

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE Mécanique



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Spécialité :** Energétique

**THÈME**

*Etude et dimensionnement d'un système de protection cathodique  
alimenté par une source d'énergie*

**Préparé par :** *Ouled Kaddour Assia  
Sriba Ahmed Aymen*

**Soutenu devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms :</b>	<b>Grade :</b>	<b>Qualité :</b>
ZAGANE MOHAMED EL SALAH	MCA	President
SLIMANI HALIMA	MCA	Examineur
MEKROUSSI SAID	Pr	Examineur
MOULGADA ABDELMAJID	Pr	Encadreur

**Promotion 2023/2024**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **REMERCIEMENT**

*Nous tenons tout d'abord à remercier en premier lieu notre Dieu, qui nous a donné la force et qui nous à aider à faire ce travail. Comme, nous tenons à remercier vivement nos Promoteur Mr : **Moulgada Abdelmadjid** pour son aide, sa disponibilité, son soutien, et qui ouvris devant nous les portes de leur bureau à Mr **ZAGANE MOHAMED**, Mr **MEKROUSSI SAID** et Mme **SLIMANI HALIMA** pour leur guidance et orientation et d'avoir accepté de faire partie du comité des examinateurs et à tous nos enseignants, qui ont contribué à notre formation tout au long de nos années d'études.*

*Nous tenons à remercier Monsieur Bouhassoune Cheikh ingénieur à l'entreprise des grands projets pétroliers **SONATRACH**, et le monsieur Khallot Ahmed ingénieur à l'entreprise **SONELGAZ**.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à **ma famille**, pour leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel qui ont nourri mon esprit et fortifié mon cœur tout au long de ce voyage académique*

*À mes **amis et collègues**, pour leur camaraderie et leurs échanges*

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon binôme, **Ouled Kaddour Assia**, Merci pour ton engagement exemplaire et pour avoir partagé cette aventure académique avec moi.*

*Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicace*

*Mon cher père **BOUAMAMA** pour ton soutien, ton encouragement et surtout ton amour. Aucun mot ne serait assez pour témoigner de l'étendue des sentiments que j'approuve à ton égard. Ce que je suis aujourd'hui est grâce à toi papa, Je t'aime plus que tout.*

*Ma mère **Oum Hani** la plus chère et précieuse personne dans ma vie, la femme la plus courageuse au monde, la femme que je ne saurais récompenser pour toutes les sacrifices que tu as faits et ne cesses de faire pour moi et mon frère, pour ton grand amour et pour l'éducation que tu nous as donnée, j'espère que tu sois fière de moi.*

*Mon très cher frère Sofiane. Vous êtes mon épaule la plus solide  
Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.  
Toute la famille **OULEDKADDOUR**.*

*Mes amis et camarades de promotion spécialement pour les moments merveilleux que nous avons passés ensemble. Mon binôme **Sriba Ahmed** pour avoir été patiente avec moi pendant toutes ces années et pour son soutien inconditionnel.*

Table des matières

Nomenclature

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction général

# *Chapitre I*

## *Phénomène de corrosion et les techniques de la protection*

I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition de la corrosion.....	4
I.3. Les processus de corrosion.....	5
I.3.1 Corrosion chimique .....	5
I. 3.2 Corrosion électrochimique .....	5
I.3.3 Corrosion par les courants vagabonds .....	5
I.3.4 Corrosion bactérienne.....	6
I.4. Morphologie de la corrosion .....	7
I.4.1 Uniforme .....	7
I.4.2 Galvanique (ou bimétallisme).....	7
I.4.3 Par piqûres .....	7
I.4.4 Par aération différentielle .....	8
I.4.6 Corrosion par crevasses .....	9
I.4.5 Corrosion intergranulaire.....	9
I.4.7 Corrosion sous contrainte .....	9
I.5 La force motrice de la corrosion .....	9
I.5.1 La tension .....	9
I.5.2 Le Métal.....	9
I.5.3 La série électromotrice / galvanique.....	10
I.5.4 Potentiel d'électrode des métaux .....	10
I.6 Diagramme potentiel pH de Pourbaix .....	11
I.7. La Polarisation.....	13
I.8 Taux de corrosion.....	13
I.8.1 La loi de Faraday .....	13
I.8.2 Courant et potentiel .....	14
I.8.3 Facteurs qui affectent le taux de corrosion .....	14
I.9 Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés.....	15
• Le sol comme électrolyte.....	15
• Agressivité du sol .....	15
I.9.1 Paramètres déterminant l'agressivité du sol .....	16

I.9.2	Méthode de mesure de la résistivité du sol.....	16
I.9.3	Principe de mesure de la résistivité du sol.....	17
I.9.4.	Les différents éléments utilisés pour mesurer la résistivité du sol : .....	18
I.10	Les Moyens techniques appliqués contre la corrosion.....	20
I.10.1	Champs d'application de la protection cathodique.....	20
I.10.2	Protection passive .....	21
I.10.3	Types de revêtement.....	21
I.10.4	Choix du revêtement.....	21
I.10.5	Mise en œuvre des revêtements.....	21
I.11	la protection cathodique (active) .....	22
I.11.1	Anodes galvaniques (sacrificielles).....	23
I.11.2	Choix des anodes sacrificielles.....	23
I.11.3	Le role de backfill(le coque).....	24
I.11.4	Exigence en termes de conception.....	25
I.11.5	Installation du système d'anodes galvaniques .....	25
I.11.6	Différents types d'anodes sacrificielles .....	26
I.11.7	Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant électrique imposé. P.C.C.I .....	27
I.11.8	Tensions de référence .....	28
I.11.9	Variations des critères autour de la valeur de base.....	28
I.12	Système de protection par courant Imposé .....	28
I.12.1	Les principes.....	28
I.13	La source d'énergie .....	30
I.14	Le contrôle de la protection.....	31
I.14.1	Potentiel de protection :.....	31
I.14.2	Électrode de référence Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	32
I.15	Comparaison entre PE et Acier : .....	33
I.16	Conclusion .....	34

**Chapitre II**

***Protection cathodique et dimensionnement du système***

**II.1 Introduction ..... 39**

II.2.1 Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur :  $R_c$  ..... 39

II.2.1.1 Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur : ..... 39

II.2.3 Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite :  **$R_r$**  ..... 40

II.2.3.1 Calcul de la résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite à la fin et au début de l'exploitation : ..... 40

II.2.4 Constante de distribution du potentiel le long de la conduite :  $\alpha$  ..... 40

II.2.5 Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes ..... 41

II.2.6 Résistance d'entrée d'une conduite revêtue :  $Z$  ..... 41

II.2.7 Les déferents valeurs de potentiels : ..... 41

II.2.8 Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins :  $K$  ..... 43

II.2.9 La longueur de protection d'un poste de soutirage  **$L_p$**  ..... 43

II.2.10 La nombre de postes de protection cathodique  **$N_{ppc}$**  ..... 44

II.2.11 L'intensité du courant de drainage :  **$I_{dr}$**  ..... 44

II.2.12 Le nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection :  $N_a$  ..... 45

II.2.13 La résistance de terre du déversoir :  $R$  ..... 45

II.2.14 La résistance des câbles : ..... 48

II.2.15 La puissance du poste de soutirage : ..... 48

II.2.16 Calcul de la puissance requise par le poste ..... 49

**II.3 Caractéristique des composants du système de protection [Sonatrach Arziw] ..... 50**

II.3.1 Caractéristique du gazoduc ..... 50

II.3.2 Caractéristique des anode (fer silicium) ..... 51

**Conclusion : ..... 51**

**ChapiteIII**

***Simulation et interprétation des résultats***

<b>III.1 INTRODUCTION :</b> .....	55
<b>III.2 Les types des installations différents :</b> .....	55
III.2.1 Les installations par l'utilisation des panneaux photovoltaïques : .....	55
III.2.2 Les installations par l'utilisation du réseau électrique : .....	55
<b>III.3 Les équipements de l'installation</b> .....	56
III.3.1 Le transformateur principal : .....	56
III.3.2 Le transformateur de soutirage : .....	57
III.3.4 Le transformateur d'excitation : .....	58
<b>III.4 Classification des convertisseurs statiques :</b> .....	58
III.4.1 Redresseur .....	58
III.4.2 Les hacheurs : .....	59
III.4.3 Les onduleurs: .....	59
III.4.4 Les gradateurs: .....	59
<b>III.5 Schéma de simulation :</b> .....	60
<b>Introduction a MATLAB / Simulink</b> .....	61
<b>III.6 Résultats et interprétations :</b> .....	65
III.6.1 Interprétation de la courbe de tension de sortie .....	66
III.6.2 Interprétation de la courbe de tension et l'intensité d'entrée : .....	67
III.6.3 Interprétation de la courbe courant de sortie : .....	68
<b>III.7 Conclusion</b> .....	68

<i>Symbole</i>	<i>Explication</i>	<i>L'unité</i>
<b>E</b>	Potentiel d'équilibre	Volts
<b>E<sub>0</sub></b>	Potentiel normal	Volts
<b>P</b>	La pression	Pascal
<b>T</b>	La température	Kelvin
<b>n</b>	Nombre de charges	
<b>R</b>	Constante de gaz parfait.	. Joule /°K. Mole
<b>F</b>	Constant de faraday	Coulombs
<b>M</b>	Masse atomique	Mole
<b>I</b>	Intensité de courant	Ampère
<b>t</b>	Temps en seconde	Seconde
<b>n</b>	Valence du métal	
<b>ρ</b>	Résistivité moyenne du sol.	(Ω cm)
<b>R</b>	Résistance moyenne du sol	(Ω)
<b>D</b>	Espacement entre deux piquets	(Cm)
<b>U</b>	La tension	Volts
<b>d<sub>a</sub></b>	Le diamètre de l'anode	[m]
<b>S</b>	La profondeur de l'anode	[m]
<b>E<sub>a</sub></b>	L'espace entre deux anodes consécutives	[m]
<b>L<sub>p</sub></b>	La longueur	[Km]
<b>R<sub>pol</sub></b>	La résistance de polarisation	(Ω)
<b>P</b>	La puissance	Watt
<b>ρ<sub>a</sub></b>	Résistivité de l'acier	Ω.m
<b>D'<sub>Ext</sub></b>	Diamètre extérieur de la conduite en mètre	m

**CSC:** Corrosion Sous Contrainte.

**G.P.L:** Gaz de Pétrole Liquéfié.

**P.E:** Polyethylene.

**Cu/CuSO<sub>4</sub>:** Par rapport à l'électrode de cuivre-sulfate

**NACE:** National Association of corrosion Engineers.

**P H :** Pression d'hydrogène.

**H<sub>2</sub>O:** Molécule d'eau.

**O<sub>2</sub>:** Atome d'Oxygène (gaz).

**Fe<sup>2+</sup>:** Ion Ferreux.

**Fe<sup>3+</sup>:** Ion Ferrique.

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:** Oxyde de fer (Magnétite).

**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:** Oxyde de fer magnétique.

**HF<sub>e</sub>O<sub>2</sub><sup>-</sup>:** Ion Ferrate.

**H<sub>2</sub>:** Atome d'hydrogène (gaz).

**H<sub>2</sub>S:** Sulfure d'hydrogène.

**P.C:** Protection Cathodique.

**CHAPITRE 1**

Figure I-1 Le phénomène de corrosion. [3] .....	5
Figure I-2 Corrosion par les courants vagabonds. [7] .....	6
Figure I-3 Aspect générale d'une corrosion bactérienne.[9] .....	6
Figure I-4 Corrosion uniforme. [10] .....	7
Figure I-5 Corrosion Galvanique. [11] .....	7
Figure I-6 Corrosion par piqure. [12].....	8
Figure I-7 Corrosion aération différentielle. [13].....	8
Figure I-8 Corrosion intergranulaire. [14].....	9
Figure I-9 présente le diagramme $E - Ph$ de Pourbaix du système ( $Fe - H_2O$ ) à $25^\circ C$ . [18].....	12
Figure I-10 Schema dispositif WENNER [24].....	18
Figure I-11 Les différents éléments utilisés pour mesurer la résistivité du sol : a) marteau, b) les sondes en aciers inoxydables, c) les câbles de connexion, d) Telluromètre, e) un mètre ruban [25] .....	19
Figure I-12 Appareil utilisé pour la mesure de la résistivité du sol : telluromètre ou Géohm [25] .....	20
Figure I-13 Revêtement d'un tube. [29] .....	21
Figure I-14 Principe de la protection cathodique par anodes galvaniques [34] .....	23
Figure I-15 représente l'anode, le backfill et le tronçon [35].....	24
Figure I-16 Principe de la protection cathodique par anodes galvaniques [37] .....	25
Figure I-17 Principe de la protection cathodique par courant imposé.[40] .....	28
Figure I-18 Pièce en acier incandescent dans cette représentation de l'art du forgeron [43]. ....	30
Figure I-19 Pièce en PE incandescent dans cette représentation de l'art du forgeron [Domaine public][43] .....	30
Figure I-20 Poste de soutirage simple [28] .....	31
Figure I-21 Exemple de mesure de potentiel. [45] .....	31
Figure I-22 Électrode saturée en $Cu/CuSO_4$ . [46].....	32



**Chapitre I**

<b>Tableau I-1</b> Série standard de métaux. ....	<b>10</b>
<b>Tableau I-2</b> Consommation de quelques métaux usuels [20] .....	<b>14</b>
<b>Tableau I-3</b> Corrosivité du sol selon la résistivité [20].....	<b>16</b>
<b>Tableau I-4</b> Comparaison des différents types d'anodes sacrificielles.[28] .....	<b>26</b>
<b>Tableau I-5</b> Comparaison entre anodes sacrificielles et anodes à courant imposé. ....	<b>33</b>
<b>Tableau I-6</b> Comparaison entre PE et Acier.[30].....	<b>33</b>
<b>Tableau I-7</b> Avantages et inconvénients de deux types d'anodes présentés .....	<b>34</b>

**Chapitre II**

<b>Tableau II-1</b> Caractéristique du gazoduc [47] .....	<b>46</b>
<b>Tableau II-2</b> Caractéristique des anode (fer silicium [48] .....	<b>47</b>

### **Résumé :**

La corrosion des pipelines enterrés est un phénomène courant qui peut entraîner des risques graves peut être causée par plusieurs facteurs tels que l'environnement, la qualité de l'acier et la méthode de revêtement. La mise en place d'un système de protection cathodique peut aider à prévenir la corrosion et à réduire les risques associés. Le mémoire décrit une étude et un dimensionnement d'un système de protection cathodique par courant imposé pour une ligne de transport de gaz enterrée de 116 km situer dans un site isolé à KENENDA à ARZIW afin de lutter contre la corrosion. L'étude est basée sur des notes de calcul et des normes, tandis que le dimensionnement du système d'alimentation de réseau électrique est effectué à l'aide du logiciel MATLAB

### **Abstract:**

Pipeline corrosion is a common phenomenon that can result in serious risks and can be caused by various factors such as the environment, steel quality, and coating method. The implementation of a cathodic protection system can help prevent corrosion and reduce associated risks. This paper describes a study and design of a cathodic protection system using impressed current for a 116 km gas transmission pipeline located in a remote site in KENENDA to ARZIW, aimed at combating corrosion. The study is based on calculations and standards, while the sizing of the electrical network supply system is done using MATLAB software.

### **ملخص:**

يعد تآكل خطوط الأنابيب المدفونة ظاهرة شائعة يمكن أن تؤدي إلى مخاطر جسيمة ناتجة عن العديد من العوامل مثل البيئة وجودة الفولاذ وطريقة الطلاء. ولذلك تثبيت نظام الحماية الكاثودية يمكن ان يساعد في منع التآكل وتقليل المخاطر المرتبطة به. تقدم هذه الأطروحة دراسة لتحديد حجم نظام الحماية الكاثودية بالتيار القسري لخط نقل الغاز المدفون بطول 116 كم الذي يقع في موقع معزول في كناندة الى ارزيو من أجل مكافحة التآكل. تستند الدراسة إلى الملاحظات والمعايير الحسابية، بينما يتم إجراء تحجيم نظام شبكة الكهرباء باستخدام برنامج Matlab

## *Introduction générale*

La corrosion des pipelines enterrés est un phénomène courant qui peut entraîner des risques graves peut être causée par plusieurs facteurs tels que l'environnement, la qualité de l'acier et la méthode de revêtement. La mise en place d'un système de protection cathodique peut aider à prévenir la corrosion et à réduire les risques associés. Cette méthode de protection nécessite une source d'énergie électrique. Deux types de systèmes sont utilisés pour prévenir le développement de la corrosion dans l'acier : soit les systèmes passifs où la protection est assurée entre l'acier et le milieu ambiant, soit les systèmes actifs où la protection est assurée en rendant l'acier cathode pour arrêter la réaction d'oxydation par abaissement de son potentiel électrochimique au niveau dit d'immunité. C'est le cas de la protection cathodique qui fonctionne soit par circulation d'un courant entre l'acier à protéger et une anode, soit par effet sacrificiel d'un métal à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium, plus électronégatif (moins noble), lorsqu'il est couplé avec l'acier.

### **Le présent travail est divisé en trois chapitres :**

Le premier chapitre introduire des généralités sur le phénomène de corrosion et leurs causes et les types et les formes ainsi que leurs facteurs qui agissent sur les ouvrages métalliques. Nous exposons aussi la définition de la protection cathodique et les différentes formes passives et active. Le principe de fonctionnement de la protection active par courant imposé alimenté par le réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre on traitera les calculs des paramètres énergétiques ainsi que le dimensionnement.

Dans le troisième chapitre nous allons simuler l'opération de la protection cathodique par courant imposé d'un pipeline enterré à l'aide de logiciel de Matlab. Nous clôturerons ce travail par une conclusion générale qui résume l'essentiel des résultats obtenus ainsi que les perspectives.

# ***Chapitre I***

## ***Phénomène de corrosion et les techniques de la protection***

## I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous citons une définition de la corrosion, les types et les causes de corrosion dans le transport et la distribution d'hydrocarbures par pipelines. Pour traiter les phénomènes de corrosion, il est nécessaire de mettre en place des mesures préventives et thérapeutiques pour protéger les structures métalliques des altérations électrochimiques. Pour lutter contre cette corrosion, deux types de protection doivent être mis en œuvre. Il s'agit d'une protection passive et d'une protection active. Le second complète le premier.

## I.2. Définition de la corrosion

La corrosion est la dégradation des matériaux provoquée par des réactions chimiques ou électrochimiques avec l'environnement. La corrosion chimique implique le flux d'électrons.

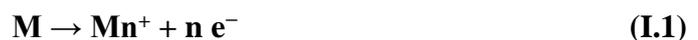
La corrosivité des métaux est déterminée par :

- Perte d'électrons
- Conditions extérieures favorisant le mouvement des électrons (température, pression, frottement, etc.) [1]

Se compose de deux réactions

1. ✓ **Réaction anodique (oxydation du métal):** L'électrode métallique entre en contact avec

L'électrolyte et se corrode.



2. ✓ **Réaction cathodique:** Electrode métallique en contact avec l'électrolyte et protégée de la corrosion. [2]



Figure I-1 Le phénomène de corrosion. [3]

### I.3 Les processus de corrosion

Les causes de corrosion sont diverses et complexes et résultent d'interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement. À ce jour, la corrosion n'est pas entièrement comprise. Cela s'explique par des tests en laboratoire qui ne peuvent pas prédire de manière fiable le comportement d'un métal ou d'un alliage particulier sous l'influence de la corrosion et, de même, il n'existe aucun métal résistant à la corrosion dans des conditions précisément définies.[4]

#### I.3.1 Corrosion chimique

Cette corrosion est due à une réaction hétérogène entre le métal et la phase gazeuse ou liquide. Si le réactif est un gaz, on parle alors de « corrosion sèche ou oxydation », mais si le réactif est un liquide, la corrosion se produit en raison de la formation de produits de corrosion sur la surface métallique. Ce type de corrosion ne permet pas au courant électrique de circuler. Ce type de corrosion est rare. Cela représente 3 % de tous les cas de corrosion.

