, l'anodisation et la chromatation sont utilisées pour créer ces couches de conversion. Elles

améliorent la résistance à la corrosion du métal et favorisent l'adhérence de revêtements ultérieurs.

Les couches étrangères au substrat sont fabriquées par des procédés de dépôt qui ne nécessitent pas de réaction chimique avec le substrat métallique lui-même. Par exemple, dans le procédé d'émaillage, une couche de matériau étranger au substrat, comme une couche de céramique, est déposée sur la surface métallique. Dans ce cas, la composition chimique du revêtement est indépendante de celle du substrat métallique.

Ainsi, les revêtements de conversion chimique et les couches étrangères au substrat sont deux approches distinctes pour protéger et améliorer les propriétés des surfaces métalliques. Les revêtements de conversion chimique modifient la surface métallique elle-même, tandis que les couches étrangères au substrat ajoutent une couche de matériau différent sur la surface métallique.

#### **III.4.4 Revêtements organiques :**

Les revêtements organiques sont utilisés comme barrière entre le métal et le milieu électrolytique, offrant une protection contre la corrosion. Ils peuvent être classés en trois catégories principales :

1. Revêtements en bitume : Ces revêtements sont couramment utilisés pour la protection des structures enterrées, telles que les pipelines. Le bitume forme une couche étanche qui empêche l'eau et l'humidité de pénétrer et d'entrer en contact avec le métal.

2. Revêtements polymériques : Les revêtements polymériques sont très répandus et peuvent être appliqués de différentes manières, telles que la pulvérisation de poudre, l'application au pistolet, le laminage ou l'immersion. Leur efficacité dépend de leur résistance chimique intrinsèque dans le milieu corrosif et de l'absence de défauts dans le revêtement.

3. Peintures et vernis : Les peintures et vernis sont des liquides opaques qui forment une couche protectrice sur la surface métallique. Certains types de peintures contiennent des pigments qui agissent comme inhibiteurs de corrosion, offrant une protection supplémentaire. Les peintures protègent le métal en agissant par différents mécanismes, tels que la formation d'une barrière

physique, la suppression des réactions électrochimiques et l'inhibition des processus de corrosion.

Les peintures sont d'une importance capitale dans la protection contre la corrosion, car elles sont largement utilisées pour protéger de nombreux objets en acier et d'autres matériaux contre les effets néfastes de la corrosion.

### **III.5 Protection par inhibiteurs :**

#### **III.5.1 Définition d'un inhibiteur :**

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques qui sont ajoutées en petite quantité à un milieu corrosif pour réduire la vitesse de corrosion du matériau métallique. Ils agissent en interférant avec les réactions chimiques qui conduisent à la corrosion, ce qui ralentit le processus de détérioration du métal.

Les inhibiteurs de corrosion sont utilisés dans une variété d'environnements où la corrosion peut se produire, tels que les milieux acides, les systèmes de vapeur, les eaux de refroidissement et d'autres applications industrielles. Ils peuvent être utilisés pour protéger différents types de métaux et alliages, en fonction des caractéristiques spécifiques du milieu corrosif et du matériau à protéger.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent agir de différentes manières pour prévenir la corrosion. Certains inhibiteurs créent une couche protectrice sur la surface du métal, formant ainsi une barrière physique entre le métal et le milieu corrosif. D'autres inhibiteurs peuvent modifier les propriétés du milieu corrosif, rendant le milieu moins réactif envers le métal et ralentissant ainsi les réactions de corrosion. Certains inhibiteurs peuvent également agir en supprimant les réactions électrochimiques nécessaires à la corrosion.

#### **III.5.2 Classification des inhibiteurs :**

Les inhibiteurs peuvent être classés selon différents critères :

- Par domaine d'application,
- Par réaction partielle,
- Par mécanisme réactionnel.

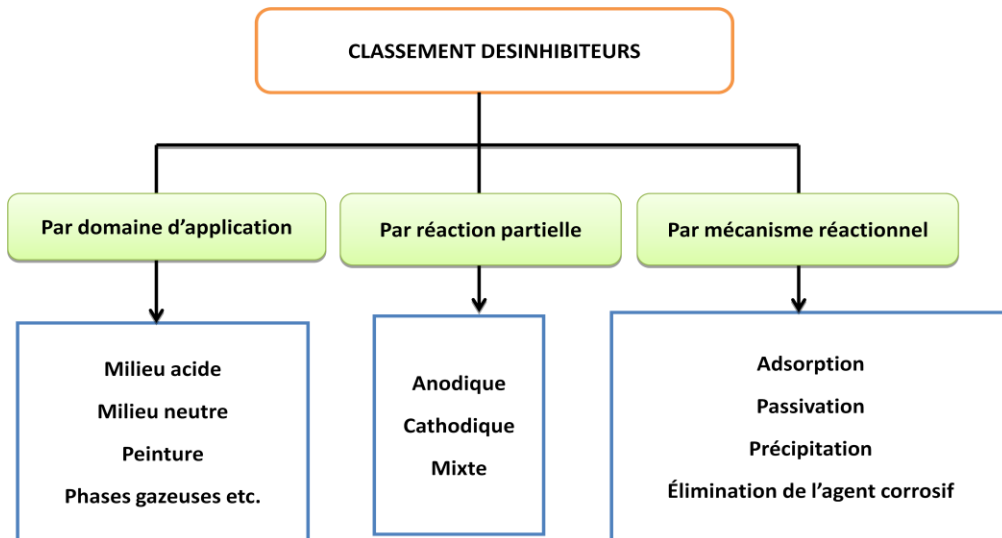


Fig. III 2 classements d'inhibiteur de corrosion [5]

### III.5.2.1 Par domaine d'application :

Tout à fait, les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés en fonction de leur utilisation dans des milieux aqueux, organiques ou gazeux. Dans le cas des inhibiteurs de corrosion utilisés dans les milieux aqueux, leur sélection est souvent basée sur le pH du milieu.

En milieu acide, les inhibiteurs de corrosion sont utilisés pour protéger les surfaces métalliques contre les attaques chimiques lors de procédures de décapage ou de détartrage. Ils agissent en formant une couche protectrice sur la surface du métal, empêchant ainsi la réaction corrosive avec le milieu acide.