#### I. 3.2 Corrosion électrochimique

Les métaux réactifs et électriquement conducteurs se corrodent au contact de solutions aqueuses ioniquement conductrices (électrolytes, condensats). La corrosion correspond au passage d'atomes métalliques en solution sous forme d'ions (dissolution métallique). Les cations dissous existent sous diverses formes telles que hydratés et hydrolysés. [5]

#### I.3.3 Corrosion par les courants vagabonds

Le courant vagabond, comme son nom l'indique, est un courant qui circule en dehors du circuit normal. Le tente de suivre le circuit de résistance la plus faible comme suit : Les conduites métalliques, sont un site d'occurrence et peuvent dans certains cas être soumises à une attaque anodique rapide et localisée. [6]

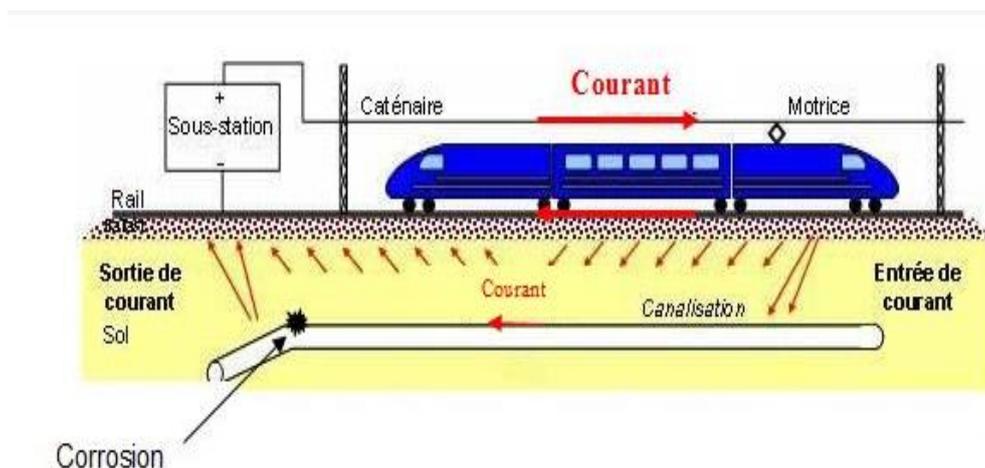
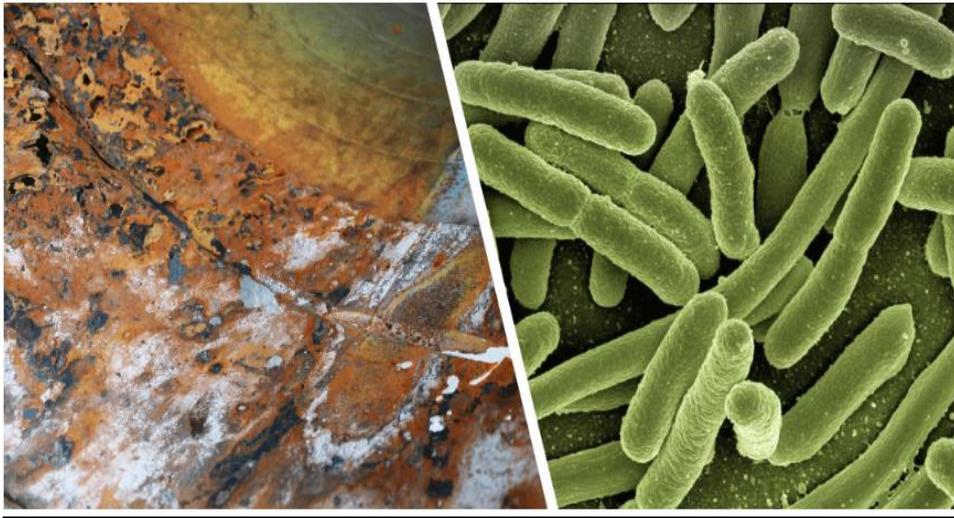


Figure I-2 Corrosion par les courants vagabonds. [7]

### I.3.4 Corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne, également appelée bio corrosion, est un processus dans lequel les bactéries interviennent directement en créant des conditions favorables à la corrosion, telles que : la production d'acide sulfurique ou par action indirecte d'accélération de processus déjà établis. [8]



*Figure I-3 Aspect générale d'une corrosion bactérienne.[9]*

## I.4. Morphologie de la corrosion

### I.4.1 Uniforme

Il s'agit du phénomène le plus courant provoquant des attaques générales sur l'environnement de surface. C'est le cas de l'acier au carbone atmosphérique. Ainsi, on observe la formation d'une couche homogène d'oxyde de fer recouvrant toute la surface.

Cette uniformité de comportement peut être due à l'homogénéité inhérente du matériau.

Le taux de corrosion dans ce cas est exprimé en perte de masse.



*Figure I-4 Corrosion uniforme. [10]*

### I.4.2 Galvanique (ou bimétallisme)

Cette morphologie est particulièrement visible dans les milieux aqueux et résulte de la formation d'accumulations entre différentes zones matérielles. Zones où se produisent des réactions anodiques (corrosion des matériaux) et zones où se produisent des réactions cathodiques (réduction des oxydants).

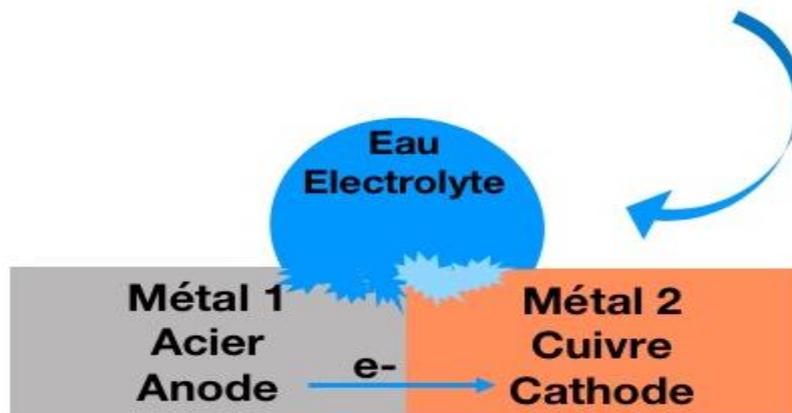


Figure I-5 Corrosion Galvanique. [11]

### I.4.3 Par piqûres

Il s'agit d'une corrosion localisée qui provoque généralement des défauts dans le film passif (dommages causés par des ions agressifs comme le chlorure). Nous observons une corrosion progressant en profondeur et créant des trous dangereux dans les installations affectées. Pipeline). Ce phénomène est particulièrement observé dans les matériaux passivables (acier inoxydable, nickel, titane, alliages d'aluminium). [8]



Figure I-6 Corrosion par piqûre. [12]

### I.4.4 Par aération différentielle

Ce phénomène, étudié par EVANS, est dû au couplage du métal, de zones aérées et de zones désaérées. Dans les zones aérées, l'oxygénation se fait aisément (cathode), par contre dans les zones désaérées, l'oxygène pénètre mal.

La zone désaérée joue le rôle d'anode : il y a oxydation du fer suivant la demi-réaction :



La zone aérée joue le rôle de cathode.



La demi-réaction de réduction peut s'écrire : Les électrons vont de l'anode à la cathode à travers le métal, tandis que les ions ferreux partent de la zone anodique vers l'électrolyte. [13]

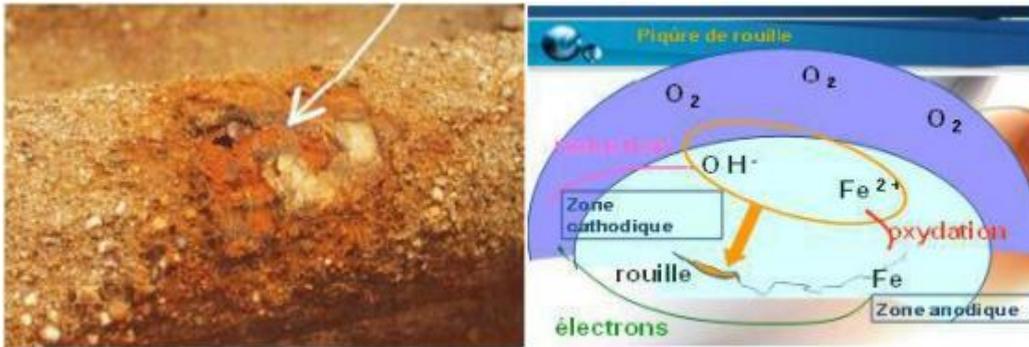


Figure I-7 Corrosion aération différentielle. [13]

#### I.4.6 Corrosion par crevasses

Cette forme de corrosion est généralement associée à la présence de petites quantités de solution stagnante dans les dépôts, les joints ou les crevasses.

#### I.4.5 Corrosion intergranulaire

Dans cette forme de corrosion, l'attaque de corrosion se propage le long des lignes de contact des phases micro structurelles au sein de la masse métallique. Cette forme de corrosion entraîne une perte de résistance mécanique du métal.

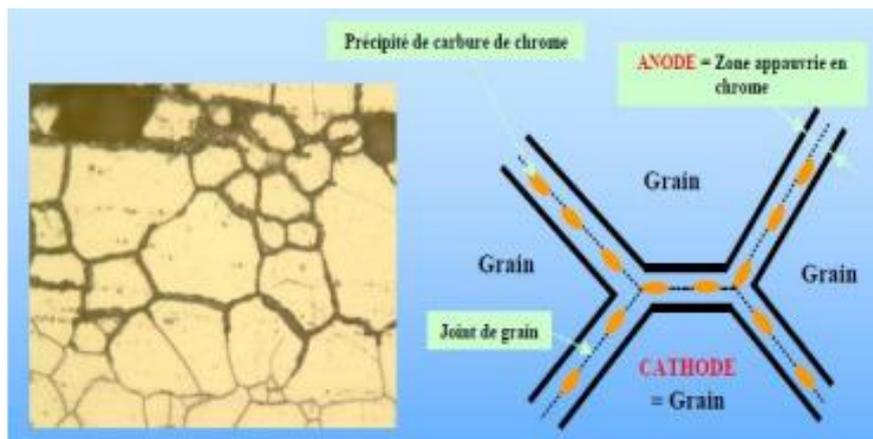


Figure I-8 Corrosion intergranulaire. [14]

#### I.4.7 Corrosion sous contrainte

Il s'agit de la formation de fissures dans les métaux provoquées par les effets combinés de contraintes mécaniques et de réactions électrochimiques. [15]

## I.5 La force motrice de la corrosion

Cette force motrice qui provoque cette corrosion est le résultat de la différence de potentiel électrique entre l'anode et la cathode de la cellule de corrosion. Plus la différence de potentiel entre les deux électrodes est grande, plus la force motrice de corrosion est élevée, et plus le taux de corrosion est rapide. Cette force dépend de la tension et le métal : (Les réactions électrochimiques entre deux électrodes dans l'électrolyte créent une tension appelée force électromotrice de la corrosion)

### I.5.1 La tension

La tension entre les deux métaux facilite le transfert d'électrons de l'anode à la cathode, accélérant ainsi le processus de corrosion. Cela accélère la corrosion de l'anode tout en protégeant la cathode.

### I.5.2 Le Métal

Cela peut être une source de tension qui provoque la corrosion des cellules. Les différences de contraintes peuvent être dues à des changements dans la structure des grains du métal, à la composition formée lors de l'alliage, à la température ou à la déformation des surfaces métalliques individuelles pendant la fabrication.

### I.5.3 La série électromotrice / galvanique

La différence de potentiel entre les métaux exposés à des solutions contenant leurs ions actifs unitaires respectifs est donnée dans la série standard présentée dans le tableau (I.1). Dans cette série, les métaux sont classés du plus noble (d'or) au plus actif (Magnésium). [16]

Tableau I-1 Série standard de métaux.

Demi-cellule	Métal	Electrodes standard potentiel $E_0$ (volts)
<b>Au/ Au<sup>++</sup></b>	Dor	+1.498
<b>Pt/ Pt<sup>++</sup></b>	Platinum	+1.200
<b>Cu/ Cu<sup>++</sup></b>	Cuivre	+0.345
<b>H<sub>2</sub>/ 2H<sup>++</sup></b>	Hydrogène	+0.000
<b>Pb/ Pb<sup>++</sup></b>	Plomb	-0.126
<b>Ni/ Ni<sup>++</sup></b>	Nickel	-0.250
<b>Fe/ Fe<sup>++</sup></b>	Fer	-0.440
<b>Zn/ Zn<sup>++</sup></b>	Zinc	-0.763
<b>Al/ Al<sup>+++</sup></b>	Aluminium	-1.662
<b>Mg/ Mg<sup>++</sup></b>	Magnésium	-2.363

### I.5.4 Potentiel d'électrode des métaux

La présence de la double couche électrons/ions à l'interface métal/solution crée un potentiel entre le métal et l'électrolyte, que l'on appelle "potentiel d'électrode" qui se calcule par

#### La formule de Nernst

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{espèces oxydées}]^x}{[\text{espèces réduites}]^y} \quad (\text{I.5})$$

Où

(x) et (y) représentent les coefficients stœchiométriques des espèces et (n) le nombre d'électrons mis en jeu par la réaction.

**E** : potentiel d'équilibre en volts ou potentiel d'oxydation de l'électrode.

**E<sub>0</sub>** : potentiel normal mesuré par rapport à l'électrode normal d'hydrogène dans les conditions standards P = 1 Atm et T=25°C,

**[X]** : concentration des ions métalliques dans la solution,

**n** : nombre de charges ou électrons échangés,

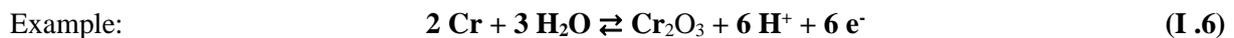
**R** : Constante de gaz parfait

**T** : température en Kelven.

**F** = constant de faraday = 9600 [C/mol] 1 Faraday = 1.6 10<sup>-19</sup> 6.02.10<sup>23</sup> = 96.500 coulombs

**e** - = Charge de l'électron

**N** = 6.02 10<sup>23</sup> (mol)<sup>-1</sup> (nombre d'Avogadro).



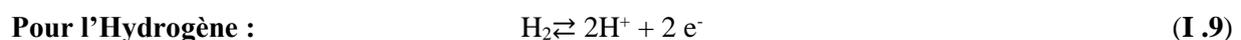
L'équation de Nernst appliquée à la réaction ci-dessus devienne :

Aux conditions standards, P = 1 atm et T = 25°C

$$E_{(\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3)} = E_{0(\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3)} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Cr}_2\text{O}_3][\text{H}^+]^6}{[\text{H}_2\text{O}]^3[\text{Cr}]^2} \quad (\text{I.7})$$

Avec  $[\text{H}_2\text{O}] = [\text{Cr}_2\text{O}_3] = [\text{Cr}] = 1$ , solide ou corps pur

$$E_{(\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3)} = E_{0(\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3)} - 0,059 \text{ Ph} \quad (\text{I.8})$$



$$E_0 (\text{O}_2 / \text{OH}^-) = 1,23 - 0,059\text{pH} \quad (\text{I.11})$$

## I.6 Diagramme potentiel pH de Pourbaix

Cela permet d'exprimer différents équilibres en fonction de la valeur du pH. De tels diagrammes sont appelés diagrammes potentiel-pH ou diagrammes de Pourbaix. La figure suivante montre un diagramme de Pourbaix simplifié pour le fer. Traditionnellement, ce chiffre était créé pour une température de 25 °C et une concentration en espèces dissoutes de 10<sup>-6</sup> mol/l

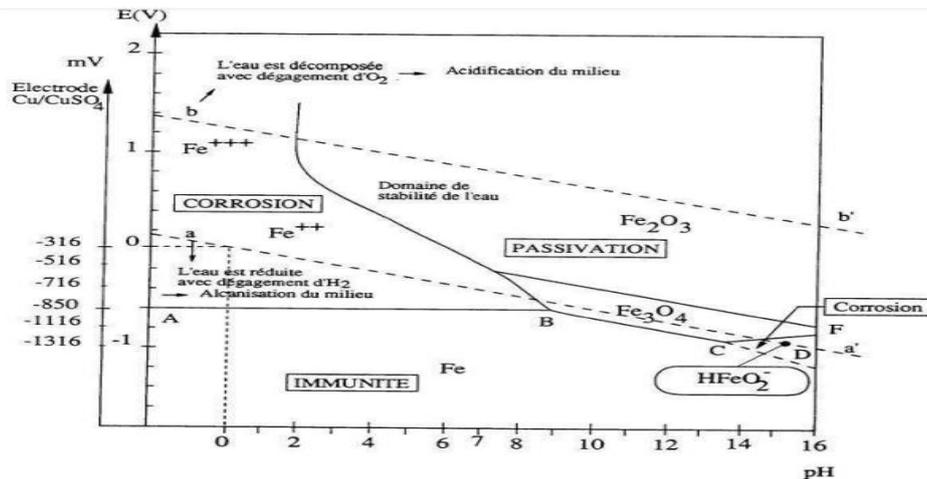


Figure I-9 présente le diagramme  $E - \text{pH}$  de Pourbaix du système ( $\text{Fe} - \text{H}_2\text{O}$ ) à 25°C. [18]

Deux oxydes solides ont été pris en compte pour la construction de ce diagramme très simplifié, l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Les différents équilibres existants entre le fer, ses cations, ses anions et ses oxydes et l'eau ainsi qu'entre eux quand ils ont des frontières communes

**Exemple :** l'équilibre représenté par la droite 4 s'écrit



Dans les environnements acides et neutres, le fer peut réagir avec les protons ( $\text{H}^+$ ) pour libérer de l'hydrogène, mais dans les environnements alcalins, l'oxyde formé peut facilement réagir avec les ions  $\text{OH}^-$ . Notez qu'il est plus résistant à la corrosion, car il ne se dissout pas. Dedans. C'est en bon accord avec l'expérience. En fait, le fer se corrodé facilement dans les environnements neutres ou acides, mais est plus durable dans les environnements alcalins comme le béton

Généralement, ces deux lignes séparent trois domaines importants.

- Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre avec la concentration ionique  $\cdot 10^{-6}$  mol/l est inférieur à la ligne (a) sont attaqués par l'eau, libérant de l'hydrogène.
- Tous les métaux dont les potentiels d'équilibre avec des concentrations ioniques se situent entre les droites (a) et (b) ne sont attaqués qu'en présence d'oxygène.

- Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre pour une concentration en ions de  $10^{-6}$  mol/l, est situé au-dessus de la droite (b) sont thermodynamiquement stables. [17].

Pour protéger le fer de la corrosion, nous pouvons agir de trois manières différentes

- **Un domaine de passivation**

Où la corrosion est empêchée par formation d'une couche protectrice d'oxyde ou hydroxyde de Fer à la surface du métal ; cette couche se présente sous forme d'un film superficiel qui l'isole du milieu ambiant.

- **Un domaine de corrosion**

Où les atomes de Fer passent sous forme d'ions dans la solution, et forment des sels et des hydroxydes solubles.

- **Un domaine d'immunité**

Où le fer reste à l'état métallique et ne peut donc se corroder, les réactions d'oxydation n'étant plus possibles. C'est le domaine de la protection cathodique.

Ces trois domaines définis pour les coordonnées PH-Potentiel peuvent être établis pour tous les métaux purs, et en particulier pour le fer, l'aluminium, le plomb et le cuivre. [18]

## I.7. La Polarisation

Les ions sont relativement lourds et se déplacent lentement. Par conséquent, les électrolytes ont une résistivité beaucoup plus élevée que les métaux. Cela provoque un phénomène appelé polarisation.

La polarisation est la force qui s'oppose constamment au courant électrique dans une cellule de corrosion. Lorsque vous connectez une anode et une cathode, leurs potentiels se rapprochent à mesure que leur résistance diminue. Cependant, une certaine résistance existe toujours, ce qui conduit à la tension d'attaque de la cellule de corrosion.

## I.8 Taux de corrosion

Le taux de corrosion est directement proportionnel au courant, et quelle que soit la cause de la différence de tension, plus la différence est grande, plus le courant est élevé.[19]

### I.8.1 La loi de Faraday

Loi de Faraday La masse de métal déposée sur une cathode (courant passe de la solution vers le métal) ou consommée à l'anode (est proportionnelle à l'intensité de courant traversant les électrodes et à la masse atomique du métal et inversement proportionnelle à sa valence.

$$m = \frac{M \times I \times t}{n \times F} \quad (\text{I. 13})$$

M : Masse atomique de l'élément métallique en gramme par mole.

I : Intensité de courant en ampère.

t : Temps en seconde.

n : Valence du métal (Nombre d'électrons mis en jeu).

F : Nombre de faraday.

### I.8.2 Courant et potentiel

De la corrosion Si l'on regarde tous les métaux ou tous les alliages présents dans l'électrolyte, l'équilibre au sens thermodynamique n'est plus atteint et le potentiel absorbé par les métaux ne peut plus être calculé. Ce potentiel est appelé potentiel de corrosion (potentiel propre ou potentiel naturel) et peut encore être mesuré avec un millivoltmètre par rapport à une électrode de référence.

Deux réactions se produisent au cours du processus de corrosion : l'oxydation due au courant anodique et la réduction due au courant cathodique. Sa valeur absolue correspond au courant anodique. Ces deux réactions se produisent à des rythmes égaux et opposés. On parle ici de courants de corrosion. Cela permet de déterminer la quantité de métal dissous selon la loi de Faraday (réaction anodique).

Le tableau suivant représente les équivalents électrochimiques (consommations) de quelques métaux usuels :

*Tableau I-2 Consommation de quelques métaux usuels [20]*

Métal	Consommation (Kg/A.an)
Fer	10
Cuivre	10.4
Zinc	10.7
Plomb	34

### I.8.3 Facteurs qui affectent le taux de corrosion

- **Rapport anode/cathode**

La taille relative de l'anode et de la cathode dans la cellule de corrosion a un effet significatif sur le taux de corrosion de l'anode. Si l'anode est plus petite que la cathode, l'anode se corrodera rapidement car le courant de corrosion sera concentré dans une petite zone. Si la cathode est petite et l'anode est grande, l'anode se corrodera plus lentement car la densité du courant de corrosion au niveau de l'anode est beaucoup plus faible. La polarisation joue également ici un rôle important.

- **Influence du milieu**
- **Taux d'humidité**

La corrosion galvanique nécessite de l'humidité, mais la corrosion générale peut se produire plus rapidement sur des surfaces métalliques humides et bien ventilées que sur des surfaces complètement immergées. Pour la corrosion souterraine, une teneur élevée en humidité augmente souvent le taux de corrosion. L'argile peut devenir déficiente en oxygène et, dans les sols mixtes, la zone en contact avec l'argile devient l'anode d'une batterie de concentration d'oxygène, générant de l'énergie électrique qui provoque la corrosion.

- **Conductivité**

La quantité de courant circulant à travers l'électrolyte dépend de sa teneur en ions. Plus la conductivité est élevée, plus le flux de courant est élevé et plus le taux de corrosion est rapide. La conductivité est égale à l'inverse de la résistivité et son unité de mesure est Siemens cm (ohm-cm). Une conductivité élevée n'indique pas un environnement corrosif, mais simplement la capacité à résister au flux de courant électrique

[L'unité SI de conductivité électrique est l'ohm<sup>-1</sup>. Mètre<sup>-1</sup> ( $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ), ou siemens par mètre (S. m<sup>-1</sup>).]

- **Activité chimique**

Les réactions redox nécessaires au fonctionnement de la cellule de corrosion dépendent de l'activité chimique de l'électrolyte. Certains composés peuvent favoriser la formation d'un film protecteur et ralentir la corrosion. Le pH est également un facteur important, car les métaux plus actifs que l'hydrogène se corroderont dans un environnement acide, mais pas les métaux plus nobles. Les environnements très alcalins peuvent accélérer la corrosion des métaux amphotères tels que l'aluminium et le plomb.[21]

## I.9 Facteurs agissant sur la corrosion des ouvrages métalliques enterrés

- **Le sol comme électrolyte**

Les sols sont des mélanges complexes de solides, de liquides et de gaz, qui sont parfois agressifs et provoquent une érosion très rapide, mais d'autres fois complètement inertes et ont des « effets totalement négligeables ». L'agressivité absolue du sol envers les métaux est due à ses propriétés physiques et chimiques.

- **Agressivité du sol**

L'agressivité du sol est considérée comme la principale propriété qui contribue directement au processus de corrosion des structures enterrées. A cet effet, la connaissance de la résistivité du sol autour de la canalisation est utilisée pour estimer la corrosivité du sol. Les limites de résistance considérées sont indiquées dans le tableau (I.3). Le tableau définit cinq classes de sols en fonction de leur résistivité et de leur corrosivité associée.

La résistivité du sol est considérée comme le premier indicateur déterminant l'échelle d'activité de corrosion. Néanmoins, ils existent d'autres facteurs qui peuvent affecter le sol tels que les produits chimiques présents dans le sol, le taux d'humidité et la qualité du sol, etc.

Tableau I-3 Corrosivité du sol selon la résistivité [20]

Plage de résistivité du sol (cm)	Consommation (Kg/A.an)
0-1500	Très corrosif
1500-3000	Corrosif
3000-5000	Faiblement corrosif
>10000	Peu corrosif

### I.9.1 Paramètres déterminant l'agressivité du sol

L'analyse du taux d'agressivité du sol consiste en la détermination des paramètres suivants :

- **Résistivité du sol**

Pour ces raisons, nous avons établi des limites d'intensité de champ pour les conduites d'eau en fonte sur la base de ces normes existantes. Les limites de résistance considérées sont indiquées dans le tableau

**I.3.** Ce tableau définit cinq classes de sols en fonction de la résistivité et de la corrosivité associée.

- **Ph**

La valeur du pH représente la teneur en ions acidogènes dissous dans l'électrolyte (sol) et indique la capacité du sol à subir certaines réactions qui affectent la corrosion. Un sol avec un pH faible indique un sol aux propriétés acides, et un sol avec un pH élevé indique la présence de sels basiques dans le sol.

- **Sulfures**

La présence de sulfure indique la présence de bactéries sulfate-réductrices. L'analyse prend en compte le degré de réaction catalytique (positive, trace ou aucune) dans l'échantillon de sol testé.

- **Potentiel d'oxydoréduction (Redox) :**

Le potentiel redox vise à mesurer la capacité d'un sol à permettre l'échange d'électrons, ce qui est le fondement même du processus de corrosion.

- **Humidité :**

Le taux d'humidité et ses variations ont un impact double : ils affectent autant la résistivité que le transport d'oxygène aux zones de corrosion.

### **I.9.2 Méthode de mesure de la résistivité du sol**

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est la méthode des quatre électrodes de Wenner. Cette technique présente de nombreux avantages dont entre autres sa caractéristique non destructive, capacité de fournir de hautes résolutions, relevé de mesure rapide et données facilement interprétables. [22]

### **I.9.3 Principe de mesure de la résistivité du sol**

La méthode Wenner est une technique utilisée en géophysique pour mesurer la résistivité électrique souterraine. Il est largement utilisé dans les études géologiques, géotechniques et hydrologiques pour caractériser les propriétés électriques des matériaux souterrains. Voici comment cela fonctionne :

- **Disposition des électrodes**

Utilise quatre électrodes disposées en ligne droite. Ces électrodes sont placées à intervalles égaux sur la surface du sol. Les électrodes sont généralement des piquets métalliques enfoncés dans le sol.

- **Injection de courant**

Un courant est injecté entre les deux électrodes extérieures. Ces électrodes sont appelées électrodes d'injection de courant. Mesure de tension : La tension est mesurée entre deux électrodes internes placées entre les électrodes d'alimentation en courant. Ces électrodes sont appelées électrodes de mesure de tension.

- **Calcul de la résistivité**

La résistance électrique d'un substrat peut être calculée à partir de mesures de courant et de tension à l'aide de la formule de Wenner, qui prend en compte la géométrie du dispositif et les propriétés du matériau.

- **Mesures multiples**

Pour obtenir une image complète de la résistance souterraine, répétez ce processus avec différentes configurations d'électrodes et différents emplacements. Le principe de base de la méthode Wenner repose sur la mesure précise des courants et des tensions dans le sol, ce qui permet de déduire la résistance électrique des différentes formations géologiques traversées par le courant. Cette méthode est largement utilisée en raison de sa simplicité et de sa capacité à fournir des informations sur la structure géologique du sous-sol.[23]

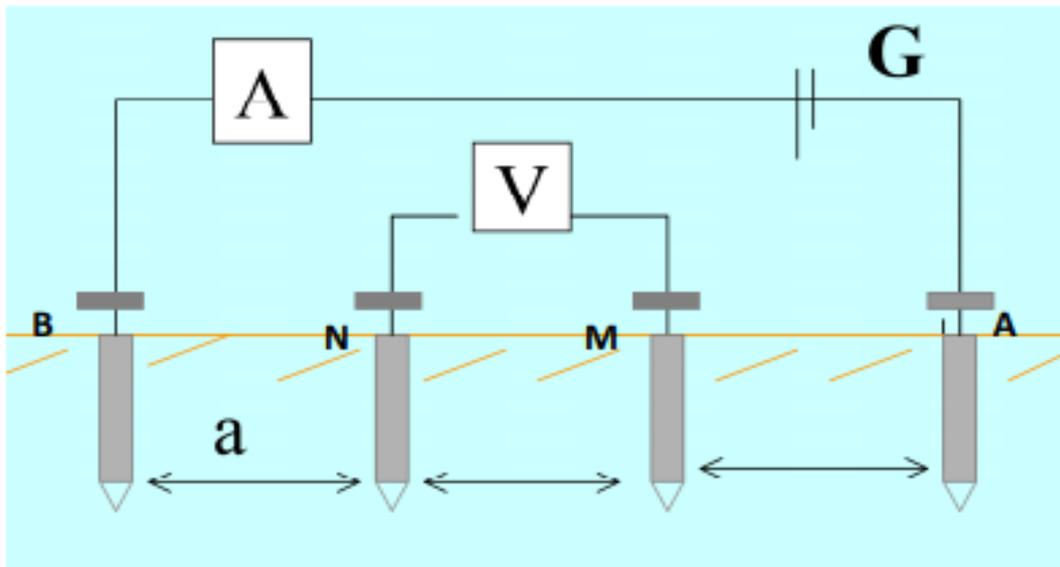


Figure I-10 Schema dispositif WENNER [24]

La résistivité moyenne du sol ( $\rho$ ) peut être calculée en fonction de la résistance moyenne du sol mesuré avec l'application de la formule : [24]

$$\rho = 2 * \pi * R * d \quad (\text{I.14})$$

Où :

$\rho$  : Résistivité moyenne du sol ( $\Omega \text{ cm}$ ) .

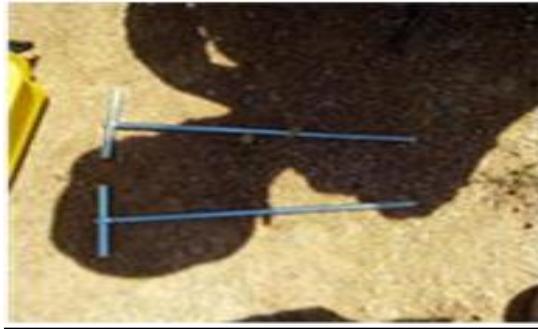
$R$  : Résistance moyenne du sol ( $\Omega$ ).

$d$  : Espacement entre deux piquets(cm)

#### I.9.4. Les différents éléments utilisés pour mesurer la résistivité du sol :



Les cables de connexion



**Les sondes  
en acier**



**Un mètre  
ruban**



**Marteau**



**Telluromètre**

*Figure I-11 Les différents éléments utilisés pour mesurer la résistivité du sol : a) marteau, b) les sondes en aciers inoxydables, c) les câbles de connexion, d) Telluromètre, e) un mètre ruban [25]*

- **Telluromètre**

Un telluromètre, également appelé appareil de mesure de terre, nécessite deux connexions de terre auxiliaires dont la résistance n'affecte pas la précision de la mesure. La source d'alimentation est courant alternatif. Il existe plusieurs modèles de ce type d'appareil, selon la marque du et la référence fournie. [26]



*Figure I-12 Appareil utilisé pour la mesure de la résistivité du sol : telluromètre ou Géohm [25]*

## **I.10 Les Moyens techniques appliqués contre la corrosion**

La protection contre la corrosion des conduites métalliques enterrées (pipelines) soumises à l'action corrosive du milieu (sol) est assurée par l'application conjointe d'un revêtement protecteur épais et d'une protection électrochimique par un système de protection cathodique. Il existe deux manières d'obtenir cette protection : via une anode sacrificielle ou via un courant appliqué. Ceci est expliqué plus en détail ci-dessous.

### **I.10.1 Champs d'application de la protection cathodique**

- **Ouvrages au contact du sol**
  1. Canalisations de produits pétroliers liquides, de gaz combustibles ou d'autres fluides de types produits chimiques.
  2. L'extérieur des cuvelages de puits (pétrole, gaz).
  3. Les réservoirs enterrés.
  4. Réservoirs (cylindriques, horizontaux ou sphères) de gaz liquéfiés inflammables comme le G.P.L.
  5. Réservoirs de propane liquide installés ou enterrés.
  6. Réservoirs des stations-service les plus importantes.
- **Ouvrages immergés**
  1. Les installations offshores fixes et les navires,
  2. Les bouées et ouvrages portuaires.[27]

### I.10.2 Protection passive

La protection cathodique des structures enterrées est utilisée systématiquement dans les systèmes doubles qui combinent protection passive (revêtement) et protection active (anode sacrificielle ou courant imposé). La protection cathodique n'est applicable que si le revêtement est défectueux et que les pièces métalliques sont en contact direct avec l'électrolyte (sol ou eau).[28]



*Figure I-13 Revêtement d'un tube. [29]*

### I.10.3 Types de revêtement

Les canalisations en acier destinées à être enterrées doivent être protégées au moyen d'un revêtement appliqué à chaud ou à froid, ces revêtements sont :

1. Revêtement à liant hydrocarboné (type C à chaud) ;
2. Revêtement par bande adhésive ;
3. Revêtement en P.E. extrudé ;
4. Revêtement par gaine thermo rétractable. .[30]

### I.10.4 Choix du revêtement

La sélection des revêtements de protection contre la corrosion doit répondre aux exigences suivantes :

- Haute résistance d'isolation,
- Imperméabilité à la vapeur d'eau, à l'air,
- Faible migration des espèces ioniques,
- Inertie chimique et bactériologique,
- Adhérence et mouillabilité aux surfaces métalliques [31]

### I.10.5 Mise en œuvre des revêtements

L'application du revêtement doit être effectuée sur une surface parfaitement sèche, en assurant un contact complet entre le revêtement et son support, et en éliminant toute trace de poussière à l'aide d'un pinceau. [32]

#### A. Revêtement à liant hydrocarbonés : (type c)

Le revêtement est constitué d'un primaire synthétique ou hydrocarboné et d'une armature en fibre de verre imprégnée d'un liant hydrocarboné. L'épaisseur du brai de houille et de l'asphalte de pétrole ainsi appliqué est d'environ 3 mm [31]

### **B. Revêtements en P.E. extrudé**

Ce revêtement est appliqué en usine par extrusion et consiste en une couche de polyéthylène qui adhère à la surface du tuyau sous la forme d'une gaine à l'aide d'une couche d'apprêt appropriée.

### **C. Revêtement par gaine thermo rétractable**

Elles sont utilisées pour la protection des joints de soudures et des dérivations. Ces gaines sont composées de :

1. Une couche intérieure constituée par un adhésive.
2. Une couche extérieure constituée par du P.E.
3. Une glissière qui sert éventuellement comme pièce de fermeture. Cet ensemble permet de constituer un revêtement équivalent en qualité, au revêtement en P.E extrudé des conduites, en plus on peut l'utiliser pour la réparation des joints de soudures des canalisations revêtues au brai.

### **D. Revêtement par bande adhésive**

Ce revêtement est composé de : Couche primaire appelée couche de liaison. Bande de masquage adhésive. Bande de protection mécanique en plastique. Ce revêtement est réalisé de la manière suivante :

1. La couche de base ou la couche adhésive est appliquée selon le même procédé que le revêtement à chaud.
2. Les couches de protection contre la corrosion à l'aide de ruban adhésif peuvent être appliquées manuellement ou mécaniquement. La tension appliquée sur les spires avec recouvrement à 50% doit assurer une bonne adhérence des bandes et éviter les plis et bulles.
3. Des bandes de plastique supplémentaires peuvent être ajoutées pour la protection mécanique. [32]

## **I.11 la protection cathodique (active)**

Pour transformer une surface métallique corrodée en surface de protection cathodique, le potentiel naturel de la surface de protection cathodique doit se rapprocher du potentiel naturel de la zone immunitaire. Pour y parvenir, un système de protection DC doit être installé dans le même électrolyte. La mise en œuvre d'un tel système requiert l'application de l'un des deux types d'anodes suivants :

1. Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger.

2. Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé.

### I.11.1 Anodes galvaniques (sacrificielles)

Le principe de la protection des anodes sacrificielles repose sur la connexion d'une anode ou d'une série d'anodes sacrificielles à la structure à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau), comme le montre la figure I.14 La structure devient polarisée négativement jusqu'à ce qu'un niveau de potentiel suffisant et uniforme soit atteint pour garantir que le système de protection est la source du processus de polarisation. Le seuil de protection de l'acier est de -850 mV par rapport à l'électrode de référence en sulfate de cuivre saturé de cuivre (Cu/CuSO<sub>4</sub>). [31]

### I.11.2 Choix des anodes sacrificielles

Les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes :

1. Il doit se corroder uniformément au sein de l'environnement considéré et ne doit pas être attaqué sans électricité.
2. Doit avoir une bonne conductivité électrique.
3. Bonne résistance mécanique.
4. A un coût économiquement viable

Dans la pratique, trois matériaux satisfont à ces critères. Il s'agit du zinc, de l'aluminium, et le magnésium. De nombreux alliages à base de ces matériaux sont largement utilisés comme anodes sacrificielles. [33]

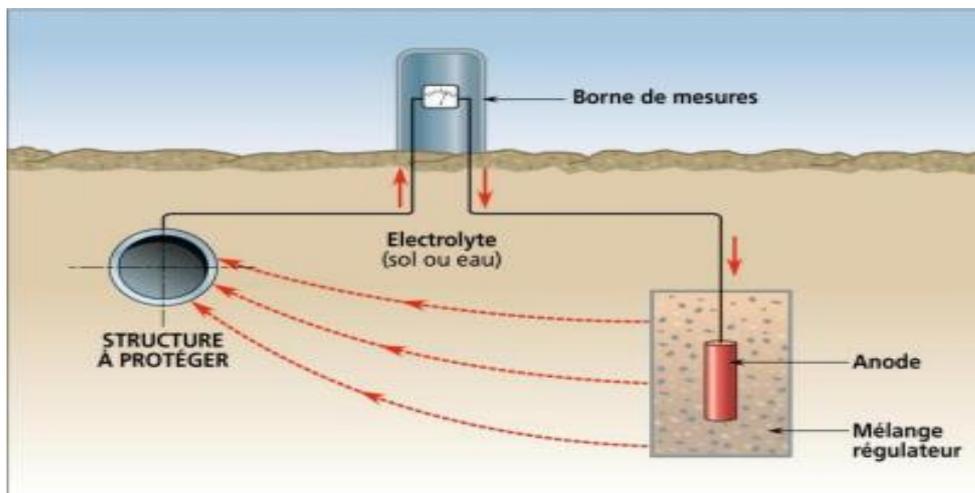
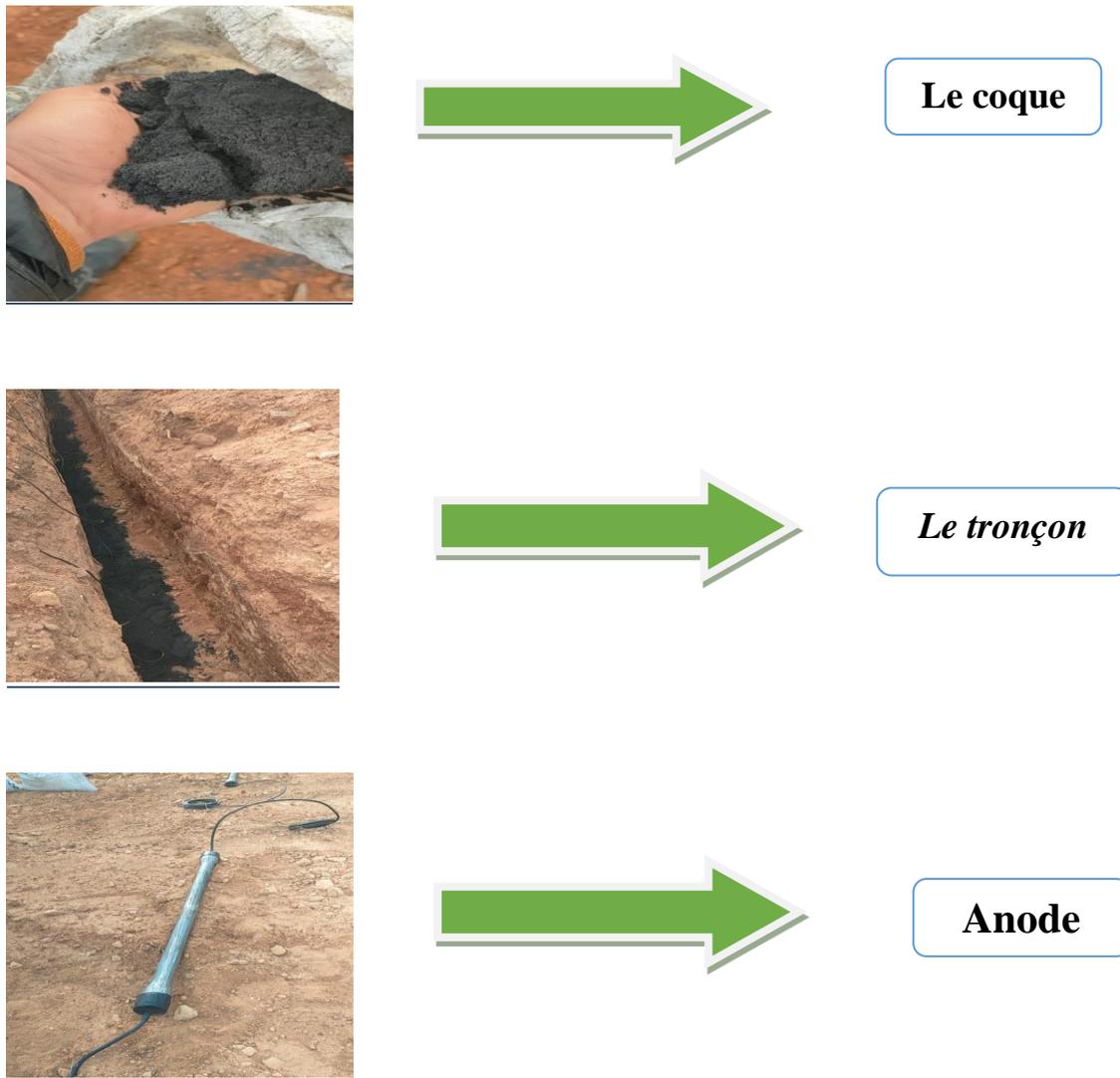


Figure I-14 Principe de la protection cathodique par anodes galvaniques [34]



*Figure I-15 représente l'anode, le backfill et le tronçon [35]*

### **I.11.3 Le rôle de backfill (le coque)**

Joue un rôle de régulateur c'est-à-dire il abaisse la résistance et évitez le contact direct de l'anode avec le sol, et unifie tout le long des anodes en un seul corps et mettre une barrière en oxygène pour ne pas freiner l'oxydation. [35]

Une application des anodes galvaniques peut également être considérée :

1. Si aucune alimentation pour le courant imposé n'est disponible
2. Pour une protection temporaire de canalisation nouvellement posées
3. Pour une protection temporaire des canalisation existantes
4. Si une maintenance de l'équipement électrique associé à un courant imposé est impossible

### I.11.4 Exigence en termes de conception

1. Le matériau d'anode choisi doit délivrer le courant de protection requis (en prenant en compte la résistivité de l'électrolyte et le potentiel moteur de l'anode) le long de la canalisation
2. L'anode doit être capable de fournir en permanence le courant maximum requis.
3. La masse du matériau doit être suffisante pour fournir le courant requis pendant toute la durée de vie nominal du système de canalisations [36]

### I.11.5 Installation du système d'anodes galvaniques

Placer les anodes uniformément sur la structure métallique et connecter les à des conducteurs non corrosifs sont des étapes courantes dans la construction d'un système de protection cathodique avec une anode sacrificielle.