En revanche, dans les milieux aqueux neutres ou alcalins, les inhibiteurs de corrosion sont couramment utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement, les systèmes de distribution d'eau ou d'autres équipements exposés à des milieux aqueux. Ces inhibiteurs fonctionnent généralement en formant une couche protectrice sur la surface métallique, empêchant la corrosion due à la réaction électrochimique entre le métal et le milieu.

### III.5.2.2 Par réaction électrochimique partielle

Selon leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles, on distingue trois types d'inhibiteurs :

#### III.5.2.2.1 Les inhibiteurs anodiques :

Ces inhibiteurs agissent en diminuant le courant sur la partie anodique de la surface métallique. Cependant, si le blocage est seulement partiel, il peut entraîner localement une augmentation

de la densité de courant sur ces surfaces, ce qui peut conduire à une corrosion localisée plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur. Il est donc important de maintenir une concentration adéquate de l'inhibiteur au niveau de la zone métallique à protéger.

### **III.5.2.2 Les inhibiteurs cathodiques :**

Ces inhibiteurs induisent une augmentation de la surtension cathodique, ce qui réduit le courant de corrosion. Bien que ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils n'entraînent pas le risque de corrosion localisée. Ils ont souvent tendance à précipiter des sels ou des hydroxydes en raison de l'accumulation d'ions OH<sup>-</sup> au niveau des cathodes.

### **III.5.2.3 Les inhibiteurs mixtes :**

Effectivement, un inhibiteur anodique agit en réduisant la densité de courant anodique partiel et en déplaçant le potentiel de corrosion dans le sens positif. Cela permet de diminuer la vitesse de la réaction d'oxydation anodique.

De même, un inhibiteur cathodique diminue la densité de courant cathodique et déplace le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Cela a pour effet de ralentir la réaction de réduction cathodique.

Quant à un inhibiteur mixte, il a une influence sur les deux réactions électrochimiques, en diminuant la vitesse des deux réactions. Cependant, il a un impact limité sur le potentiel de corrosion global.

La sélection du type d'inhibiteur dépendra de la nature de la corrosion à prévenir et des caractéristiques spécifiques de l'environnement corrosif. Chaque type d'inhibiteur a ses propres avantages et limitations, et il est important de choisir celui qui convient le mieux à la situation pour assurer une protection efficace contre la corrosion.

Le choix de l'inhibiteur approprié dépendra du type de corrosion à prévenir, des caractéristiques du milieu corrosif et des propriétés du matériau métallique à protéger. Une compréhension approfondie des mécanismes de corrosion et des réactions électrochimiques est essentielle pour sélectionner efficacement l'inhibiteur le mieux adapté à chaque situation

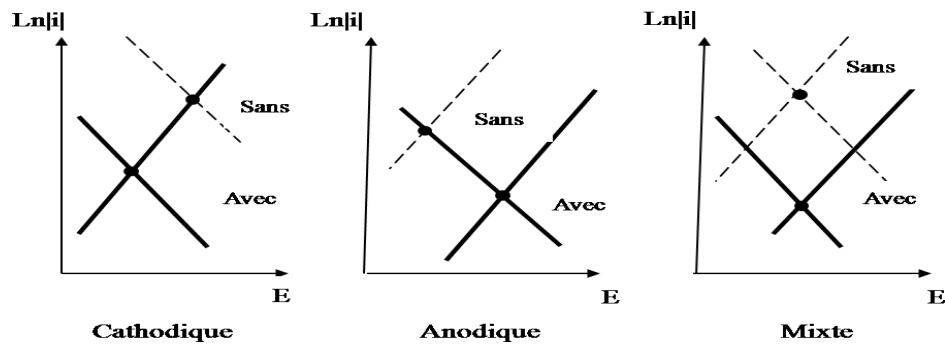


Fig. III 3 Diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentielle de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte. [5]

### III.5.3 Par Mécanisme Réactionnel :

Effectivement, selon le mécanisme réactionnel, les inhibiteurs peuvent être classés en différentes catégories :

#### III.5.3.1 Inhibition par adsorption et passivation :

Certains inhibiteurs se fixent à la surface métallique par adsorption, formant ainsi une couche protectrice qui limite l'accès des agents corrosifs. Cette adsorption peut être régie par une isotherme d'adsorption, qui décrit l'équilibre entre les espèces dissoutes et adsorbées. Certains inhibiteurs oxydants peuvent également induire une passivation spontanée du métal, formant une couche protectrice d'oxydes qui réduit la vitesse de corrosion.

#### III.5.3.2 Inhibition par précipitation d'un film :

Certains inhibiteurs provoquent la formation de films superficiels par précipitation de sels minéraux ou de complexes peu solubles. Ces films agissent en réduisant l'accessibilité de la surface métallique à l'oxygène et en bloquant partiellement la dissolution anodique, ce qui ralentit la corrosion.

#### III.5.3.3 Inhibition par élimination de l'agent corrosif :

Ce type d'inhibition est applicable principalement dans des systèmes fermés. Il consiste à éliminer l'agent corrosif du milieu, généralement par filtration ou traitement chimique, afin de réduire la vitesse de corrosion. Par exemple, dans les circuits d'eau chaude fermés des centrales thermiques, on peut pratiquer une inhibition par élimination de l'oxygène dissous.

Chaque mécanisme réactionnel peut être utilisé en fonction de la nature de la corrosion et des caractéristiques de l'environnement corrosif. Le choix de l'inhibiteur et du mécanisme appropriés dépendra de l'application spécifique et des objectifs de protection contre la corrosion.

### **III.6 Propriétés :**

En effet, les inhibiteurs de corrosion doivent présenter certaines propriétés essentielles pour être efficaces et adaptés à leur utilisation. Voici quelques-unes de ces propriétés :

#### **III.6.1 Abaissement de la vitesse de corrosion :**

Un inhibiteur de corrosion doit réduire efficacement la vitesse de corrosion du métal protégé. Il doit empêcher ou ralentir les réactions chimiques responsables de la corrosion, ce qui permet de prolonger la durée de vie du matériau.