Note : la distance entre anode et cathode au même niveau (3 jusqu'à 5 mètres), et la profondeur (80cm jusqu'à 120 cm) d'après le guide technique. [38]

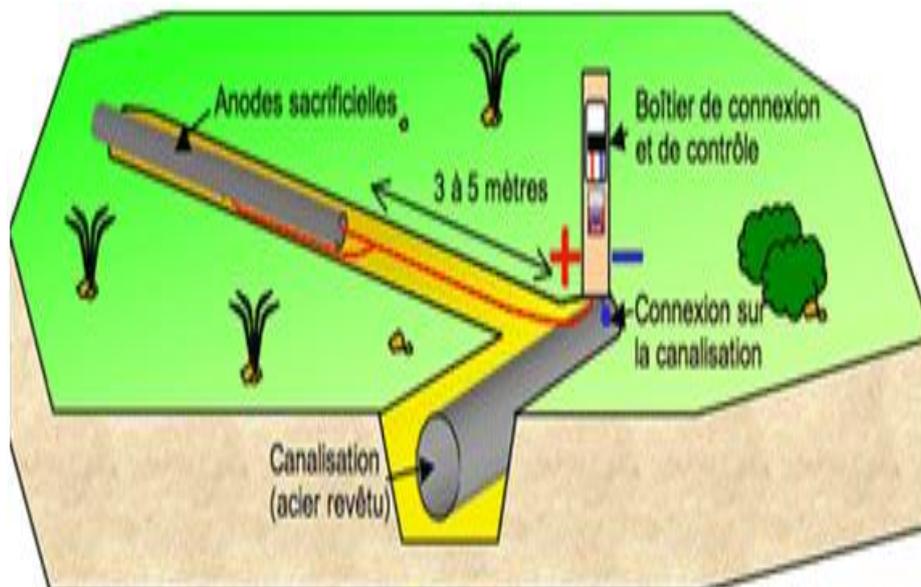


Figure I-16 Principe de la protection cathodique par anodes galvaniques [37]

## I.11.6 Différents types d'anodes sacrificielles

Tableau I-4 Comparaison des différents types d'anodes sacrificielles.[28]

	Anode à base de zinc	Anode à base d'aluminium à l'indium	Anode à base de magnésium
<i>Potentiel en charge (V)</i>	-1 à -1,05 en eau de mer -1,10V à terre	-1,05	-1,4 à -1,5 (type standard) -1,6 à -1,7 (type haut potentiel)
<i>Capacité pratique (Ah/Kg)</i>	780 en eau de mer 740 à terre	2600	1100 (type standard) 1230 (type HP)
<i>Consommation pratique (Kg/A.an)</i>	11,2 en eau de mer 11,9 en terre	3,4	6,5 à 8
<i>Rendement électrochimique (%)</i>	95 en eau de mer 90 à terre	87	55
<i>Application</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conduites enterrées de faible longueur</li> <li>• Ouvrages immergés</li> <li>• Capacités métalliques (intérieur ou extérieur)</li> <li>• Réservoirs sous talus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plates-formes offshore</li> <li>• Conduite offshore chaude</li> <li>• Capacité métalliques (intérieur)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conduites enterrées sur de faibles longueurs</li> <li>• Conduites offshore sur plusieurs Km à partir des plates-formes</li> <li>• Réservoirs sous talus</li> </ul>
<i>Avantages</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potentiel bien adapté à la protection des structures compactes en eau de mer</li> <li>• Comportement sûr dans les conditions diverses de fonctionnement (sol, eau de mer, vase,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de l'A/an le plus faible (forte capacité pratique)</li> <li>• Potentiel bien adapté à la protection des structures complexes en eau de mer</li> <li>• Utilisation possible dans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portée élevée (fort potentiel)</li> <li>• Polarisation rapide de la structure (précipitation du dépôt calco-magnésien en eau de mer)</li> <li>• Faible poids spécifique</li> </ul>

	<p>milieux confinés)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Excellent rendement</li> <li>• Peu sensibles aux salissures marines</li> </ul>	<p>les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reste active aux températures élevées avec toutefois une chute du rendement</li> </ul>	
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portée limitée (faible potentiel)</li> <li>• Température d'utilisation limitée à 60 °C</li> <li>• Coût A/an</li> <li>• Poids spécifique élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins adaptée dans les milieux faiblement renouvelés (chute de rendement en cas d'acidification du milieu)</li> <li>• Vulnérable aux salissures marines</li> <li>• Déconseillé pour la protection des ouvrages entièrement peints car il y a risque de passivation si l'anode n'est que faiblement sollicitée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Force électromotrice parfois surabondante pour la protection en eau salée (surconsommation, risque de cloquage de la peinture)</li> <li>• Faible durée de vie (remplacement fréquents nécessaires)</li> <li>• Rendement médiocre en eau de mer</li> <li>• Coût de l'A/an le plus élevé</li> </ul>

**I.11.7 Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant électrique imposé. P.C.C.I**

Il s'agit essentiellement du métal établissant un potentiel de protection cathodique présent dans la zone immunitaire. A cet effet, est alimenté en courant continu via un générateur dont la cathode est reliée à la structure à protéger (cathode) et l'anode à l'anode. Utilise une anode noble : Graphite, fer enrichi de silicium, particulièrement adapté à la protection des canalisations enterrées [39]

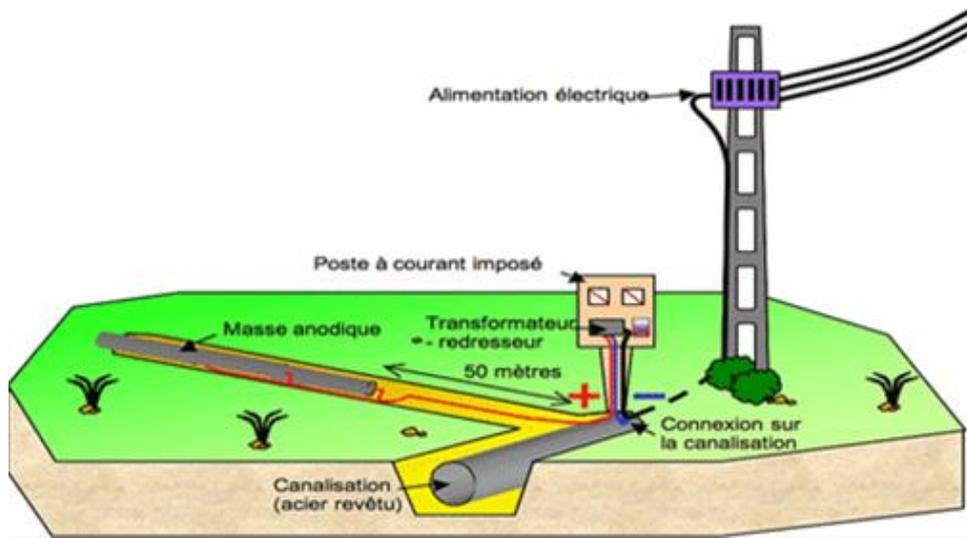


Figure I-17 Principe de la protection cathodique par courant imposé.[40]

Le but de la protection cathodique est de polariser le système avec une tension, ou un courant. Si la surface et la répartition ou la position de l'anode sont calculées correctement, le courant devrait (en principe) s'autoréguler en appliquant une tension.

### I.11.8 Tensions de référence

Principaux critères pour les aciers au carbone ou à faible alliage :

Dans le sol (à terre) :  $U < -0,85 \text{ V} / \text{Cu-CuSO}_4$  saturé (limité à  $> -1,2 \text{ V}$ )

Dans l'eau de mer :  $U < -0,80 \text{ V} / \text{Ag-AgCl}$  (limité à  $> -1,1 \text{ V}$ ).

En eau de mer et eaux saumâtres / (même valeur pour l'électrode saturée en calomel).

### I.11.9 Variations des critères autour de la valeur de base

En cas d'activité bactérienne élevée (SRB, bactérie sulfate-réductrice) en environnements anaérobies ou à température  $T > 60^\circ\text{C}$  :

- $U < -0,95 / \text{Cu-CuSO}_4$  saturé ou  $-0,90 \text{ V} / \text{Ag-AgCl}$ - eau de mer.
- Dans les sols très résistifs :  $U < -0,75 \text{ V}$  entre 100 et 1000  $\Omega\cdot\text{m}$ .
- $U < -0,65 \text{ V} / \text{Cu-CuSO}_4$  saturé, au-delà de 1000  $\Omega\cdot\text{m}$ . [41]

## I.12 Système de protection par courant Imposé

### I.12.1 Les principes

La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant :

1. Un déversoir (ou masse anodique),
2. L'électrolyte (sol ou eau),
3. La structure à protéger.

- **Un déversoir (ou masse anodique)**

Les anodes utilisées dans les systèmes de protection à courant imposé ne doivent pas nécessairement être moins noble que le matériau de la structure à protéger, ces anodes sont généralement fabriquées à partir de matériau résistant à la corrosion afin de limiter leur consommation. Pour le choix de l'anode on doit tenir compte de :

1. Le milieu.
2. La consommation (durée de vie).
3. Faible taux de consommation.
4. Polarisation faible.
5. Conductivité électrique élevée et faible résistance à l'interface anode/électrolyte.
6. Facilité de fabrication sous différentes formes.
7. Un coût faible

Les anodes utilisées selon la NACE (10A196) (National Association of Corrosion Engineerings) sont représentées sur le **Tableau I.4**, qui représente une excellente description détaillée des matériaux anodiques utilisés pour les structures enterrées.[28]

- **L'électrolyte (sol)**

Un électrolyte est un milieu conducteur de courant qui entoure une structure métallique, il peut être un liquide ou un solide tel que le sol ou l'eau.

**Exemple** : L'eau pure conduit peu le courant électrique, par contre une solution aqueuse de chlorure de sodium, NaCl, est un bon conducteur.

- **La structure à protéger (conduite en acier)**

L'acier est un alliage de fer qui contient généralement plusieurs dizaines de pour cent de carbone pour améliorer la résistance et la résistance à la rupture par rapport aux autres formes de fer. De nombreux autres éléments peuvent exister ou être ajoutés. L'acier inoxydable, qui résiste à la corrosion et à l'oxydation, nécessite généralement du chrome 11 supplémentaire. En raison de sa haute résistance à la traction et de son faible coût, l'acier est utilisé dans les bâtiments, les infrastructures, les outils, les navires, les trains, les automobiles, les machines, les produits électriques, les armes, etc. Le fer est le métal de base de l'acier. Selon la température de, il peut prendre deux formes cristallines (forme cristalline isotrope) : cubique au centre du corps et cubique au centre de la face. L'interaction des allotropes de fer avec des éléments d'alliage, principalement le carbone, confère à l'acier et à la fonte leurs propriétés uniques.[42]



*Figure I-18 Pièce en acier incandescent dans cette représentation de l'art du forgeron [43].*

- **Le polyéthylène**

Produit à partir d'éthylène gazeux, est le plastique mondial le plus volumineux actuellement disponible. En utilisant différents procédés de fabrication, en variant les types de catalyseurs, il est possible de produire une large gamme d'homopolymères et de copolymères d'éthylène. La possibilité de fabriquer autant de variante productrice de personnaliser les résines pour des applications spécifiques telles que les films d'emballage, les conteneurs rigides, les fûts et les tuyaux. [42]



*Figure I-19 Pièce en PE incandescent dans cette représentation de l'art du forgeron [Domaine public][43]*

### I.13 La source d'énergie

Le poste de soutirage est équipé d'appareillages électriques auxiliaires, qui servent généralement à la protection (parasurtenseurs ...), à la coupure générale ou à la coupure des sous-ensembles, ou aux mesures qui ont pour but d'indiquer :

- La tension d'alimentation,
- La tension d'utilisation (< 120 V)
- Le courant débité,
- Le potentiel de structure,
- Le temps de fonctionnement.[28]

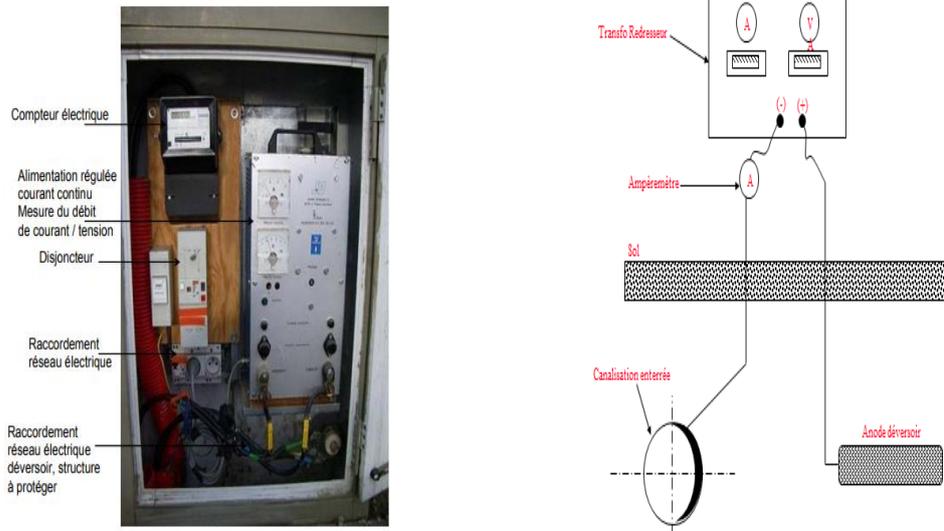


Figure I-20 Poste de soutirage simple [28]

## I.14 Le contrôle de la protection

### I.14.1 Potentiel de protection :

Le potentiel de protection nécessaire pour les systèmes de protection cathodique par courant imposé est probablement aux alentours de  $-850 \text{ mV/E}$  ( $\text{Cu/CuSO}_4$ ). Cependant, en présence de sulfures, bactéries, températures élevées, environnements acides et différents métaux, le critère de  $850 \text{ mV}$  peuvent ne pas être suffisant. Selon la NACE, il faut également tenir compte de la chute de potentiel à l'interface métal-sol, qui est incluse dans la plupart des mesures pratiques du potentiel de protection qui relie directement à la résistance de l'électrolyte (sol). [44]

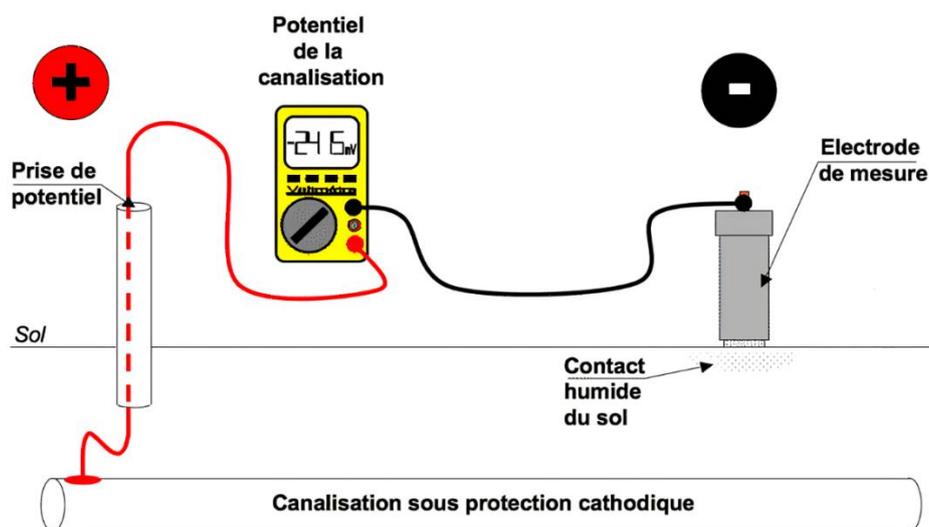


Figure I-21 Exemple de mesure de potentiel. [45]

### I.14.2 Électrode de référence Cu/CuSO<sub>4</sub>

L'électrode de référence est constituée d'une douille CEI 1010 connectée à une tige de cuivre et immergée dans du sulfate de cuivre. Cela permet la mesure et nécessite une vérification annuelle. Il peut également être utilisé sur place. En revanche, l'électrode étalon est conservée dans l'obscurité à une température stable et n'est utilisée que pour confirmer l'électrode de référence. Les électrodes standard ne doivent pas être utilisées pour les mesures sur le terrain et doivent être soumises à des tests de mesure périodiques. [46]

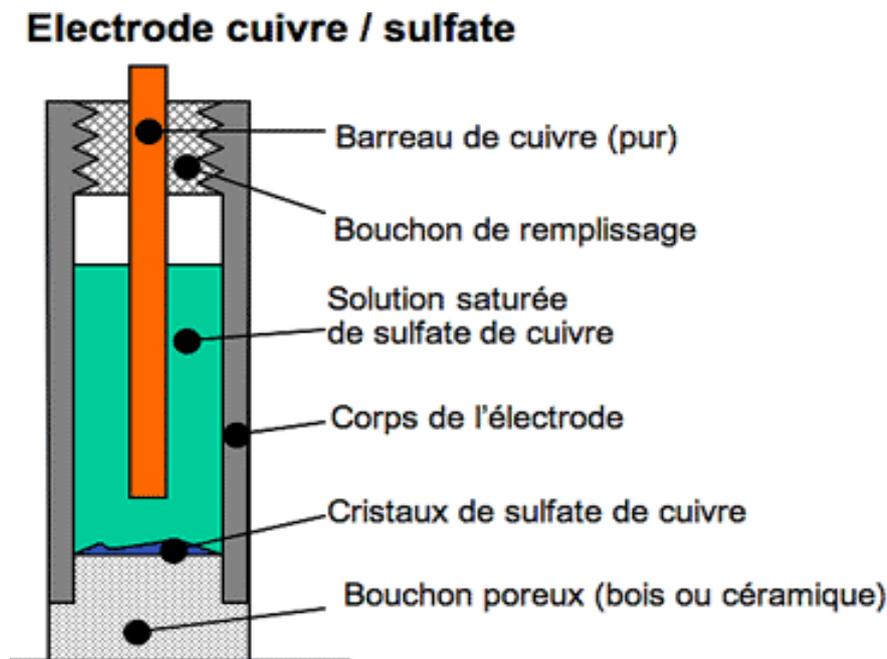


Figure I-22 Électrode saturée en Cu/CuSO<sub>4</sub>. [46]

La mesure du potentiel d'une structure sous protection cathodique s'effectue à l'aide : d'une électrolyse de référence et d'un voltmètre.

**Remarque** : Pour les autres métaux, tels que les tuyaux en aluminium et en cuivre, la NACE RP0169 suggère une polarisation cathodique minimale de 100 mV entre la surface de la structure et un électrolyte de référence.

- Non affecté par les environnements corrosifs.
- Possède une bonne conductivité électrique et une bonne résistance mécanique.
- Ne faites pas en sorte que ce soit trop cher.

Tableau I-5 Comparaison entre anodes sacrificielles et anodes à courant imposé.

	Anode galvanique	Système de Courant imposé
<i>Complexité de l'installation</i>	Simple	Complexe
<i>Source d'énergie</i>	Non nécessaire	Nécessaire
<i>Distribution du courant sur la structure</i>	Homogène	Souvent hétérogène
<i>Poids de la structure</i>	Importante surcharge en poids pour des longues durées de vie	Peu d'accroissement
<i>Risque de surprotection</i>	Pratiquement aucun	Possible
<i>Interférence avec d'autres structure</i>	Non	Possible
<i>Risque humain</i>	Non	Possible poste de soutirage
<i>Surveillance</i>	Aisée	Occasionnelle surveillance fréquente requise par un spécialiste
<i>Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande</i>	Adaptation possible	Adaptation facile
<i>Influence de la résistivité du milieu</i>	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
<i>Débit par anode</i>	Faible	Elevé
<i>Nombre d'anode</i>	Important	Faible

### I.15 Comparaison entre PE et Acier :

Tableau I-6 Comparaison entre PE et Acier.[30]

Matériau	Avantages	Inconvénients	Mode assemblage
<b>Acier</b>	- Pression très élevée -Durée de vie avant pose très longue	-Durée de vie avant pose très peu -Condition de stockage	Soudage
<b>PE</b>	-Réparation facile  -Facile à poser	-Mise en œuvre très difficile -Coût de réparation trop chère -corrosion	Electro-Fusion

**Anodes sacrificielles :**

Tableau I-7 Avantages et inconvénients de deux types d'anodes présentés

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La force électromotrice. Est fournie par l'électrode</li> <li>• Peu de surveillance</li> <li>• Installation facile</li> <li>• Pas d'isolement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Source de courant onéreuse</li> <li>• Débit dépendant du bon contact avec le métal à protéger</li> <li>• Système lourd et encombrant.</li> </ul>

**Anodes à courant imposé :**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le courant est ajusté à la valeur voulue</li> <li>• Système léger, peu d'anodes</li> <li>• Énergie électrique peu coûteuse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulté d'installation</li> <li>• Coût élevé d'installation (isolation, écrans diélectriques)</li> <li>• Système fragile et vulnérable.</li> </ul>

**I.16 Conclusion**

La protection contre la corrosion des lignes enterrées, peut être obtenue en appliquant une protection passive (revêtement) en combinaison avec une protection cathodique en appliquant un courant avec une anode sacrificielle ou un potentiel Cu de à 850 mV. Ceci peut être réalisé avec /CuSo4. Cette dernière protection est dite active car elle affecte directement le processus de corrosion. Pour évaluer l'efficacité des systèmes de protection installés le long des canalisations, des mesures de potentiel et de courant sont généralement effectuées.

## ***CHAPITRE II***

### ***DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE***

## II.1 Introduction

Après avoir donné une étude sur les défaillances par corrosion par les sols et la synthèse bibliographique et une description du contexte industriel Nous présentons ici dans ce chapitre les formules et les données de base pour le calcul et la conception des installations de protection cathodique les calculs effectués sur le site d'Arzew. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux paramètres du sol tels que le PH et la résistivité. Nous avons aussi décrit la méthode suivie pour un dimensionnement d'un système de protection cathodique par courant imposé.

## II.2. Modèle mathématique

### II.2.1 Résistance longitudinale de la conduite par unité de longueur : $R_c$

Connue également sous le nom de résistance transversale, sa mesure par unité de longueur est exprimée en  $[\Omega/m]$ , et elle est définie comme suit :

$$R_c = \frac{\rho_c}{\pi(\varnothing_{ext}-\delta).\delta} \quad (II.15)$$

Avec :  $\rho_c$  : résistivité électrique du matériau de la structure  $[\Omega.mm^2/m]$

$\rho_c$  de l'acier peut être accepté pour  $0.245 \Omega.mm^2/m$  ;

$\varnothing_{ext}$ : diamètre extérieur de la structure [mm] ;

$\delta$  : épaisseur moyenne de la conduite [mm].

#### II.2.1.1 Calcul de la résistance longitudinale du tube par unité de longueur :

En appliquant l'équation II.15 je parviens à obtenir :

$$R_c = \frac{\rho_c}{\pi(\varnothing_{ext}-\delta).\delta} = \frac{0.18}{3.14(508-11.13)11.13} \quad R_c = 1.036 \times 10^{-5} \Omega/m$$

### II.2.2 Resistance transitoire « conduite-sol » : $R_t$

La variation de la résistance transitoire, désignée par  $R_t(t)$  et mesurée en  $[\Omega.m^2]$ , peut être estimée pour les pipelines en phase de planification ou en exploitation à l'aide de la relation suivante :

$$R_t(t) = R_{ti} \cdot e^{-\beta \cdot t} \quad (II.16)$$

Cependant, lors des calculs en protection cathodique, on préfère généralement utiliser la valeur moyenne de la résistance transitoire conduite-sol, notée  $R_{tm}$ , pour une durée de protection "t" donnée. Cette valeur, exprimée en  $[\Omega.m^2]$ , est obtenue par :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{(\beta \cdot t)} [1 - e^{(-\beta \cdot t)}] \quad (II.17)$$

Avec les paramètres suivants :

1.  $\beta$  : Coefficient de vieillissement du matériau de la conduite [1/an]
2. Pour l'acier,  $\beta$  peut être égal à 0.124 1/an
3.  $t$  : Durée d'exploitation du système de protection [ans]
4.  $R_{ti}$  : Résistance initiale d'isolement du revêtement ; à  $t=0$  [ $\Omega.m^2$ ]

### II.2.2.1 Calcul de la résistance transitoire moyenne, « conduite-sol » :

En appliquant l'équation II.17 je parviens à obtenir :

$$R_{tm} = \frac{R_{ti}}{(\beta.t)} [1 - e^{(-\beta.t)}] = \frac{50000}{0.124 \times 25} [1 - e^{(-0.124 \cdot 25)}] \quad R_{tm} = 15402.43 \Omega.m^2$$

### II.2.3 Résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite : $R_r$

Elle est désignée sous le symbole  $R_r(t)$  et mesure [ $\Omega.m$ ] pour une période d'exploitation  $t$ .

$$R_r(t) = \frac{R_{tm}}{(\pi.\phi_{ext})} \quad (II.18)$$

De plus, lors de la mise en place initiale du système de protection, la résistance d'isolement du revêtement est plus élevée. Désignée par  $R_r(0)$ , elle est définie comme suit :

$$R_r(0) = \frac{R_{ti}}{(\pi.\phi_{ext})} \quad (II.19)$$

### II.2.3.1 Calcul de la résistance d'isolement du revêtement par unité de longueur de la conduite à la fin et au début de l'exploitation :

En appliquant l'équation II.18 et II.19 je parviens à obtenir :

$$R_r(t) = \frac{R_{tm}}{(\pi.\phi_{ext})} = \frac{15402.43}{(3.14 \times 0.508)} \quad R_r(t) = 9655.96 \Omega.m$$

$$R_r(0) = \frac{R_{ti}}{(\pi.\phi_{ext})} = \frac{50000}{(3.14 \times 0.508)} \quad R_r(0) = 31345.604 \Omega.m$$

### II.2.4 Constante de distribution du potentiel le long de la conduite : $\alpha$

Également connu sous le nom de coefficient d'atténuation, cette mesure, exprimée en [1/m], reflète la diminution du potentiel le long des bras de protection.

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_c}{R_r(t)}} \quad (II.20)$$

Où,

$R_c$ : Résistance longitudinal de la conduite en  $\Omega m^{-1}$

$R_r$  : Résistance transversale de la conduite en  $\Omega m$

#### II.2.4.1 Calcul du coefficient d'atténuation :

En appliquant l'équation II.20 je parviens à obtenir :

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_c}{R_r(t)}} = \sqrt{\frac{1.036 \times 10^{-5}}{9651.07}} \quad \alpha = 3.276 \times 10^{-5}$$

#### II.2.5 Détermination du nombre de postes de soutirage et du nombre d'anodes

En fonction des caractéristiques spécifiques du pipeline, un certain nombre de points de soutirage sont requis pour réduire adéquatement le potentiel de la conduite et répondre aux critères de protection.

#### II.2.6 Résistance d'entrée d'une conduite revêtue : Z

Dans le contexte du transport des hydrocarbures par canalisation, les pipelines sont systématiquement revêtus, et ce revêtement possède une certaine résistance, connue sous le nom de résistance d'entrée. Comme pour toutes les résistances, elle est mesurée en ohms, et elle est déterminée par :

$$Z = \frac{\sqrt{R_c \cdot R_r(t)}}{2} \quad (II.21)$$

##### II.2.6.1 Calcul de la résistance d'entrée de la conduite :

En appliquant la relation II.21 j'obtiens

$$Z = \frac{\sqrt{R_c \cdot R_r(t)}}{2} = \frac{\sqrt{1.036 \times 10^{-5} \times 9651.07}}{2} \quad Z = 0.158$$

$$Z(0) = \frac{\sqrt{31329.713 \times 1.036 \times 10^{-5}}}{2} \quad Z(0) = 0.284$$

#### II.2.7 Les différents valeurs de potentiels :

De manière générale, pour les structures métalliques immergées ou enterrées, on différencie trois types de potentiel utilisés dans les calculs de protection cathodique. Les potentiels sont rapportés par rapport à une électrode de référence, qui est dans ce cas l'électrode de sulfate de cuivre-cuivre (Cu-CuSO<sub>4</sub>).

##### A- Potentiel naturel

Ce potentiel est désigné par la notation "En" et représente le potentiel stable du métal dans le sol.

### B- Potentiels de protection ( $E_{max}$ , $E_{min}$ )

Les potentiels de protection sont définis comme un espace de valeurs allant du potentiel de protection maximum ( $E_{max}$ ) au potentiel de protection minimum ( $E_{min}$ ) à partir desquels le métal ne subit pas d'oxydation. Le choix du potentiel  $E_{pmax}$  dépend du type de revêtements utilisés, car certains ne tolèrent pas des valeurs trop négatives. Ainsi, la capacité de protection est restreinte. Alors que l'on évalue le potentiel  $E_{pmin}$  en se basant sur le diagramme de Pour Baix. La valeur absolue la plus petite pour l'acier est de 850mV.

### C- Gain de potentiel ( $E_{pmax}$ , $E_{pmin}$ )

Lorsqu'un métal est relié à une source de prélèvement, il subit une variation de son potentiel, appelée différence de potentiel. On peut identifier deux niveaux de protection, notés  $E_{pmax}$  et  $E_{pmin}$ , qui correspondent respectivement au niveau maximal et minimal de cette différence de potentiel par rapport au potentiel naturel.

De la même manière que le flux de courant injecté dans l'électrolyte pour atteindre la tuyauterie et réduire son potentiel, le potentiel du métal lorsqu'il est relié au système de protection cathodique n'est pas constant, mais fluctue selon une loi exponentielle.

$$E_{pmax} = E_{max} - E_n \quad (II.22)$$

$$E_{pmin} = E_{min} - E_n \quad (II.23)$$

Pour déterminer la façon dont le potentiel et le courant varient, je fais les suppositions suivantes :

- 1- L'électrolyte (sol) est homogène dans tout le pipeline.
- 2- Les tubes soudés ont un diamètre, une épaisseur de paroi et une résistance électrique constants.
- 3- Le revêtement du tuyau est uniforme sur toute la longueur du tuyau.

Les expressions des fluctuations de potentiel et de courant en tout point « x » sur le tuyau sont les suivantes :

$$E(x) = E_{max} \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot z}{2 \cdot \pi \cdot z + \rho_{ms}} e^{-\alpha \cdot x} + \frac{\rho_{ms} \cdot y}{2 \cdot \pi \cdot z \cdot y \cdot \sqrt{y^2 + x^2}} \right] \quad (II.24)$$

$$I(x) = \frac{E_{max}}{\alpha \cdot R_r + \frac{\rho_{ms}}{\pi \cdot y}} \left[ e^{-\alpha \cdot x} - \frac{\rho_{ms}}{R_r} \cdot \text{Arsh} \frac{y}{x} \right] \quad (II.25)$$

$Y(m)$  représente l'espace entre le lit anodique et le tuyau, tandis que  $X$  est la distance entre la station de prélèvement et le lieu de mesure.

**II.2.7.1 Calcul des gains de potentiel :**

Elles s’obtiennent en appliquant les relations II.22 et II.23

$$E_{pmax} = E_{max} - E_n = -1500+550 \quad E_{pmax}=-0.95\text{mv}$$

$$E_{pmin} = E_{min} - E_n = -850+550 \quad E_{pmin}=-0.3\text{mv}$$

**II.2.8 Coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins : K**

Généralement, les canalisations pour transporter les hydrocarbures sont de longueur considérable. Un unique point d'extraction ne peut pas fournir suffisamment de courant pour protéger toute la canalisation. C'est pourquoi il faut prendre en compte un coefficient, K, lors des calculs de la longueur de protection. Ce coefficient est déterminé par la formule suivante :

$$K = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmax}}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot y + \rho_{ms}}{2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot y}\right)}} \quad (\text{II.26})$$

**II.2.8.1 Calcul du coefficient tenant compte des postes de soutirage voisins :**

$$K = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmax}}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot z + \rho_{ms}}{2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot z}\right)}} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{-0.3}{-0.95}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 \times \pi \times 0.158 \times 250 + 60.40}{2 \times \pi \times 0.158 \times 250}\right)}}$$

**K = 0.516**

**II.2.9 La longueur de protection d’un poste de soutirage Lp**

La mesure de protection " Lp " indique la plus grande distance à laquelle une conduite peut être protégée grâce à l'énergie électrique fournie par une station de tirage. En d’autres termes, le rayon de la station de tirage a atteint son maximum. Pour une protection optimale, placez la station de retrait au milieu pour offrir une plage de protection plus large. Lp Est exprimé en mètres (m) et se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$Lp = \frac{2}{\alpha} \ln \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot y}{k \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmax}}\right) (2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot y + \rho_{ms})} \right) \quad (\text{II.27})$$

**II.2.9.1 Calcul de la longueur de protection d’un poste de soutirage :**

En appliquant la relation II.27 j’obtiens

$$Lp = \frac{2}{\alpha} \ln \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot y}{k \left(\frac{E_{pmin}}{E_{pmax}}\right) (2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot z + \rho_{ms})} \right) =$$

$$\frac{2}{3.276 \times 10^{-5}} \ln \left( \frac{2 \times \pi \times 250 \times 0.158}{\left(\frac{-0.3}{-0.950}\right) (2 \times \pi \times 250 \times 0.158 + 60.40)} \right) \quad Lp=97.466Km$$

**II.2.10 La nombre de postes de protection cathodique  $N_{ppc}$**

Si l'on sait quelle est la longueur de la conduite et de la protection d'un seul poste de soutirage, il est alors simple de calculer combien de postes sont nécessaires pour protéger l'intégralité de la conduite.

$$N_{ppc} = \frac{L}{Lp+1} \tag{II.28}$$

L : longueur de la conduite

$Lp$  : porte d'un seul poste de soutirage

**II.2.10.1 Calcul du nombre de postes de protection cathodique :**

En appliquant la relation II.28 j'obtiens

$$N_{ppc} = \frac{L}{Lp+1} = \frac{116.265}{97.466+1} \quad N_{ppc} = 1.18 \quad N_{ppc} = 2$$

Le nombre de postes de soutirage doit être un entier. Par conséquent, si le calcul aboutit à une valeur décimale, celle-ci sera arrondie à l'entier supérieur le plus proche

**II.2.11 L'intensité du courant de drainage :  $I_{dr}$**

En ce qui concerne le flux de drainage, il s'agit de la quantité de courant que le poste de protection doit délivrer pour répondre aux exigences de protection à chaque point de la canalisation. Cette valeur est mesurée en Ampère et est déterminée par la formule suivante :

$$I_{dr} = \frac{|Ep_{max}|}{z \cdot [1 + 2 \cdot \text{Exp}(-\alpha \cdot Lp)] + \frac{\rho_{ms}}{2 \cdot \pi \cdot y}} \tag{II.29}$$

Il est important de remarquer que le débit de courant fourni par le poste de distribution au début de l'installation est plus faible que celui requis à la fin de la période d'utilisation. Cela est principalement dû à la résistance élevée du revêtement en début d'utilisation. Le courant au début de l'exploitation est calculé selon la formule suivante, en ne prenant pas en compte les variations de la constante K

$$I_{dr}(0) = \frac{|Ep_{max}|}{z(0) \cdot [1 + 2 \cdot \text{Exp}(-\alpha \cdot Lp)] + \frac{\rho_{ms}}{2 \cdot \pi \cdot y}} \tag{II.30}$$

**II.2.11.1 L'intensité du courant de drainage :  $I_{dr}$**

En appliquant la relation II.29 et II.30 j'obtiens

$$I_{dr} = \frac{|Ep_{max}|}{z.[1+2.Exp(-\alpha.Lp)]+\frac{\rho_{ms}}{2.\pi.y}} = \frac{|0.950|}{0158[1+2.Exp(-3.276 \times 10^{-5} \times 97.466)]+\frac{60.4}{2.\pi. \times 250}} \quad I_{dr} = 1.857A$$

$$I_{dr}(0) = \frac{|Ep_{max}|}{z(0).[1+2.Exp(-\alpha.Lp)]+\frac{\rho_{ms}}{2.\pi.y}} = \frac{|0.950|}{0.284 \times [1+2.Exp(-3.276 \times 10^{-5} \times 97.466)]+\frac{60.40}{2.\pi.}} \quad I_{dr}(0) = 1.069A$$

**II.2.12 Le nombre d'anodes minimal, nécessaire à la protection : Na**

Compte tenu de la durée de vie de la protection et des qualités de l'anode sélectionnée, on peut estimer le nombre d'anodes approprié pour la protection contre la corrosion d'une structure par la relation suivante :

$$Na = \frac{I_{dr}.t.m}{\mu.Ma} \tag{II.31}$$

Où :  $I_{dr}$ : courant de protection (ou de drainage) [A]

t : durée de l'exploitation [ans]

m : consommation massique de l'anode [Kg/ (A. Ans)]

Ma : la masse d'une anode [Kg]

$\mu$  : coefficient d'utilisation de l'anode

**II.2.12.1 Calcul du nombre d'anodes minimal pour la protection :**

Le nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection de la structure doit être un nombre entier. Il est donné par l'équation II.31

$$Na = \frac{I_{dr}.t.m}{\mu.Ma} = \frac{1.857 \times 25 \times 0.3}{0.5 \times 22.7} \quad Na = 1.227 \approx 2$$

**II.2.13 La résistance de terre du déversoir : R**

La résistance du déversoir est donnée par :

$$R = R_{ma} + R_t + R_{pol} \tag{II.32}$$

Où :  $R_t$ : résistance du lit d'anode [ $\Omega$ ]

$R_{ma}$ : résistance du matériau de l'anode

$R_{pol}$ : résistance de la polarisation

### II.2.13.1 Calcul de la résistance de terre du déversoir pour des anodes posées horizontalement et verticalement :

$$R = R_{ma} + R_t + R_{pol}$$

#### II.2.13.1.2 La résistance du matériau de l'anode

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$R_{ma} = \rho_a \frac{l_a}{S_a} \quad (\text{II.33})$$

#### II.2.13.1.3 Calcul de la résistance du matériau des anodes :

Selon l'équation II.33 on a :

$$R_{ma} = \rho_a \frac{l_a}{S_a} = 0.229 \times 10^{-6} \frac{1.5}{\pi \times \left(\frac{50.8 \times 10^{-3}}{2}\right)^2} \quad R_{ma} = 1.69 \times 10^{-4} \Omega$$

#### II.2.13.1.4 La résistance du lit d'anodes :

Plusieurs approches sont disponibles pour le calcul de ce paramètre. Cependant, nous opterons pour celles fournies par NACE.

La résistance totale des anodes est influencée par plusieurs paramètres, notamment :

- La position des anodes, qu'elles soient disposées verticalement ou horizontalement ;
- La profondeur à laquelle les anodes sont implantées ;
- L'espacement entre les anodes ;
- La résistivité du backfill.

#### II.2.13.2 Un lit d'anodes disposées horizontalement :

Considérons  $R_h$  comme étant la résistance d'une anode disposée horizontalement, laquelle est définie par l'équation de Dwight pour des configurations comportant plusieurs anodes.

$$R_h = \frac{0.00159 \cdot \rho_{ms}}{l_a} \left[ \text{Ln} \frac{4l_a^2 + 4l_a \sqrt{S^2 + l_a^2}}{d_a \cdot S} + \frac{S}{l_a} + \frac{\sqrt{S^2 + l_a^2}}{l_a} - 1 \right] \quad (\text{II.34})$$

#### II.2.13.2.5 Calcul de la résistance totale des anodes :

Cas d'un lit d'anode composé d'anodes posées horizontalement :

La résistance d'une seule anode est donnée par la relation II.34

$$R_h = \frac{0.00159 \cdot \rho_{ms}}{l_a} \left[ \text{Ln} \frac{4l_a^2 + 4l_a \sqrt{S^2 + l_a^2}}{d_a \cdot S} + \frac{S}{l_a} + \frac{\sqrt{S^2 + l_a^2}}{l_a} - 1 \right] =$$

$$\frac{0.00159}{1.5} \left[ \text{Ln} \frac{4 \times 1.5^2 + 4 \times 1.5 \sqrt{(2 \times 1.5)^2 + (1.5)^2}}{0.508 \times (2 \times 1.5)} + \frac{2 \times 1.5}{1.5} + \frac{\sqrt{(1.5 \times 2)^2 + (1.5)^2}}{1.5} - 1 \right]$$

$$R_h = 25.71 \Omega$$

Considérons F comme étant le coefficient permettant de prendre en compte l'impact des autres anodes ; celui-ci est déterminé par la relation suivante :

$$F = 1 + \frac{\rho_b}{\pi \cdot (E_a + l_a) \cdot R_h} \text{Ln}(0.66Na) \quad (\text{II.35})$$

Le facteur F, est donné par II.35

$$F = 1 + \frac{\rho_b}{\pi \cdot (E_a + l_a) \cdot R_h} \text{Ln}(0.66Na) = 1 + \frac{60.40}{\pi \cdot (5 + 1.5) \cdot 25.71} \text{Ln}(0.66 \times 2)$$

$$F = 1.031$$

Par la suite, la résistance totale pour un ensemble d'anodes disposées horizontalement est déterminée par la relation suivante :

$$R_{th} = \frac{R_h}{N_a} F \quad (\text{II.36})$$

On déduit donc la résistance du lit d'anode par II.36

$$R_{th} = \frac{R_h}{N_a} F = \frac{25.71}{13} \times 1.247 \quad R_{th} = 13.27 \Omega$$

Selon l'équation II.19 La résistance du déversoir est donnée par :

$$R = R_{ma} + R_{th} + R_{pol} = 1.69 \times 10^{-4} + 13.27 + 1.367$$

$$R = 14.63 (\Omega)$$

### II.2.13.3 Un lit d'anodes disposées vertical :

Dans le cas des anodes disposées verticalement, la résistance totale est déterminée par la relation ci-dessous :

$$R_t = R_v = \frac{0.00159 \cdot \rho_{ms}}{N_a \cdot l_a} \left[ \text{Ln} \frac{8l_a^2}{d_a} - 1 \frac{2l_a}{E_a} \text{Ln}(0.656Na) \right] \quad (\text{II.37})$$

Où :

- $\rho_{ms}$  : représente la résistance du matériau de remplissage arrière en [ $\Omega \cdot m$ ]
- $l_a$  : correspond à la longueur de l'anode en [m]
- $d_a$  : désigne le diamètre de l'anode en [m]
- S : représente la profondeur de l'anode en [m]

- $N_a$ : indique le nombre d'anodes constituant le lit d'anodes
- $E_a$ : représente l'espace entre deux anodes consécutives en [m]

#### II.2.13.4 La résistance de polarisation :

Elle est exprimée en ohms et est déterminée par l'expression suivante :

$$R_{pol} = \frac{U_a}{I_{da}} \quad (\text{II.38})$$

##### II.2.13.4.1 Calcul de la résistance de polarisation :

Selon l'équation II.38 La résistance de polarisation est :

$$R_{pol} = \frac{u_a}{I_{da}} = \frac{2}{1.463} = \quad R_{pol} = 1.376 \Omega$$

$$I_{da} = \frac{I_{dr} + I_{dr}(0)}{2}$$

#### II.2.14 La résistance des câbles :

Comme toute résistance, elle est exprimée en ohms. Pour l'obtenir, j'applique la formule suivante :

$$R_{cable} = \rho_c \frac{l_{cable}}{S_a} \quad (\text{II.39})$$

#### II.2.15 La puissance du poste de soutirage :

La tension du poste, notée U [V], est calculée en utilisant la loi d'Ohm. Cependant, afin d'assurer une régulation adéquate et une disponibilité du courant de protection pendant l'exploitation du système, le système de protection cathodique doit disposer d'une marge de tension, ce qui nécessite une correction de la tension en prenant en compte le rendement du poste, noté  $\eta$ .