#### **III.6.2 Conservation des caractéristiques physico-chimiques :**

L'inhibiteur ne doit pas altérer les propriétés physiques et chimiques du métal à protéger. Il ne doit pas compromettre la résistance mécanique, la conductivité électrique, la ductilité ou toute autre caractéristique essentielle du matériau.

#### **III.6.3 Stabilité :**

L'inhibiteur doit être stable en présence des autres constituants du milieu corrosif. Il ne doit pas se décomposer, se désactiver ou réagir avec d'autres espèces chimiques présentes dans le milieu. Cela garantit une protection continue et fiable contre la corrosion.

#### **III.6.4 Compatibilité avec le milieu :**

L'inhibiteur ne doit pas perturber la stabilité des espèces chimiques présentes dans le milieu corrosif. Il ne doit pas induire de réactions indésirables ou d'interactions néfastes avec d'autres substances présentes dans le milieu.

#### **III.6.5 Stabilité thermique :**

L'inhibiteur doit être stable à la température d'utilisation prévue. Il doit conserver son efficacité même en présence de variations de température.

#### **III.6.6 Efficacité à faible concentration :**

L'inhibiteur doit être efficace même à des concentrations relativement faibles. Cela permet d'utiliser des quantités réduites d'inhibiteur, ce qui est économiquement avantageux et réduit les impacts environnementaux potentiels.

### **III.6.7 Utilisation permanente ou temporaire :**

Les inhibiteurs peuvent être utilisés pour une protection permanente des matériaux, mais aussi pour une protection temporaire lors de situations spécifiques telles que le stockage, le décapage, le nettoyage ou lors d'usinages sévères. Ils peuvent être adaptés à différents scénarios d'application.

En respectant ces propriétés, les inhibiteurs de corrosion peuvent jouer un rôle crucial dans la préservation et la durabilité des matériaux métalliques soumis à des environnements corrosifs.

### **III.7 Mode d'action des inhibiteurs de corrosion :**

En ce qui concerne le mode d'action des inhibiteurs de corrosion, il n'existe pas de mécanisme unique qui s'applique à tous les systèmes de corrosion. Le mode d'action peut varier en fonction du type de métal, du milieu corrosif et de l'inhibiteur lui-même. Cependant, voici quelques modes d'action couramment observés :

#### **III.7.1 Interposition d'une barrière :**

Dans les milieux acides, l'inhibiteur peut former une couche adsorbée à la surface du métal, créant ainsi une barrière physique entre le métal et le milieu corrosif. Cette adsorption peut réduire la réactivité du métal en limitant son contact direct avec le milieu corrosif.

#### **III.7.2 Renforcement d'une barrière préexistante :**

En milieu neutre ou alcalin, l'inhibiteur peut renforcer une couche d'oxyde ou d'hydroxyde déjà présente sur la surface du métal. Il peut favoriser l'extension de cette couche protectrice ou précipiter des sels pour renforcer les zones faibles de la couche d'oxyde.

#### **III.7.3 Formation d'une barrière par interaction chimique :**

Dans certains cas, l'inhibiteur peut réagir chimiquement avec des espèces présentes dans le milieu corrosif pour former une barrière protectrice. Cette interaction chimique peut entraîner la formation de complexes insolubles ou de produits de précipitation qui empêchent la corrosion.

### **III.7.4 Stabilisation des films d'oxyde :**

Certains inhibiteurs peuvent stabiliser les films d'oxyde déjà présents sur la surface du métal. Ils peuvent favoriser la formation d'oxydes protecteurs et prévenir leur dissolution, contribuant ainsi à la protection contre la corrosion.

### **III.7.5 Participation aux réactions d'électrode :**

Certains inhibiteurs peuvent agir comme des catalyseurs, favorisant certaines réactions électrochimiques qui inhibent la corrosion. Ils peuvent faciliter la formation de produits de corrosion passivants ou diminuer la vitesse des réactions de corrosion.

Il est important de noter que l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion dépend de divers facteurs, tels que la température, le pH du milieu corrosif et la concentration en inhibiteur. Ces conditions peuvent influencer l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface du métal et son interaction avec le milieu corrosif.

## **III.8 Nature inhibiteurs :**

### **III.8.1 Inhibiteurs organiques :**

Les inhibiteurs organiques utilisés pour la protection contre la corrosion peuvent être classés en trois grandes classes en fonction de la nature de leur hétéro-atome actif :

#### **III.8.1.1 Composés azotés :**

Il s'agit principalement des amines, des pyridines et des sels quaternaires basiques. Ces composés ont la capacité de s'adsorber à la surface des métaux et peuvent également avoir d'autres effets spécifiques, tels que la neutralisation ou l'alcalinisation du milieu corrosif, la formation d'un film protecteur à la surface du métal et l'hydrophobisation de la surface du métal.

#### **III.8.1.2 Composés soufrés :**

Ces composés sont moins couramment utilisés que les composés azotés, mais ils peuvent être tout aussi efficaces, en particulier à des températures élevées. Cependant, l'utilisation de composés soufrés en milieu acide peut présenter un inconvénient majeur, à savoir le risque de décomposition avec la formation de sulfure d'hydrogène. Cette décomposition peut favoriser la pénétration de l'hydrogène et la fragilisation des aciers en particulier.

### **III.8.1.3 Composés oxygénés :**

Ces composés sont moins nombreux que les composés azotés ou soufrés, mais ils peuvent également agir comme inhibiteurs de corrosion. Dans ces composés, c'est l'oxygène qui joue le rôle de centre actif responsable des propriétés inhibitrices.

### **III.8.2 Les inhibiteurs inorganiques :**

Également appelés inhibiteurs minéraux, sont généralement utilisés dans des milieux proches de la neutralité ou alcalins. Ces inhibiteurs se dissocient en solution et ce sont les produits de leur dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition, qu'ils soient sous forme d'anions ou de cations.

On peut les classer en inhibiteurs passivants et non passivants en fonction de leur dépendance à l'égard de l'oxygène dissous dans le milieu corrosif pour être efficaces :

#### **III.8.2.1 Inhibiteurs passivant :**

Ce sont des composés tels que les oxydes métalliques ( $\text{MeO}$ , où Me représente un métal et  $x=1, 2$  ou  $3$ ), les nitrites, les molybdates, les chromates, etc. Ces inhibiteurs favorisent la formation ou la stabilisation de la couche d'oxyde à la surface du métal, ce qui conduit à une passivation du métal et à une réduction de sa vitesse de corrosion.

#### **III.8.2.2 Inhibiteurs non passivant :**

Ils comprennent des composés tels que les phosphates et polyphosphates, les phosphonates, les sels de zinc, etc. Ces inhibiteurs agissent en formant des films protecteurs insolubles à la surface du métal ou en alcalinisant le milieu corrosif.

Les inhibiteurs minéraux peuvent donc agir en passivant le métal, en formant des films protecteurs insolubles ou en alcalinisant le milieu, ce qui contribue à ralentir le processus de corrosion. Ils sont particulièrement efficaces dans les milieux neutres ou alcalins.

### **III.8.3 Choix d'un inhibiteur :**

Effectivement, le choix d'un inhibiteur de corrosion doit prendre en compte les normes et réglementations concernant la toxicité et l'impact sur l'environnement. Certains inhibiteurs, tels que les chromates de sodium et de potassium, ont été largement utilisés en raison de leur efficacité, mais ils posent des problèmes environnementaux et de santé en raison de leur toxicité. De même, l'utilisation d'inhibiteurs volatils peut présenter des risques pour la santé et l'environnement en raison de leur évaporation dans l'atmosphère.

Au fil des années, des recherches ont été menées pour trouver des alternatives plus respectueuses de l'environnement et moins toxiques. Les sels minéraux tels que les vanadates, les molybdates, les silicates, etc., ont été étudiés comme des substituts potentiels aux chromates. Ces composés offrent des propriétés inhibitrices efficaces tout en étant moins préoccupants du point de vue de la toxicité et de l'impact environnemental.

Ainsi, le choix d'un inhibiteur de corrosion doit prendre en compte non seulement son efficacité dans la protection contre la corrosion, mais aussi son innocuité pour la santé humaine et son impact sur l'environnement. Les normes et réglementations en vigueur visent à promouvoir l'utilisation d'inhibiteurs plus respectueux de l'environnement et moins toxiques, encourageant ainsi la recherche et le développement de nouvelles solutions de protection contre la corrosion.

### **III.9 Mode d'expression de L'efficacité d'un inhibiteur de corrosion :**

Peut être exprimée par le pouvoir protecteur, qui mesure le ralentissement de la corrosion. Ce pouvoir protecteur est généralement exprimé par l'équation suivante :

$$\eta = (V_0 - V) / V_0$$

Où  $\eta$  représente le pouvoir protecteur,  $V_0$  est la vitesse de corrosion en l'absence d'inhibiteur et  $V$  est la vitesse de corrosion en présence de l'inhibiteur.

Le pouvoir protecteur est un indicateur de l'efficacité de l'inhibiteur à réduire la vitesse de corrosion. Plus la valeur de  $\eta$  est élevée, plus l'inhibiteur est efficace pour protéger le matériau contre la corrosion. Un pouvoir protecteur de 1 indiquerait une absence totale de corrosion en présence de l'inhibiteur, tandis qu'une valeur proche de 0 indiquerait une efficacité limitée de l'inhibiteur.

Cette mesure de l'efficacité d'un inhibiteur permet de comparer différents inhibiteurs entre eux et de sélectionner celui qui offre la meilleure protection contre la corrosion dans un contexte donné.

### **III.10 Les méthodes d'étude de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion :**

Comprennent plusieurs approches, à la fois électrochimiques et non électrochimiques. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées :

#### **III.10.1 Mesure du potentiel de corrosion :**

Cette méthode consiste à mesurer le potentiel électrique du métal dans le milieu corrosif en présence et en absence de l'inhibiteur. La comparaison des potentiels permet d'évaluer l'efficacité de l'inhibiteur pour déplacer le potentiel de corrosion dans une direction protectrice.

### **III.10.2 Courbes intensité-potentiel :**

Ces courbes sont obtenues en mesurant l'intensité du courant de corrosion en fonction du potentiel appliqué au métal. Elles permettent de déterminer les variations de la cinétique de corrosion en présence de l'inhibiteur et d'évaluer son effet sur la vitesse de corrosion.

### **III.10.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) :**

Cette technique mesure la réponse électrique d'un système à un signal alternatif. En mesurant l'impédance du système, on peut déduire des informations sur les processus de corrosion et l'efficacité de l'inhibiteur. L'EIS permet de caractériser les variations de résistance, de capacité et de constantes de temps en présence de l'inhibiteur.

### **III.10.4 Techniques de surveillance en temps réel :**

Il s'agit de méthodes qui surveillent en continu les paramètres de corrosion tels que le courant de corrosion, la résistance électrique, le pH, etc., afin de suivre l'évolution de la corrosion en présence de l'inhibiteur.

### **III.10.5 Analyse chimique :**

Des techniques analytiques telles que la spectrométrie d'absorption atomique, la spectroscopie de masse, la chromatographie, etc., peuvent être utilisées pour détecter et quantifier les produits de corrosion, les espèces chimiques présentes dans le milieu corrosif et les interactions entre l'inhibiteur et le métal.

Ces méthodes permettent d'évaluer l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion, de comprendre son mode d'action, d'optimiser sa concentration et ses conditions d'utilisation, ainsi que de sélectionner le meilleur inhibiteur pour une application spécifique.

## **III.11 Protection électrochimique :**

### **III.11.1 Protection cathodique :**

La protection cathodique est une méthode efficace pour réduire la corrosion des structures métalliques enterrées ou immergées, en les rendant cathodiques par rapport à un métal plus facilement corrodable. Voici quelques points supplémentaires à prendre en compte :

- Anodes sacrificielles : Les anodes sacrificielles, également appelées anodes galvaniques, sont généralement constituées de métaux tels que le zinc, le magnésium ou l'aluminium. Elles sont placées en contact avec le métal à protéger et se corrodent délibérément pour fournir le courant cathodique nécessaire à la protection. Les anodes sacrificielles doivent être correctement dimensionnées et installées pour assurer une protection adéquate.