Le dimensionnement du redresseur est déterminé par la tension, l'intensité et la puissance.

$$P = \frac{U \cdot I}{\eta} \quad \rightarrow \rightarrow \quad U = R \cdot I \quad \rightarrow \rightarrow \quad P = \frac{U \cdot I^2}{\eta} \quad (\text{II.40})$$

Par ailleurs, l'application de cette relation requiert la connaissance de la résistance totale  $R_{tot}$ .

#### Détermination de la puissance du poste de protection cathodique :

Selon les lois de l'électricité, en connaissant le courant délivré par le poste et sa tension, sa puissance peut être déterminée par la relation suivante :

$$P = U \cdot I_{dr} \quad (\text{II.40})$$

$$R_{tot} = R_c + R + R_{ps} \quad (\text{II.41})$$

Où :  $R_c = R_{c1} + R_{c2}$  : résistance du câble

$R_{ps}$  ( $\Omega$ ): résistance due à la protection passive = z

R : résistance de terre du [déversoir]

$R_c$ : résistance du sol entre la canalisation et le déversoir

Par ailleurs, l'application de cette relation requiert la connaissance de la résistance totale

$$R_{tot} = R_c + R + R_{ps}$$

Pour des anodes posées horizontalement

$$R_{ps} = Z \cdot I_{dr} = (0.158 \times 1.857) = R_{ps} = 0.293 \text{ ohm}$$

$$R_c = R_{c1} + R_{c2} = \rho_c \cdot y / S_c$$

$$R_c = 0.0172 \times 250 / 50 = R_c = 0.086 \Omega$$

$$R_{tot} = 0.086 + 0.293 + 14.63$$

$$R_{tot} = 15.009 \Omega$$

### II.2.15.1 Calcul de la tension aux bornes du poste de soutirage :

Selon la relation II.40 la tension est donnée par :

$$U = (R_{tot} \cdot I_{dr}) / (\eta) = (15.009 \times 1.857) / 0.85$$

$$U = 32.79 \text{ (v)}$$

### II.2.16 Calcul de la puissance requise par le poste

D'après l'équation II.29 j'ai :

$$P = U \cdot I_{dr} = 32.79 \times 1.857$$

$$P = 36.842 \text{ watts}$$

## II.3 Caractéristique des composants du système de protection [Sonatrach Arziw]

## II.3.1 Caractéristique du gazoduc

Tableau II-1 Caractéristique du gazoduc [47]

<b>Durée d'exploitation</b>	<b>25 ans</b>
<b>Longueur de la conduite</b>	116265 m
<b>Epaisseur moyenne</b>	11.13 mm
<b>Diamètre</b>	(20') (508 mm)
<b>Nuance acier</b>	API5L
<b>Densité de courant</b>	0.1 mA/m <sup>2</sup>
<b>La résistance d'isolement initiale</b>	50 Ωm <sup>2</sup>
<b>Résistivité électrique du matériau moy</b>	60.40 Ω.mm <sup>2</sup> /m
<b>Résistivité de l'acier</b>	0.18.10 <sup>-8</sup> Ωm
<b>Type de revêtement</b>	PE
<b>Coefficient de vieillissement du revêtement</b>	0.124 mv
<b>Potentiel de protection Max</b>	-1500 mv
<b>Potentiel de protection Min</b>	-850 mv
<b>Potentiel naturel du tube</b>	-550 mv

## II.3.2 Caractéristique des anode (fer silicium)

Tableau II-2 Caractéristique des anode (fer silicium [48])

Composition chimique	
Longueur de l'anode sans backfill	1500mm
Diamètre de l'anode sans backfill	508mm
La densité	0.2Adm <sup>2</sup>
La densité spécifique	6.8g/cm <sup>3</sup>
Consommation massique	0.3 Kg/A. year
Masse unitaire (anodique)	22.7 Kg
Résistivité de l'anode (backfill)	$\rho_a=0.229 \times 10^{-6} \Omega.m$
Profondeur de pose	1.5 m
Espace entre anode	5m
Coefficient d'utilisation	0.5

**Conclusion :**

Ce chapitre fournit une contribution significative à la compréhension et à la mise en œuvre de la protection cathodique, offrant des solutions et des calculs éprouvés pour prévenir la corrosion par les sols. Un remplacement régulier et une surveillance constante sont essentiels pour assurer une protection continue. En respectant ces étapes, et en assurant des calculs précis, et en garantissant une installation adéquate, un système de protection cathodique peut assurer une protection efficace des structures métalliques contre la corrosion pendant de longues périodes.

## ***Chapitre III***

### ***Simulation et interprétations des résultats***

### III.1 INTRODUCTION :

Une simulation est réalisée sur le programme Matlab/Simulink, les résultats ont été obtenus comme cela a été fait illustrée le comportement de système de protection cathodique sont effectuées et évaluer ses performances du système. Les différentes parties du système (panneaux photovoltaïques, le réseau électrique, convertisseur AC/DC et le transformateur) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés entre eux d'une manière cohérente.

### III.2 Les types des installations différents :

Par la différence de la source d'alimentation qui sont :

#### III.2.1 Les installations par l'utilisation des panneaux photovoltaïques :

L'énergie solaire photovoltaïque est produite à partir de l'énergie du rayonnement solaire. Pour cette raison, les panneaux photovoltaïques collectés sont installés sur le toit dans la meilleure orientation possible.

Le but est de s'exposer au plus grand possible de rayonnement solaire, de collecter photons du soleil et de les convertir en électricité. La configuration d'un panneau solaire est conçue de telle sorte que la superposition de couches chargées négativement ou positivement génère une tension lorsque photons le traversent. Un câble relié aux bornes positive et négative, soit semblable à une batterie, permet d'utiliser l'énergie produite.[47]

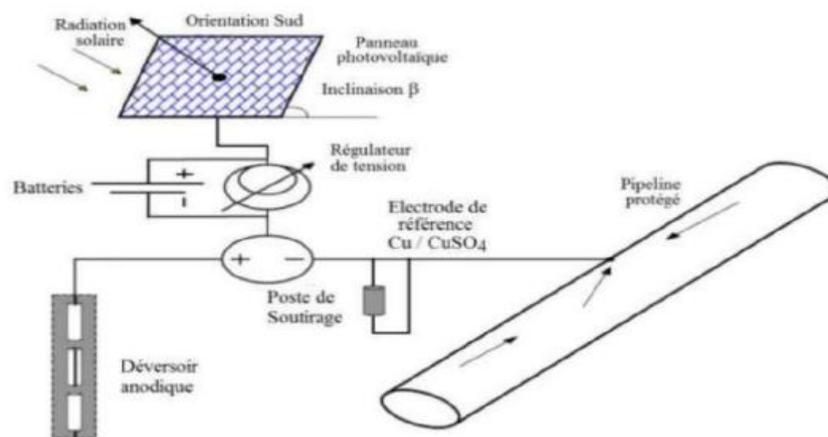


figure III-1 Schéma Général d'un système de protection cathodique par énergie solaire [48]

#### III.2.2 Les installations par l'utilisation du réseau électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures qui permettent le transport de l'énergie électrique depuis les centres de production jusqu'aux consommateurs d'électricité. Se compose de fils électriques fonctionnant à différents niveaux de tension et connectés les uns aux autres au sein d'une sous-station.

Dans les sous-stations électriques, les transformateurs peuvent être utilisés pour distribuer et transférer l'énergie d'une tension à une autre. [49]

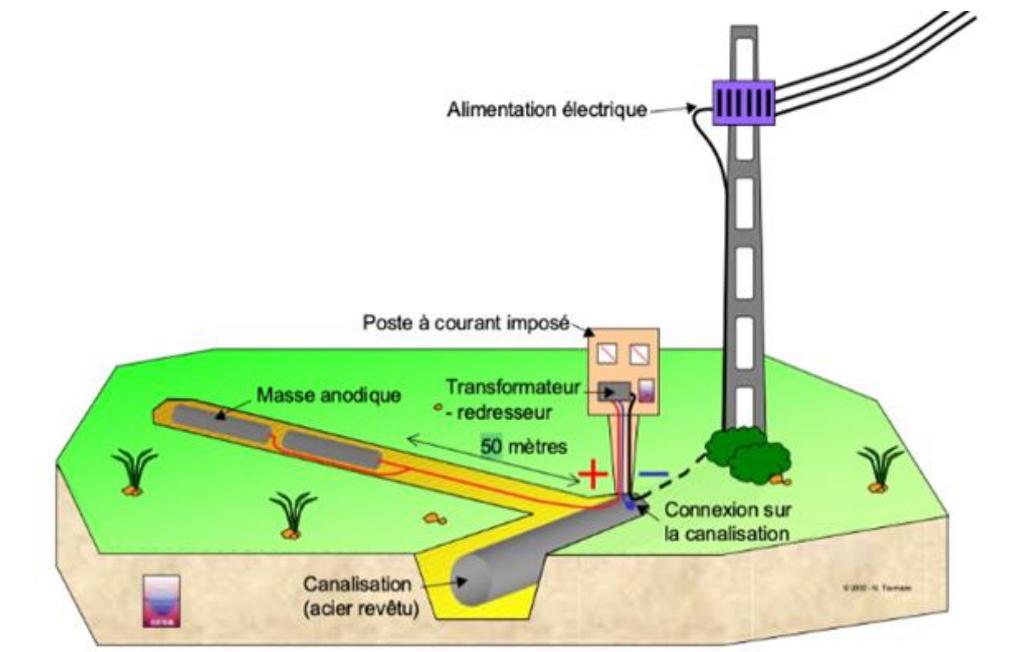


Figure III-2 Schéma Général d'un système de protection cathodique du réseau électrique [50]

### III.3 Les équipements de l'installation

#### Les Transformateurs :

Dans la centrale thermique 4 types des transformateurs qui sont :

#### III.3.1 Le transformateur principal :

Le premier est le transformateur principal et le second est le transformateur élévateur. Celui-ci est connecté à l'alternateur. Sa mission est de porter la tension aux bornes de l'alternateur 15,75 kV à la tension secteur 220 kV et d'évacuer le réseau électrique. Les appareils suivants sont équipés pour le refroidissement :

- Ventilation forcée par ventilateur
- Circulation forcée d'huile par pompe moto
- Le système de refroidissement est composé de 9 groupes de freins, chaque groupe est équipé de 2 ventilateurs et d'une pompe à huile



*Figure III-3 Transformateur principal*

### III.3.2 Le transformateur de soutirage :

Il existe également un deuxième type de transformateur, le transformateur débrochable ou bien soutirage. Ce dernier, est un transformateur abaisseur. Son système de refroidissement est de type ONAF (Oil Natural Air Forced) et est alimenté par un jeu de barres relié à l'extrémité du générateur, assurant l'alimentation électrique des auxiliaires de la centrale.



*Figure III-4 Transformateur de soutirage*

### III.3.3 Le transformateur de secours :

Ce type de transformateur est également un transformateur abaisseur (63 kV/6 kV), et l'est alimenté par la ligne électrique 63 kV et est réservé comme source d'alimentation de secours pour les équipements auxiliaires, dont le refroidissement est assuré par le système fourni. ONAF (Pétrole) Garantie Force Aérienne Naturelle). L'alimentation de secours du est fournie via une ligne du réseau 63 kV et après son passage dans le transformateur de secours, elle est distribuée à deux jeux de barres de 6 kV chacun. Transformateur abaisseur de tension.



Figure III-5 Transformateur de soutirage

### III.3.4 Le transformateur d'excitation :

Il est alimenté par la barre conductrice reliée à la sortie d'alternateur, assure l'excitation d'alternateur, par l'intermédiaire d'un redresseur à base de thyristor, son système de refroidissement se base sur la circulation naturelle d'air et celle d'huile. Le transformateur qui utilisé dans le système c'est le transformateur abaisseur.



Figure III-6 Transformateur d'excitation. [51]

## III.4 Classification des convertisseurs statiques :

### III.4.1 Redresseur :

Un convertisseur AC-DC qui convertit la tension AC en tension DC unidirectionnelle. En les contrôlant, vous pouvez ajuster la valeur moyenne de la tension résultante.

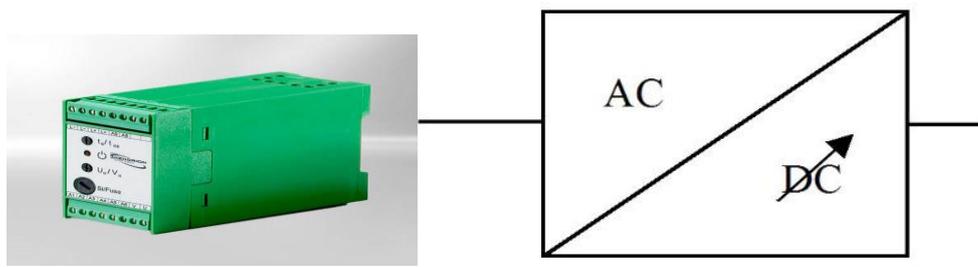


Figure III-7 Convertisseur redresseur. [53]

### III.4.2 Les hacheurs :

Ce sont des convertisseurs DC-DC qui fournissent une tension DC réglable à partir d'une tension DC de valeur fixe et agissent comme un transformateur DC.



Figure III-8 Convertisseur hacheur. [54]

### III.4.3 Les onduleurs :

Ce sont des convertisseurs DC, ils peuvent donc convertir la tension DC en tension AC et sont appelés onduleurs de tension (ou s'ils convertissent le DC en AC)

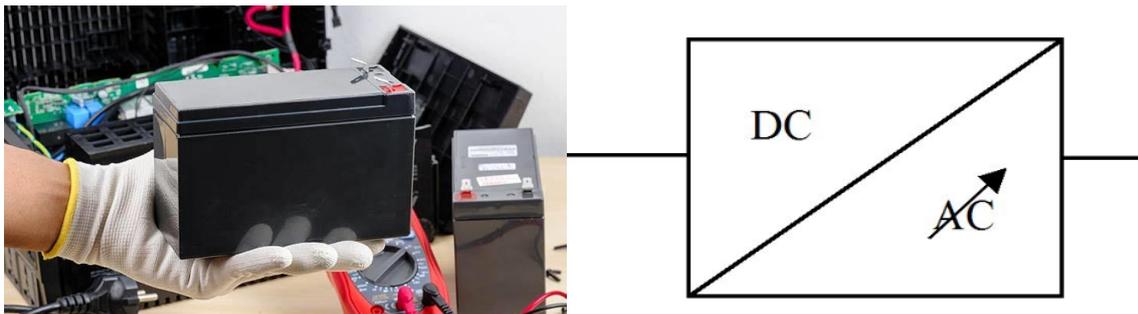


Figure III-9 Convertisseur onduleur. [55]

### III.4.4 Les gradateurs :

Est un dispositif électrique qui permet de contrôler l'intensité lumineuse d'une lampe ou d'un groupe de lampes. Il fonctionne en modifiant la quantité de courant électrique qui atteint l'ampoule, ce qui permet de régler la luminosité selon les besoins et les préférences. [52]

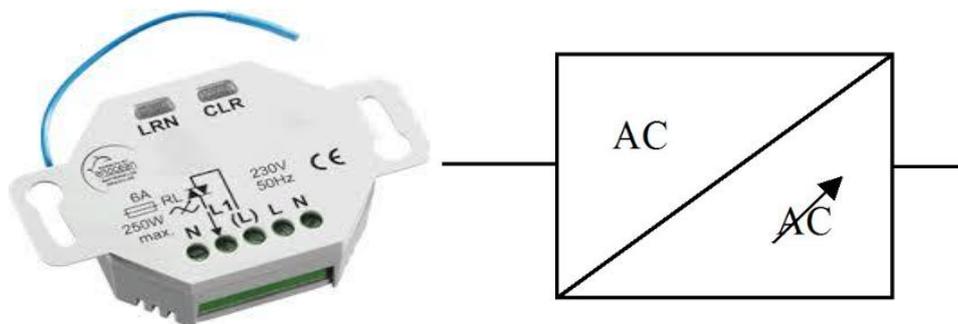


Figure III-10 Convertisseur gradateur. [56]

Le convertisseur statique qui utilisé dans le système c'est le redresseur.

### III.5 Schéma de simulation :

Dans ce chapitre, nous avons simulé le système en utilisant le Matlab. Le système est constitué d'un réseau électrique, un transformateur, d'un système de filtration des harmoniques et la partie la plus importante est le redresseur, il peut également être remplacé de l'anode, cathode et les câbles de connexion par une résistance

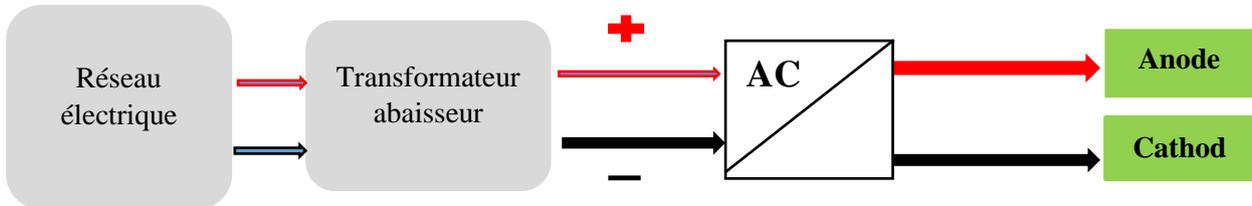


Figure III-11 Schéma de simulation.

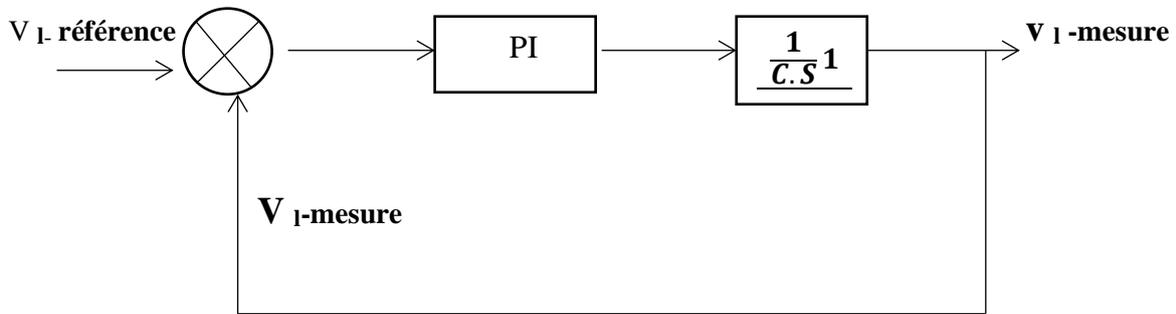


Figure III-12 boucle de régulation de la tension.