- Systèmes d'alimentation en courant : Dans certains cas, un courant de protection est fourni à la structure métallique à l'aide d'un système d'alimentation en courant externe. Ce système applique un courant direct à la structure, la maintenant à un potentiel cathodique pour inhiber la corrosion. Les systèmes d'alimentation en courant sont souvent utilisés pour la protection de grandes structures ou lorsque les conditions environnementales ne sont pas favorables à l'utilisation d'anodes sacrificielles.

- Surveiller et entretenir : La protection cathodique nécessite une surveillance et un entretien réguliers pour s'assurer de son efficacité continue. Cela peut inclure la mesure des potentiels et des densités de courant, l'inspection visuelle des anodes sacrificielles et des systèmes d'alimentation en courant, ainsi que la maintenance et le remplacement des composants si nécessaire.

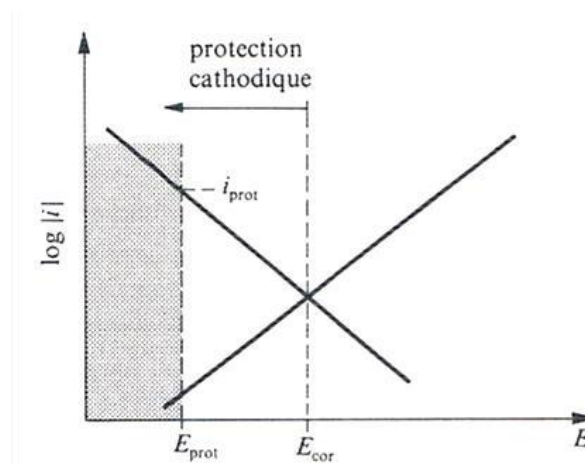


Fig. III 4 principe de la protection cathodique [5]

Deux méthodes de protection cathodique sont souvent utilisées en pratique :

#### III.11.1.1 Protection par anode sacrificiel :

En effet, la formation d'une pile électrochimique, le choix des anodes sacrificielles avec des potentiels réversibles appropriés, et les critères requis pour les anodes sont des éléments essentiels de cette méthode de protection contre la corrosion. Il est également important de noter que la surveillance régulière et l'entretien des anodes sacrificielles sont nécessaires pour maintenir une protection efficace au fil du temps.

La protection par anode sacrificielle est particulièrement adaptée aux structures en acier enterrées, immergées ou exposées à des milieux corrosifs. Elle est largement utilisée dans des applications telles que les pipelines, les plates-formes offshore, les réservoirs de stockage, les

ponts, les structures marines, et bien d'autres. L'ajout d'anodes sacrificielles appropriées permet de prolonger considérablement la durée de vie des structures métalliques en réduisant la vitesse de corrosion du métal à protéger.

Il convient également de noter que la conception et l'installation appropriées des systèmes de protection cathodique, y compris les anodes sacrificielles, nécessitent une expertise technique pour assurer une performance optimale et une protection adéquate contre la corrosion. Les normes et les pratiques recommandées doivent être suivies pour garantir l'efficacité et la durabilité du système de protection cathodique dans des environnements corrosifs spécifiques.

### **III.11.1.2 Protection par courant imposé :**

Cette méthode de protection cathodique est utilisée pour fournir un courant de protection constant au métal à protéger, ce qui permet de le maintenir à un potentiel de protection suffisamment bas pour ralentir la corrosion. Voici quelques points supplémentaires à considérer :

- Contrôle précis du courant : La protection par courant imposé offre un contrôle précis du courant fourni au métal. Cela permet de régler la quantité de courant de protection en fonction des besoins spécifiques de la structure métallique et des conditions du milieu corrosif. Le courant peut être ajusté pour compenser les variations de résistivité du sol ou pour répondre aux exigences de protection spécifiques.
- Utilisation de l'anode inerte : Dans la protection par courant imposé, une anode inerte est utilisée pour fournir le courant de protection au métal. Les anodes inertes, telles que les anodes en titane ou en platinisé, ne se corrodent pas pendant le processus de protection cathodique. Elles offrent une durée de vie plus longue et une stabilité chimique élevée.
- Évaluation et surveillance continues : La protection par courant imposé nécessite une surveillance continue pour évaluer l'efficacité du système de protection. Des mesures régulières du potentiel et du courant sont effectuées pour s'assurer que le métal reste polarisé à un potentiel de protection adéquat. Les ajustements peuvent être apportés en fonction des résultats des mesures pour optimiser la protection.

- Coûts et exigences énergétiques : La protection par courant imposé peut nécessiter des coûts initiaux plus élevés en raison de l'installation d'un système de redresseur et de câblage approprié. De plus, elle nécessite une source d'alimentation électrique continue pour fournir le courant de protection. Les exigences énergétiques doivent être prises en compte lors de la conception et de l'exploitation du système.

La protection par courant imposé est une méthode efficace pour la protection cathodique des structures métalliques dans divers environnements corrosifs. Elle offre une flexibilité et un contrôle précis du courant de protection, ce qui en fait une option appropriée pour les structures de grande taille, les environnements corrosifs agressifs ou les applications où la protection par anode sacrificielle n'est pas possible.

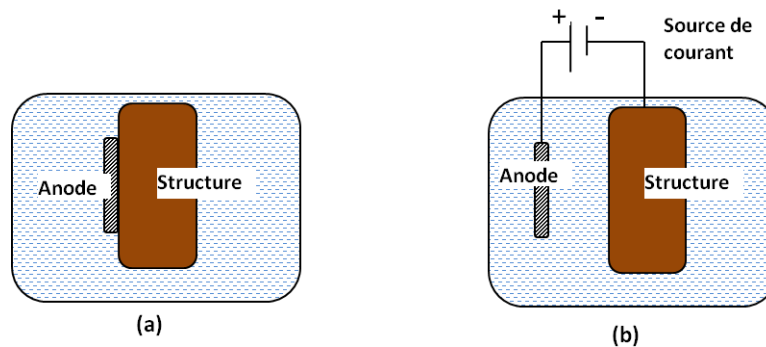


Fig. III 5 exemple de protection cathodique par courant imposé [5]

#### III.11.1.2.1 Principaux domaines d'application :

Effectivement, la protection cathodique est souvent utilisée en combinaison avec d'autres méthodes de protection conventionnelles telles que les revêtements ou les peintures. Cela permet de réduire la densité de courant fournie par les anodes ou le générateur, et d'améliorer l'efficacité globale de la protection. Voici quelques exemples de domaines d'application courants pour la protection cathodique :

- Structures enterrées : Les canalisations et les réservoirs enterrés sont des exemples typiques de structures qui bénéficient de la protection cathodique. Les anodes sacrificielles ou les systèmes de courant imposé sont utilisés pour fournir une protection contre la corrosion dans les sols corrosifs. La disposition et la quantité d'anodes sont déterminées en fonction de la taille et de la configuration des installations.