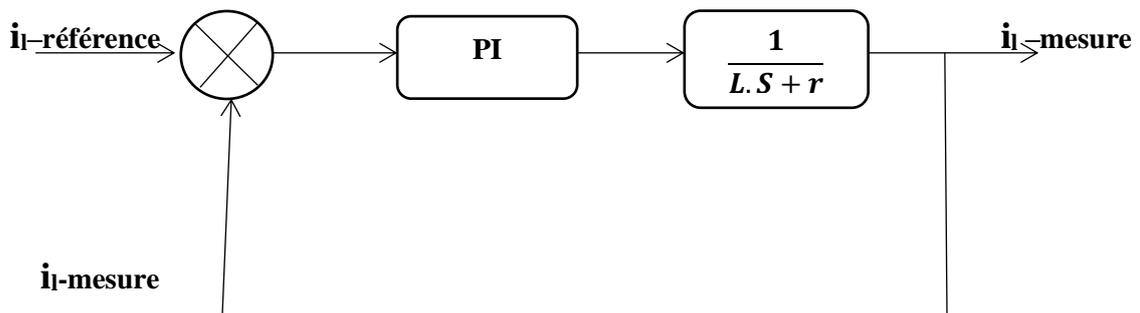


Figure III-13 Boucle de régulation de l'intensité

## Introduction à MATLAB / Simulink

### Matlab :

MATLAB est une abréviation de MATRIX LABORATORY. C'est un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique.[58]

Lancez Matlab à partir du menu de démarrage.

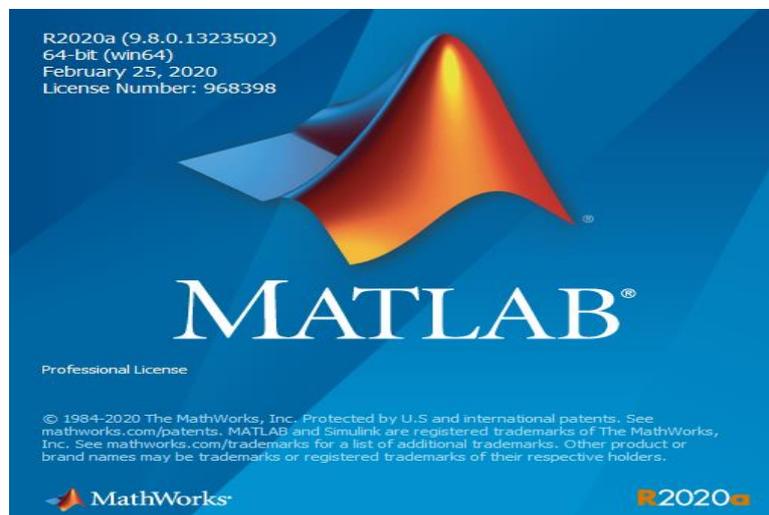


Figure III-14 Lancement du Matlab

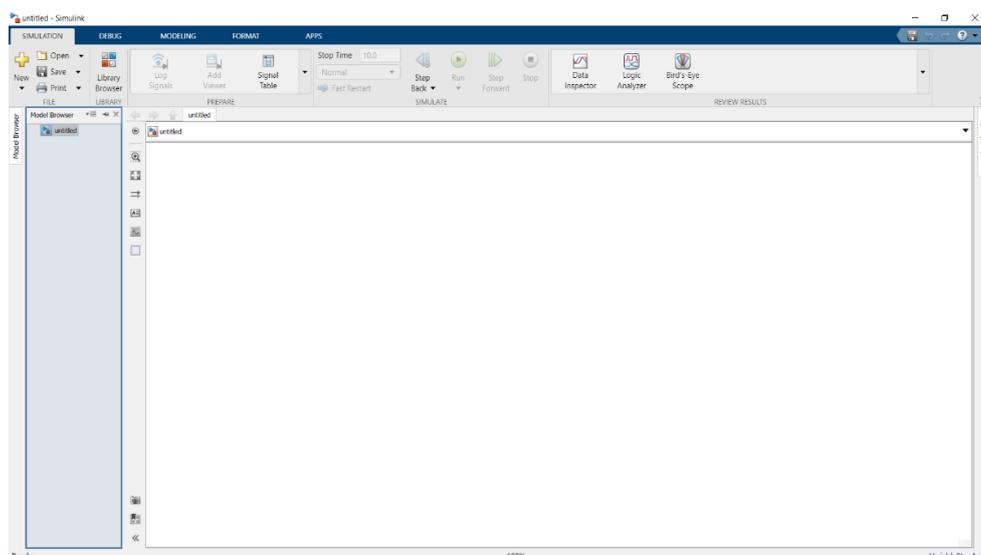


Figure III-15 Interface MATLAB



Figure III- 16 Presentation de l'interface [59]

### Simulink

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ; une extension de MATLAB, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) [58]

Simulink est intégré à Matlab. Pour y accéder, ouvrez Matlab et cliquez sur l'icône **Simulink** dans la barre d'outils ou tapez Simulink dans la fenêtre de commande.

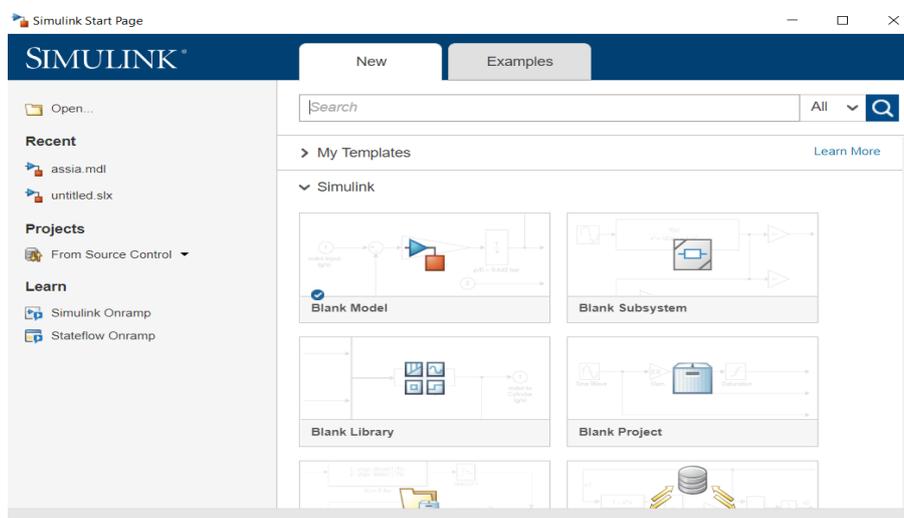


Figure III-17 fenêtre Simulink

**Création d'un modèle Simulink :**

Simulink peut être lancé depuis l'environnement de MATLAB

- En cliquant, dans la barre d'outils, sur le bouton
- Ou en tapant Simulink dans le Command Windows.

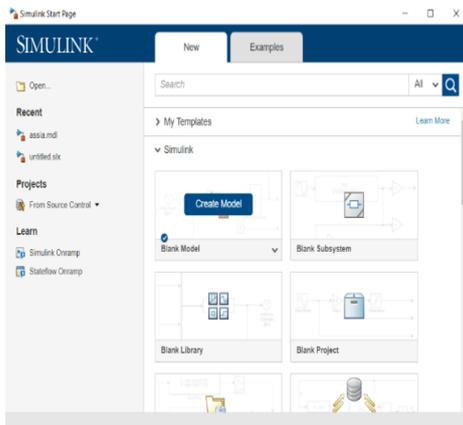


figure III-18 Simulink start page

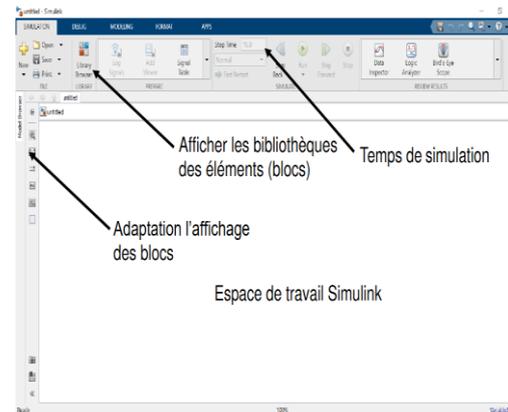


figure III-19 Simulink

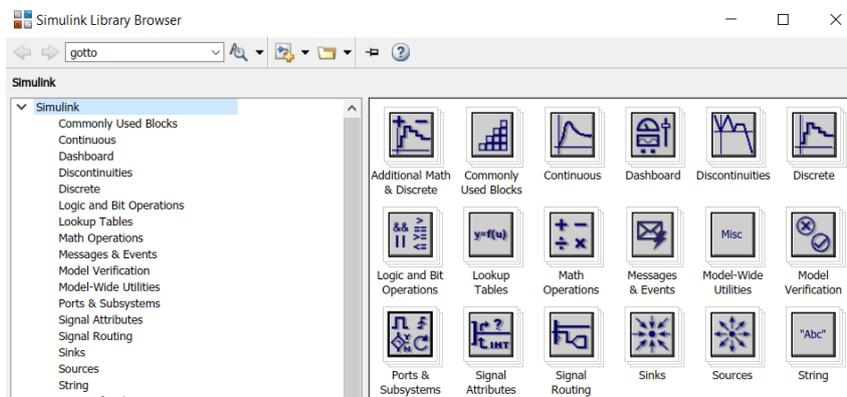
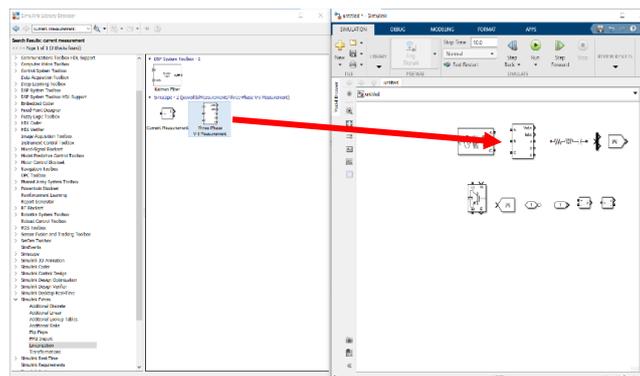
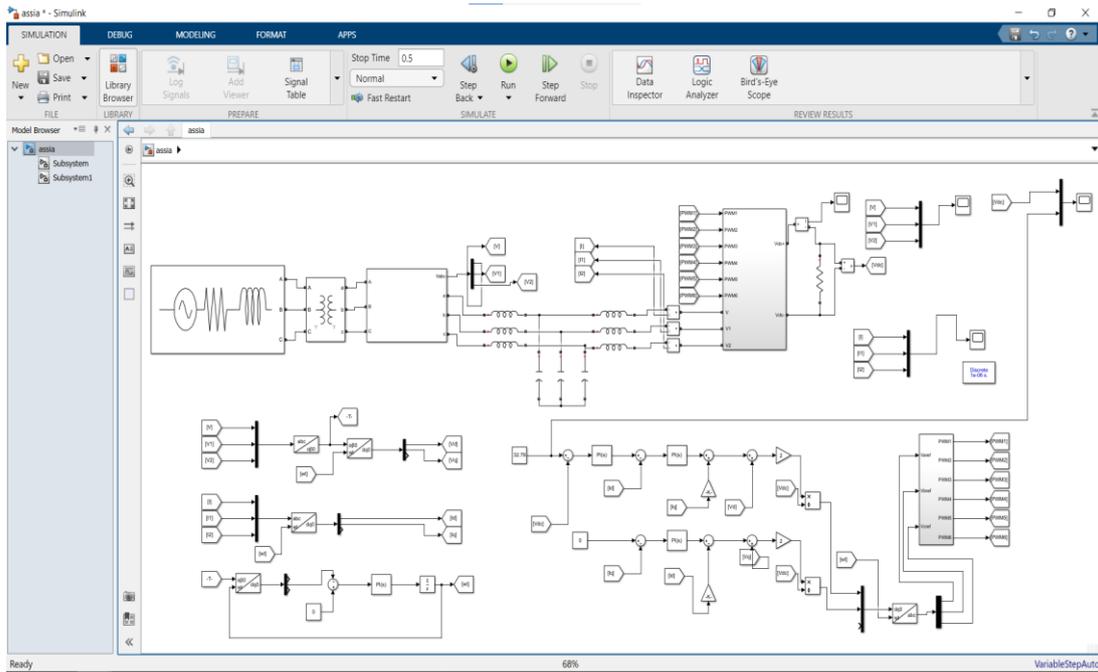


Figure III- 20 Navigateur de la librairie de Simulink

Etape 2 : Ajouter des blocs par « glisser / déposer » (drag and drop):







III.6 Résultats et interprétations :

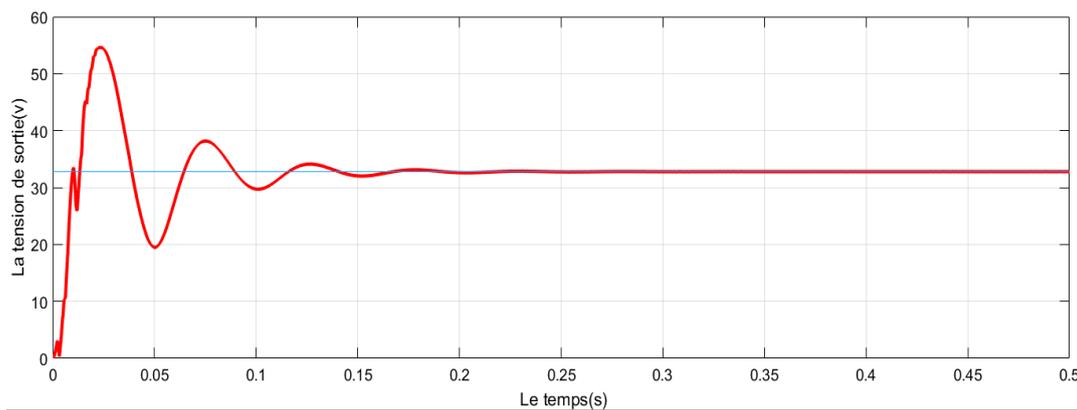


Figure III-25 Courbe de tension de sortie

Pour :  $U= 17.44 \text{ v}$      $R=7.683 \Omega$

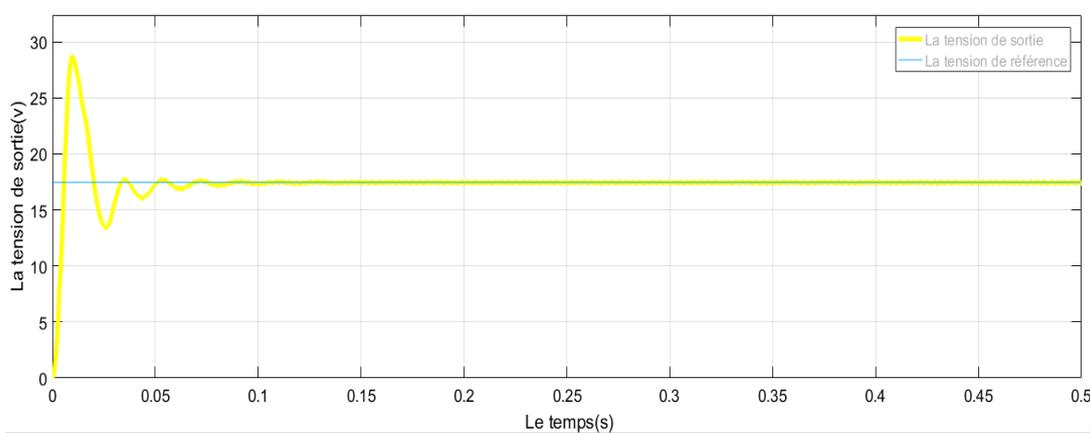


Figure III-26 Courbe de tension de sortie [60]

### III.6.1 Interprétation de la courbe de tension de sortie

#### La phase 01 :

La tension de charge correspond parfaitement à sa valeur de référence, qui est la valeur Souhaitée. Ensemble du système a été modélisé comme un système du second ordre, on note que la réponse obtenue reflète exactement le comportement du système du second ordre. En modifiant la valeur des paramètres proportionnels et intégrateurs, nous pouvons optimiser le temps de réponse, la limitation des dépassements et erreur statique peuvent être minimisées (précision).

Une diminution la tension de sortie peut être une réponse appropriée pour aligner la protection cathodique avec les besoins réels.

#### La phase 02 :

La stabilité de la tension de sortie bien régulée à sa valeur de référence qui est de 32 dans un système de protection cathodique est cruciale pour assurer une protection cathodique efficace et fiable de la structure métallique

Pour :  $U = 32.79 \text{ v}$   $R = 15.009 \Omega$

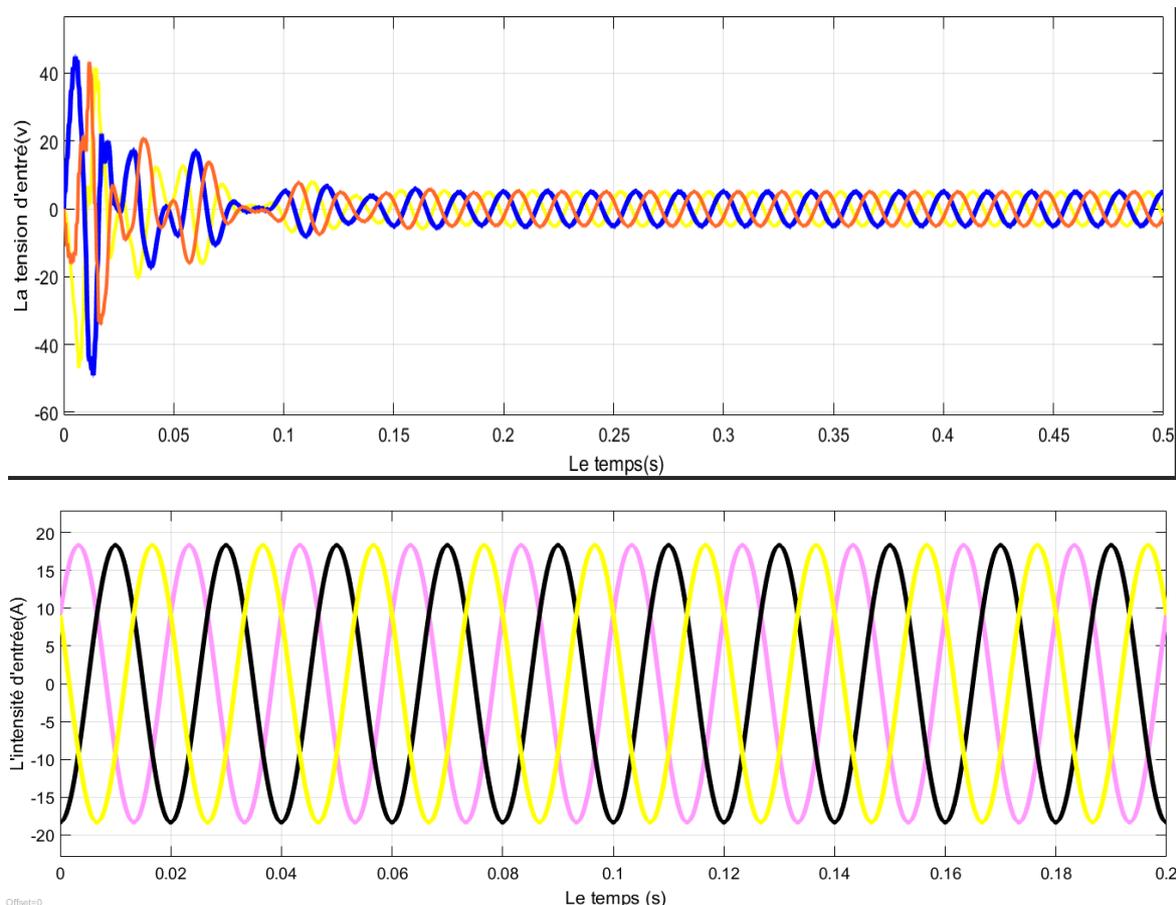


Figure III-27 Courbes de tension d'entrée et l'intensité de l'entrée

Pour :  $U= 17.44 \text{ v}$   $R= 7.683 \Omega$

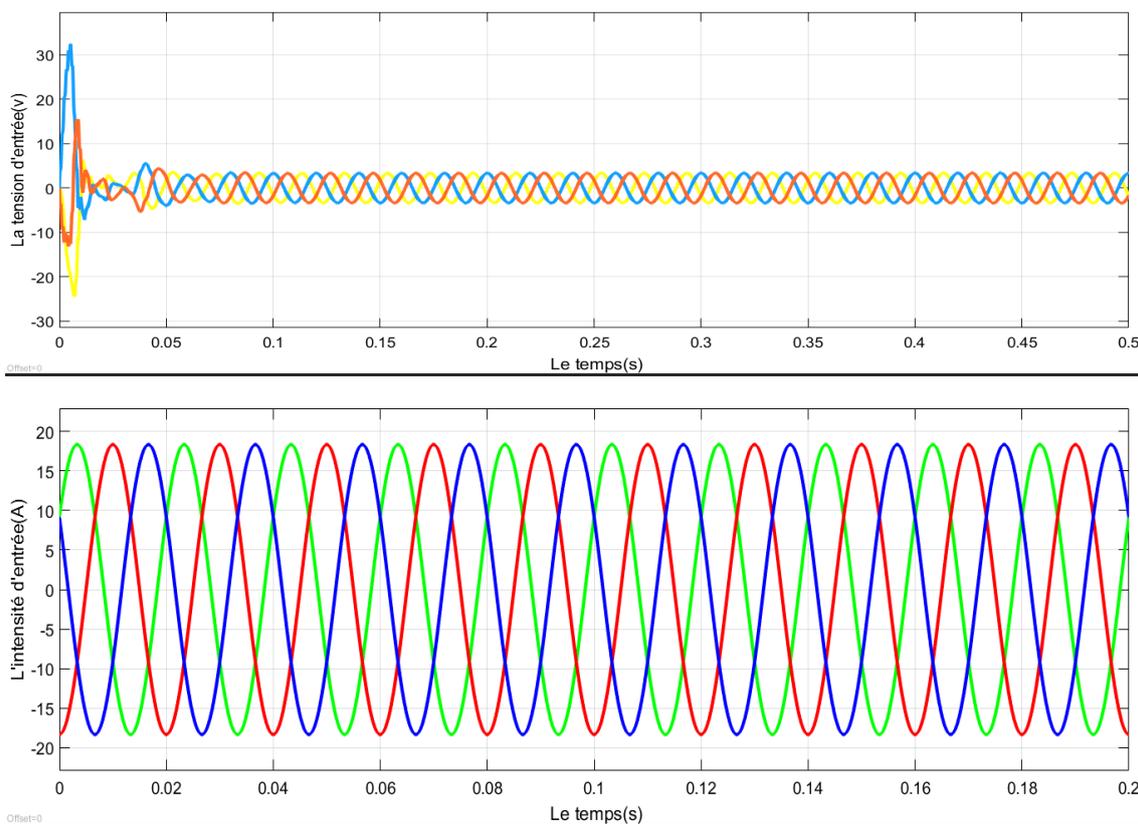


Figure III-28 Courbes de l'intensité d'entrée et la tension d'entrée. [60]

**III.6.2 Interprétation de la courbe de tension et l'intensité d'entrée :**

On remarque la tension et l'intensité de trois phases prenant une trajectoire sinusoïdal alternatifs indique que : La plupart des réseaux électriques utilisent le courant alternatif AC pour distribuer l'électricité utilisée dans de nombreux systèmes électriques industriels et de distribution d'énergie.