- Structures immergées : Les carènes de navires et les structures fixes immergées, telles que les jetées, les appontements et les plates-formes de forage offshore, sont exposées à des environnements corrosifs en eau de mer ou en eau douce. La protection cathodique est utilisée pour prévenir la corrosion des métaux et des structures métalliques en les polarisant à un potentiel de protection cathodique. Des anodes sacrificielles ou des systèmes de courant imposé sont installés pour fournir cette protection.

D'autres domaines d'application de la protection cathodique incluent les réservoirs de stockage en surface, les structures métalliques dans l'industrie pétrolière et gazière, les structures marines telles que les coques de bateaux et les systèmes de conduites en milieu industriel. La protection cathodique peut être adaptée à diverses situations et environnements corrosifs pour prévenir la corrosion et prolonger la durée de vie des structures métalliques.

### **III.11.2 Protection anodique :**

Voici quelques points supplémentaires pour compléter votre résumé :

- Formation de la couche de passivation : Lorsque le métal est polarisé anodiquement, une couche de film d'oxyde se forme à sa surface. Ce film d'oxyde est généralement plus stable et moins soluble que le matériau de base, ce qui le protège contre la corrosion. La couche de passivation agit comme une barrière physique et électrochimique entre le métal et l'environnement corrosif.

- Contrôle du courant anodique : Le courant anodique appliqué doit être suffisamment faible pour maintenir la formation et la stabilité de la couche de passivation. Un courant anodique excessif peut provoquer la dissolution de la couche de passivation, tandis qu'un courant insuffisant peut entraîner une dépassivation et une augmentation de la vitesse de corrosion.

- Choix des matériaux d'anode : Les anodes utilisées dans la protection anodique doivent être compatibles avec le métal à protéger et avoir une capacité élevée à fournir un courant anodique. Les matériaux couramment utilisés pour les anodes incluent le titane, le graphite, l'acier inoxydable et le niobium.

- Conception et installation : La conception et l'installation appropriées du système de protection anodique sont essentielles pour assurer son efficacité. Cela comprend le positionnement adéquat des anodes, le choix de l'électrolyte approprié, la surveillance et le contrôle du courant anodique, ainsi que la protection contre les problèmes tels que la corrosion sous le dépôt.

- Applications de la protection anodique : La protection anodique est utilisée dans diverses applications, notamment la protection des structures en aluminium, des réservoirs de stockage chimiques, des équipements chimiques, des navires, des pipelines et des ponts. Elle est particulièrement efficace dans les milieux agressifs où la passivation du métal est essentielle pour prévenir la corrosion.

En résumé, la protection anodique vise à maintenir un métal passivable dans un état de passivation en appliquant un courant anodique faible. Cela favorise la formation d'une couche de passivation protectrice qui ralentit la corrosion. Une conception et une installation appropriées, ainsi qu'une surveillance régulière, sont nécessaires pour assurer l'efficacité de la protection anodique.

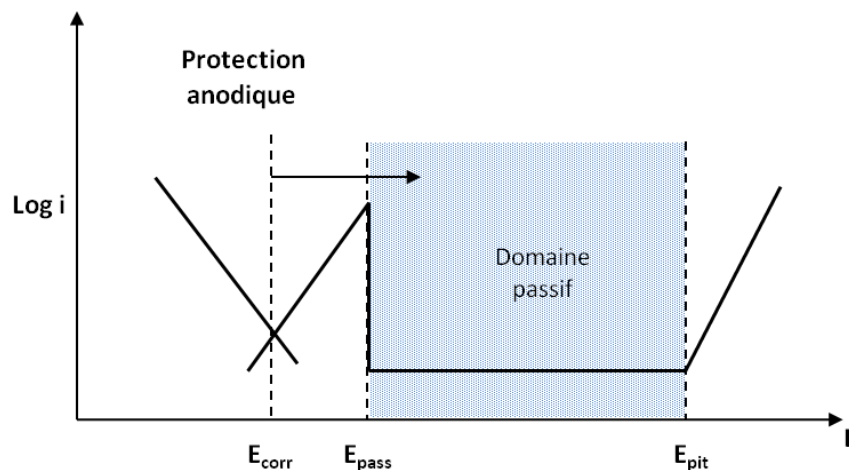


Fig. III 6 Principe de la protection anodique d'un métal passivable : déplacement potentiel dans le domaine passif correspondant à :  $E_{pass} < E < E_{pit}$ . [5]

### III.12 Conclusion :

En conclusion, la lutte contre la corrosion est d'une importance capitale pour préserver l'intégrité et la durabilité des structures métalliques. Ce chapitre a permis de mettre en évidence les techniques utilisées pour le prévenir et le contrôler.

# **Chapitre IV : étude de la protection cathodique par anodes sacrificielle au milieu marin**

#### IV.1 Introduction:

Ce chapitre se concentre sur les calculs effectués par une Plusieurs conceptions inadéquates de pipelines polarisés cathodiquement, tant en mer que sur terre, ont été signalées au Nigeria en raison de la complexité de la conception et de l'application du système de protection cathodique. Les anodes sacrificielles jouent un rôle essentiel dans les systèmes de protection cathodique, qui sont utilisés pour prévenir la corrosion des structures métalliques dans diverses industries telles que l'industrie pétrolière, gazière, maritime et de l'infrastructure.