(C'est bien sûr à cause de que nous avons que la source d'alimentation est le réseau électrique)

Pour :  $U= 32.79 \text{ v}$   $R=15.009 \Omega$

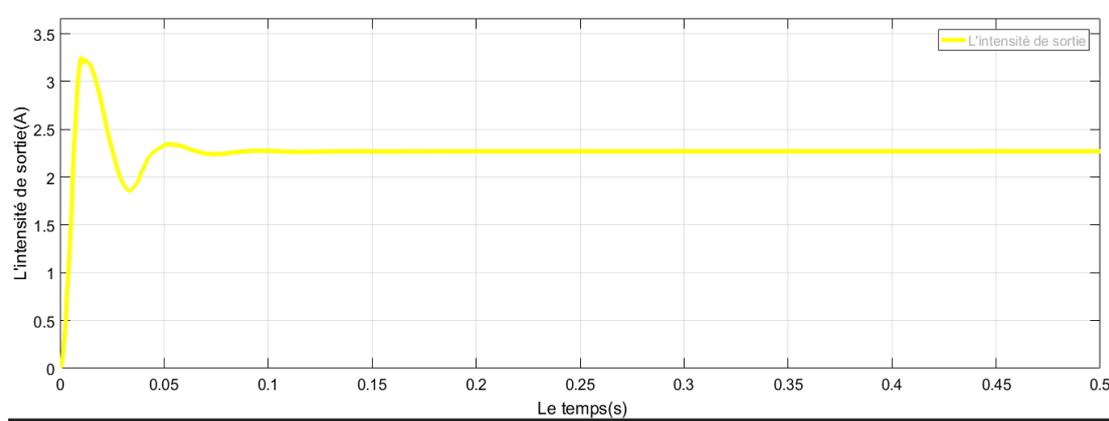


Figure III-29 Courbe de l'intensité de courant de sortie

Pour :  $U = 17.44 \text{ v}$   $R = 7.683 \Omega$

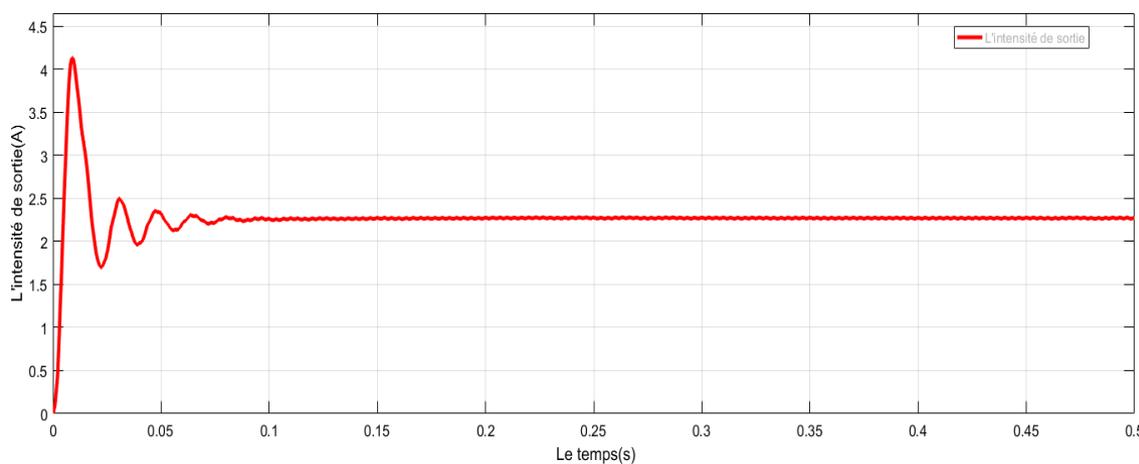


Figure III-30 Courbe de l'intensité de courant de sortie. [60]

### III.6.3 Interprétation de la courbe courant de sortie :

#### La phase 01 :

Après le démarrage du système, un petit dépassement peut être observé dans le courant de sortie. Ce dépassement peut être dû à des transitoires ou à des variations initiales dans les paramètres du système. Il est important de noter ces dépassements car ils peuvent affecter la performance et la stabilité du système à court terme. Ces oscillations indiquent que le système oscille autour de la valeur de consigne avant de se stabiliser.

#### Phase 02 :

Une fois que le système a atteint un état stable après le démarrage. Cela suggère que le système s'est stabilisé et fonctionne conformément aux attentes, fournissant un courant de charge constant à la charge connectée. La stabilité du courant de sortie dans un poste de soutirage peut être un indicateur positif de l'efficacité de la protection cathodique et de la santé globale de la structure métallique. Le système fonctionne efficacement pour prévenir la corrosion. Le courant finit par se stabiliser à une valeur constante, montrant que le système atteint l'état stable.

### III.7 Conclusion

Finalement, les résultats obtenus lors des simulations sont importants. Ils confirment que le système fonctionne bien pour gérer la tension et le courant. En gros, les simulations ont montré que le système peut ajuster la tension quand elle baisse, assurant ainsi que le réseau électrique reste stable. De plus, le système peut aussi ajouter du courant au besoin pour maintenir un bon équilibre dans le réseau. Ces conclusions montrent que le système est vraiment utile pour gérer l'électricité de manière intelligente, et il semble capable de relever les défis actuels de la distribution d'énergie, comme la fiabilité et l'efficacité opérationnelle.

Ce travail a été consacré à la protection cathodique de structures métalliques enterrées dans le sol. Ces dernières sont protégées par des revêtements externes (protection passive) et associées à un système actif de protection cathodique par courant imposé. L'exemple dont nous discutons est le gazoduc souterrain, long de 116 km, exploité par une entreprise publique pour le grand projet pétrolier de rénovation d'une ligne neuve dans la région de Kenenda (Arzew), dont le matériau est l'acier.

Pour avoir une meilleure protection cathodique des ouvrages enterrés, il est nécessaire de mesurer les prises de potentiel chaque mois à l'aide d'une électrode de référence de sulfate de cuivre  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , et de faire une visite visuelle des postes et des anodes chaque semaine, en plus des mesures marche-arrêt effectuées chaque semestre pour assurer le bon fonctionnement de la structure, toujours protégée aux valeurs  $[-850 \text{ mV} ; -1200 \text{ mV}]$  relatives au diagramme de Pourbaix. Afin de maintenir la structure métallique dans son domaine d'immunité, il est nécessaire de surveiller régulièrement les facteurs influents tels que : le potentiel et les paramètres du sol sur lequel est disposée la structure (résistivité, pH).

Les calculs de dimensionnement de la protection cathodique de la structure nous ont permis de déterminer le nombre d'anodes, le nombre de postes, la tension et l'intensité nécessaires pour protéger la longueur de la structure.

[1] F. Farinazzo, 'La corrosion expliquée', Q8Oils. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available : <https://www.q8oils.com/fr/travail-des-metaux/la-corrosion-expliquee/>

**(30/04/2024 -- 8 : 25)**

[2] M. Pourbaix, *Atlas d'équilibres électrochimiques*. Gauthier-Villars, 1963.

**(30/04/2024 — 9: 00).**

[3] 'Industrie : comment lutter contre la corrosion ?' Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available : <https://www.olikrom.com/fr/blog/oeil-de-lexpert/comment-lutter-contre-la-corrosion/>

**(30/04/2024 — 9: 15).**

[4] 'CP 2 Course Manual April 2005.pdf - CP 2-Cathodic Protection Technician Course Manual April 2005 © NACE International 2000 Acknowledgements The time | Course Hero'. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/60231774/CP-2-Course-Manual-April-2005pdf/>

**(30/04/2024 – 9 : 52)**

[5] Y. Omar and C. Samira, 'Etude de l'efficacité de l'inhibiteur de corrosion NORUST IG 514 dans les installations pétrolières du champ rhoud baguel'.

(1/05/2024 – 13 : 04)

[6] M. ALLALI and I. BENZAOUI, 'Méthodologie d'étude de la protection cathodique des réseaux en acier dans la région d'Ouargla.', PhD Thésis, 2021. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/27457>

**(01/05/2024 – 13 :27)**

[7] <https://ccta.fr/principes-de-la-protection-cathodique/la-protection-cathodique-une-protection-active.courant>

**(01/05/2024 – 13 : 55)**

[8] [8] K. BOUHRIA, 'CORROSION ET PROTECTIONS DES METAUX', 2002, Accessed : Jun. 29, 2024. [Online]. Available : <http://dspace.univ-usto.dz/handle/123456789/525>

**(01/05/2024 – 14 : 12)**

[9] 'Adoucisseurs d'Eau Professionnels : Guide Complet', Ethic Process. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://eau-traitement.com/adoucisseur-eau-professionnel/>

**(01/05/2024 – 14 : 31)**

[10] F. Farinazzo, 'La corrosion expliquée', Q8Oils. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.q8oils.com/fr/travail-des-metaux/la-corrosion-expliquee/>

**(01/05/2024 – 14 : 50)**

[11] 'La corrosion galvanique', GBM France. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.gbm-france.com/conseils/possibilite-de-connexion-de-differents-materiaux/>

**(04/05/2024 – 15: 07)**

[12] 'La Corrosion'. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available : <https://ingmaritima.blogspot.com/2017/03/la-corrosion.html>

**(04/05/2024 – 15 : 47)**

[13] Formateur Concepteur : Mme Mehdi Ghania Copyrights © IFEG/ ETB/DPF/Laboratoire GAZ  
Développement : Laboratoire e-learning

**(04/05/2024 – 16 : 13)**

[14] S. Torsiello *et al.*, 'Etude de la résistance à la corrosion par piqûres d'un alliage de zirconium en milieu chlorure de sodium', *Rev. Métallurgie*, vol. 93, no. 12, pp. 1589–1596, 1996.

**(04/05/2024 – 16 : 23)**

[15] Y. Omar and C. Samira, 'Etude de l'efficacité de l'inhibiteur de corrosion NORUST IG 514 dans les installations pétrolières du champ rhoud baguel'.

**(04/05/2024 – 16: 34)**

[16] CP2–Cathodic Protection Technician Course manual, © NACE International,2000,15 April 2005.

**(04/05/2024 – 16 : 48)**

[17] Gaz de France, documentation relative aux revêtements – R.07 – Edition Janvier 1986.

**(05/05/2024 – 11 : 30)**

[18] M. POURBAIX ;<> chapitre III, Matériaux Métallique, Phénomène de corrosion Leçon en corrosion électrochimique (Ceferacor), Ed (1975)

**(05/05/2024 – 12: 00)**

[19] CP2–Cathodic Protection Technician Course manual, © NACE International,2000,15 April 2005.

**(05/05/2024 – 14 : 04)**

[20] (PDF) CORROSION ET PROTECTION CATHODIQUE - DOKUMEN.TIPS'. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://dokumen.tips/documents/corrosion-et-protection-cathodique.html>

**(05/05/2024 – 14: 17)**

[21] CP1–Cathodic Protection Tester Course Manual, © NACE International,2000,01 July 2006

**(05/05/2024 – 14 : 46)**

[22] D. Bouzidi, Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieurs, école de technologie supérieure université du Québec 2011

**(05/05/2024 – 15: 00)**

[23] Wenner, F. (1915)"A method of measuring earth resistivity." Bulletin of the Bureau of Standards, 12(4), 469-478

**(05/05/2024 – 15 : 50)**

[24] A. Kessab, 'Les effets de corrosion dans l'industrie « causes Et remèdes » : application : protection cathodique des ouvrages enterrés', Thésis, 2010. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/1682>

**(29/06/2024 – 16 : 30)**

[25] Les différents éléments utilisés pour mesurer la résistivité du sol SONATRACH

**(05/05/2024 – 16 : 57)**

[26] Melle ABDELLI Feriel ; Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour un bac de stockage d'hydrocarbure

**(06/05/2024 – 18 : 06)**

[27] Marec, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRAN 96.2, (1996), Gaz de France.

**(06/05/2024 – 18 : 24)**

[28] GIL\_protection\_cathodique\_V1\_1 janvier 2008.

**(06/05/2024 – 18 : 43)**

[29] Marif Abdelhakim Etude sur la méthode de maintenance par protection cathodique - Cas de la ligne de pipeline GZ1 40''

**(06/05/2024 – 18 : 54)**

[30] Document technique Sonelgaz (ETB)

(06/05/2024 – 19 : 14)

[31] Document technique Sonalgaz “ Procédures relatives au revêtement appliqué sur les tubes transport de gaz : généralités sur les fonctions des revêtements et leurs applications” PR : N° 004.GRTG - R 1 (2008).

(06/05/2024 – 19 : 44)

[32] M. KHERCHOUCHE « Technologie du gaz » ; Rapport interne ; direction des ressources humaines ; centre de formation AIN M'LILA.

(06/05/2024 – 20 : 01)

[33] D. Landolt, « Corrosion et chimie de surfaces des métaux », Traité des matériaux, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1993).

(08/05/2024 – 23 : 05)

[34] ‘Systèmes de protection cathodique – Protection Cathodique.’ Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://protectioncathodique.net/principes-et-applications/generalites/systemes-de-protection-cathodique/>

(11/05/2024 – 19 : 20)

[35] Projet de rénovation d'une ligne neuve de KENENDA à ARZIW

(11/05/2024 – 21 : 00)

[36] EURO. Anti corrosion service, Afnor ; norme en ligne le 13/05/2016 à 11 :10 (ISO15589-1 :2015(F)

(11/05/2024 – 21: 19)

[37] Jones, D. A. (2013). Principles and Prevention of Corrosion (2nd ed.). Prentice Hall

(17/05/2024 – 09 : 59)

[38] M. Ghellai Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL mémoire master, université de Tlemcen 2013.

(17/05/2024 – 10: 21)

[39] Jones, D. A. (2013). Principles and Prevention of Corrosion (2nd ed.). Prentice Hall.

(20/05/2024 – 15 : 48)

[40] La\_protection\_cathodique-l\_essentiel cefracor 11 Mars 2015

(20/05/2024 – 16 : 20)

[41] LES UTILITÉS PROTECTION CATHODIQUE, Manuel de formation cours EXP-PR-UT120-FRR Révision 0.1, dernière révision 07 juin 2007.

(25/05/2024 – 09: 00)

[42] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2022). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.

(26/05/2024 – 10 : 17)

[43] Smith, J. (2022). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley.

[44] IBBARI Cerine, ABBANE Amira Zoulikha Etude et dimensionnement d'un système de protection cathodique alimenté par un générateur photovoltaïque d'une canalisation de transport de gaz.

(26/05/2024 – 11 : 20)

[45] M. Roche, 'L'essentiel sur la protection cathodique', Cent. Fr. Anticorros. CEFRACOR, p. 14, 2015.

(27/05/2024 – 11 : 20)

[46] 'ADCA Protection Cathodique | Produits & Services | 20 Rue des Meuniers, 91520 Égry, France'. Accessed : Jun. 29, 2024. [Online]. Available : <https://www.adca.fr/>

(27/05/2024 – 11 : 20)

[47] SONATRACH

(28/05/2024 – 11 : 20)

[48] Mr M. BOUDJAHROUNE and H. ZAIDI (CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE ALIMENTE PAR ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE). Towards a diploma in engineering specializing in transport and new works. BOUMERDES ENGINEERING SCHOOL. OCTOBER 2010

(02/06/2024 – 11 : 20)

[49] Souileh Rafik – Herizi khaoula Etude de l'influence de situations géographiques sur le dimensionnement des systèmes photovoltaïque

(02/06/2024 – 12 : 05)

[50] PROCEDURES TECHNIQUES FASCICULE N°5 : PROTECTION DES OUVRAGES GRTG /SONELGAZ

(02/06/2024 – 15 : 15)

[51] ‘ Réseau électrique - Définition et Explications’. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-electrique.ht>

**(02/06/2024 – 15 : 41)**

[52] ‘Corrosion des canalisations métalliques enterrés - Oryx Eleven’. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.oryxeleven.com/tube-acier-revetu/corrosion-des-canalisation-metalliques-entrees/> **(03/06/2024 – 08: 20)**

[53] M. Takieddine BRIHMOUCHE M. Houssem BELKHIRI Study, sizing and realization of a cathodic protection system powered by a photovoltaic source

**(04/06/2024 – 08: 02)**

[54] ‘CP 2 Course Manual April 2005.pdf - CP 2-Cathodic Protection Technician Course Manual April 2005 © NACE International 2000 Acknowledgements The time | Course Hero’. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/60231774/CP-2-Course-Manual-April-2005pdf/>

**(04/06/2024 – 09: 10)**

[55] \_ ‘DirectIndustry - La marketplace B2B de l’industrie : capteurs, automatismes, moteurs, pompes, manutention, emballages...’ Accessed : Jun. 29, 2024. [Online]. Available : <https://www.directindustry.fr/>

**(04/06/2024 – 09: 30)**

[56] ‘LM2596 Adjustable Step-Down DC-DC Buck Converter’. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.daraz.pk/products/lm2596-adjustable-step-down-dc-dc-buck-converter-i3297831.html>

**(04/06/2024 – 10: 50)**

[57] <https://images.app.goo.gl/yHTg63cVN5ztyRSi7>

**(05/06/2024 – 18: 20)**

[58] ‘Gradateurs’. Accessed : Jun. 29, 2024. [Online]. Available : <https://sitelec.org/cours/abati/gradateur.htm>

**(05/06/2024 – 18 : 53)**

[59] [PowerPoint Presentation \(univ-paris13.fr\)](#)

**(06/06/2024 – 20 : 22)**

[60] A. Kessab, 'Les effets de corrosion dans l'industrie « causes Et remèdes » : application : protection cathodique des ouvrages enterrés', Thésis, 2010. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/1682>

**(07/06/2024 – 21 : 30)**

### Caractéristiques générales de l'ouvrage :

Les données et les caractéristiques de la ligne Gazoduc sont les suivantes :

- ☒ **Ouvrage** : RGZ2
- ☒ **Produit** : GAZ
- ☒ **Liaison** : SC5 /KENANDA – TA /ARZEW
- ☒ **Longueur** : 116265 ml
- ☒ **Diamètre** : Ø 40" (1016 mm)
- ☒ **Epaisseur** : zone I.a :19,05 mm ; zone II : 14,27 mm ; zone III : 12,70 mm
- ☒ **PMS** : 70 bars
- ☒ **Revêtement** : PE H Densité
- ☒ **Densité de courant** : 0,15 mA/m<sup>2</sup>.

يكتسي هذا البريد الالكتروني وملحقاته طابع السرية

### 21. NOTE DE CALCUL DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE

#### I. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE

Dans ce paragraphe, on a reporté les calculs utilisés pour le dimensionnement des composants du Système de P.C. à courant imposé.

##### Critères de base de calcul :

- durée d'exploitation : 25 ans
- la consommation d'anodes : 0.5 Mg/A/ans
- potentiel spontané : - 550 mV
- Densité de courant : 0,1 mA/m<sup>2</sup>
- potentiel de protection mini : < - 850 mV
- résistance d'isolement initiale de : 50.000 Ω m<sup>2</sup>, Revêtement en PE.
- Résistivité de l'acier :  $\rho = 0,18 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
- Résistivité moyenne du sol :  $\rho_m = 60,40 \Omega \cdot m$

Calcul de la surface

$$S = \pi \cdot D \cdot L$$

Où

- S = Surface à protéger (m<sup>2</sup>)
- D = Diamètre de la ligne (m)
- L = Longueur de la ligne (m)

Diamètre (")	Matériel	Longueur (m)	Epaisseur (mm)	Superficie (m <sup>2</sup> )
20" (508 mm)	API 5L	3531	11,13	5632,37