#### IV.2 Les caractéristiques métalliques de pipeline et d'anode sacrificielle :

La conception de la protection cathodique de l'anode sacrificielle a été réalisée pour un pipeline d'exportation de 1,2 m de diamètre dans un emplacement offshore allant de 50 à 100 m de profondeur. La base de conception pour les données de pipeline et les propriétés d'anode étudiées sont données dans les tableaux 1 et 2 respectivement.

Résistivité de l'eau de mer sur l'emprise du pipeline a été donnée comme  $0.3\Omega.m$  respectivement.

Tableau. IV 1 données des pipelines [6]

<b>Qualité de matériau de pipeline</b>	<b>X42</b>
<b>Diamètre</b>	<b>1.2 m</b>
<b>Longueur en eau de mer</b>	<b>80000 m</b>
<b>Densité de courant moyenne dans eau de mer</b>	<b>10 mA/mètres<sup>2</sup></b>
<b>Efficacité de revêtement</b>	<b>0.5</b>
<b>Vie de conception</b>	<b>10 ans</b>
<b>Longueur de joint de tyau</b>	<b>3 m</b>

Tableau. IV 2 données de l'anode. [6]

<b>Matériaux d'anode</b>	<b>Alliage de magnésium</b>
<b>La densité actuelle</b>	<b>25mA/mètre<sup>2</sup></b>
<b>Dimension</b>	<b>0.67 * 0.67 * 3.5 m</b>
<b>Taux de consommation d'alliage Mg</b>	<b>4 kg/ampère – an</b>
<b>Potentiel avec référence à CuSO<sub>4</sub></b>	<b>-1.55 volte</b>
<b>Capacité électrochimique d'anode</b>	<b>1230 Amp-h/kg</b>
<b>Poids d'anode</b>	<b>25kg</b>
<b>Utilisation</b>	<b>0.85</b>

#### IV.3 La méthode utilisée pour calculer le nombre d'anode nécessaire pour protéger ce pipeline :

Le volt de potentiel d'entraînement du magnésium par rapport au cuivre/sulfate de cuivre a été donné à -1,55 volts. D'après l'expérience pratique sur le terrain, le volt potentiel moyen d'un pipeline en acier non revêtu dans l'eau de mer avec référence au cuivre/sulfate de cuivre indique

généralement -0,68 volts. Par conséquent, le potentiel de conduite initial net entre l'anode sacrificielle et la cathode a été estimé à l'aide de l'équation

$$E = E_a - E_c \quad (1)$$

Où,

$E_0$  : Potentiel initial de commande net

$E_a$  : Potentiel de commande de l'anode

$E_c$  : Potentiel moyen du pipeline en acier (cathode).

$$E_0 = (-1.55) - (-0.68) = -0.87 \text{ volt}$$

Étant donné que le pipeline sera polarisé cathodiquement à un minimum de -0,85 volt par rapport au cuivre/sulfate de cuivre, le potentiel de commande final net peut être estimé comme suit :

$$E = (-1.55) - (-0.85) = -0.7 \text{ volt}$$

L'étape suivante consistait à calculer la surface externe totale du pipeline à protéger à l'aide de l'équation :

$$S_a = \pi * D * L * f_c \quad (2)$$

Où :

$f_c$  : est l'efficacité du revêtement basée sur l'expérience sur le terrain.

$$\text{Donc : } S_a = 150816 \text{ m}^2$$

La valeur de résistivité la plus basse de 0.3  $\Omega\text{m}$  (1) serait utilisée, car une diminution de la résistivité augmente le taux de corrosion, ce qui implique l'utilisation de la densité de courant correspondante dans le calcul des besoins en courant pour la conception d'anode sacrificielle à l'aide de l'équation :

$$I_r = S_a * I_c \quad (3)$$

Où

$I_r$  : est le courant nécessaire pour protection le pipeline.

$I_c$  : est la densité de courant.

$$\text{Donc : } I_r = 150816 \times 10 = 1508160 \text{ mA}$$

De plus, la résistance de l'anode à l'électrolyte connue sous le nom de résistance à la terre reste un paramètre critique dans l'évaluation de la conception du système de protection cathodique pour

prédire la sortie de courant d'anode. La résistance à l'eau de mer pour le système de protection cathodique à anode sacrificielle a été calculée à l'aide de l'équation :

$$R_v = 0.0051 * \rho * \frac{\left[ \ln\left(8 \frac{A_l}{A_d}\right) - 1 \right]}{A_l} \quad (4)$$

Où,

$R_v$  : est la résistance à la terre de l'anode verticale

$A_l$  : est la longueur de l'anode plus le remblai

$A_d$  : est le diamètre de l'anode plus le remblai et

$\rho$ : st la résistivité.

$$\text{Donc : } R_v = 0.78 \Omega$$

Vient ensuite l'estimation de la sortie de courant par anode ( $I_a$ ) obtenu à l'aide de l'équation :

$$I_a = \frac{E}{R_v} \quad [7]$$

Donc :

$$I_a = \frac{0.85}{0.78} = 1.1A$$

La durée de vie de chaque anode peut être estimée en utilisant la formule suivante :

$$d_a = \frac{M * u * \varepsilon}{I_a * 8760} \quad (5)$$

Où

$d_a$  : durée de vie de l'anode individuelle

$u$  = facteur d'utilisation

$s$  = capacité électrochimique de l'anode

$M$  = poids net total de l'anode sacrificielle nécessaire pour protéger le pipeline a été donnée comme:

$$M = \frac{I_c * d_l * 8760}{u \varepsilon} \quad (6)$$

$$M = \frac{25 * 40 * 8760}{0.85 * 1230} = 8379 \text{ Kg}$$

$$\text{Donc : } d_a = \frac{8376 * 0.85 * 1230}{1.1 * 8760} = 909 \text{ hrs} = 0.1 \text{ ans}$$

L'étape suivante consiste à calculer le nombre d'anodes nécessaires pour respecter la durée de vie prévue du pipeline à l'aide de l'équation :

$$N_a = \frac{d_l \times l_r}{1000W} \quad (7)$$

Où,  $d_l$  est la durée de vie de conception et  $W$  est le poids de l'anode

Donc :  $N_a = 2413$  anodes

Cela a été suivi par l'estimation de l'espacement des anodes pour déterminer la distance linéaire de l'agencement des anodes et il est calculé avec l'équation :

$$A_s = \frac{\text{longueur de pipeline}}{N_a} \quad (8)$$

$$A_s = \frac{80000}{2413} = 33.15 \text{ m}$$

Après l'estimation de l'espacement des anodes, l'intervalle de tuyau estimation conjointe à l'aide de l'équation :

$$\text{interval} = \frac{A_s}{\text{la longueur moyenne de joint de pipe}} \quad (9)$$

$$\text{Interval} = \frac{33.15}{3} = 11 \text{ loint}$$

Enfin, la sélection du lit de sol qui représente l'emplacement prêt à conserver une seule ou une combinaison d'anodes est la plupart du temps la phase finale de la conception et de la préparation.

Avant cette dernière phase, zone de protection pour chaque anode  $P_a$  nécessite une estimation à l'aide des éléments suivants expression:

$$P_a = \frac{S_a}{N_a} \quad (10)$$

$$\text{Donc : } P_a = \frac{150816}{2413} = 62.5m^2$$

#### **IV.4 Conclusion :**

Les exigences en termes de courant de protection cathodique par le biais d'anodes sacrificielles ont été calculées pour le pipeline en acier X42, qui a un diamètre de 1,2 m et une longueur de 80000 m, en utilisant une équation spécifique. L'analyse de conception a révélé que les besoins en courant pouvaient être satisfaits en utilisant 2413 anodes en alliage de magnésium, permettant ainsi d'établir un potentiel naturel qui assurerait une durée de vie prévue de 40 ans pour le pipeline avant que les anodes ne soient complètement épuisées. Selon les recommandations de Bradford, les anodes utilisées dans la technique de protection par anode sacrificielle se consomment progressivement et doivent être remplacées une fois épuisées, que le pipeline soit toujours en

service ou qu'il soit retiré. De plus, le calcul du potentiel initial de -0,87 volts a confirmé que les pipelines terrestres se trouvent dans la plage de protection requise. Ces valeurs sont conformes aux normes de DNV qui stipulent qu'un potentiel constant compris entre -0,85 volts et -1,2 volts par rapport à une électrode en cuivre/sulfate de cuivre saturé, ou entre -0,80 volts et -1,1 volts par rapport à une électrode en argent/chlorure d'argent, garantit une protection adéquate des pipelines. Par conséquent, toute partie du pipeline exposée directement à un environnement corrosif sera sujette à une corrosion externe en cas de défaillance du revêtement.

## **Conclusion général :**

La présente étude nous a permis d'approfondir notre compréhension de la corrosion dans les pipelines et d'évaluer l'efficacité de la protection cathodique par anodes sacrificielles en tant que méthode de prévention de ce phénomène. Nous avons examiné les mécanismes de corrosion, les méthodes de détection et d'évaluation, ainsi que les différentes techniques de protection existantes. Notre attention s'est particulièrement portée sur la protection cathodique par anodes sacrificielles dans un contexte de milieu marin.

L'analyse des techniques de construction des pipelines nous a permis de reconnaître l'importance de prendre en compte les problématiques liées à la corrosion dès les phases de conception et d'installation. En comprenant les facteurs qui influencent la corrosion, tels que la composition du fluide et les caractéristiques de l'environnement, nous avons pu mieux appréhender les défis auxquels sont confrontées les infrastructures de transport de fluides.

La protection cathodique par anodes sacrificielles s'est révélée être une solution efficace pour prévenir la corrosion dans les pipelines. En utilisant des anodes en métal plus réactif que les matériaux du pipeline, la corrosion se concentre sur les anodes sacrificielles plutôt que sur la structure du pipeline. Cette approche a prouvé son efficacité, en prolongeant la durée de vie des pipelines et en minimisant les coûts de maintenance.

Nous avons également examiné les aspects pratiques de la mise en œuvre de la protection cathodique par anodes sacrificielles, notamment les calculs du nombre d'anodes nécessaires et de leur durée de vie. Ces calculs sont essentiels pour assurer une protection adéquate et économiquement viable des pipelines.

Cependant, malgré les avantages de la protection cathodique par anodes sacrificielles, il est important de souligner ses limitations. La durée de vie des anodes sacrificielles est limitée, ce qui nécessite un suivi régulier et un remplacement périodique. De plus, la conception et l'installation correctes des systèmes de protection cathodique sont essentielles pour garantir leur efficacité à long terme.

En conclusion, l'étude de la corrosion et de la protection cathodique par anodes sacrificielles dans les pipelines revêt une importance capitale pour assurer la durabilité et la fiabilité de ces infrastructures de transport de fluides. La prévention de la corrosion est essentielle pour éviter les dégradations coûteuses et les risques potentiels pour l'environnement.

Grâce à notre recherche, nous avons consolidé nos connaissances sur les mécanismes de corrosion, les techniques de protection existantes et les avantages spécifiques de la protection cathodique par

anodes sacrificielles. Cette étude ouvre la voie à de nouvelles recherches visant à améliorer davantage l'efficacité et la durabilité des techniques de protection contre la corrosion dans les pipelines.

## **Lists des références:**

- [1] PIPE DRAFTING AND DESIGN Second Edition Roy A. Parisher • Robert A. Rhea
- [2] Fontana, M.G., and Greene, N.D. “Corrosion Engineering” (3<sup>rd</sup> Edition). McGraw-Hill Education, 1986.
- [3] Pierre Roberge - Corrosion Engineering Principles and Practice-McGraw-Hill Professional (2008).
- [4] Thermodynamique et cinétique électrochimique expérimentale B. Le Gorrec janvier 2005 1 page 264.
- [5] Cours de Corrosion et Protection des Métaux. Dr. Hakim BENSABRA. Université de JIJEL 2016.
- [6] Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH) Vol. 36, No. 4, October 2017, pp. 1072 – 1077
- [7] Bushman, J.B. “Corrosion and Cathodic Protection Theory”, Bushman Association Inc, Medina, Ohio, 2012.